

第3章 戸建て住宅の液状化被災調査

3.1 概要

本章では、液状化が戸建て住宅に及ぼす被害の実態を把握するため、東日本大震災および過去の戸建て住宅の液状化被災調査事例を調査した。これまでの表層改良等の液状化対策の評価においては、各地震によりその効果について発表されているものもあるが、その数が極端に少なくそれぞれ地震動や地盤条件等が異なるために、画一化した性能評価がなされてこなかった。そこで本章では、表層改良・中層改良対策あるいは柱状改良などの地盤改良等の戸建て住宅に対する実際の液状化被害軽減効果の現状分析と評価を行った。また、航空レーザ測量による道路の液状化被害調査も行った。これらの資料を収集・整理し、地盤改良層厚と被害軽減効果について分析した。

3.2 戸建て住宅の被災調査方法

3.2.1 被災事例の収集

(1) 2000年鳥取県西部地震による安倍彦名団地の液状化被害事例

①概要

鳥取県西部地震による宅地地盤の液状化被害の顕著な箇所として、**図 3.2.1** に示すように、以下の2つの団地があげられる。

i) 富益団地

米子市北部の富益団地は、臨海の埋立地や干拓地における液状化被害が目立つ中、唯一の弓ヶ浜半島内陸の丘陵地での被害である。しかし、この地点は元々砂を採取した採掘跡地に水が溜って池になっていたところが近年になって埋め立てられた若年の埋立地盤である。液状化被害箇所は、切盛境から局所的な盛土部分が沈下及び傾斜を生じたものである。

ii) 安倍彦名団地

米子市の安倍彦名団地では、液状化の噴砂によりほぼ地区全体で、住宅が沈下及び傾斜した。この団地では、海岸沿いの元の「荒地」に、砂を埋めて、造成したところである。鳥取県西部地震による造成宅地地盤の液状化被害分析は、富益団地の調査データが非常に少なく切盛境からの局所的な盛土であるため、安倍彦名団地を対象として検討を行った。

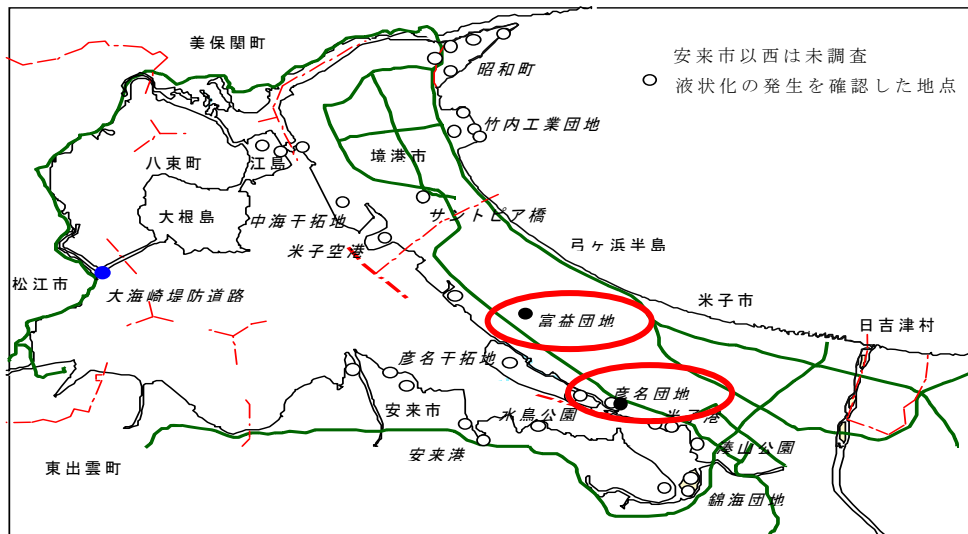


図 3.2.1 鳥取県西部地震による宅地地盤の液状化被害位置図

②地形・地質概要

当地区の造成に当っては、弓ヶ浜砂州を昭和 60 年代に埋め立て平成元年頃から用地の売却が行われている。その搬入土質と分布は表 3.2.1 の通りである。

また、団地南側の一部はペーパードレーンを打設してサーチャージ盛土を施工している。既往調査で確認されている深度は標高 TP-19m 程度までで TP-7m 程度以浅は現世の埋土 (R) 層であり、標高 TP-7m 以深は図 3.2.2 に示すように第四紀沖積世の粘性土 (Ac) 層・砂質土 (As) 層である。埋土 (R) 層は、砂質土を主体として埋め立てられているが、部分的にシルト分を多く混入するところがあり不均一である。N 値は 0~18 とばらついており、平均的な N 値は約 10 程度であるが、0~9 と緩いところがある。沖積粘性土 (Ac) 層は、シルトを主体とし、N 値は 0~3 と軟らかい地層である。沖積砂質土 (As) 層は、中砂を主体とし、N 値は 7~21 と「緩い」から「中位」の地層である。

表 3.2.1 搬入土質と分布

位置	工区	土量 m^3	材質	産出場所
北東部	1	16,266	真砂土	西伯町能竹
東部	2	19,827	碎石混り土砂	伯太町安田山形
北部	3	13,198	レキ混り土砂	宗像
北西部	4	6,061	西高残土	大谷町
西部	5	3,000	真砂土	会見町鶴田
南部	6	20,256	砕砂混り土砂	溝口町谷川
進入路	—	1,988	ズリ	伯太町安田山形
進入路 上置材	—	1,800	碎石	伯太町安田山形

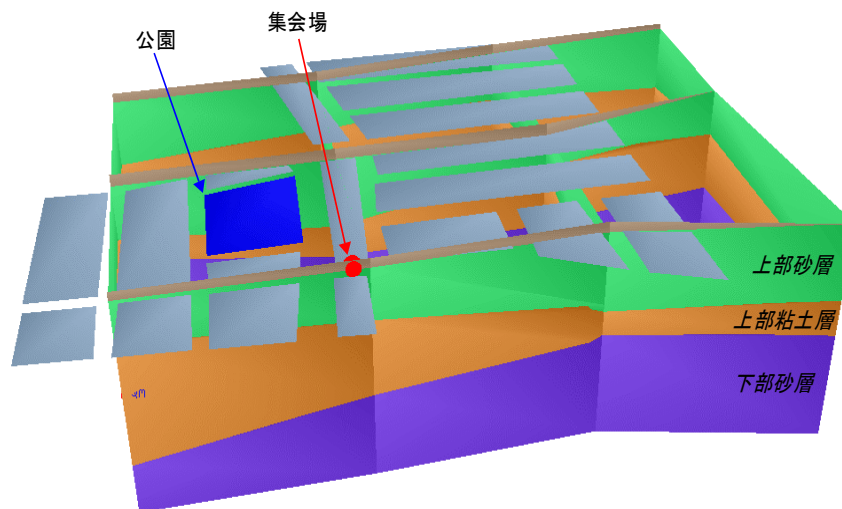


図 3.2.2 阿部彦名団地における地層断面図

③建物被害と沈下量及び変位勾配との相関

i)建物被害

建物被害は罹災判定より全壊、半壊、一部損壊とした。全 169 宅地の内、それぞれの内訳は表 3.2.2 のようになる。

表 3.2.2 建物被害の関係

内容	件数	割合 (%)
全壊	10	5.9
半壊	111	65.7
一部損壊	34	20.1

ii)建物沈下量

建物の沈下量は、5cm 単位ごとに表 3.2.3 のように 4 つの区分を建物傾斜方向別には建物沈下量の大きいところが全壊、半壊となっている。

表 3.2.3 建物沈下量の関係

内容	件数 (件)	割合 (%)
20 c m以上	21	12.4
15 c m以上～20 c m未満	26	15.4
10 c m以上～15 c m未満	31	18.3
5 c m以上～10 c m未満	37	21.9

iii)建物変位勾配

建物の変位勾配は、木造建築物の不同沈下被害の変形角に応じて表 3.2.4 の4つの区分を行った。建物被害は、建物変位量の大きい所が全壊、半壊となり、建物沈下量との相関がある。

表 3.2.4 建物変位勾配の関係

内容	件数 (件)	割合 (%)
5/1000 以下	6	3.6
5/1000~10/1000 以下	40	23.7
10/1000~15/1000	31	18.3
15/1000 以上	47	27.8

iv)建物沈下量と建物変位勾配(x/1000)との相関

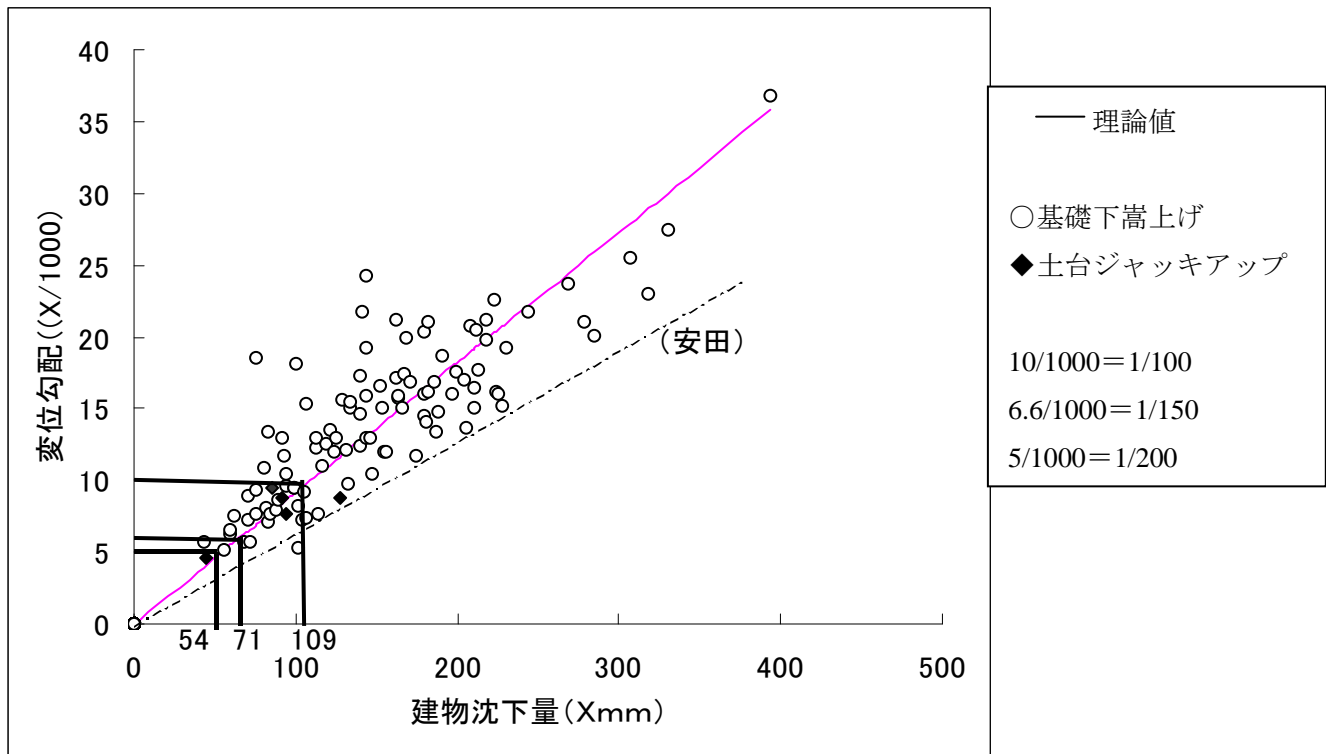
建物基礎地盤の液状化による残留沈下量の算定について、以下のように検証を行う。

- a)鳥取県西部地震（安倍彦名団地）及び新潟地震（安田ら）の建物の変位勾配と建物沈下量の相関図を作成する。
- b)建物の変形量すなわち変位勾配により、建物の大地震時での限界値を設定する。
- c)この建物の限界の変位勾配と沈下量との相関図から建物沈下量の推定を行う。
- d)建物沈下量の推定から許容沈下量の設定を行う。

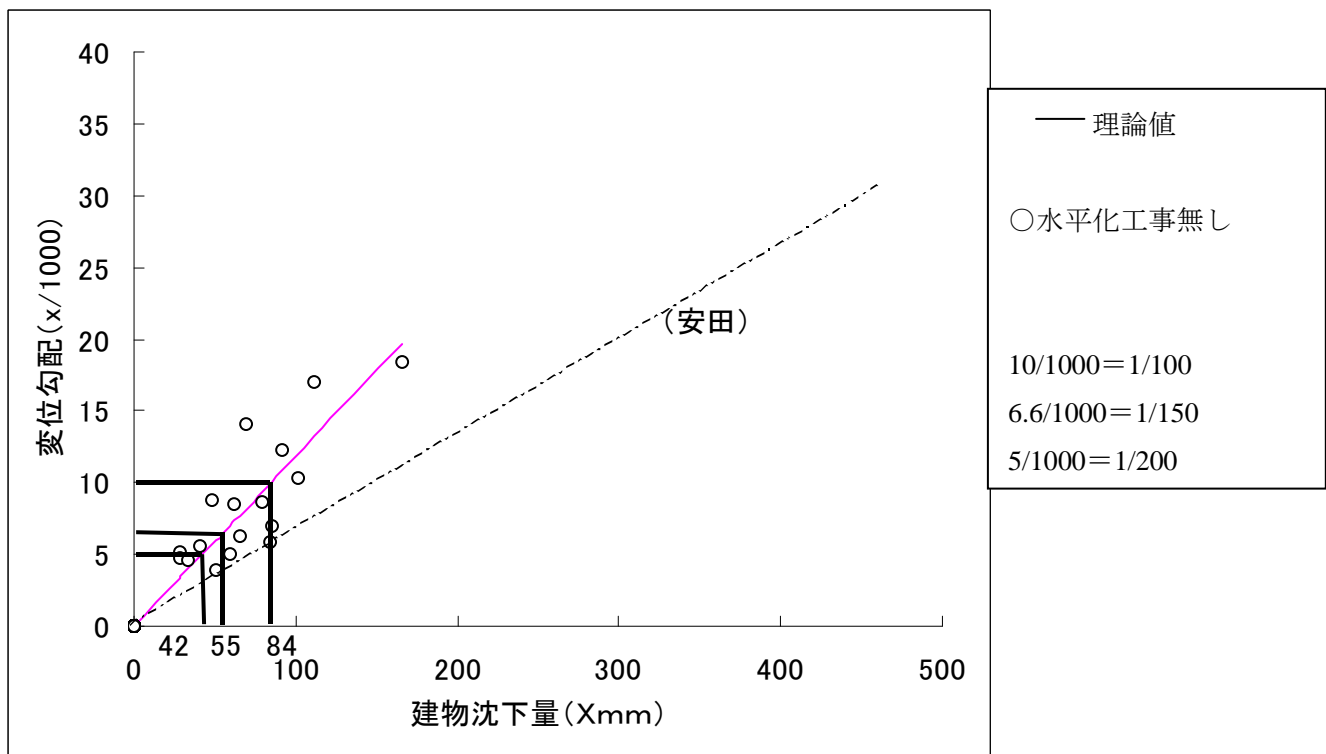
安田らの発表している新潟地震の回帰直線とほぼ近似しているが、鳥取県西部地震の方が建物沈下量が小さい値を示している。特に、斜距離の方が最短距離よりも建物沈下量が小さくなっている。また、木造建築物の不同沈下障害との変形角の関係を入れてみた。その結果、表 3.2.5 のようになった。水平化工事を実際に行った箇所とそうでない箇所を明らかにすることにより、建物被害における不同沈下障害の限界値を得ることが可能となる。

表 3.2.5 木造建築物の不同沈下障害と変形角との関係

建物変位勾配	不同沈下障害	建物沈下量
10/1000(1/100)	柱が傾き床傾斜支障を生じる	10cm
6.6/1000(1/150)	一般建物の構造物損傷のおそれのある限界	7cm
5/1000(1/200)	壁、タイルにキレツが入る	5cm

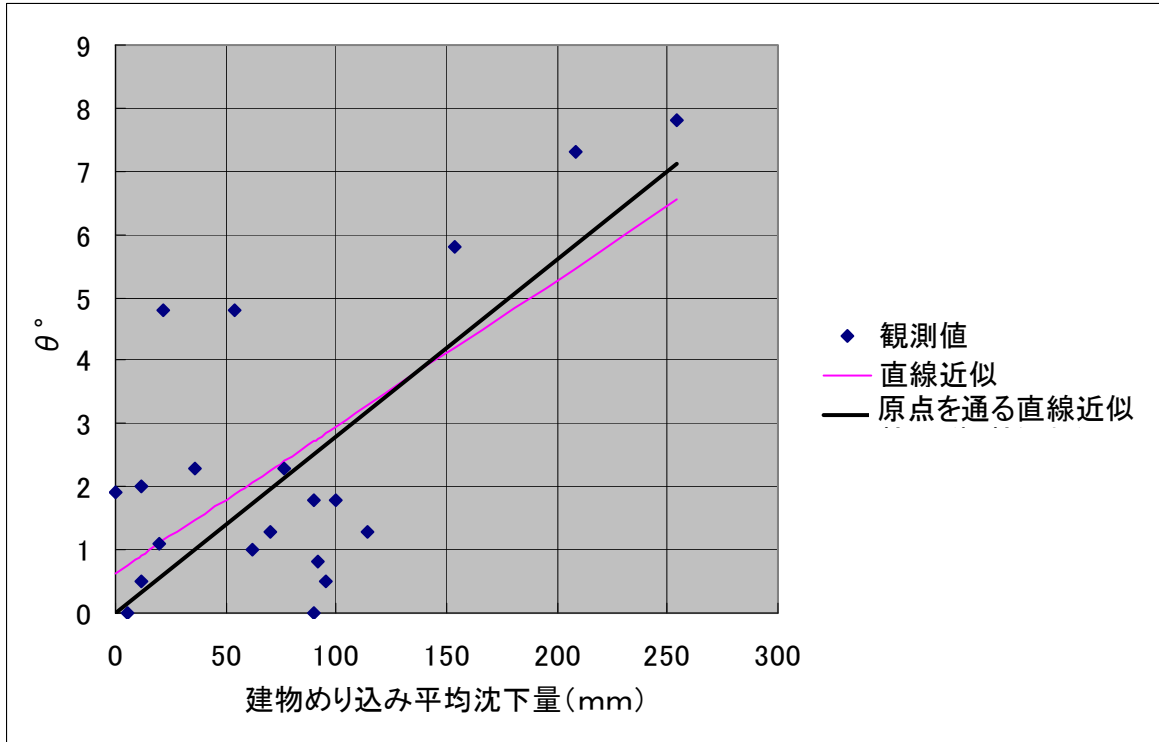


(a) 安倍彦名団地 (水平化工事有)

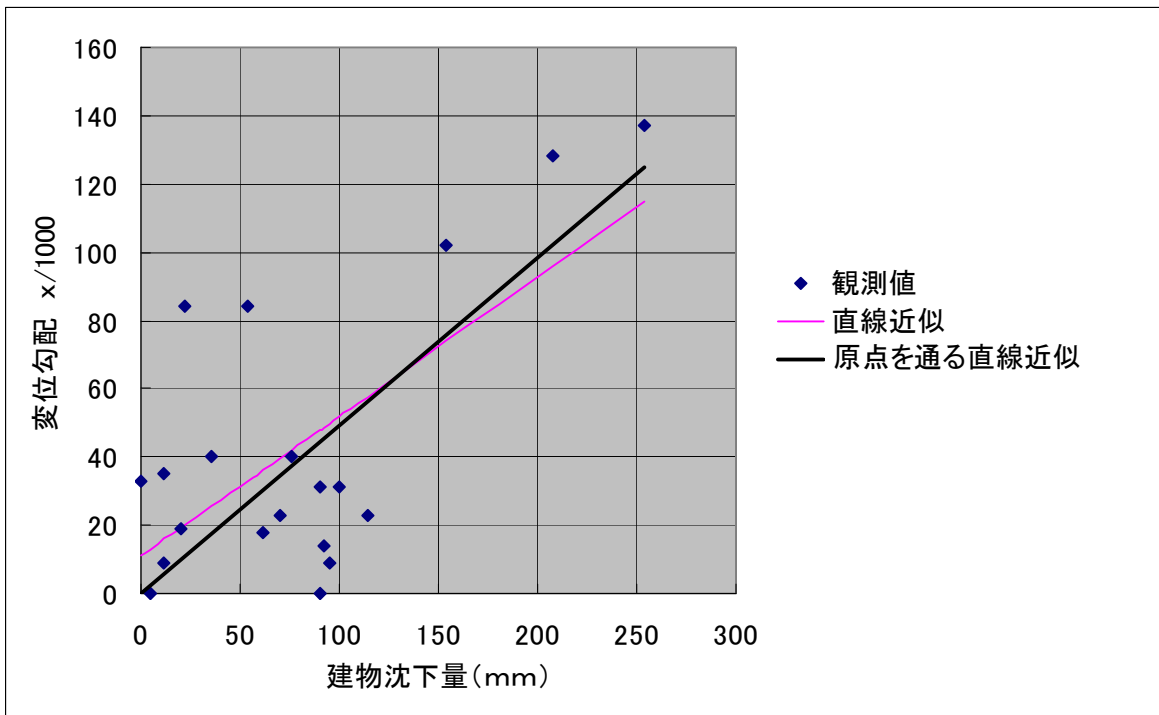


(b) 安倍彦名団地 (水平化工事無)

図 3. 2. 3 安倍彦名団地における建物沈下量と変位勾配の関係



(a) 建物めり込み沈下量と建物変位勾配



(b) 建物めり込み沈下量と建物変位勾配

図 3.2.4 新潟地震における中層住宅の建物沈下量と変位勾配関係 (安田ら)

④非液化化層H1と液化化層H2の関係

地震前における地表面からの地下水コンターは、**図 3.2.5** のように推定した。非液化化層 $H1$ と液化化層 $H2$ の関係は、地下水位面を境にした H_1' と H_2 の相関を **図 3.2.6** に、**図 3.2.7** に地下水位及び設計水平震度 $K_h=0.28$ とした場合について求めた。また、それぞれ平成 14 年 1 月時点と地震前の想定について行った。その結果、非液化化層厚 $H1$ を 2m 確保しておけば宅地被害を防止することができることが明らかとなった。

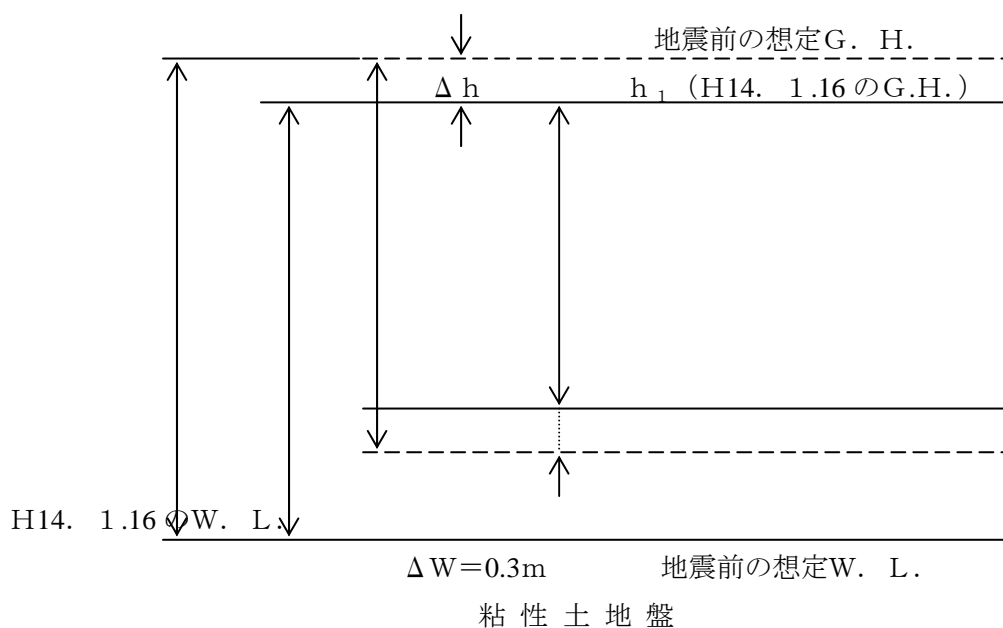


図 3.2.5 地震前における地表面からの地下水コンター（推定）

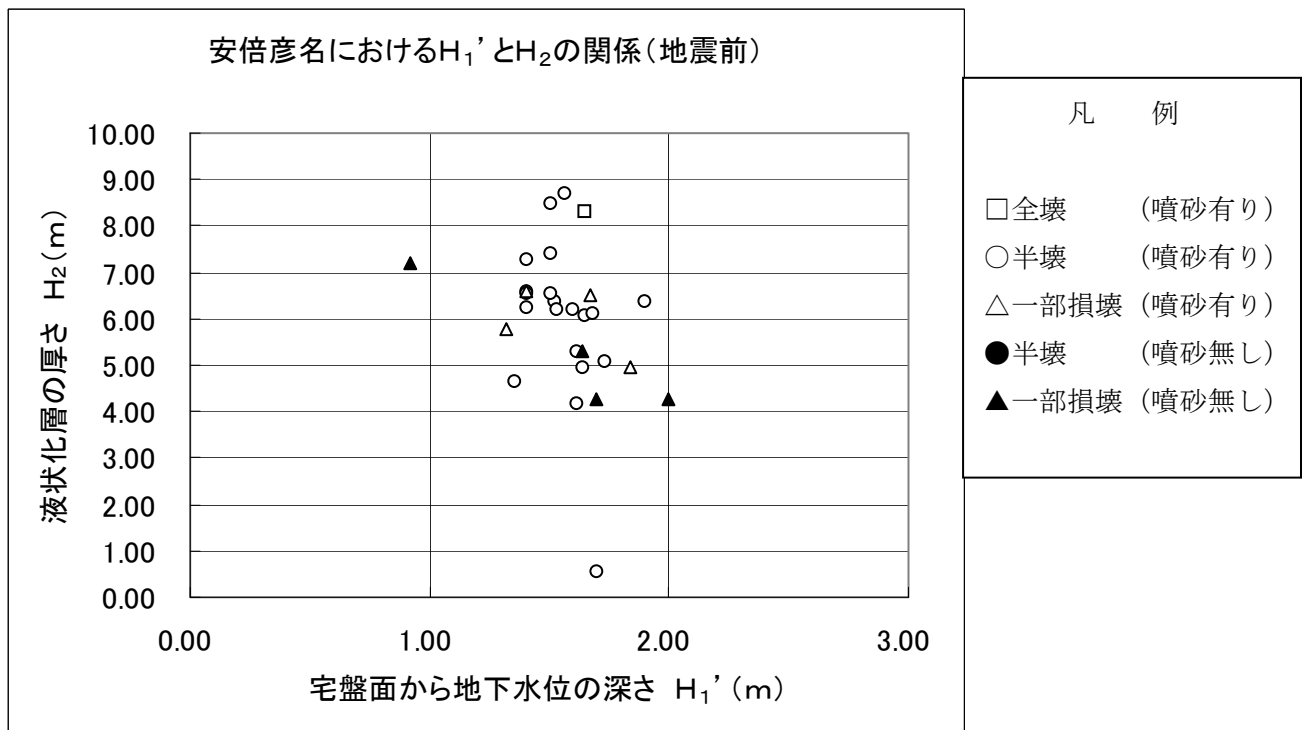
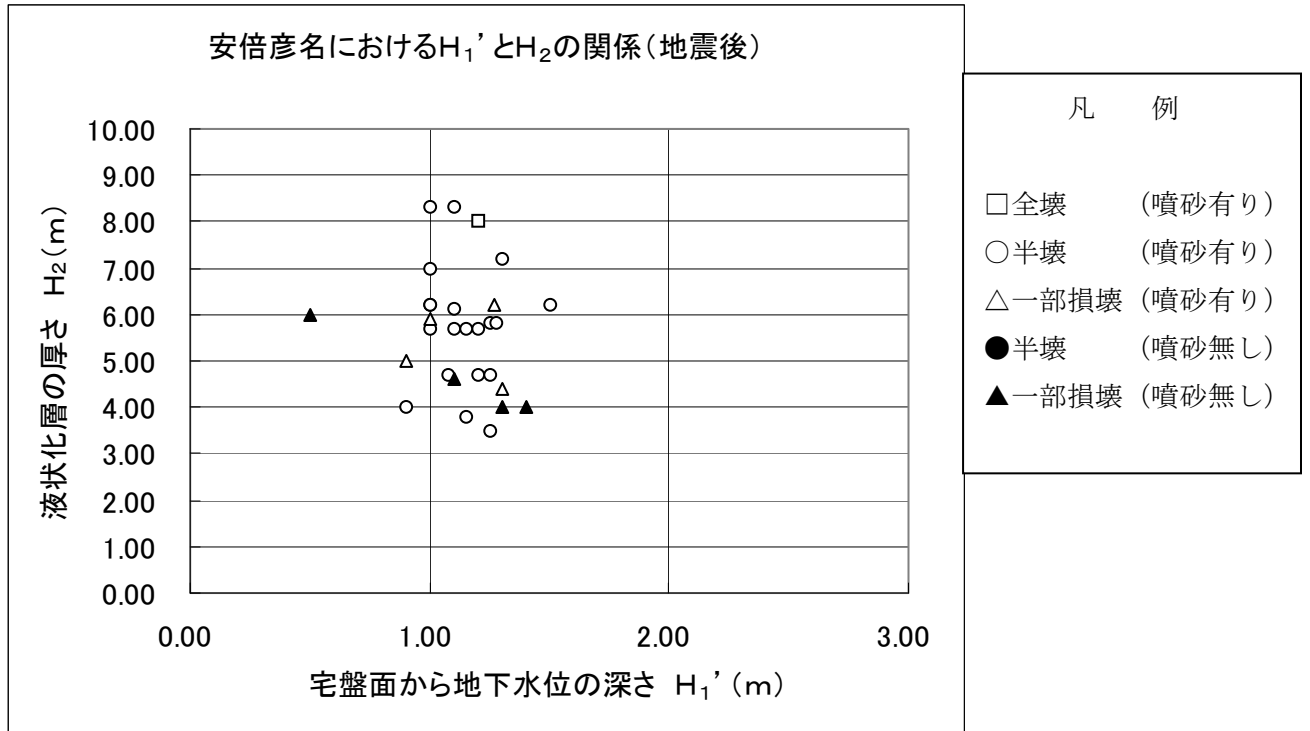
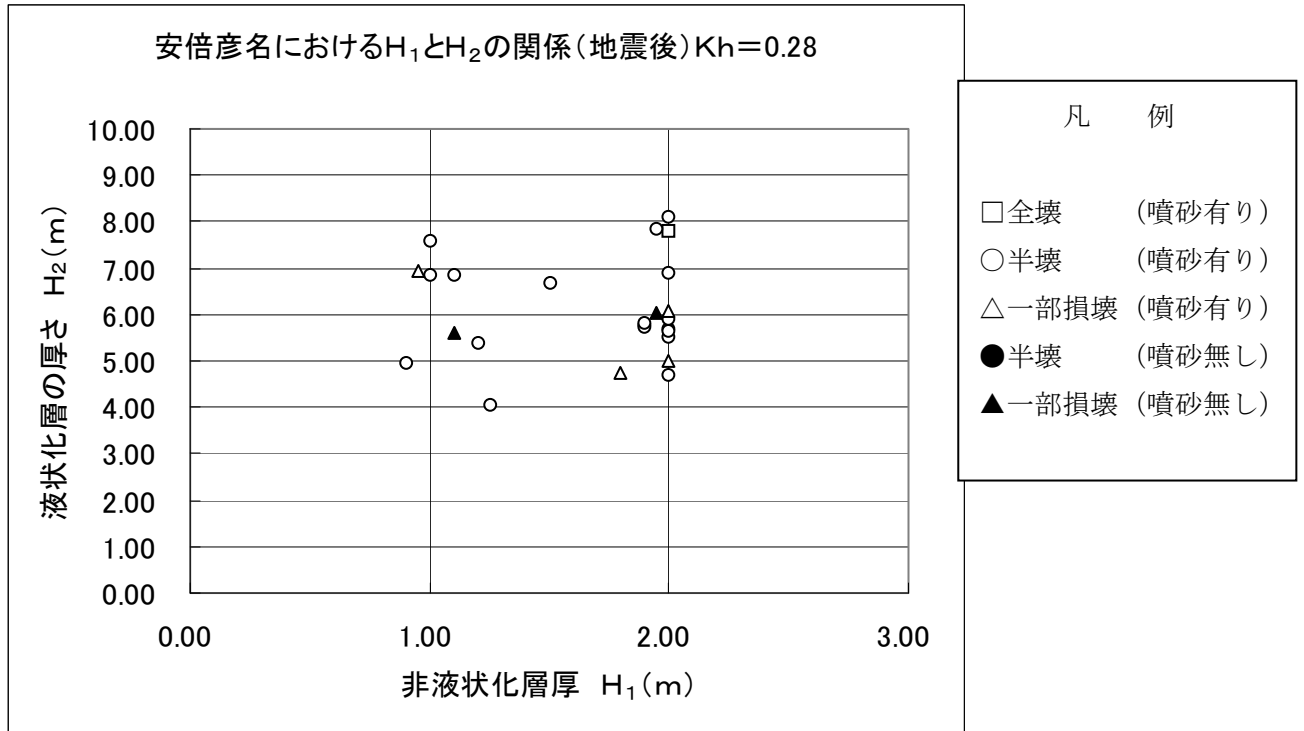
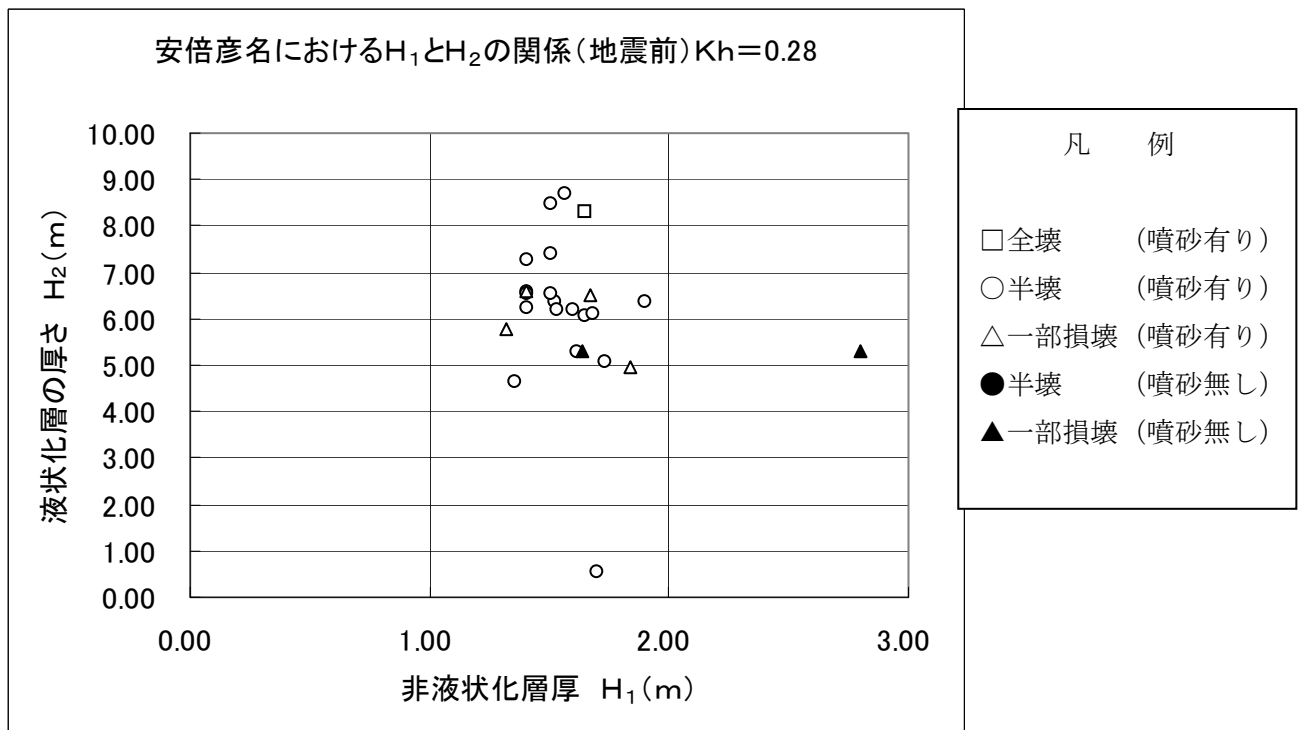


図 3.2.6 地下水位面を境にした H_1' と H_2 の相関



(a) 平成 14 年 1 月 14 日時点の地下水位を用いた場合



(b) 地震発生前の地下水位を推定した場合

図 3.2.7 設計水平震度 ($Kh=0.28$) とした場合の H_1 と H_2 の相関

⑤被災状況と要因

被災状況は、**図 3.2.8** に示すような液状化による噴砂による被災等が生じている。要因は液状化による噴砂により、地域一帯が全体に沈下しているものとみられ、その程度は不均一である。液状化による被災は、南側の一部を除いて全体に分布しており、ペーパードレーンとサーチャージ盛土を施工した南側の一部は被災が見られなかった。なお、家屋の変状は、地震動によるものか液状化によるものか判断が難しいが、液状化による変状と考えられる。

家屋の全壊、半壊、一部損壊、噴射、及び不同沈下傾斜角を、5/1000 以下、5/1000～10/1000 以下、10/1000～15/1000 以下、15/1000 以上に分けた建物被害、及び搬入盛土材及び地盤改良位置図を重ねてみると次のようである。

- ・ 北部の真砂土及び碎石混り土砂で改良した部分は、在来水路の地中化に伴う地下水の堰止め嵩上げ現象によると想定される上昇により被災が大きい。
- ・ 南東部の無処理部は、地下水位の傾斜が急であることも含めて、被災が大きい。
- ・ 西部の無処理部分の家屋、改良部と無処理の境界部分の家屋も被災が大きい。



図 3.2.8 液状化被害分析図（建物被害、地下水位、地盤改良工法の重ね図）

注）：○（GL-1.9m）は、井戸を使用しているために液状化被害がなかった

(2) 液状化によるめりこみ沈下の簡易推定方法と鳥取県西部地震での被災事例への適用

①概要

戸建住宅地で液状化が発生すると、一般に家屋が沈下、傾斜を生じる。家屋が傾斜を生じない等沈下をした場合には、基礎が強ければ家屋にもクラックなどの被害はあまり発生せず、多少の補修程度を行うだけで、そのまま使用することが出来る。ところが、家屋が傾きながら沈下する不等沈下が生じた場合には、基礎にクラックが生じて、その上の家屋も被害を受けやすい。さらに、家屋自体は大した被害でなくても、中に住んでいる住人にとって、家屋の大きな傾斜は生活を続けていくのに致命的になる。2000年鳥取県西部地震の際に被災した安倍彦名団地での調査によると、1/100程度以上の変位勾配で傾いた家屋に住んでいると、めまいやはきけが生じるため、復旧にあたって水平に戻す工事をせざるを得なかった。

このように、戸建住宅にとっては液状化により沈下量自体よりは傾斜角の方が問題となり、大地震を想定して多少の液状化の発生を許すような“性能設計”を行っていく場合に、傾斜角を推定する必要があるが出てくる。ところが、傾斜角を直接推定できる方法が今まで開発されてきていない。ただし、地震時および常時において一般に、沈下量自体が大きいほど傾斜角も大きいことが言われている。液状化による沈下でも、中層建物に対し、めりこみ沈下量(地盤に対する建物の平均めりこみ沈下量)が大きいほど傾斜角が大きいことが、1964年新潟地震などの事例分析で明らかにされている¹⁾。戸建住宅に関しては、めりこみ沈下量を測定された事例がほとんどなく、このような関係は明らかにされてきてはいないが、中層建物と同様にめりこみ沈下量と傾斜角が関係あるとみなしても良いのではないかと考えられる。

このように考えると、めりこみ沈下量を推定できると傾斜角も推定できることになる。めりこみ沈下量を推定する方法としては、以下のような方法がある。

- a) 経験式を用いて推定する方法
- b) 簡易式を用いて推定する方法
- c) 詳細解析を行って推定する方法

これらのうち、a)の方法は上述のように被災事例でめり込み沈下量を測定したものがほとんどないため、現在のところ推定式が出来てきていない。c)では液状化による地盤や構造物の変形を考慮できる地震応答解析方法が最近いくつか開発されてきており、これを用いることが出来る。ただし、費用がかかり、戸建住宅での設計には用いるのは困難である。そこで、b)の方法を用いるのが良いと考えられる。そこで、以下にはb)の方法を鳥取県西部地震で被災した安倍彦名団地の戸建住宅に適用し、測定されている傾斜角との関係を求めた。そして、上述した中層建物におけるめりこみ沈下量と傾斜角との関係と比較し、この簡易推定方法の適用性に関し検討を行った。

②安倍彦名団地での建物の傾斜状況

鳥取県西部地震により団地内の各地で液状化が発生した。自治会の調査²⁾によると図 3.2.9 の●印で示した箇所で噴砂・噴水が発生した。この液状化により、多くの家屋が沈下・傾斜や損壊の被害を受けた。傾斜した家屋では住民の方々にめまいや頭痛が生じ、そのままでは生活が出来なくなった。そのため、傾斜がひどい家屋は基礎下嵩上げを行って水平に戻す水平復元工事が行われた。この傾斜量、つまり不同沈下量については、地震後の被災状況把握時や復旧時に測定が行われた。

この値は自治会でまとめられた²⁾が、安田・橋本はこの資料を見せていただき、被災判定との関係などの以下のような方法で整理を行っている。沈下量の測定にあたっては、各家屋について最も沈下量が小さい角を基準にし、その他の角の相対沈下量が測定されている。そこで、それらの内から最大と最小の差をとり不同沈下量を求めた。また、その最大と最小の沈下を生じた角どうし間の距離をとり、不同沈下量をこの距離で除して傾斜角を求めた。

このようにして整理した傾斜角の分布を図 3.2.9 に示す。全戸の内最大の傾斜角は 37.5/1000 であり、最大の不同沈下量は 33cm であった。そして、15/1000 以上傾いた家屋が 47 棟、10/1000～15/1000 ほど傾いた家屋が 30 棟、5/1000～10/1000 ほど傾いた家屋が 39 棟、5/1000 以下か沈下量が測定されていない家屋が 53 棟あった。この図から、団地内の北東などで傾斜角が特に大きいことが分かる。



図 3.2.9 噴砂発生地点と家屋の傾斜角の分布

各戸の傾斜角に加えて平均沈下量も求めて両者の関係をプロットしてみると図 3.2.10 となる。この図は復旧にあたって水平化工事を施したか否かを分けてプロットしたものである。これをみると、傾斜角が(5~15)/1000 程度が水平化工事を行ったか否かの境となっている。なお、図中に中層建物と示した関係は新潟地震などで沈下した中層建物における平均沈下量と傾斜角の関係である¹⁾。ただし、この場合は地表面からのめり込み沈下量が測られており、建物全体がめりこみ沈下した値もこれに含まれている。安倍彦名団地の場合はこのめりこみ沈下量は含まれていないので直接比較できないが、安倍彦名団地でのめり込み沈下量が数 cm とみなすと両者の関係は近いものとなる。

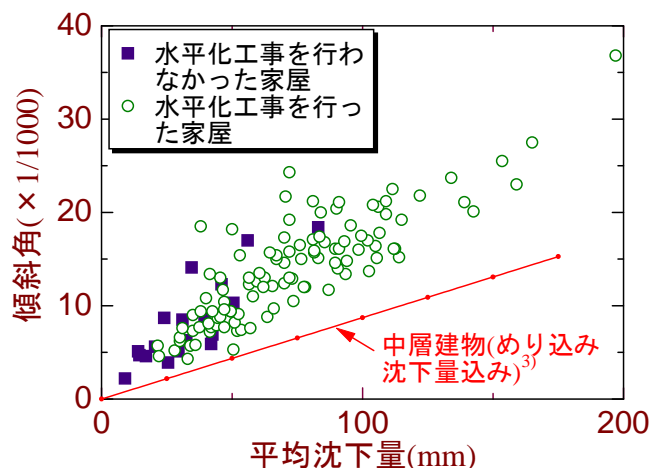


図 3.2.10 平均沈下量と傾斜角の関係

さて、地震後各家屋の被災度が沈下量などをもとに全壊、半壊、一部損壊に区分され、区分に応じて災害復旧助成が行われた。そこで、被災度ごとに傾斜角の度数分布をとってみると、図 3.2.11 となった。これをみると全壊、半壊、一部損壊と判断された家屋の傾斜角の平均値は、それぞれ(15~22.5)/1000 程度、(7.5~17.5)/1000 程度、(5~10)/1000 程度となっている。被災度が半壊、全壊の場合は復旧工法として基礎嵩上げを行うことが今回基準とされているので、10/1000 程度以上傾斜するとめまいや頭痛が生じて水平復元工事を行わざるを得なかったと言えそうである。つまり、住家としてはこの程度の傾斜角が許容傾斜角と言えそうである。

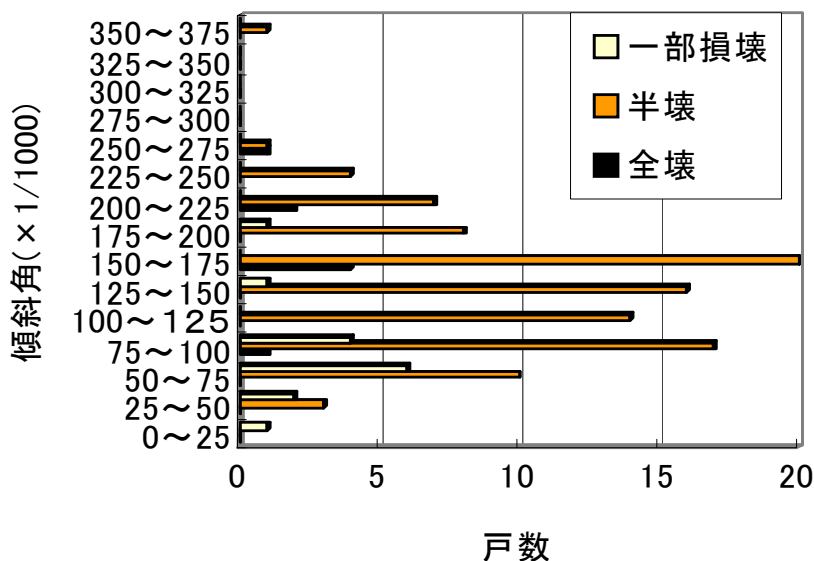


図 3.2.11 被害度ごとの傾斜角の度数分布

③めりこみ沈下量の簡易推定方法

液状化による直接基礎構造物のめりこみ沈下量を簡易的に求める方法としては、
 a)液状化した地盤をせん断剛性が低下した地盤と考えて、液状化による剛性低下割合をもとに沈下量を推定する方法、b)液状化した地盤を粘性流体と考え、その中を構造物が沈下していくと考えて沈下量を推定する方法、の2つが最近提案されてきている。このうち a)の考え方の方が今のところ設計に用いやすいので、a)の方法による推定方法をここでは採り上げてみる。

a)の方法による場合、まず、液状化に伴うせん断剛性の低下割合がいくらになるかを知る必要がある。これに関して、安田らは繰返しねじりせん断試験をいくつかの条件と試料で行ってきている⁵⁾。

この試験では、繰返し载荷により供試体に液状化を発生させた後、単調载荷試験を行い、そこでの応力～ひずみ関係をもとに液状化後の土のせん断剛性を求めている。そして、繰返し载荷を行わない供試体でのせん断剛性の値で除して、せん断剛性低下率を求めている。このせん断剛性低下率と液状化に対する安全率 F_L 、細粒分含有率 F_c の関係をまとめたのが図 3.2.12 である。

この関係を常時でよく用いる有限要素法に適用すると、液状化にともなう地盤や構造物の沈下量が簡易的に推定できる⁵⁾。ただし、さらに簡易的に推定する場合には、地盤を弾性と考え、地表面に载荷重が載った場合の弾性論による解を利用する方法が考えられる。この場合、a)常時のせん断剛性を用いて建物が建設された時のめりこみ沈下量を推定する、b)液状化した地盤のせん断剛性を図 3.2.12 などをもとに推定し、これを用いて建物の沈下量を推定する、c)沈下量 b)から沈下量 a)を差し引いた値を地震によるめりこみ沈下量とする、といった手順により沈下量が求まる。ただし、a)の沈下量は b)に比べてはるかに少ないため、b)の沈下量だけを地震による沈下量としても良いと考えられる。弾性論により沈下量を求める式としては、例えば、建築基礎構造設計指針⁶⁾では、液状化ではなく一般の弾性沈下に対し、地盤を2層からなる場合(式 3.2.1)と1層からなる場合(式 3.2.2)で、以下のような式で沈下量(指針では即時沈下量との表現になっている)を求める方法が示されている。

$$S_{E1} = [\mu_H(H_1, \nu_1)/E_1 + \mu_H(H_2, \nu_2)/E_2 - \mu_H(H_1, \nu_2)/E_2] \times q \times \sqrt{A} \quad (\text{式 3.2.1})$$

$$S_{E2} = \mu_H(H, \nu) \times q \times \sqrt{A} / E \quad (\text{式 3.2.2})$$

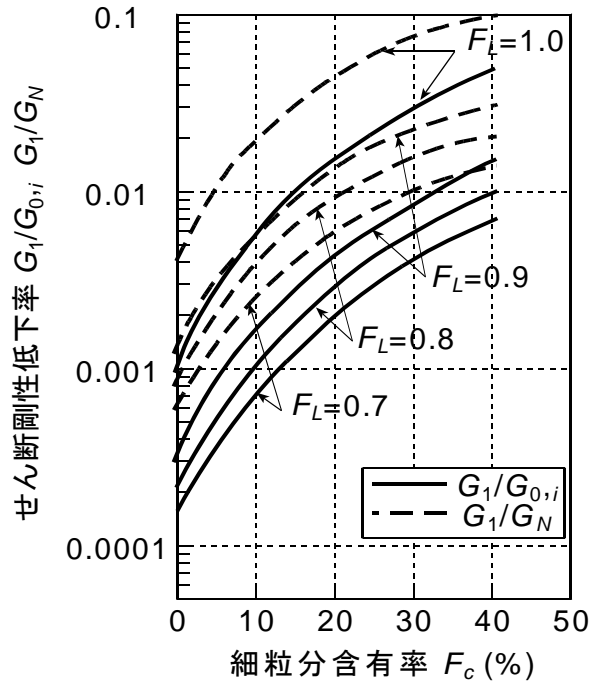


図 3.2.12 せん断剛性低下率

ここで、

S_{E1} 、 S_{E2} : 基礎の沈下量 mm (液状化後の地盤のヤング率 E を用いて計算した沈下量から、液状化前のヤング率 E を用いて計算した沈下量を差し引くと液状化に伴うめり込み沈下量が求まる。)

A : 基礎底面積(m^2)= $B \times L$ B : 基礎の短辺長さ(m) L : 基礎の長辺長さ(m)

q : 基礎の平均荷重強度(kN/m^2)

E_1 : 地盤のヤング率= $2800N$ (kN/m^2)

E_2 : 地盤の液状化後のヤング率= $E_1 \times \alpha$ (kN/m^2)

α : 液状化後の剛性低下率 N : 平均 N 値

ν : 地盤のポアソン比

μ_H : 地盤のポアソン比、厚さおよび基礎底面の形状によって決まる係数

H 、 H_1 、 H_2 : 地盤の厚さ m (H_1 : 2層の場合の上層厚さ、 H 、 H_2 : 全層厚さ)

ここでは、安倍彦名団地の地盤モデルを図 3.2.13 に示す[2層モデルの場合]とし、図 3.2.12 に示すせん断剛性低下率と F_c 、 F_L の関係から式 3.2.1 を用い安倍彦名団地の各戸のめりこみ沈下量を表 3.2.6 のように推定した。

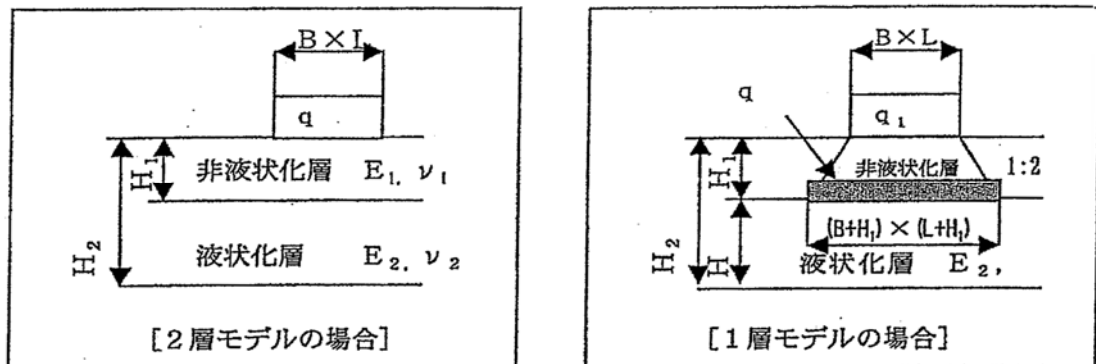


図 3.2.13 弾性沈下の地盤モデル

表 3.2.6 むり込み沈下量の推定結果

番号	むり込み沈下(m)			傾斜角	番号	むり込み沈下(m)			傾斜角
	SE_a	SE_b	SE	*1/1000		SE_a	SE_b	SE	*1/1000
1	0.225	0.001	0.224	9.0	16	0.192	0.001	0.190	0.0
2	0.189	0.001	0.188	18.4	17	0.204	0.001	0.203	12.3
3	0.194	0.001	0.192	6.3	18	0.163	0.001	0.162	16.4
4	0.185	0.001	0.184	6.9	19	0.194	0.001	0.193	0.0
5	0.178	0.001	0.177	0.0	20	0.220	0.001	0.219	8.1
6	0.212	0.001	0.211	19.8	21	0.224	0.001	0.223	12.0
7	0.238	0.002	0.236	11.7	22	0.244	0.001	0.243	11.7
8	0.229	0.001	0.228	20.6	23	0.202	0.001	0.201	4.3
9	0.245	0.001	0.244	20.4	24	0.140	0.001	0.139	21.8
10	0.243	0.002	0.241	9.6	25	0.225	0.001	0.224	0.0
11	0.220	0.001	0.218	21.1	26	0.218	0.001	0.217	13.0
12	0.219	0.001	0.218	7.6	27	0.259	0.001	0.258	12.3
13	0.222	0.001	0.220	19.2	28	0.268	0.001	0.267	14.6
14	0.218	0.001	0.217	14.8	29	0.264	0.001	0.263	12.1
15	0.233	0.001	0.232	9.1	平均			0.111	11.486

④安倍彦名団地での沈下量の推定結果と中層建物との比較

むり込み沈下量の推定にあつての必要条件を以下のように設定した。

i)地盤のN値

非液状化層 (H_1) のN値は、各宅地のスウェーデン式サウンディング試験結果から算出した。しかし、液状化層 ($H_2 \sim H_1$) のN値は、非液状化層 (H_1) にレキ等が混り締つていたため、液状化層まで貫入できず、ボーリング調査結果から一律 $N=7.7$ と仮定した。

ii)液状化層の細粒分含有率と液状化に対する安全率

液状化層の細粒分含有率は、土質調査結果から $F_c=8\%$ と仮定した。また、液状化に対する安全率は、鳥取県西部地震で観測された最大設計水平震度、 $K_h=0.28$ として計算した安全率の平均値である $F_L=0.8$ を用いた。そこで、液状化層 ($H_2 \sim H_1$) のせん断剛性低下率は、図 3.2.12 から上記の細粒分含有率は $F_c=8\%$ を用い、 $\alpha = G_1 / G_N = 0.0036$ と設定した。一方、非液状化層 (H_1) のせん断剛性低下率は、一般的な数値として $1/40$ と仮定した。

上記の条件から計算した各戸のむりこみ沈下量の推定結果を表 3.2.6 を基に測定した変位勾配と推定したむりこみ沈下量の関係をプロットすると図 3.2.14 となった。ばらつきは大きいものの、推定したむりこみ沈下量が多いほど、変位勾配が大きくなった。また、

図には安田らが新潟地震などの中層建物に対して測定された両者の関係をまとめた関係も示す。安倍彦名でのプロットと比べると、かなり一致していると言える。従って、戸建住宅に対して簡易方法でめりこみ沈下量を推定し、当面は安田らの中層建物の関係 $\theta=0.05 \times S$ (ただし、 θ : 傾斜角($^{\circ}$), S : 建物めりこみ沈下量(cm)) を用いて、傾斜角を推定すれば良いと考えられる。なお、上述したように、住民が許容できる変位勾配が 1/100 であるとする、その時のめりこみ沈下量は 15cm 程度となる。

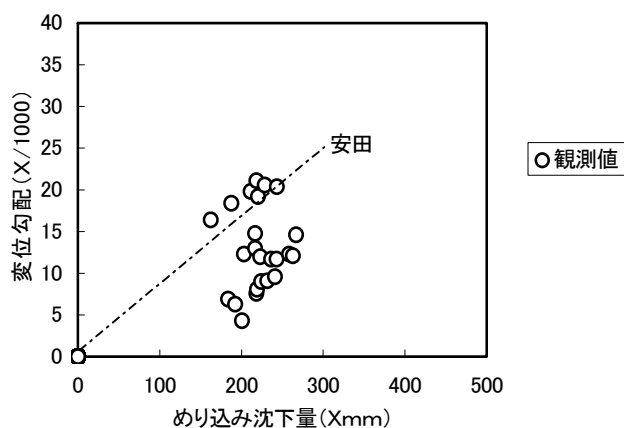


図 3.2.14 めり込み沈下量の推定結果

注) SE_a : 液状化前の沈下量

SE_b : 液状化後の沈下量

(3) 1995年兵庫県南部地震による尼崎築地地区の液状化被害事例

①概要

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、芦屋浜シーサイドタウン（瀬戸内海の内海砂による埋立地）、西宮市の沿岸低地、尼崎市の沿岸低地と築地地区で戸建て住宅が大きな被害を受けた液状化被害が発生した。その中で尼崎市築地地区は、全1100棟のうち、全壊10棟、半壊292棟の大きな被害を出した。住民からは、地震に強い町、再液状化することのない町にしたいという要望に対して、道路の耐震化を目的に実施した地下水位低下工法で要望に応え、区画整理事業を完了させることができた。

②築地地区における液状化被害

尼崎市築地地区は、兵庫県南部地震の震源断層からかなり遠方にあるが、武庫川を越えて尼崎市にはいると全壊率は小さくなっているのに、1個所だけ全壊率の高くなっている。図3.2.15は、写真3.2.1、3.2.2に示すように被災家屋の分布を示す。当時は全壊、半壊、一部損傷の3種類しか被災分類が行われていなかった。全戸数ではないが、約60%の建物の傾斜や不同沈下の測定を行った結果、30cmを越える沈下や10/1,000を越える傾斜建物が多く見られた。

築地地区でこのように大きな液状化が発生した理由は地下水位に求めることができる。図3.2.16はボーリングの孔内水位であるが、点線で囲まれた築地地区の地下水位はほとんどがGL. -0~-1.0mの深さにあるのに対し、水路を挟んで43号周辺から北寄りの地区では地下水位がGL. -2.0m以深と深く、これらの地区では液状化被害は見られなかった。

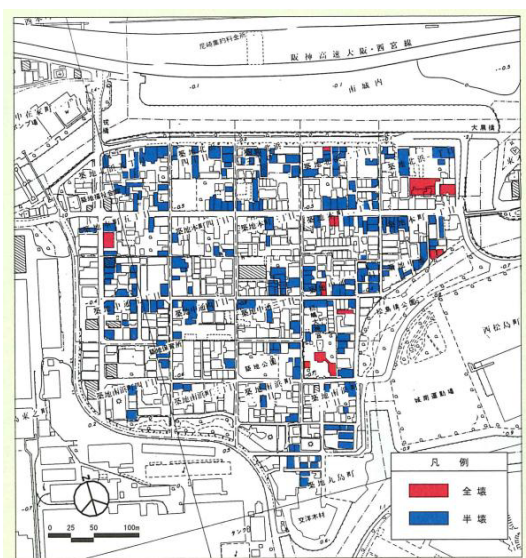


図 3. 2. 15 家屋の被害

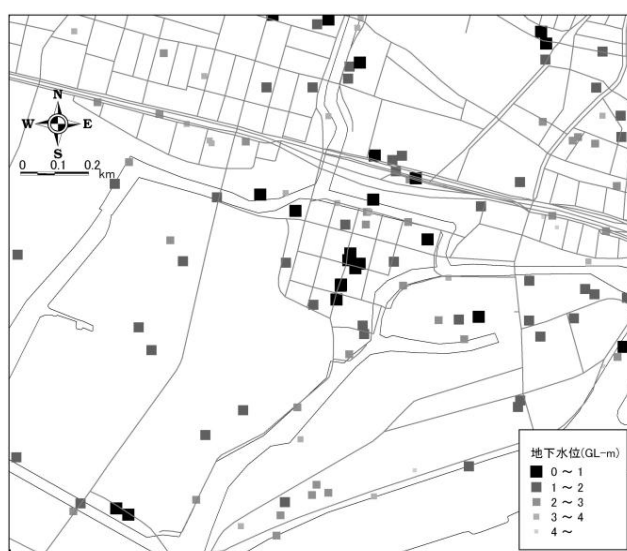


図 3. 2. 16 築地地区周辺の地下水位(深度表示)



写真 3. 2. 1 初嶋大神宮の全壊状況



写真 3. 2. 2 建物の沈下状況

③地盤の概要

当地区は盛土層の下位に N 値 $N=5\sim 10$ 前後の緩い沖積砂質土層(As)が層厚 7m 前後で成層し、次の沖積粘性土層(Ac)へと続いている。この Ac 層は既存調査結果より、層厚 10m 程度はあると考えられる。尚、No. 10 地点においては As 層の層厚が他地点より厚い様であり、今回のボーリングにおいては下位の Ac 層が確認されていない。したがって、東堀運河の矢板は Ac 層に達しておらず、遮水が出来ていないことも考えられる。

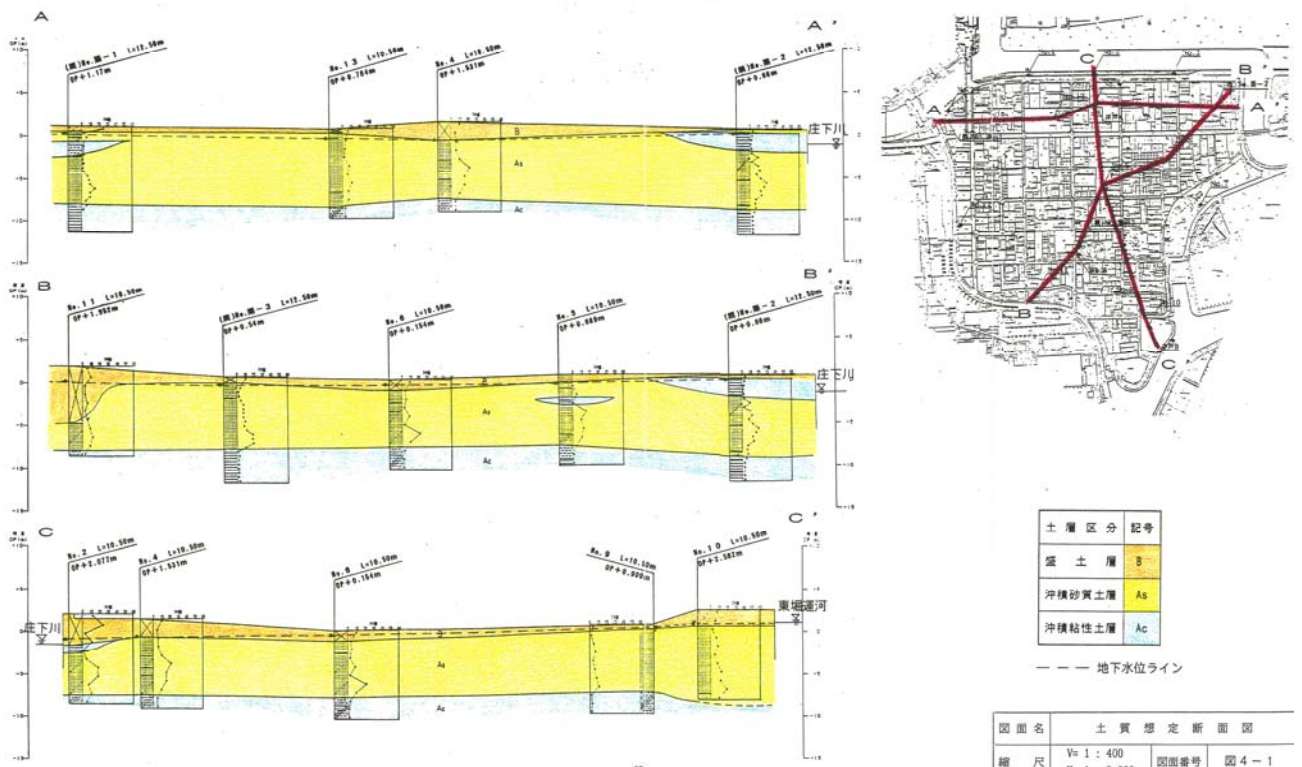


図 3. 2. 17 築地地区の東西地盤断面

④沖積砂層の地下水の状況

地下水位低下工法の適用性を検討するために、詳細な地盤調査と揚水試験を実施した。

揚水井戸を2本、観測井を14本設置した。2本の揚水井戸A、Bを使用し、各々単独に揚水した場合、2本同時に揚水した場合など3ケースの揚水試験を実施し、地下水定数（地下水位の変動、透水係数、貯留係数）や揚水による水位低下量予測、ならびに周辺河川運河からの漏水についても検討した。その結果、地区内の常時の地下水位は、南の東堀運河側が高く、北の庄下川側が低く、東堀運河からの漏水のあることが確認された。庄下川の河川水位の影響はほとんど受けていないことが明らかになった。東堀運河からの漏水の影響で、地区南側の地下水は塩水化されていることも判明した。

揚水試験時の地下水位の変動を図3.2.19、3.2.20に示す。東堀運河の水位は潮位に連動してO.P.+0.4～1.2mの範囲で変動しているが、尼崎閘門の働きで満潮時がカットされた動きをしている。庄下川の水位はO.P.-1.2～-1.0mの範囲に制御されているが、降雨があれば急激に上昇し、排水ポンプが全稼働すると元の水位に戻るという動きをしている。東堀運河や庄下川の変動に地下水が直ちに大きく反応していないことから、東堀運河からの漏水も大きなものではないと判断できる。

試験の結果判明した地下水定数は次のとおりであった。

透水係数= $1.45 \times 10^{-2} \sim 3.37 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 、平均 $2.27 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$

貯留係数=0.22～0.37（東堀運河に近い揚水試験値が大きい）

塩分濃度=0.03～2.09%、平均値=0.76%（庄下川=0.03%、東堀運河=2.31%）

揚水試験後の塩分濃度は若干低下した。

また、沖積粘土の圧密特性を調査するために、沖積粘土の連続サンプリングと詳細な土質試験を実施した。圧密沈下量についての検討結果では嵩上げ盛土（1.5m）と地下水位低下（最大1.5m）により、20cmを越える圧密沈下の発生が予測された。ただし、過去の地盤沈下で沖積粘土層の上下は圧密が進行し過圧密状態にあることなどから、盛土や地下水位低下による圧密の進行はゆっくりと現れるので直接基礎の多い当地区では大きな問題にならないと判断した。



図 3.2.18 揚水井戸と水位観測井位置図

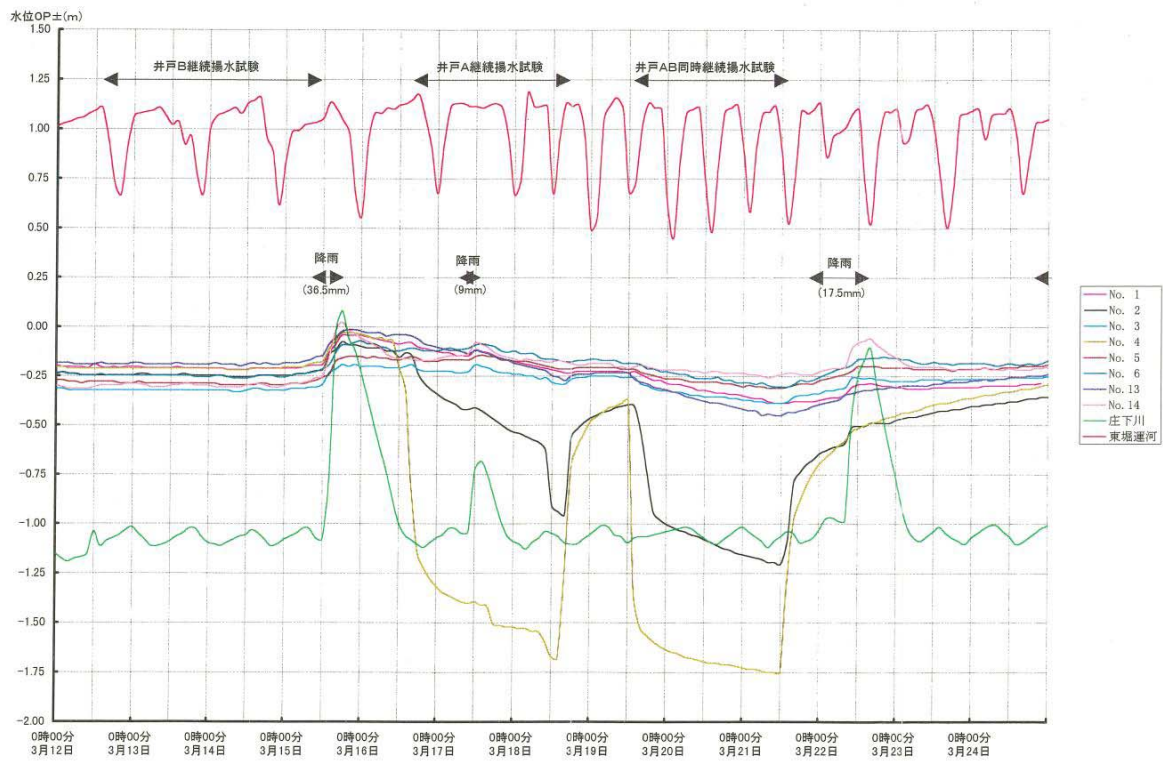


図 3. 2. 19 地区の北半分の揚水試験時の地下水位の変動（観測井 No. 1～6、13、14）

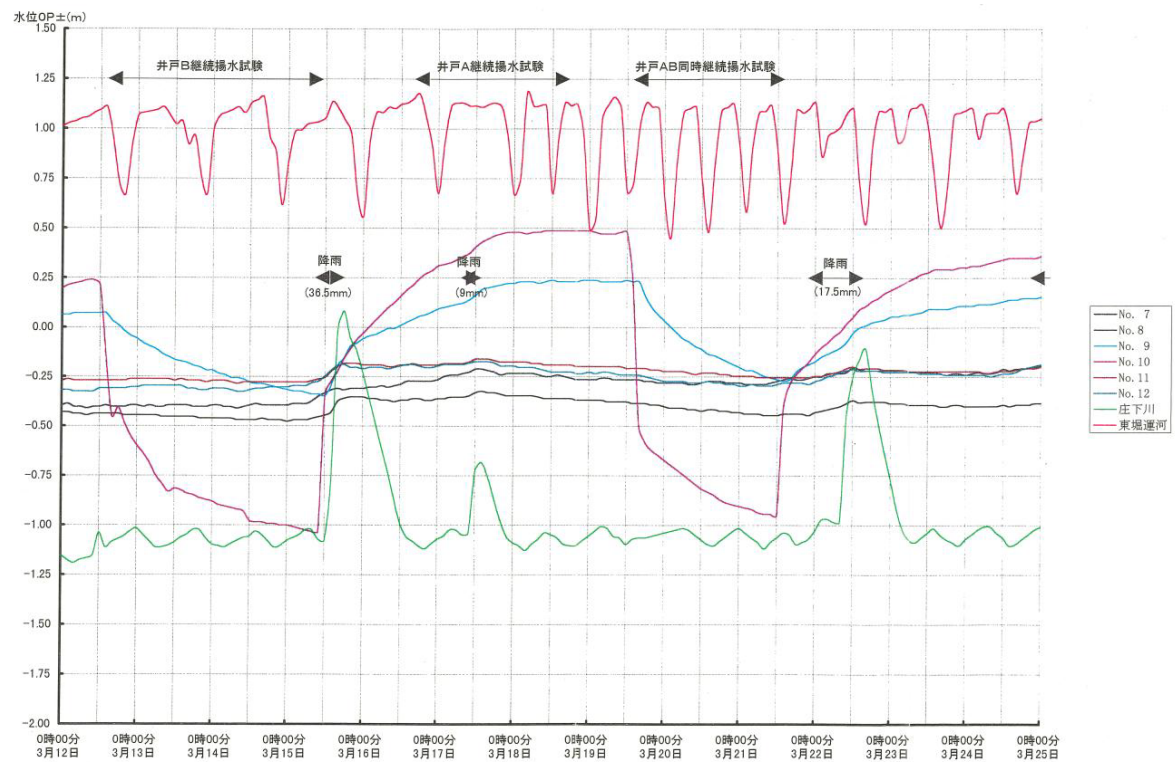


図 3. 2. 20 地区の南半分の揚水試験時の地下水位の変動（観測井 No. 7～12）

⑤地下水低下工法の概要

地下水低下工法には色々な方法が考えられるが、街路の耐震化が主目的であること、液状化対象地盤が有する透水性に適した工法であること、旧地盤面からでは透水管設置のための掘削深度が浅くてすむことなどから街路下に沿って透水管を埋設し、地下水を何カ所に集めて排水することが経済的であり、施工も容易であることで実施した。

尼崎市は瀬戸内海気候であるために年間降水量が 1,300mm 弱である。この降雨のうち地中に浸透するのは、尼崎市の下水道への流入実績から求めると 20%程度とすることが判明している。そうすると、地区での年間の揚水量は $13.7\text{ha} \times 0.2 \times 1.3\text{m} = 35,620\text{m}^3/\text{year}$ となり、これは 1 日にすれば $97.6\text{m}^3/\text{day}$ 、1 時間にすれば $4.1\text{m}^3/\text{h}$ となって大きな量ではない。したがってポンプ施設なども小型で十分である。これ以外には運河や河川からの漏水と陸続きの東西の地区外からの流入であるが、これも大きなものではないと揚水試験結果から判断し、透水管の敷設で十分な水位低下が得られると判断した。設計上は時間雨量 10mm/h に対応することで、透水管の管径 200mm、場外へ排水する末端近くで北部が 300mm、南部が 350mm とした。設計時の透水管の設置位置は外周に設置しない。内部の街路も地下水位低下に必要なだけに限定し、**図 3. 2. 21** のような配置としていたが、実際の施工に当たっては復興委員会などとも協議を行い、ほとんどの街路に設置した。

場外へ排水するピットは庄下川に排水する北西部と東堀運河に排水する南東部の 2 箇所とした。地下水位が高く、東堀運河からの漏水が懸念される南東部の負担面積は $24,100\text{m}^2$ (地区面積の 17.6%)、残りの面積 $112,900\text{m}^2$ (地区面積の 82.4%) を北西部の排水ピットへ集水することにした。透水管の設置断面と工事断面を **図 3. 2. 22** に示す。掘削幅は 950mm、掘削深度は地表面標高と埋設標高で決まり、概略の掘削深度は 2,000~3,500mm である。透水管は高密度ポリエチレン管を使用し、その廻りにはフィルターとして単粒度砕石 4 号 (20~30mm) を厚さ 635mm ほど入れ、その砕石全体を不織布で巻き込み、フィルターへの砂の流入を防いでいる。

築地地区での耐震化は、盛土による地盤の嵩上げが行われたために、地下水位低下量が少なくすみ、透水管敷設工事費も安価であった。さらに、工事開始後透水管が一部埋設されてきたので 1998 年頃、この透水管を使った揚水試験も実施している。ポンプを稼働させると、透水管埋設範囲内では容易に水位を低下できることが確認できた。

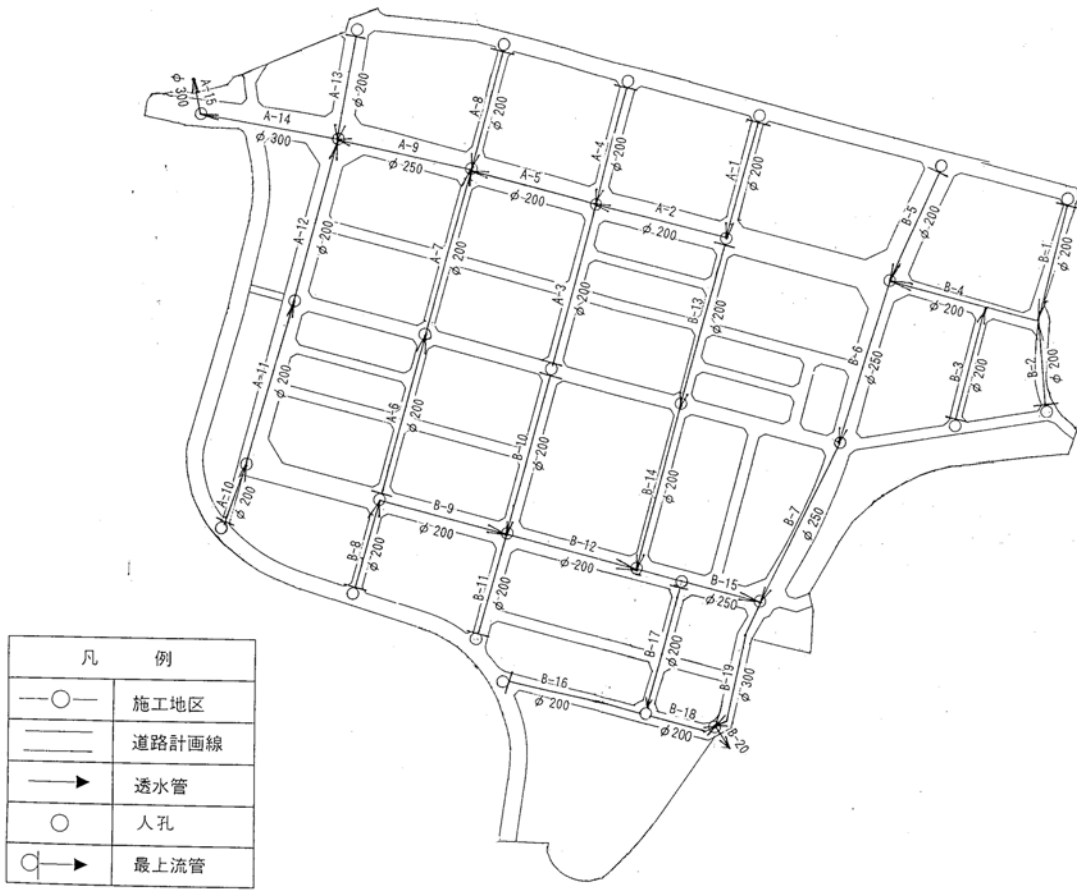


図 3.2.21 透水管の配置 (当初設計)

布設断面図 S = 1 : 20

仮設工 S = 1 : 20

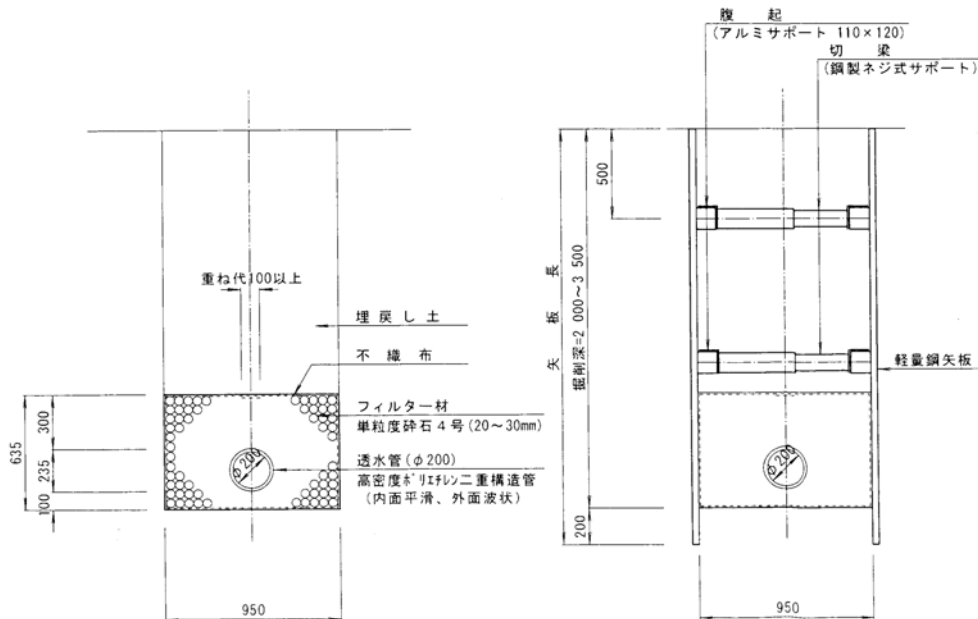


図 3.2.22 透水管設置断面ならびに工事概要図

(4) 2007年新潟県中越沖地震による刈羽村稲場の液状化被害事例⁷⁾

①地形・地質と被害の特徴

i)概要

柏崎市に隣接する刈羽村では砂丘麓での液状化による地盤変状に起因した建物被害が顕著であった。同地区では2004年の新潟県中越地震(M6.8)の際も同様の建物被害が発生しており、潜在的に地震による被害が発生しやすい地域でもある。その要因を調査するために、表面波探査、スウェーデン式サウンディング調査(SWS)、ボーリング調査などの各種地盤調査を実施し、建物の不同沈下量、傾斜角の計測結果と比較した。さらに、中越地震以降に液状化対策が施されていた建物の被害状況を比較することで、その耐震補強効果を検証した。

ii)刈羽村の地質および地形

図3.2.23に柏崎・刈羽地域の地質、図3.2.24に刈羽村稲場地区の概略地形を示す。図3.2.23より、刈羽村は日本海側の荒浜砂丘と内陸側の西山丘陵に挟まれた位置に存在する。被害が甚大であった稲場地区は荒浜砂丘の東側麓に、刈羽駅のある地域は柏崎層上の砂丘後背の低地(柏崎平野)に位置している。なお、図3.2.24では地形の特徴をみるために、鉛直距離を水平距離の5倍に拡大している。荒浜砂丘は標高が高く麓は急斜面となっており、丘陵部と平野部の境界が明確である。



図3.2.23 柏崎・刈羽地域の地質(文献⁸⁾に加筆)

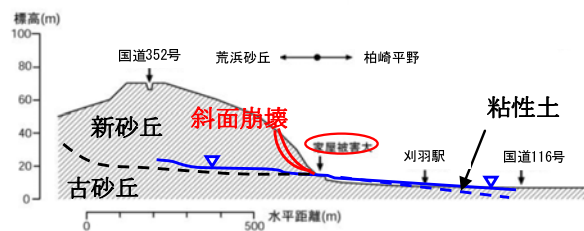


図3.2.24 稲場地区の概略地形(文献⁸⁾に加筆)

iii)地盤調査

図 3.2.25 に新潟県中越沖地震において液状化に伴う地盤変状により建物被害が甚大であった刈羽村稲場地区の被害状況を示す。図には砂丘の地盤変状も記載した。稲場地区の北部（図中①、写真 3.2.3）では、砂丘斜面の崩壊により幾段にも段差のある滑落崖が形成された。中央（図中②、写真 3.2.4）では砂丘の表層崩壊が発生し、建物に被害を及ぼした。表層崩壊発生箇所の東側に位置する砂丘上部には連続した地割れ（図中③、写真 3.2.5）も観察された。また、宅地前の道路の数カ所で沈下、擁壁の目開き、傾斜、側溝の狭窄（図中④、写真 3.2.5）などの被害が見られた。

一方、刈羽駅近くの砂丘後背の低地に位置する建物では、液状化対策として鋼管杭が打設されていたが周辺地盤の沈下、玄関屋根の崩壊など大規模な被害が発生していた建物（写真 3.2.6）と、外見上ほとんど被害のない建物（写真 3.2.7）とが混在し、選択的に被害が発生していた。しかしながら、砂丘麓に比較して砂丘後背低地の軟弱粘性地盤上に位置するこの地域では、被害が総じて小規模である。

図 3.2.25 上に示す砂丘斜面が崩壊した位置やその近傍で砂丘頂部から斜面下方に向かった測線で表面波探査（E、F、I 測線）を実施した。

また、スウェーデン式サウンディング調査（SWS）を F 測線に沿って実施した。これらの調査は（独）建築研究所と共同で実施したものである。表面波探査および SWS の結果^{9,10}を図 3.2.26 に示す。

これより、砂丘斜面とさらに下方の平坦地ではかなり異なる地層構造であることがわかる。砂丘斜面では深度数 m 以深に堅固な砂層（S 波速度 150 m/s 以上あるいは換算 N 値 15 以上を旧期砂丘堆積物、ならびに古砂丘と呼称）が、以浅では比較的緩く堆積した砂層（新期砂丘堆積物、ならびに新砂丘と呼称）が存在すると考えられる。一方、平坦地では深度 10 m 程度まで S 波速度は 100 m/s 程度であり、沖積粘土層が厚く堆積することがわかる。また、E、F、I 測線を比べると、E、I 測線の砂丘斜面（始点～50 m 付近）では深度 2～6 m 以深で S 波速度 150 m/s 以上の高速度層があり、比較的浅部から古砂丘が堆積すると思われるが、F 測線では S 波速度 150 m/s を超えるのは深度 6～10 m 以深であり、比較的深部まで緩んだ砂地盤であることがわかる。E 側線に比べると、I 側線の新砂丘、古砂丘の地層傾斜は緩やかである。

SWS の結果では、古砂丘と思われる深度（E 測線で 6m、F 測線で 10m）まで換算 N 値が 10 以下であるのに対し、それ以深では急激に換算 N 値が増加しており、表面波探査の結果と一致する。地下水位は、計測箇所で異なるものの地表面よりおおよそ 30～70cm の深度に位置しており、水位が高い。また、宅地前の側溝において、豊富に湧き出した湧水が勢いよく流れていることから地下水位の高さが伺える。



図 3.2.25 刈羽村稲場地区の被害状況 (Zenrin)



写真 3.2.3 滑落涯



写真 3.2.4 表層崩壊による建物被害



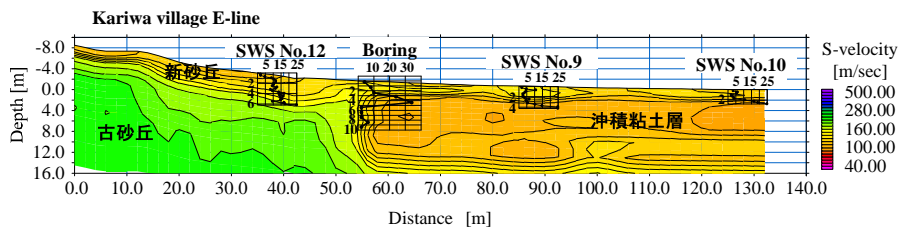
写真 3.2.5 砂丘地割れ・側溝狭窄



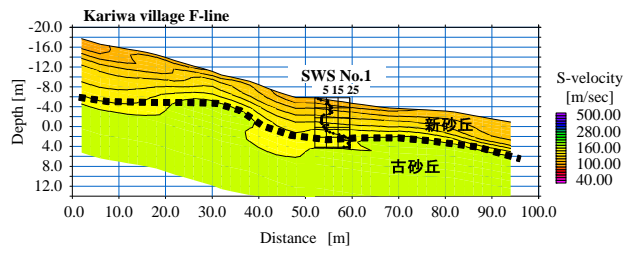
写真 3. 2. 6 刈羽駅近くの建物被害



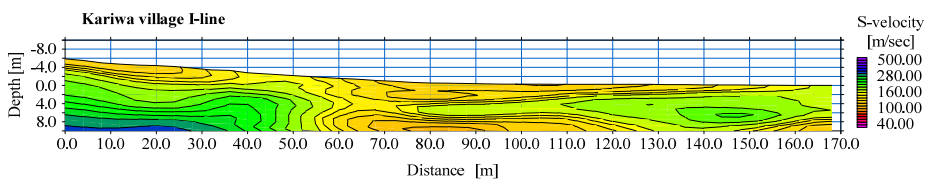
写真 3. 2. 7 刈羽駅近くの無被害の建物



(a) E測線



(b) F測線



(c) I測線

図 3. 2. 26 表面波探査および SWS 結果

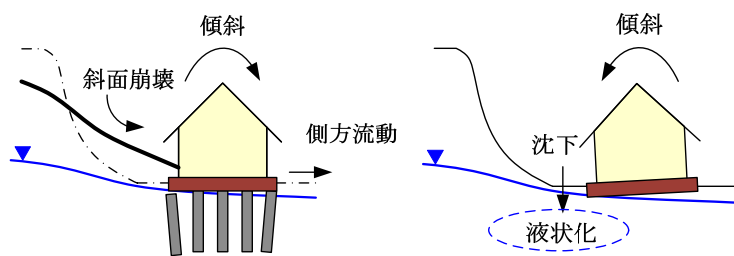
iv)建物の不同沈下量・傾斜角

刈羽稲場地区の建物の不同沈下量を測量した。測量方法は建物の四隅にコンベックスを当て、レベルによりその値を読み、その差分を不同沈下量として算出した。また、傾斜角は不同沈下量と四隅の距離から算出した。測量結果（不同沈下量と傾斜角）を表 3.2.7 に、傾斜方向ならびに各建物の被害規模^{9,10}を図 3.2.25 に併記する。なお、被害規模は応急危険度判定調査票に基づくものであり、赤は危険、黄は要注意、緑は調査済みを表す。図 3.2.25 より、建物の傾斜方向は建物の裏にある砂丘斜面の崩壊が発生した北側の地域（図中②）では道路側に、発生していない南側の地域（図中②以南）では砂丘側に向いている（図 3.2.27）。

道路側に傾斜していた地域では、裏山の砂丘斜面が液状化によりせん断強度を失ったことで崩壊し、法尻部分の隆起、崩積土の直撃、道路側の地盤の側方流動により、建物が下方から持ち上げられ道路側に傾斜したと考えられる（図 3.2.27）。

一方、砂丘側に傾斜していた地域では、砂丘斜面麓の湧水地付近で液状化が発生したために、建物が砂丘側へ傾斜したと考えられる（図 3.2.27）。また、中越地震では斜面崩壊は発生しておらず山側へ傾斜した形態が多く見られた。

表 3.2.7 より、北側の A～E の地域では斜面崩壊に伴う崩積土の直撃により、建物の水平変位量が大きく、最大不同沈下量および傾斜角も大きいことがわかる。



(a) 斜面崩壊により道路側に傾斜 (b) 砂丘麓の液状化により山側に傾斜

図 3.2.27 建物の傾斜方向の違い

表 3.2.7 建物の不同沈下量・傾斜角と 2004 年新潟県中越地震後の対策工

建物No.	不同沈下量 [mm]	傾斜角	中越	中越沖	地震後の対策工
A	1133	161/1000	全壊	全壊	新築（在来工法）
B	278	30/1000	全壊	全壊	-
C	263	18/1000	全壊	全壊	新築（柱状改良）
D	-	-	全壊	全壊	改築（在来工法）
E	62	5/1000	全壊	全壊	新築（在来工法）
F	88	6/1000	半壊	半壊	改築（アンダーピニング）
G	251	12/1000	-	-	無対策
H	-	-	全壊	全壊	新築（鋼管杭）
I	175	18/1000	全壊	全壊	改築（アンダーピニング）
J	72	6/1000	-	-	無対策
K	129	7/1000	全壊	調査済	新築（鋼管杭&暗渠）
L	-	-	全壊	要注意	-
M	187	10/1000	要注意	調査済	無対策
N	-	-	要注意	危険	-

v)液状化対策工による被害状況の違い

刈羽村稲場地区では、2004年新潟県中越地震でもM6クラスの余震の多発により液状化被害が甚大であった。多くの建物が液状化による不同沈下などが原因で全半壊に至っており、他にも石積み擁壁の崩壊や建物の亀裂などの被害が報告されている⁸⁾。この被害を受け、数件の宅地で液状化対策を実施した上で、建物の新築あるいは改築が行われた。主な対策工法として、鋼管杭基礎の打設、暗渠による地下水位低下、アンダーピニング工法、柱状改良工法が施されていた。

表 3.2.7 より各液状化対策工法による効果を比較すると、在来工法を採用し、耐震対策を施していない建物Aでは、斜面崩壊とそれに伴う法尻の隆起により建物が持ち上げられ、道路側へ側方移動するなど大きな被害を受け、稲場地区で最も被害が甚大であった。また、柱状地盤改良を施した建物Cは、裏山斜面の崩壊により建物は道路側へ約50cm水平移動し、それに伴い道路側の柱状改良体が道路側へ傾斜していた。鋼管杭を施した建物Hは、周辺地盤が約20cm沈下、建物が5cm不同沈下し、給排水管が断裂していた。鋼管杭と暗渠を施した建物Kでは、13cmほどの不同沈下、7/1000の傾斜が発生していたが、他の建物と比較して外見上大きな被害は見受けられなかった。猪爪ら¹¹⁾によると裏側の砂丘斜面形状に大差ないことが報告されており、今回実施した地盤調査の結果も踏まえると、新砂丘の堆積厚さが異なっていることと液状化対策の有無が被害規模の差異につながったと考えられる。

vi)まとめ

新潟県中越、中越沖地震の二度にわたり被害を受けた刈羽村稲場地区において、表面波探査、SWS、ボーリング調査を実施した。その結果、液状化対策工法の違いのみならず、表層を覆う新砂丘の堆積厚さが被害の差異に影響を及ぼした可能性を示した。

また、表面波探査結果に基づけば刈羽村における振動特性は砂丘斜面上と平坦地とで異なることが予想される。すなわち、古砂丘上にある斜面の新砂丘上に最大加速度が集中するのに対し、速度や変位は砂丘後背低地の軟弱粘性地盤上で発生し、粘性土地盤上では長周期化する特性である。

その場合、粘性土地盤の軟化により、減衰が大きく長周期化することで粘土層上では液状化などの大きな被害が発生せず、逆に非線形化しなかった古砂丘上での被害が大きくなった可能性があり、建物被害状況とも整合する。振動特性の相違も含めて、液状化層ならびに支持層の傾斜などの地形的な要因、液状化層の堆積厚さなどの地質的要因、液状化対策工法などの人工的要因を区分し、被害形態に与えた影響を検証する必要がある。



(a) 無対策



(b) 柱状改良



(c) 鋼管杭

写真 3. 2. 8 液状化対策工の差異による被害規模の差異

②地盤の強度と液状化層の推定

刈羽村稲場地区は日本海と刈羽村平野部を隔てる砂丘の東側にある集落である。図 3. 2. 28 は稲場地区の地形の概略を示したものである。当該地域では、図中左手砂丘法尻に家屋が建ち並び、道路を挟んで緩傾斜の斜面に家屋と畑が混在している。区画整備された宅地は少なく、大部分の家屋は自然斜面上に建てられていた。緩斜面における家屋の被害は総じて古い木造住宅ほど甚大であり、倒壊した家屋もあった。液状化による地盤変状を伴った家屋被害は砂丘法尻の急斜面に集中しており、大部分の家屋が被害を受けた。砂丘法尻の家屋の中には盛土造成された宅地に建てられたものがあり、盛土材には砂丘の砂が使用されていた。

砂丘法尻の宅地には砂丘からの地下水の流入があり、地下水面は深度 20～80cm の比較的浅い位置にあった。また、図 3. 2. 29 に示すように、稲場地区の宅地（砂丘）の砂の粒度分布は悪く、この地域の地盤は液状化を起こしやすい状態であったと考えられる。



図 3.2.28 稲場地区の地形概略 (ベースマップは Google Map)

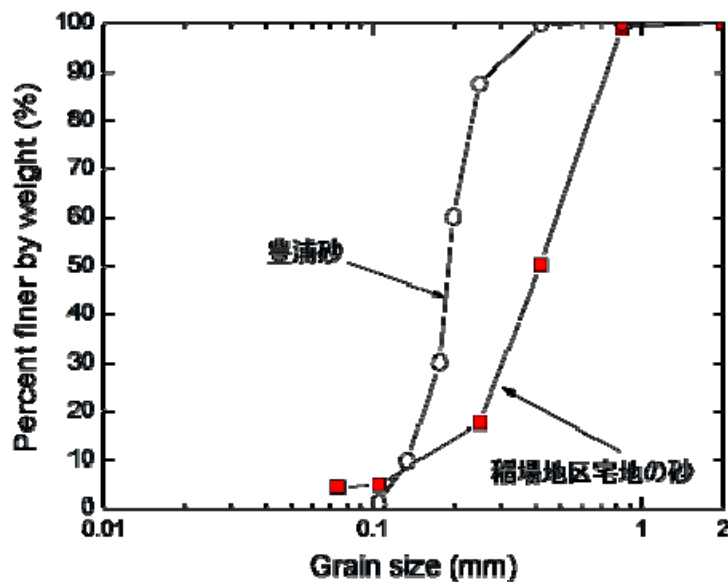


図 3.2.29 砂丘法尻宅地の砂の粒度分布

砂丘法尻における家屋被害の形態は、宅地の液状化により家屋周辺地盤が沈下・流動して家屋が移動・沈下・偏心したもの（図 3.2.30）と、家屋背後の砂丘斜面が流動して家屋に衝突し、外壁を損傷させたもの（図 3.2.31）があった。宅地の液状化による家屋被害の例を写真 3.2.9～11 に示す。写真 3.2.9 および写真 3.2.10 の家屋はいずれも玄関前の斜面が流動・沈下し、基礎が被害を受けて家屋が偏心した。また、コンクリート舗装下の砂が流出して空洞化している様子が見て取れる。写真 3.2.11 では、家屋周辺宅地が 20cm 程度沈下した。この家屋は鋼管杭を基礎に用いていたため、家屋の沈下および偏心は軽微であったが、道路側に約 15cm 移動した。

写真 3.2.12 および写真 3.2.13 は砂丘斜面の流動による家屋被害の例である。写真 3.2.12 では写真中右側の砂丘斜面が液状化して流動し、家屋の外壁に衝突した。写真 3.2.13 では

調査時には衝突した土砂は既に撤去されていたが、土砂の衝突によって斜面側の外壁が損傷していた。

砂丘法尻にあった全ての宅地・家屋において、なんらかの地盤変状または家屋被害が認められたが、**写真 3.2.14** の家屋の被害は他と比較すると軽微で宅地の液状化や家屋の沈下・偏心はほとんど認められなかった。この家屋は2004年新潟県中越地震で被災しており、立て直しの際に敷地周辺に暗渠工の敷設や家屋直下地盤の表層改良、杭基礎等の地震対策が施されていた。

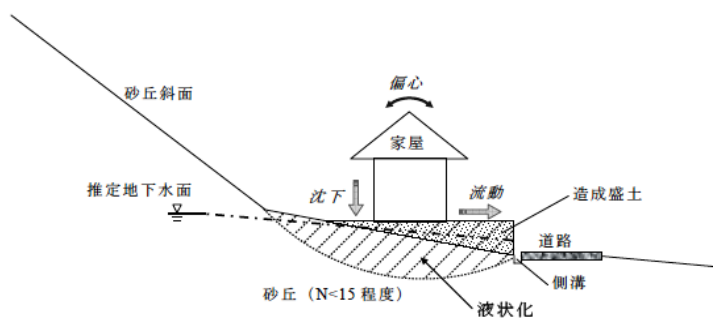


図 3.2.30 宅地の液状化による家屋被害

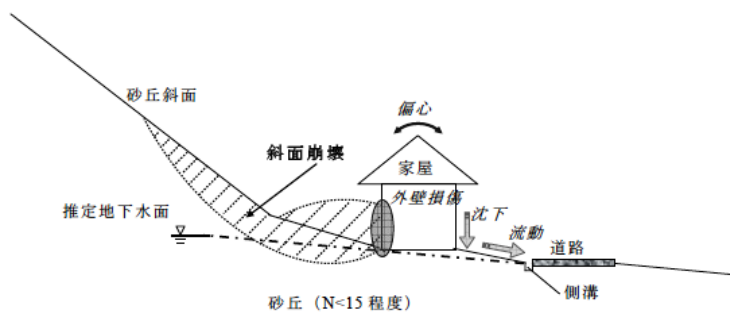


図 3.2.31 砂丘斜面の流動による家屋被害



写真 3.2.9 宅地の沈下・流動による
家屋被害 1



写真 3.2.10 宅地の沈下・流動による
家屋被害 2



写真 3.2.11 宅地の沈下・流動による
家屋被害 3



写真 3.2.12 砂丘斜面の流動による
家屋被害 1



写真 3.2.13 砂丘斜面の流動による
家屋被害 2



写真 3.2.14 被害が軽微であった家屋

図 3. 2. 32 は現地で実施したスウェーデン式サウンディング試験より得られた換算 N 値の深度分布である。図中、地下水位が 30cm 以下のものを白抜き、30cm より深いものを色塗りでプロットしている。また、図中 1~5 は砂丘法尻の宅地、6 および 7 は緩斜面上の空き地における試験結果である。図より、砂丘法尻の宅地では貫入深さ 3m 以上で換算 N 値が約 10 から約 20 へと急変することがわかる。これらの宅地の貫入深さ 1m~3m における平均的な換算 N 値が 5~10 であるのに対して、地下水面が最も浅い (GWL=20cm) の 3 では貫入深さ約 3m まで換算 N 値 5 以下であり非常に緩い地盤であることがわかる。また、5 (写真 3. 2. 14 の暗渠工が施されていた家屋) では貫入深さ 1m 以上で換算 N=10 回以上であり、周囲宅地よりも地盤が堅固であることがわかる。5 では宅地の地盤変状および家屋の被害は軽微であり、暗渠排水が液状化に対して効果を発揮したと推察される。緩斜面上の 6 および 7 は地下水面が浅い (GWL=30cm) にも関わらず 2m 以下の貫入深さで換算 N 値が 20 程度に達していることから、砂丘からの恒常的な地下水の流入がこの地域の宅地の液状化被害に影響を与えたと考えられる。

スウェーデン式サウンディング試験結果を基に液状化判定を行った結果を図 3. 2. 33 に示す。液状化判定は道路橋示方書に基づき、地域補正係数を 0.85、地盤種別を II 種地盤、地震タイプを直下型地震 (TypeII) として行った。この場合における地表設計水平深度は 0.6 となる。図より、この液状化判定条件では全ての宅地で液状化する結果となったが、地下水位の違いにより液状化抵抗値 FL の深度分布が異なる傾向が認められる。すなわち、地下水位が 30cm より浅い宅地 3、4、7 では深度 2m 未満における FL が 0.3 程度であるのに対して、地下水位が 65cm より深い宅地 1、2、5 では FL=0.5 程度であることがわかる。また、2m 以浅における被害が軽微であった宅地 5 の FL 値が他の宅地と比べて高いことは特徴的である。

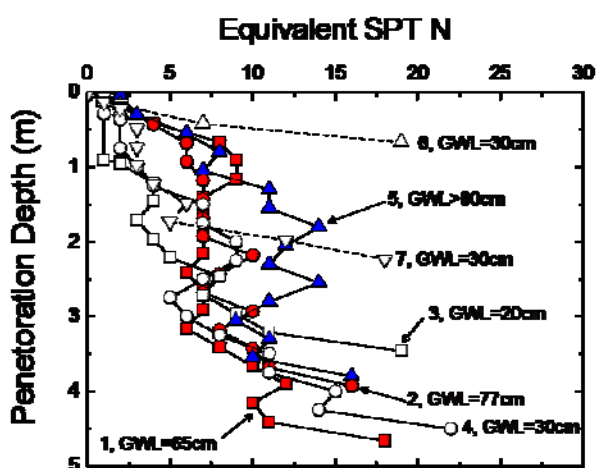


図 3. 2. 32 換算 N 値の深度分布

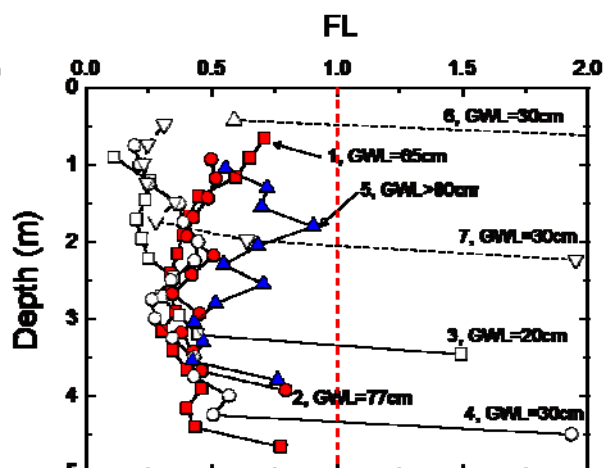


図 3. 2. 33 液状化抵抗値の深度分布

③砂丘周辺の亀裂分布

刈羽村稲場地区付近の荒浜砂丘東面においては地震後に大小無数の亀裂が確認された。砂丘東面における亀裂・段差等の分布、被災家屋等の分布を図 3.2.34 に示す。砂丘の斜面直下で傾斜のやや緩んだ土地には多くの家屋が並んでいるが、これらのうちには深刻な被害を受けたものがある。亀裂の多くは表面のゆるい砂層が大きな地震外力に耐えられず傾斜方向へすべり運動を生じたために生じたものと考えられる。開いた亀裂部分に残された根茎には緊張しているものが多い(写真 3.2.15)。斜面中腹に見られた滑落崖を写真 3.2.16 に示す。このような段差の下部土塊は、地震後に大きく下方へ移動している。一部の斜面直下では崖面が 1m 程度水平方向に変位したことが確認された(写真 3.2.17)。また、斜面下部に多く見られる竹林の一部では、竹林を含む斜面のすべり土塊が後方へ回転運動したため竹幹の逆方向傾斜などが観察された(写真 3.2.18)。砂丘内に卓越した竹の根系は、ゆるい砂からなる斜面表層を一体化させる効果があったと考えられる。

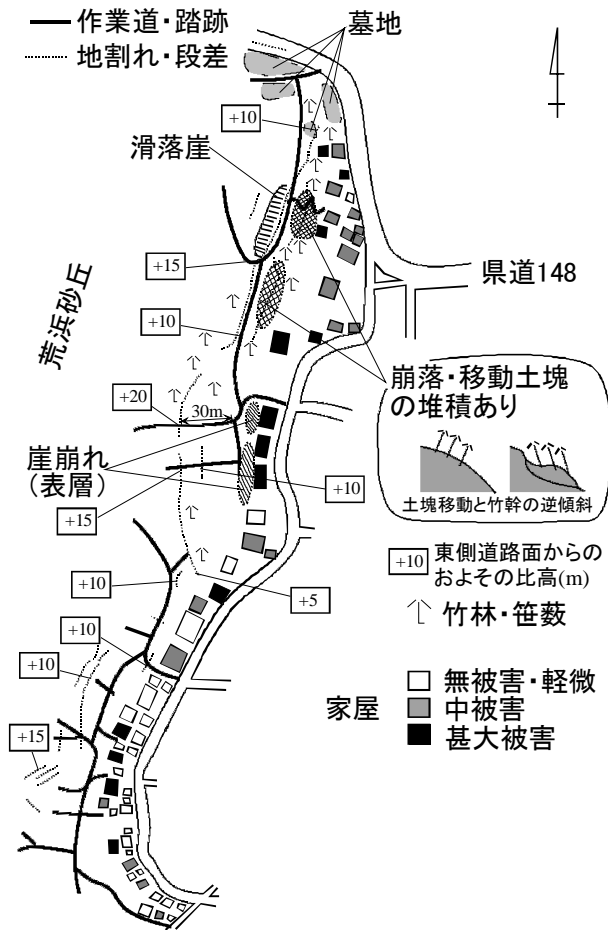


図 3.2.34 砂丘の東面に生じた亀裂の分布



写真 3.2.15 亀裂部分で緊張した根茎



写真 3.2.16 斜面中腹に見られた滑落崖

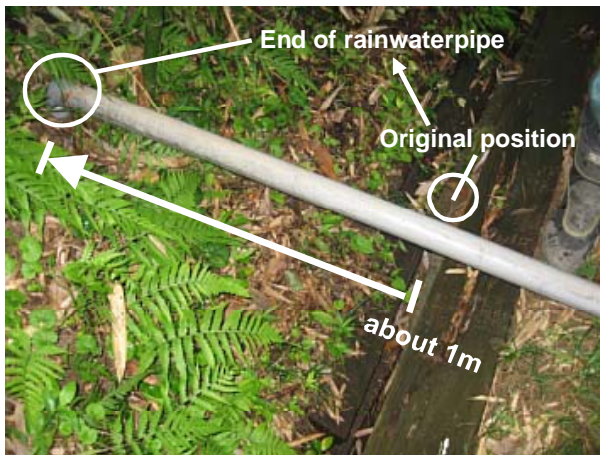


写真 3.2.17 斜面下部の残留水平変位
(雨樋の端部に着目)



写真 3.2.18 すべり土塊の後方回転
による竹幹の逆傾斜

④家屋基礎の被害

図 3.2.35 の位置図に基づいて、基礎の変状を中心に主な被害を報告する。



図 3.2.35 基礎被害調査地点位置図（刈羽村下水道資料一部改）

i)No.1

増築部分が母屋の基礎から離れて避け、修復。

ii)No.2、No.3

No.2 から No.7 までは砂丘麓の中でも最も低湿地に位置し、基礎の被害は目立たなかったものの、建物の歪みが酷く解体。

iii)No.4

写真 3.2.3、15、16 の斜面下に建つ家屋で、砂丘斜面の崩壊土が家屋背面を直撃して覆った (写真 3.2.19 (a))。地下水位はほぼ地表面にあり、敷地は湿地状態である。地震で生木が倒れる例は聞かないので、写真 3.2.19 (b) の倒木は、あるいは浅層の液状化で地盤が支持力を失った結果と疑われる。図 3.2.36 は、基礎と基礎面に補正した土台の不同沈下で、全体的に砂丘側が低いものの、鉛直方向には V 字型に曲がっている。

基礎の被害を、写真 3.2.20 に示す。同写真 (a) は、右側から砂丘斜面の土砂の直撃を受けて家屋背面の中央で 10cm 程度建物の内側に曲がった布基礎である。南側側面の基礎は、中央で内側に 6cm 余り凹み (同写真 (b))、前庭側の基礎は、中央で 20cm ほど建物の外側に押し出された (同写真 (c))。建物内部の土台は、基礎の変位について行かれず、3cm 程度ずれた (同写真 (d))。同写真 (e) のような基礎の通気孔角部を通る亀裂が多数みられる。同写真 (e) で、水位が地表面にあることも分かる。同写真 (f) の亀裂によると、基礎に鉄筋が入っていない。



写真 3.2.19 土砂の直撃と浅層の液状化 (No. 4)

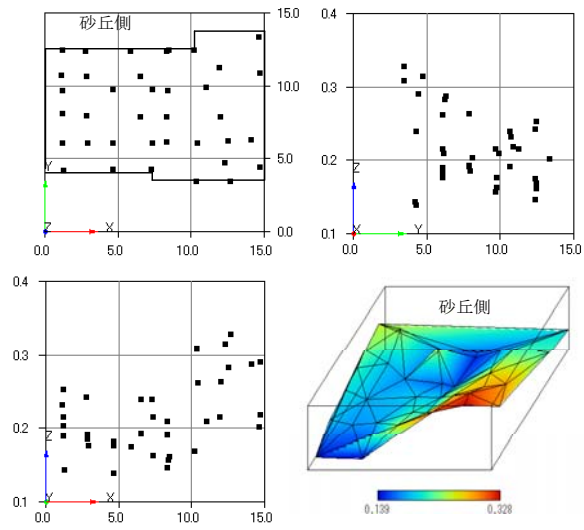


図 3.2.36 家屋 No. 4 の基礎と土台の不同沈下



写真 3.2.20 基礎の被害状況 (No. 4)

iv)No.7

写真 3. 2. 21 (a) に見るように、地表面の低い部分をそのまま池にしたと思われる低湿地である。同写真 (b) のように直径の大きな噴砂孔があった。家屋の重みで発生したと思われる家屋の縁に沿う引っ張りクラック (同写真 (c)) があり、束と束石様の基礎と土台がずれた。家屋内部は壁にクラックなどが認められたが、梁や柱は太く、接合が頑丈であったために被害は目立たない。



写真 3. 2. 21 低湿地の液状化関連被害 (No. 7)

v)No.8

図 3. 2. 25 中の測線 F-line 上の家屋で、その被害の様子は写真 3. 2. 9、10 に示した。建物周りの水平であった敷地が、写真 3. 2. 22 のように左遠方砂丘斜面の地すべりで、線状の縞模様を残して斜めに盛り上がった。

図 3. 2. 37 は、地震前後の地盤断面と家屋の位置を比較したものである¹²⁾。建物は、上から見て反時計周りに回転しつつ平均 4m 前に移動し、前面は 1.4m ほど、背面は 2.5m 余り隆起して 10° 余り前傾した。地震前の地盤高に対して、家屋直下の地下水位は GL-1.5m である。

図 3. 2. 38 は、基礎の不同沈下であるが、中越地震で壊れた家屋の一部を残して一部屋増築した建物の、増築部が千切れてより大きく前に押し出された。増築部は 4m 以上前進したと考えられるが、写真 3. 2. 23 (写真奥が低い) によると束が束石よりも大きく移動し、両者はずれている。床下の地盤は全体的に布基礎よりも盛り上がり、噴砂孔状の陥没が見える。住人は、本震時にこの増築部の床上に座っていたということであるが、転倒した訳ではないので、地すべりは瞬間的なものでなく、多少の時間を要したと考えられる。

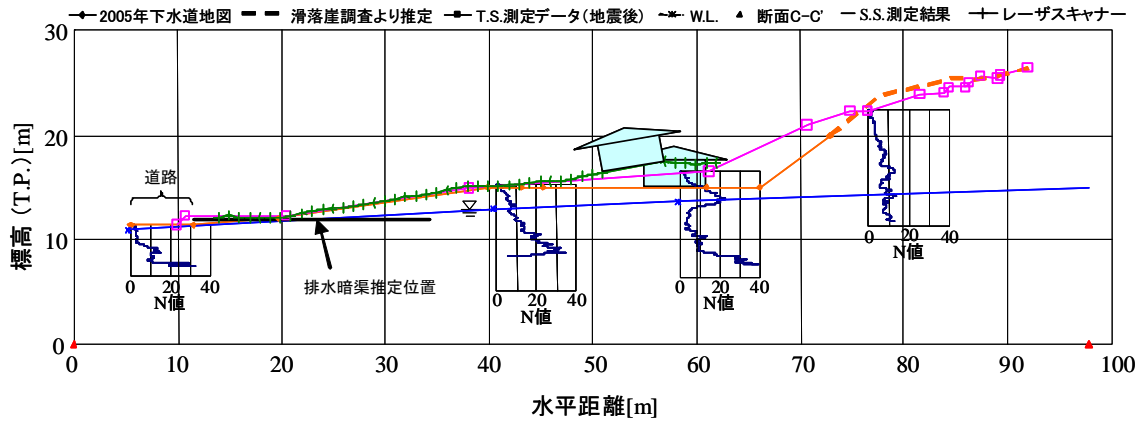


図 3.2.37 家屋 No. 8 の地震前後の位置関係と地盤断面



写真 3.2.22 地すべり舌部の隆起(No. 8)



写真 3.2.23 増築部の束と束石のずれ(No. 8)

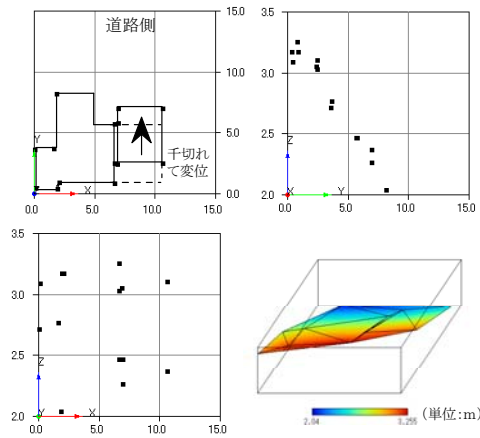


図 3.2.38 基礎の不同沈下 (No. 8)

vi)No.10

布基礎の下の地盤は、 ϕ 60cm、L=3.5m の柱状改良杭 28 本で改良されている。砂丘斜面の崩壊土砂が家屋背面を直撃し、土が高さ 95cm ほど被って外壁の一部を壊した（写真 3.2.24）。地震前の元の裏庭幅は 5m あったが、写真のように砂丘法先の植生が、家屋背面 1m まで接近したので斜面表土は 4m すべった。前後約 9m の建物の砂丘側が道路側より 20cm 余り持ち上がって前傾し、前庭が隆起した（写真 3.2.25）。

また、北側側面が南側側面よりも 5cm 前後高い。ヒアリングの話を総合すると、前面の柱状改良杭との相対変位で言えば、家屋は 60cm 以上前進し、砂丘側の杭は前方に 120cm 以上押し出された（図 3.2.39）。



写真 3.2.24 斜面崩壊土砂の直撃 (No. 10)



写真 3.2.25 前庭（道路側）の隆起 (No. 10)

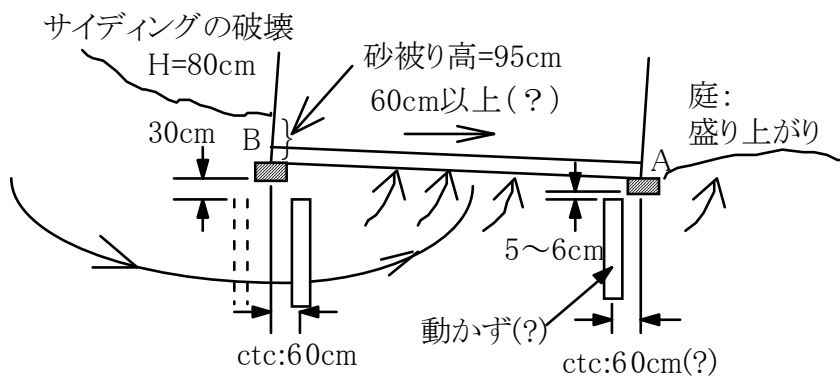


図 3.2.39 柱状改良杭と基礎の関係 (No. 10)

vii)No.11

写真 3.2.26 のように、裏の砂丘の地すべりで前面道路に至るまで敷地全体が圧縮され、家屋は前傾した。写真 3.2.27 は同上写真の赤い屋根の部分の室内であるが、全体的な傾斜とともに、圧縮と突き上げで、部屋が山型に変形した。



写真 3.2.26 砂丘斜面崩壊砂の直撃 (No. 11) 写真 3.2.27 赤屋根部の室内 (右が砂丘側)

viii)No.15

建物は、 ϕ 約 110mm、L=5~6mの鋼管杭 56 本で支持されている。敷地は写真 3.2.28 のように前庭が 20cm~25cm ほど沈下し、前述したように家屋は 15cm ほど前方に移動した(写真 3.2.29)。家屋とともに動いた他の砂丘側の杭の一本を確認したところ、杭頭が 8°程度傾斜していた。



写真 3.2.28 杭支持家屋の前庭の沈下 (No. 15)

写真 3.2.29 砂丘側 (家屋背面) の杭の離れ

ix)No.16

玄関先階段が、周囲地盤よりも二段沈下し（写真 3.2.30）、基礎も割れている（写真 3.2.31）。敷地内に液状化痕が多い（写真 3.2.32）ことから、家屋が沈下して地盤が隆起したと思われる。2004 年新潟県中越地震時にも同様に沈下し、土台を上げて長さ 2m の圧入式鋼管杭支持としたが、杭先端は N 値 8 程度と考えられ、液状化で支持力を失ったのであろう。裏庭の地下水位は GL-11~13cm で、地表は常に湿っている。水道敷設以前は自噴水で生活していたとのことである。



写真 3.2.30 摩擦杭支持家屋の沈下 (No. 16)



写真 3.2.31 基礎の亀裂 (No. 16)



写真 3.2.32 宅地内の噴砂痕 (No. 16)

x)No.17

噴砂孔など液状化の形跡は見られなかったが、建物の砂丘側の北端が相対的に 20cm 程度沈下し、土台をジャッキアップして布基礎との間をコンクリートで間詰めした（写真 3.2.33）。中越地震では噴砂があったとのこと、今回液状化痕が見られないのは隣家 No.18 の排水暗渠の効果という説もあるが、影響範囲も定かでない液状化しなかったとは断定は出来ない。



写真 3. 2. 33 噴砂痕は無いが不同沈下 (No. 17)

xi)No.18

中越地震で全壊後に新築した前掲写真 3. 2. 14 の建物で、図 3. 2. 40 に示すように杭基礎 ($\phi=114.3\text{mm}$ 、 $t=4.5\text{mm}$ 、 $L=6\text{m}$) 88 本、厚さ 1m のセメント系表層改良 ($q_u=545\text{kN/m}^2$)、およびポリコン暗渠 2 本と有孔塩ビ暗渠 1 本による敷地内地下水位低下工(設置深度 130cm ~200cm) が施工されていた。建物は全体的に 12.8cm 沈下したとのことであるが、外見적으로는建物とその外周の犬走りに一部隙間が開き、犬走りが僅かに外側に傾斜している部分がある程度で、宅地や外構と建物の大きな相対変位の形跡は見られない。

杭先端の砂地盤は N 値=31 と大きく、杭長は家屋 No.15 のそれに近いものの、建物は抜け上がっていない。この違いは排水暗渠の効果とも考えられるが、地下水位としては地震前の家屋 No.8 の GL-1.5m と近い点が注目される。暗渠のない裏庭の砂丘法尻付近では地盤が隆起したが、水位は非常に高い (写真 3. 2. 34)。

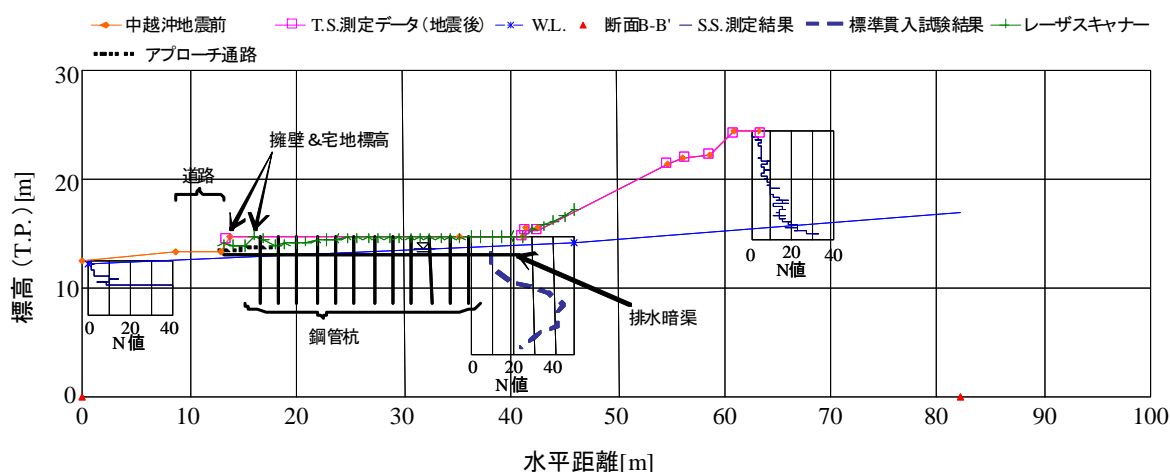


図 3. 2. 40 各種対策工と地盤の断面 (No. 18)



写真 3. 2. 34 斜面法尻の地盤の隆起 (No. 18)

xii)No.19

地下水位は裏庭で GL-75cm と浅く、1964 年新潟地震で壊れて新築し、中越地震で建物の下が液状化し全壊したが、補修で対応した。ヒアリングによれば、今回は液状化しなかったとのことであるが、建物周囲は写真 3. 2. 35 (b)、(d) のように噴砂痕があり、(a)、(c) の様に荒れていて基礎にひび割れが多数入った。



写真 3. 2. 35 噴砂痕と地表の荒れ (No. 19)

xiii)No.II

敷地に不陸はなく、液状化の痕跡は確認されていないが、砂丘斜面のはらみ出しに伴って家屋背面が押され（写真 3.2.36）、玉突き状に前庭の地表面が押された（写真 3.2.37）。特に前庭は、犬走りや玄関先のたたきに沿う土の隆起を除けば、地盤に変状は殆ど見られない。しかし図 3.2.41 の平面図と見取り図、および左下の側面図で右方向が砂丘であるが、これらによれば奥行き 9m ほどの建物が砂丘側に 30cm 程度傾いている。E 通りと e 通りの交点の沈下が大きいが、これは斜面方向から押された基礎が割れて傾いたものである。



写真 3.2.36 砂丘に押された家屋 (No. II)



写真 3.2.37 家屋に押された前庭 (No. II)

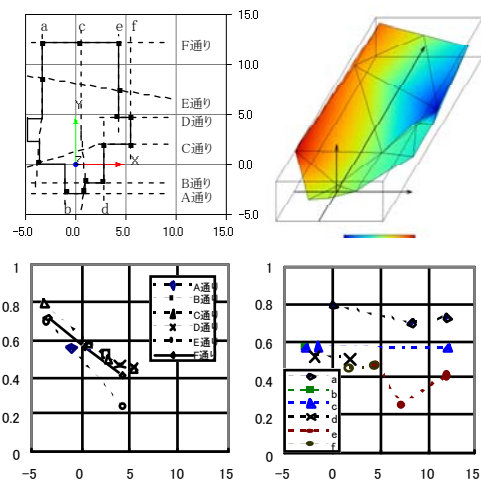


図 3.2.41 砂丘 (右) 側への傾斜 (No. II)

xiv)No.III

写真 3.2.38 のように砂丘斜面崩壊砂が建物を直撃し、高さ 80cm 程度まで砂で覆われた。地震前はかなり広がった裏庭が、大幅に狭まるとともに、家が 10cm 前に出たとの話である。図 3.2.42 によれば、この建物は隣の No. II とは異なって、道路側が 10cm 程度低く前傾している。C 通りと b 通りの交点は隣接測点よりも 30cm ほど低いですが、これは土砂の直撃で基礎が割れ、割れた部分が地面にめり込んでいるためである。



写真 3. 2. 38 斜面崩壊砂の直撃 (No. III)

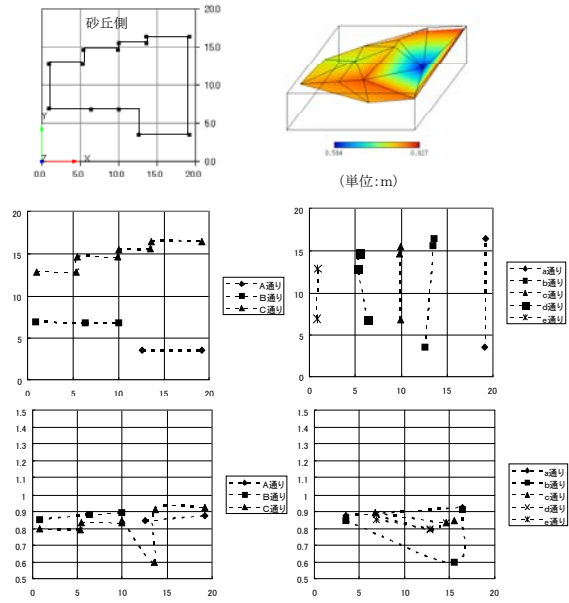


図 3. 2. 42 道路側への傾斜 (No. III)

xv)No.VI

敷地に明確な液状化痕は定かでなかったが、背後の砂丘斜面が崩壊し、比高が最大で約150cmの滑落崖が生じた(写真3.2.39)。この家屋は解体された。



写真 3. 2. 39 砂丘斜面の滑落崖 (No. VI)

xvi)No.X

砂丘斜面の崩壊で建物背後が押された（写真 3. 2. 40）。写真 3. 2. 41 のベランダ下の建物側面で地割れを伴った隆起があるが、圧縮によるものか液状化に関連するものか否か不明である。



写真 3. 2. 40 斜面崩壊土の衝突 (No. X)



写真 3. 2. 41 建物背面の地盤の隆起 (No. X)

xvii)No.XI

液状化痕と断定できる痕跡は無かったが、家屋は道路側にやや傾斜し、基礎にひびが入っている。

⑤地下水位の経時変化

スウェーデン式サウンディング孔による水位測定は、射し水による孔壁の崩壊で誤認しやすい。そこで先端を布で覆ったφ13mm塩ビ管を建て込み、観測井とした。地震後約300日間の水位は、図3.2.43のように殆ど変化しない¹³⁾。No.8の水位は比較的深いが、地震で地盤が隆起したからで、地震前はまだ浅いことに注意を要する。

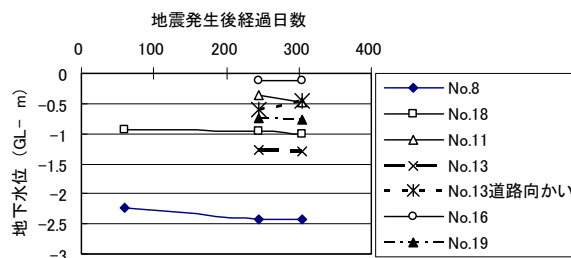


図 3. 2. 43 地震発生後の地下水位の経時変化

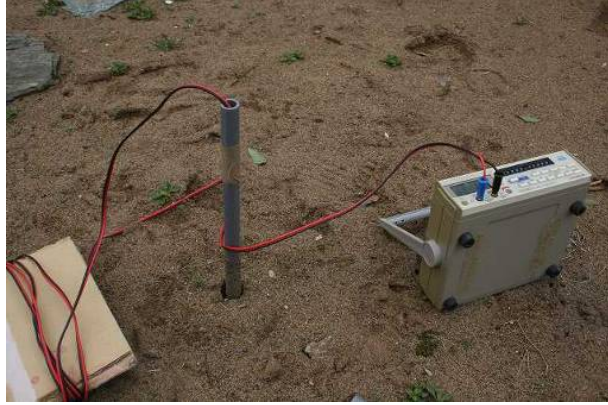


写真 3. 2. 42 水位測定

(5) 2007 年新潟県中越沖地震による柏崎市橋場町の液状化被害事例¹⁴⁾

① サウンディング試験を用いた調査

i) はじめに

柏崎市橋場町では、鯖石川左岸堤防に発生した段差、道路の盛り上がり、住宅地内の噴砂、家屋の損傷等地震による被害が多数発生した。また、2004 年の新潟県中越地震¹⁵⁾の際に液状化による被害を経験した住宅地においても軽微ではあるが液状化による噴砂が再度確認された。

本報告は、橋場町住宅地で発生した液状化が原因と考えられる住宅被害を中心に、地震発生直後に行った現地踏査とその後に行った追跡調査から得られた知見をまとめたものである。

ii) 地形地質概要

図 3. 2. 44 に橋場町の地形図を示す。この地区は、柏崎市のほぼ中央に位置し、北・西境を日本海から十日町市に至る流域面積 277km²、総延長 48.1km の鯖石川が流れ、南は榎原町、東は JR 越後線を挟んで原町に接している。主として住宅地および農業用地として利用されており、約 500 人・150 世帯¹⁷⁾の住民がこの土地で暮らしている。

この地区に沿って流れる鯖石川の上流域は、谷を深くきざんだ急流であるのに対し、下流域は川幅が狭く大きく蛇行してゆっくりとした流れとなる。古くから灌漑用水や生活用水として利用され、重要な役割を担ってきたが、表 3. 2. 8 のように 1897 年（明治 30 年）以降、大洪水による水害が多数発生し、現在に至るまで大規模な河川改修事業を繰り返し実施¹⁸⁾している。1960 年（昭和 35 年）4 月にはこの地区内を大きく蛇行して流れる部分のショートカット工事を行い、図 3. 2. 45 に示す旧河道 A を旧河道 B のように一度変更²⁰⁾している。旧河道 A のカットされた河道は埋め立てられ、1974 年（昭和 49 年）以降、宅地造成・区画整理後に住宅団地として分譲²⁰⁾されている。また、1978 年（昭和 53 年）の 6・26 水害を契機に、1996 年（平成 8 年）以降、県事業で二次改修工事が進められ、現在の鯖石川改修記念公園西側に沿って大きく蛇行して流れる川の直線化・拡幅工事によって、図 3. 2. 45 の旧河道 B から図 3. 2. 44 の現河道に再度河川改修を行った。

この地区は、柏崎平野の中央に位置しており比較的平坦な地形で、地形分類上鯖石川によって形成された自然堤防²¹⁾に分類されており、図 3. 2. 45 に示す地質図から鯖石川記念公園の一部と地区東側の一部を除き、第四紀完新世の年代に堆積した自然堤防堆積物¹⁹⁾が広く分布していることが分かる。

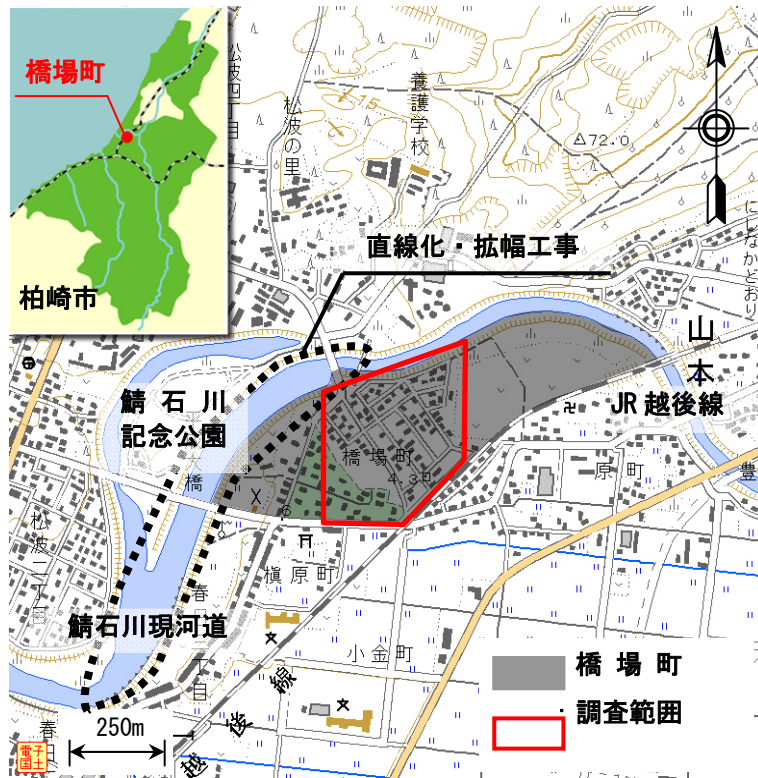


図 3.2.44 橋場町の地形（国土地理院 1/25000 地形図「柏崎」¹⁷⁾ 一部抜粋・加筆）

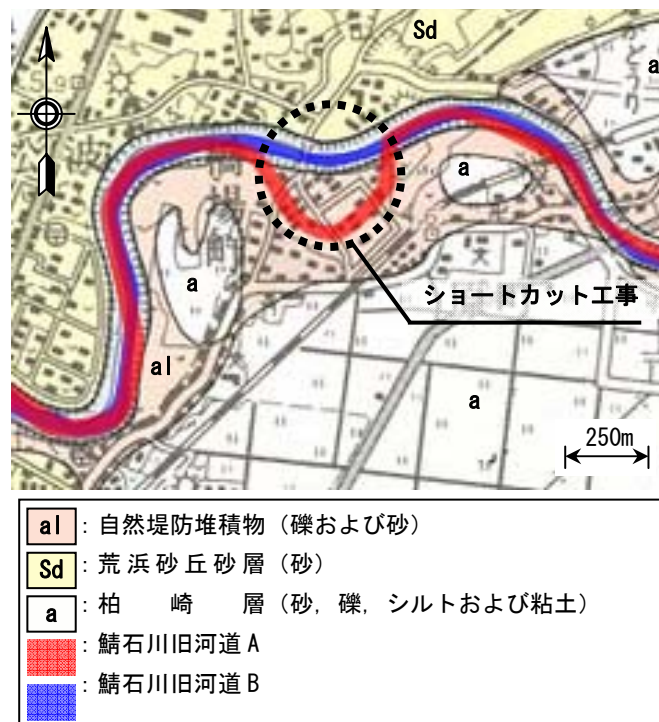


図 3.2.45 橋場町の地質図¹⁸⁾と河道の変遷

表 3.2.8 鯖石川の歴史（明治 30 年以降）

年月	出来事
1897.8	集中豪雨により鯖石川が氾濫
1913.1	集中豪雨により鯖石川が氾濫、石曾根・枇杷島・高田村に被害
1920.1	鯖石川の一部改修工事を実施
1930.2	雪どけで鯖石川の信越線鉄橋、川上・川下の堤防大決壊
1931.7	集中豪雨により鯖石川が氾濫、鯖石川堤防 3 か所決壊、藤井・上条地区に被害
1934.7	集中豪雨により鯖石川が氾濫、鯖石川沿岸泥海と化す
1946.7	集中豪雨により鯖石川が約 1.2m 増水、上条村の堤防約 20 間決壊、耕地冠水、野田村大門橋流失
1950.4	集中豪雨により鯖石川が氾濫・堤防欠壊
1952.7	県下中部一帯の豪雨で、鯖石川・別山川方面に被害発生
1959.7	集中豪雨により鯖石川氾濫、被害の中心は南鯖石・中鯖石
1960.4	鯖石川改修工事により橋場地内の蛇行部分をショートカット、旧河道は埋立。
1960.7	鯖石川が洪水、被害の中心は上条郷
1969.8	集中豪雨により鯖石川氾濫、上条地区堤防決壊、上条・関町に被害発生
1978.6	6・26 水害、柏崎地方に甚大な被害
1996.8	鯖石川下流部改修に向け国の暫定予算事業費 5 億円が認められ直線化・拡幅工事着工
2000.5	鯖石川下流部改修工事によりできた橋場町・榎原町地内の新河道に通水
2002.3	鯖石川河川改修に併せて新設工事を進めてきた松波地区と国道 8 号を結ぶ幹線市道 11-130 号線「平成大橋」「平成橋」と鯖石川改修記念公園が供用開始

iii)被害の調査方法

被害箇所の特定を行うために現地踏査を地震発生直後から断続的に行った。また、平成19年9月1～3日に「地盤工学会中越沖地震緊急調査団スウェーデン式サウンディング調査チーム」の活動の一環として、調査対象の中から図3.2.44に示す赤い線で囲まれた範囲を対象とし、被害が集中している旧河道部を中心に、スウェーデン式サウンディング試験（以下、SWS試験という）および住民への聞き取り調査を行った。

iv)宅地と家屋の被害状況

地震発生直後から行われた家屋、被災家屋応急危険度判定調査の危険・注意住宅の別、現地踏査によって判明した道路損傷部、噴砂発生箇所、参考として中越地震で全半壊した家屋、明治44年に測図された2万5千分の1の地図と2007年版の住宅地図を重ねることによって割り出した旧河道の位置をまとめたものを図3.2.46に示す。

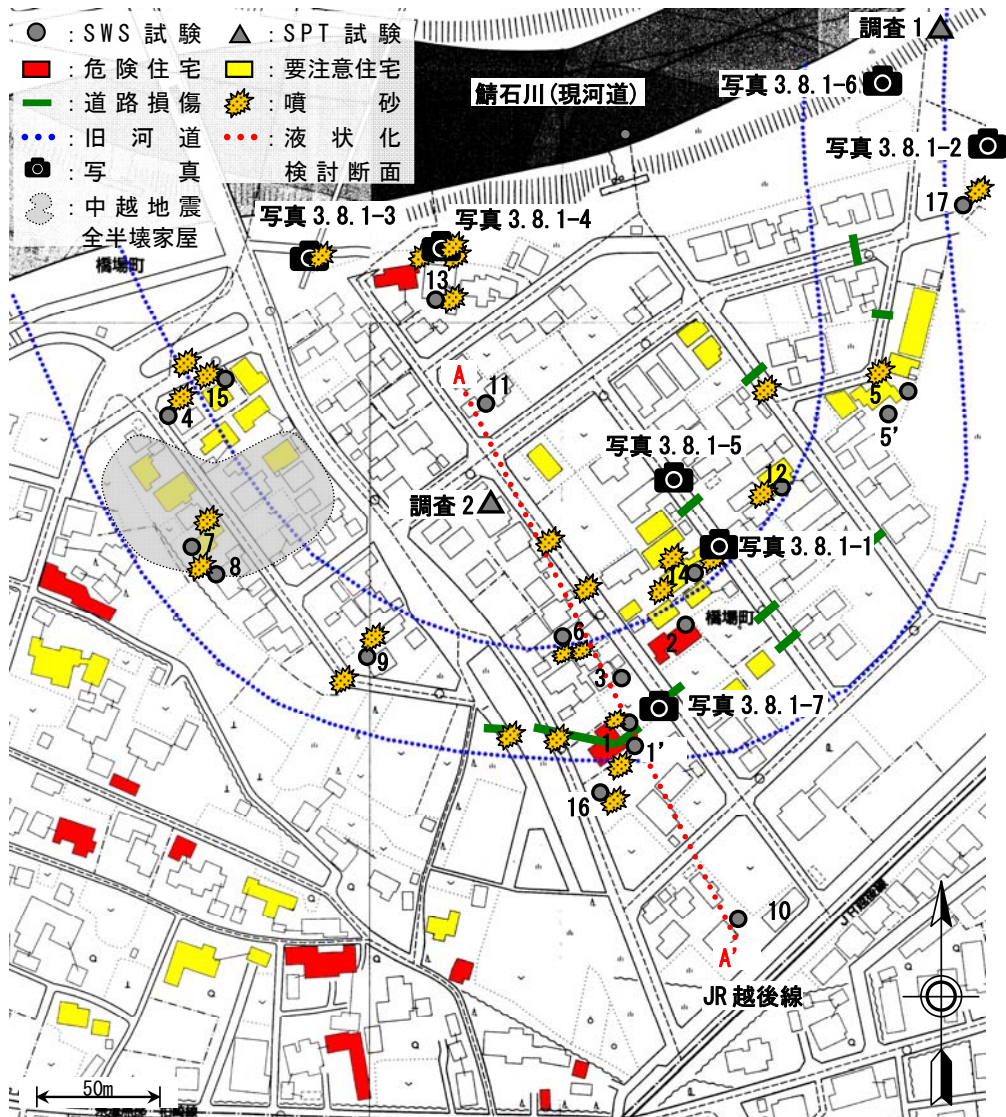


図 3.2.46 橋場町の調査地点と被害の概況

この地区の北側旧河道の内側では、地震発生後に住宅地内や道路等いたる所で**写真 3.2.43** に示すような液状化による噴砂現象が発生した。被災した住民の証言と家屋の外壁に付着した噴砂痕や堆積した砂の量の多さからその現象が激しいものであったことが分かっている。同様に、北東にある農業用地内でも**写真 3.2.44** に示すように噴砂が発生した。図中の噴砂発生箇所を見ると、発生した噴砂は概ね旧河道上に集中していることが分かる。調査地点 13 付近の旧河道以外の箇所にも発生しているが、**写真 3.2.45** に示すように埋戻土の液状化と思われるものや、**写真 3.2.46** のように民家の庭で噴砂が見られたものなど、埋戻土もしくは地表面付近の氾濫堆積物の液状化と思われる。

この地区では、噴砂の他、地震動を受けた地盤の変状に起因したと考えられる道路の盛り上がり (**写真 3.2.47**)、宅地と道路に挟まれた U 字側溝の圧縮破壊、地割れ等が多数散見され、いずれも旧河道上や、旧河道と現河道に挟まれた地域に被害が集中していることがわかる。

図中の**写真 3.2.48** の箇所では、鯖石川新河道堤防の一部で高さ 1.2m の段差が生じていた。段差の直近の堤内地寄り、地震発生後の 8 月 6 日に行った標準貫入試験結果 (以下、SPT 試験という、図中 SPT 試験の調査 1 の箇所) を**図 3.2.47** に示す。図より堤体天端から深度 5m 付近まで N 値が 5 以下で地下水を多く含んだ緩い砂や礫で構成されていることが分かる。段差が発生した箇所のから上流・下流側にわたる SPT 試験データが無いために断言することはできないが、鯖石川現河道の河床が堤防天端から 6m 下がった位置にあることを鑑みると、N=14 の砂礫層 (深度 5~6m) が現河道の河床と同じ深度であり、これより浅い部分は氾濫堆積物や埋め立てられたものと予想され、この部分で液状化が発生し、堤体に沈下が生じた可能性がある。

家屋の被害については、図中の住宅危険度判定の分布から、顕著な液状化被害の見られなかった南西側に危険住宅が集中していることが分かる。

一方で地盤災害が卓越した旧河道の近辺では、図中の**写真 3.2.49** に示すように、ちょうど旧河道の境界にあたると思われる、噴砂をともなう地割れによって分断された家屋を除き、外見上倒壊した家屋や建物の基本構造部分に著しい損傷が確認された家屋はほとんど見られず、要注意住宅が多く分布している。これは、家屋の強度差も考えられるが、液状化した地盤では揺れがそれほど大きくない (加速度が小さい) ことも原因として考えられる。



写真 3. 2. 43 宅地内の噴砂（旧河道上）



写真 3. 2. 44 農業用地内の噴砂
（長岡高専，尾上篤生氏撮影）



写真 3. 2. 45 道路上に残る噴砂（旧河道以外）



写真 3. 2. 46 調査地点 13 付近の噴砂
（長岡高専，尾上篤生氏撮影）



写真 3. 2. 47 道路の盛り上がりと噴砂痕



写真 3. 2. 48 鯖石川新河道堤防の沈下
（柏崎地域振興局提供）

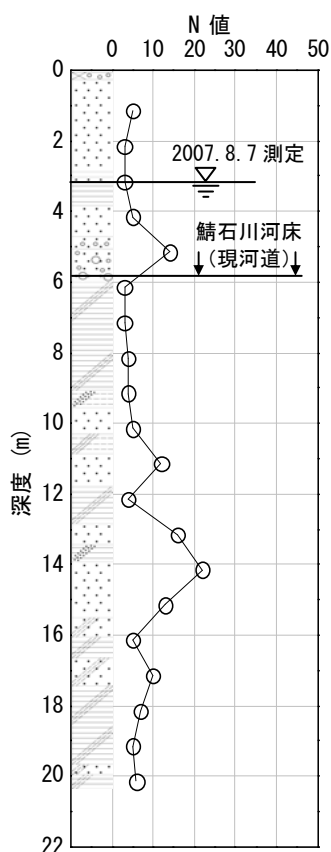


写真 3. 2. 49 住宅地内の地割れと噴砂痕

図 3. 2. 47 鯖石川堤防ボーリング柱状図 (柏崎地域振興局提供)

現地踏査によって明らかとなった宅地と家屋の被災状況および住民へのヒアリング調査の結果を、図 3. 2. 46 に示す旧河道上に建築された家屋とそうでないものに分類し整理したものを表 3. 2. 9 に示す。なお、図 3. 2. 46 の SWS 試験地点番号を家屋の上に記載しているが、この家屋上の番号は表中の整理番号に対応している。また、各調査項目に対する評価の方法として、図中の写真 3. 2. 49 に示す建物に著しい被害が発生した整理番号 1 の家屋を基準として、それぞれを相対的に評価することとした。整理番号 1 の家屋と同様に被害規模の大きいものを◎、比較的軽微なものを△、◎と△の間を○、該当しないものを×とする。

表 3. 2. 9 より本調査で対象となった家屋は、布基礎 2 階建ての一般的な和風住宅がほとんどで、3 階建て以上の家屋、高床式の基礎やべた基礎等の建物の重量が大きくなる基礎形式を有する家屋、バランスの悪い家屋等、軟弱地盤上に建てられた住宅としてしばしば問題となるような家屋が少ないことが分かった。

地震により発生した液状化は、旧河道上で最も顕著で、現鯖石川周辺でも見られた。家屋の被害については、建物の建て方に個体差があるため一概に単純比較することは困難であるが、これも同様に旧河道上に建築された家屋に集中していると読み取ることができる。

また、整理番号 1 を除くほとんどの宅地では、なんらかの地盤被害が発生しているのにも係わらず、建物に発生した被害のほとんどが基礎通風口部のクラックや外壁のはがれ等、外見上軽微なもので住民の生活を脅かす程の大きな被害に至らなかった点が特徴的である。旧河道上で被災した家屋の被害状況を見ると必ずしも 2004 年の新潟県中越地震で被災した家屋に被害が集中しているわけではないことが図 3.2.46 と表 3.2.9 から読み取れる。中越地震時と比較して地震動が大きかったことが被害拡大に繋がったのではないかと推測される。中越地震で一度被害を受けた家屋もほぼ旧河道上に位置しており、その家屋の中で建て替える際に地盤改良・補強を施したものについては被害が軽微であったという大変興味深い結果が得られたため今後更なる検討が必要である。

この地区の住民が日頃感じている問題点を集約すると、河川改修によりかなり改善されたものの、湿気が多い、水はけが悪い、豪雨時に道路がすぐに浸水するといった水に関する苦情が多い。鯖石川の旧河道を埋めてできたこの地区では、慢性的に地下水位が高い状態にあることが予想され、広域的な液状化災害を引き起こした要因の一つとして考えられる。

表 3.2.9 ヒアリング調査結果一覧（整理番号は図 3.2.46 の家屋上の番号に対応）

整理番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
地形的分類	旧河道上に建築された家屋									旧河道以外に建築された家屋						
家屋の概要	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	
家屋の階数	2	2	2	2	2	2	2	3	2	2	2	2	2	2	2	
屋根の様式	瓦	瓦、トタン	瓦	瓦	瓦	瓦	セメント瓦	トタン	トタン	トタン	瓦	瓦	瓦	トタン	トタン	
基礎の形式	布	布	布	布	布	布	布	べた	布	布	布、独立	布	布	布	布	
地盤改良、基礎補強の有無	×	×	×	×	×	×	×	RES-P、耐圧板	湿式柱状	×	×	×	×	×	湿式柱状	
中越地震での被害	-	×	×	×	下水管	駐車場にクラック	車庫にクラック	液状化(建替え)	不等沈下(建替え)	×	×	×	×	×	×	
地盤の被害	噴砂の有無	◎	◎	△	△	○	◎	◎	△	△	×	×	△	○	◎	△
地割れの有無	◎	○	△	×	○	○	×	×	×	×	×	△	×	×	×	×
地盤沈下・側方流動の有無	◎	○	△	△	○	○	×	×	○	×	×	×	×	○	×	○
家屋の被害	家屋の偏心・地盤へのめり込みの有無	◎	○	×	×	○	○	○	×	×	×	×	×	○	○	×
基礎・室内の変状の有無	◎	○	×	×	○	×	×	×	×	×	×	○	×	○	×	×
屋根・外壁等の被害の有無	◎	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
駐車場・塀・家屋附帯設備の被害	◎	×	○	×	○	○	×	○	○	×	×	○	○	○	○	○
日常生活の問題点	湿度に関する事柄：床下の湿気が多い、大雨の時に湿気が多い 水に関する事柄：水はけが悪い、豪雨時に道路が浸水しやすい															

v)地盤調査

地盤特性と被害の関係および液状化層を特定することを目的として SWS 試験を実施した。調査地点は、**図 3.2.46** 中の調査地点マークのある 17 地点とし、液状化による被害が集中している旧河道上にある宅地を中心に計測を行った。また、各調査地点において明確な噴砂痕が確認された場合は、噴出した砂をサンプリングし、室内試験を実施した。

SWS 試験は、JISA1221-2002「スウェーデン式サウンディング試験方法」²²⁾に準拠し、載荷重をおもりにより、回転貫入を人力（**写真 3.2.50**）で行った。試験は、貫入量 5cm 当たりの半回転数が 50 回転以上となる場合、または最大深度 10m に達した段階で終了することとした。なお、礫当たりにより貫入不可能となった場合は位置を変更して再度計測を実施することとした。土質判別の方法は、回転貫入の過程で発生する貫入音やロッドに伝わる感触、ロッドやスクリーポイントに付着した土を目視することで行った。また、地下水位の特定方法は、試験終了後に、ロッドに付着した地下水を確認するか、試験後一定時間経過後に細径の鉄棒を挿入し、鉄棒に付着した地下水を確認することで行った。



写真 3.2.50 試験状況（人力による回転貫入）

vi)地盤調査結果と地盤の特徴

SWS 試験によって得られた深度、 W_{sw} 、 N_{sw} の関係から予測される換算 N 値²²⁾および土質柱状図の中で代表的なもの（調査地点 No.5、11）を図 3.2.48 に示す。なお、対象とする地区の標高差が小さいため道路を基準高として整理した。また、SWS 試験の調査地点 No.11 の付近で行われたボーリング調査（図 3.2.46 中の SPT 試験の調査 2）より得られた深度と N 値の関係、土質柱状図を参考値として付した。図中の SPT 試験で得られたデータを見ると、深さ 2m から 5m 付近まで $N=20$ 程度の礫混じり砂層、深さ 5m から 11m 付近まで $N=2$ 程度の非常に軟弱なシルト層で構成されていることが分かる。一方で、SPT 試験の付近で行った SWS 試験 (b) より得られたデータを見ると、土質分類の判別方法が SPT 試験とは異なり、簡易なものであるため誤差を含むが SPT 試験と同様に、上位より粘土主体の表層土、礫混じり砂、粘土と判別されており、概ね当該地盤の特徴を捉えていると言える。しかし、換算 N 値と深度の関係については、礫混じり砂層において SWS 試験の換算 N 値が、SPT 試験の N 値と比較して低い値を示す傾向にあることが分かる。地下水位に関しては、調査を行った時期が異なるものの、ほぼ同程度の値を示した。

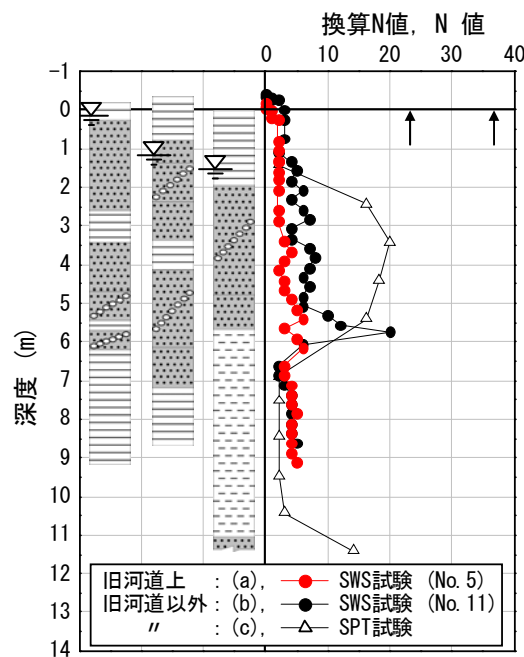


図 3.2.48 SWS と SPT 試験結果

図 3.2.46 から旧河道上と判断される調査地点 No.5 とそれ以外と判断される No.11 を比較すると、粘土主体の表層土以深、深度 4.5m 付近まで No.11 が礫混じり砂層で構成されているのに対し、No.5 では一部粘土を含む砂層で構成されていることが分かる。また、深度 6m まで No.5 の換算 N 値が No.11 に比して、若干であるが相対的に低いことが分かる。地下水

位に関しては道路を基準とすると No.5 の方が浅い位置に推移することが分かった。SWS 試験より、大きな差はないものの、旧河道上と判断される調査地点 No.5 は、地下水位が高く、緩い砂が堆積した地盤であることが予想され、旧河道以外の地点と比して液状化し易い状況にあると考えられる。

代表的な調査地点において、確認された噴砂痕からサンプリングした砂を用いた土粒子の密度試験 (JISA1202) ²³⁾および粒度試験 (JISA1204) ²³⁾で得られた物理特性をまとめたものを表 3.2.10 に、粒径加積曲線を図 3.2.49 に示す。採取した噴砂は、いずれの調査地点においても粒径が 0.1 から 1mm の狭い範囲に集中しており、液状化が発生する可能性の高い粒径の範囲に含まれている。表より、均等係数 U_c の値が全て 10 以下となっていることから分級された均質な砂であるという特徴を有することが分かる。

表 3.2.10 SWS 試験箇所で採取した噴砂の物理特性

調査地点	1	5	8
土粒子密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.745	2.700	2.710
均等係数 U_c	2.8	3.3	3.3
曲率係数 U_c'	1.2	1.7	1.7
細粒分含有率 F_c	7.2	7.6	7.3

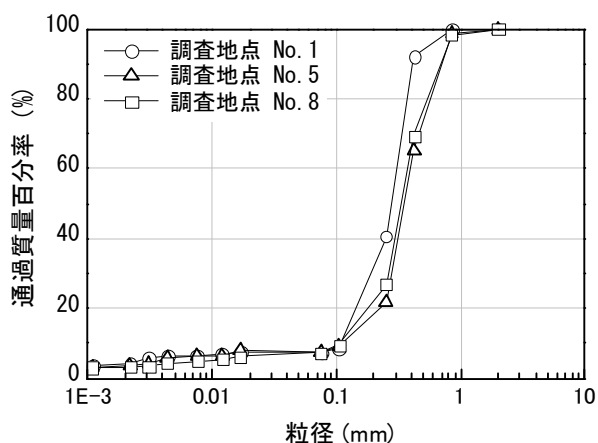


図 3.2.49 SWS 試験箇所で採取した噴砂の粒径加積曲線

SWS 試験で求めた換算 N 値、採取した噴砂の室内試験結果を用いて表 3.2.11 に示す計算条件のもと、図 3.2.46 中の液状化検討断面 A-A' について液状化抵抗値 F_L の計算を行い、調査データから液状化層の特定を試みた。なお、液状化抵抗値 F_L は、道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編（平成 8 年）²⁴⁾にもとづいて計算を行い、SWS 試験から礫混じり砂層で換算 N 値と N 値の相関性が乏しいと考えられるが計算上はそのままの値を用いた。また、粘土と判断された層については非液状化層として計算から除外した。

液状化検討断面 A-A' に沿って行った SWS 試験の各調査地点に関する深度と液状化抵抗値 F_L の関係図および土質柱状図を図 3.2.50 に示す。なお、 F_L 値は図 3.2.48 同様、道路を基準高として整理した。礫混じり砂層もしくは砂層（これらの砂層に挟まれた薄い粘土層も含める）をグレーで色分けした。この図より旧河道では地表面付近から砂層が分布しているのが分かる。

地下水位で深の礫混じり砂層もしくは砂層において概ね $F_L < 1$ となり液状化する層を含む地盤であることが分かった。深度と F_L 値の関係は、地割れや噴砂を伴って建物に著しい被害が発生した旧河道上と判断される調査地点 No.1 や旧河道付近の調査地点 No.6 と、被害が見られなかった旧河道以外と判断される調査地点 No.10、11 と比較すると、No.1、6（旧河道上）の $F_L < 1$ と計算された礫混じり砂層が、No.10、11（旧河道以外）よりも高い位置にあること、No.1、6（旧河道上）の礫混じり砂層の中に液状化対象外となる薄い粘土層を含まないこと等の差異が見られる。ただし、SWS 試験から得られる情報から計算された F_L 値を用いて、旧河道とそれ以外の箇所との差異や、液状化層を正確に特定することは困難である。1960 年以降旧河道を埋め立てることによって造成されたこの地区の詳細な施工記録が残されていないため断定することは難しいが、図 3.2.48 および図 3.2.50 から、旧河道上の宅地では、旧河道以外の宅地と比べて相対的に地下水位が浅く、かつ、緩い連続した液状化する可能性の高い礫混じり砂層が含まれる土質が地表面付近に存在している。参考として、今回調査した全箇所の SWS 試験結果を図 3.2.51 に示す。

表 3.2.11 液状化判定計算条件

項目	設定値
地盤種別	Ⅱ種地盤
地域別補正係数 C_z	0.85
計算用設計水平震度 k_{hc}	0.3
地震動タイプ	レベルⅡ(タイプⅠ)
補正係数 C_w	1.0

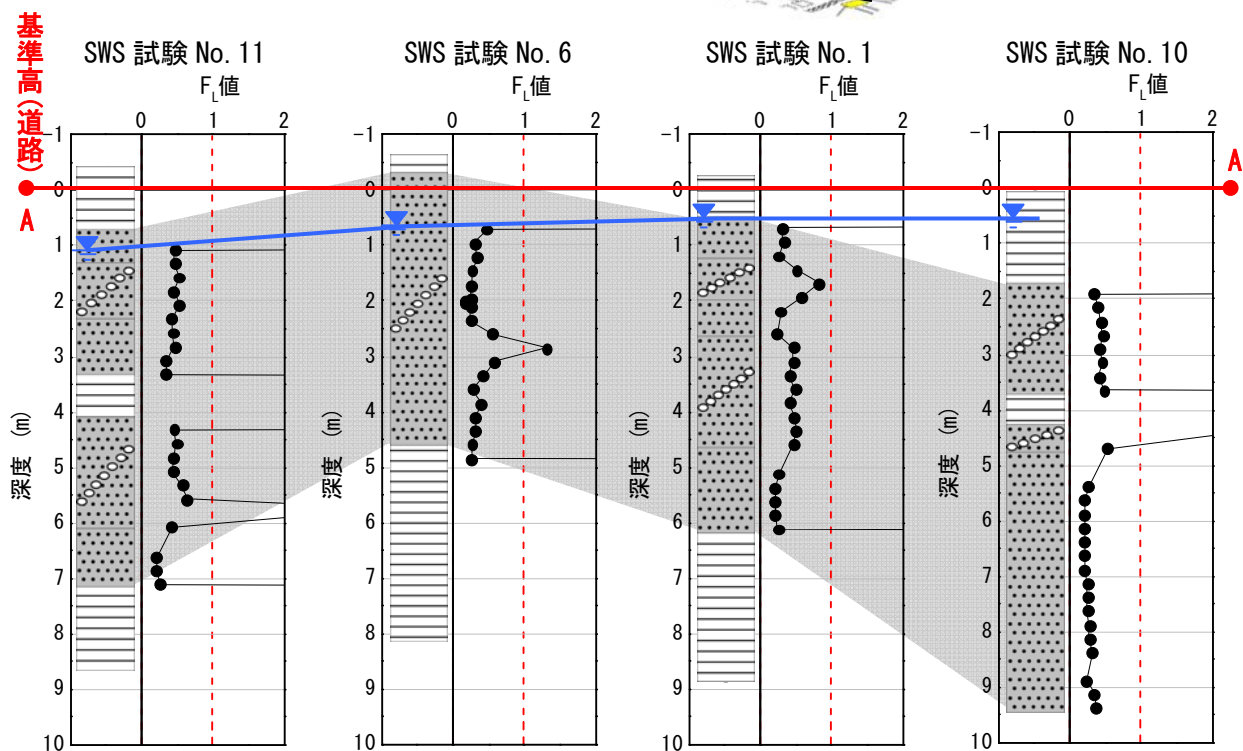
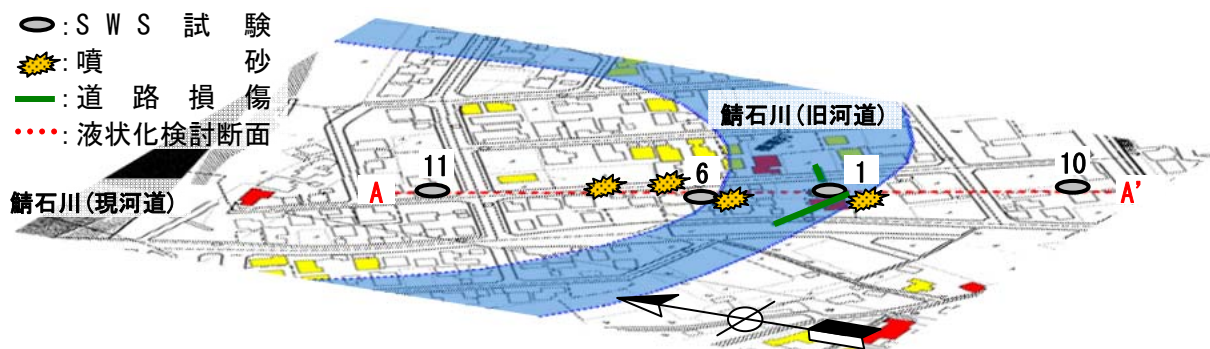
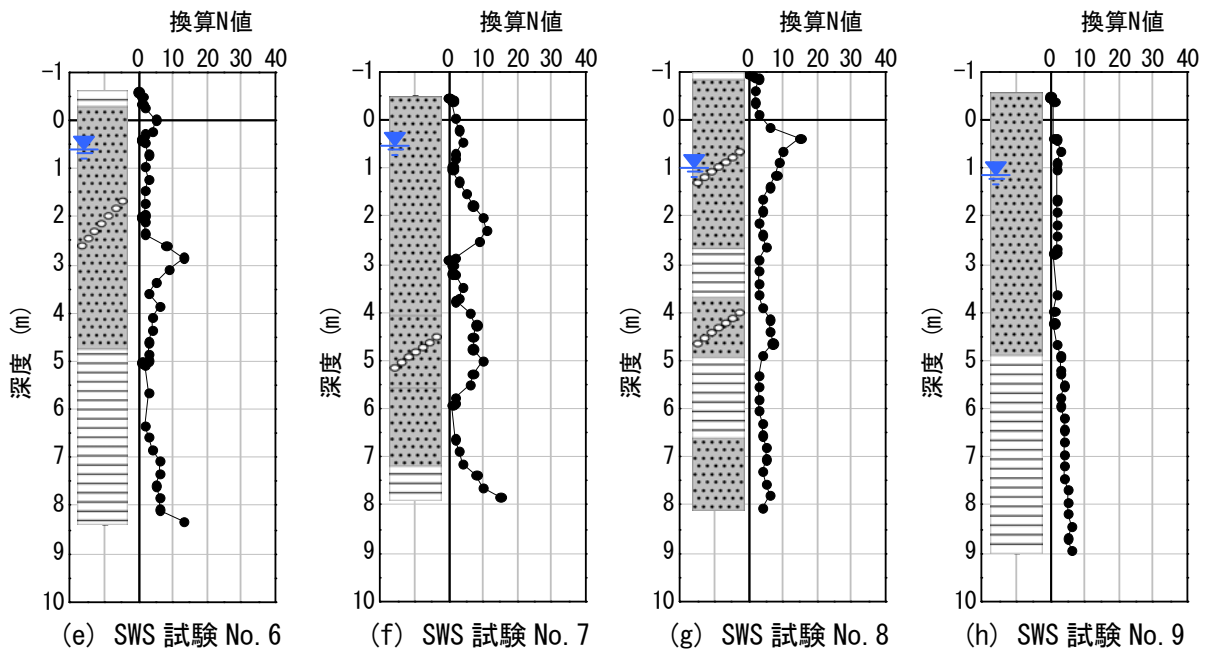
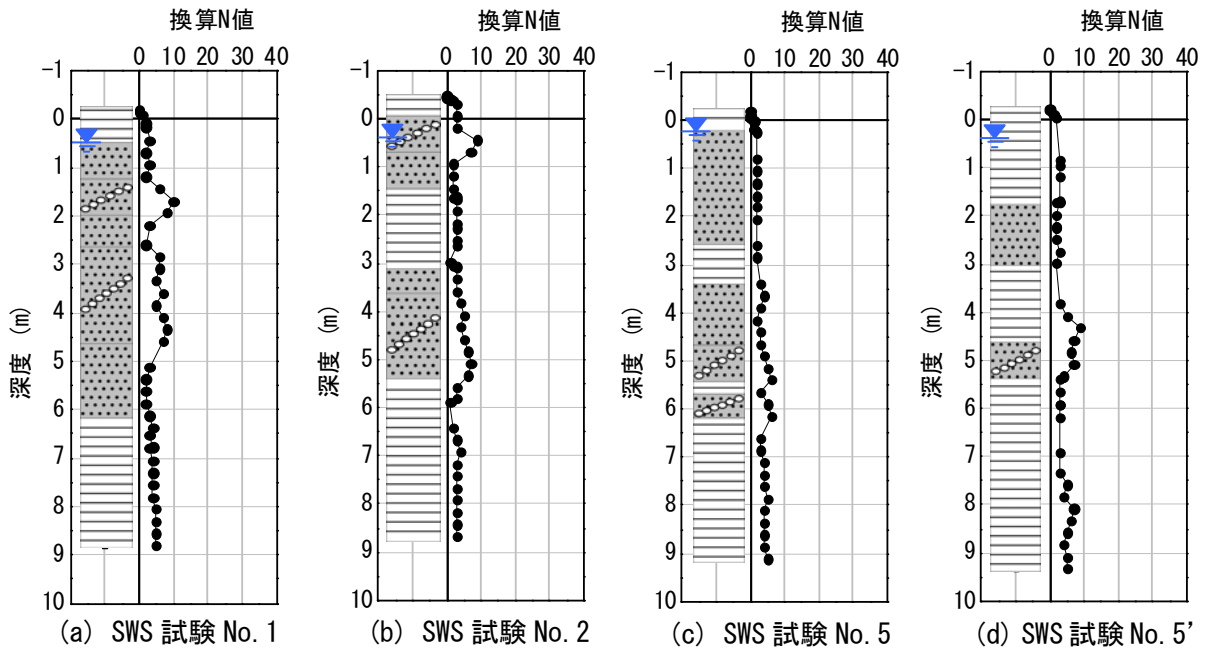


図 3.2.50 液状化検討断面 A-A' の液状化抵抗値 F_L



- ・ SWS 試験 No1'深さ 3.07m で礫当たり貫入不能 (地下水位 : 深さ 0.6m)
- ・ SWS 試験 No3深さ 1.10m で礫当たり貫入不能 (地下水位 : 深さ 0.3m)
- ・ SWS 試験 No4深さ -0.03m で礫当たり貫入不能 (地下水位 : 深さ 0.7m)

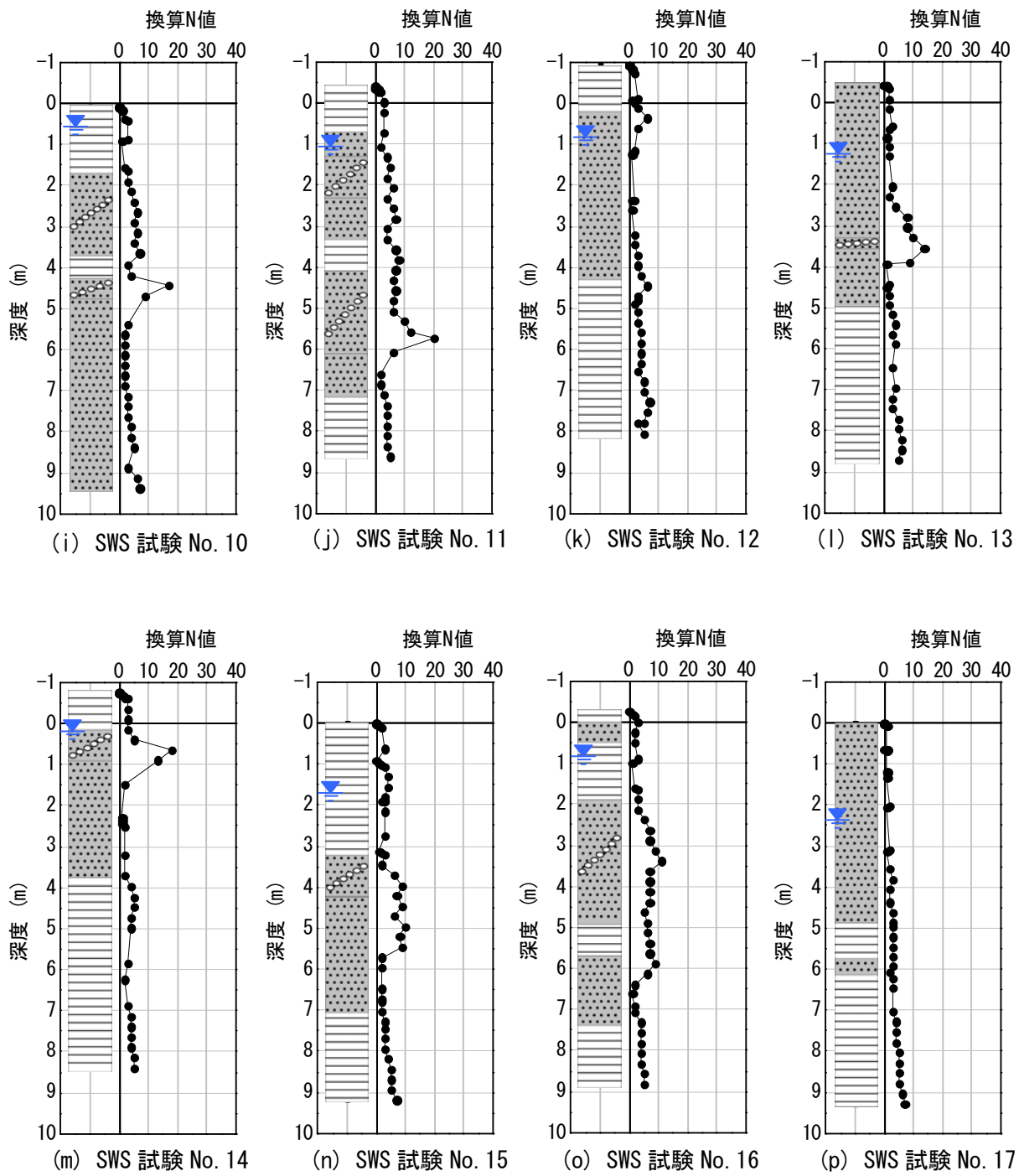


図 3.2.51 SWS 試験結果 (道路を基準高として整理)

vii)地下水位と被害の関係

SWS 試験の各調査地点における地下水位の測定結果を図 3.2.52 に示す。図中に記した値は基準高となる道路からの深さを意味し、深さ 1m を境に色分けして標記した。図より図 3.2.46 に示す噴砂の被害が集中した、旧河道南東側および西側（中越地震で一度被害を経験）において地下水位が基準高から 1m 以内と浅い位置に推移していることから、地下水位と被害になんらかの関係があると推察される。そこで、表 3.2.9 中の地盤および家屋の被害を被害度数（◎：3、○：2、△：1、×：0）として数値化し、その合計値と地下水位の関係をまとめたものを図 3.2.53 に示す。図より、地下水位が浅いほど地盤や家屋に及ぼす液状化に起因した被害が大きくなるという傾向にあることが分かった。これは 1983 年の日本海中部地震における秋田市新屋松美町や、2000 年鳥取県西部地震による米子市安倍彦名団地²⁵⁾の傾向と同様の結果である。

viii)まとめ

橋場町で行った現地踏査および SWS 試験から得られた知見を以下に示す。

現地踏査から

- a)橋場町の液状化に起因した地盤被害および道路の被害は旧河道付近に集中する傾向にあった。
- b)旧河道上に建築された家屋の中で地盤改良・補強を施したものについては、地盤と家屋の被害が軽微であった。

SWS 試験から

- c)液状化により噴出した噴砂は、分級された均質な砂で、液状化が発生する可能性の高い粒径の範囲に含まれる。
- d)旧河道上の宅地では、旧河道以外の宅地と比べて相対的に地下水位が浅く、緩い連続した液状化する可能性の高い礫混じり砂層が地表面付近に分布しており、液状化し易い状況にあると推測される。
- e)地下水位が浅いほど地盤や家屋におよぼす液状化に起因した被害が大きくなるという傾向にある。

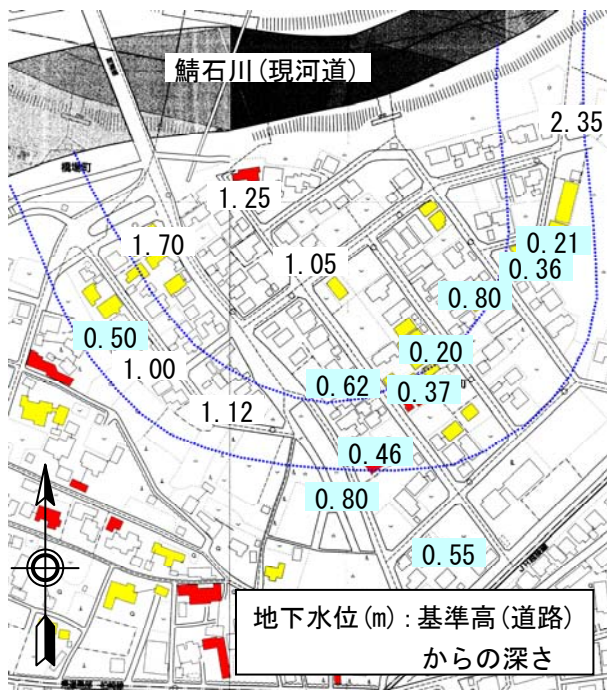


図 3.2.52 橋場町の地下水位分布

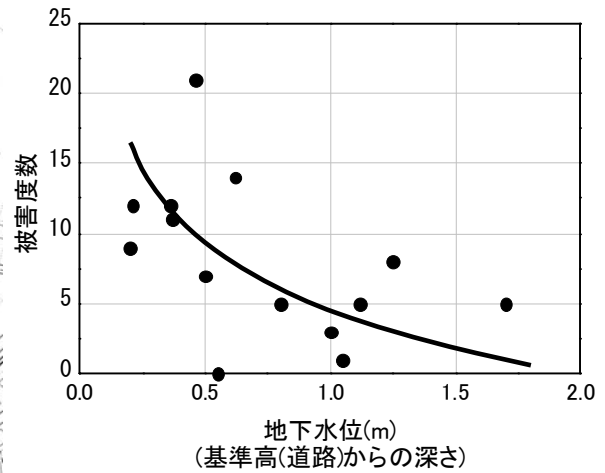


図 3.2.53 地下水位と被害の関係

②物理探査を用いた調査

i)概要

新潟県中越沖地震では鯖石川流域で液状化被害による宅地地盤の被害が発生した。鯖石川に東側の橋場町では 3 年前に新潟県中越地震でも液状化による被害を受けており、短期間に地震による液状化被害を繰り返した。同地区は河川改修による旧河道の埋戻し地盤が混在する地盤の特徴がある。本項では中越沖地震の建物被害について地震発生直後の応急危険度判定を基に被害の面的分布、建物の不同沈下量・傾斜角計測結果と地盤調査との相関関係について報告する。

ii)地盤構造

図 3.2.54 に橋場地区の平面図と宅地応急危険度判定の結果、および建物の傾斜方向・不同沈下量・傾斜角計測結果を示す。この地区の特徴は図に示すように旧河道（図中に水色で表示）の埋戻し地盤が存在する点にある。旧河道では液状化が確認され、危険宅地はほぼ旧河道に沿う地点で点在している。同地区において図 3.2.54 に示す測線にて表面波探査試験、●の位置にてスウェーデン式サウンディング試験（SWS）、ボーリング試験を実施した。

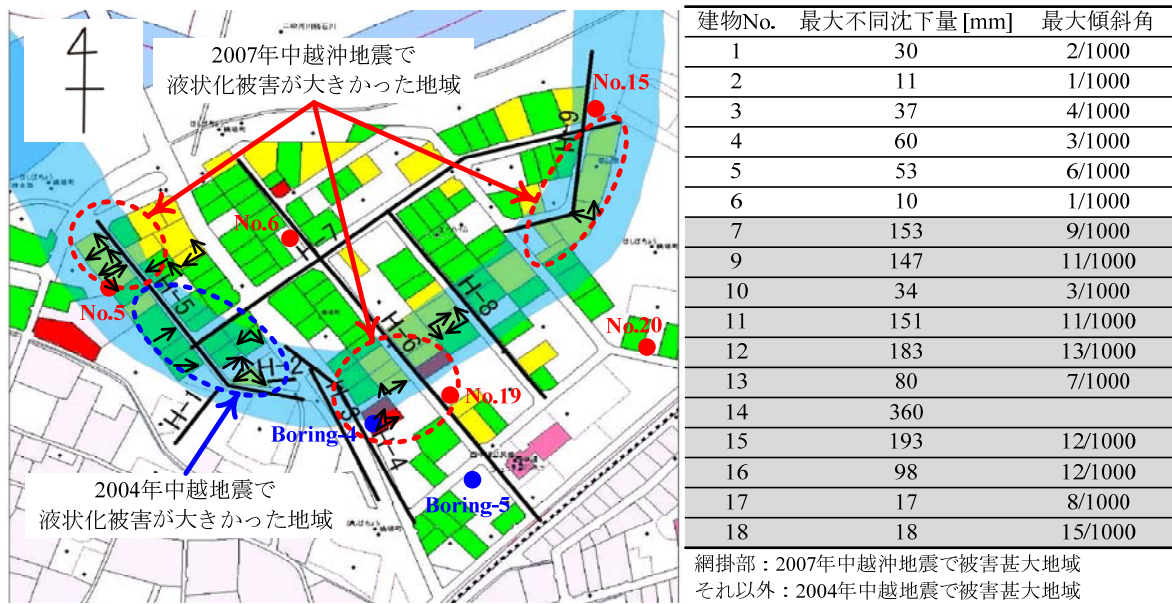


図 3. 2. 54 橋場町の被害状況・地盤調査箇所・建物の不同沈下量計測結果

図 3. 2. 55 に (独) 建築研究所と共同で実施した表面波探査試験 (H-8 : 旧河道の中央横断方向、H-1 : 旧河道の西地区横断方向、H-5 : 旧河道の縦断方向)、SWS の結果²⁶⁾を合わせて示す。H-5 に示す旧河道縦断の試験結果より、旧河道は S 波速度が 100m/s 程度の緩い砂質土により構成されている。旧河道の外周は、旧河道横断方向の H-1 では S 波速度が 80m/s 程度、H-8 でも旧河道外は南側にて低速度である。周囲のボーリング調査などから深度 3~5m 以深は概ね粘性土主体であったことから、同地区の旧河道は周辺を粘性土地盤で囲まれる構造を有すると推測され、この地盤特性が旧河道地盤の液状化被害を大きくしたと推測できる。以上より、同地区は潜在的に液状化の可能性のある地盤であるといえる。ただし、旧河道でも場所によって S 波速度が異なり、複雑な土質構成になっていると思われることから、S 波速度や SWS 結果のみで直接液状化被害の有無に結びつけることはやや困難である。

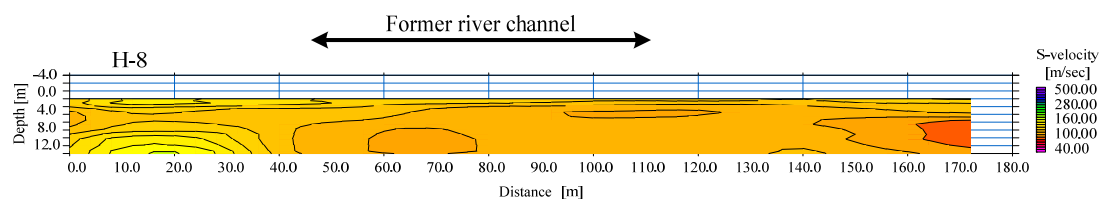


図 3.2.55(a) H-8 表面波探査データ (北より南方向)

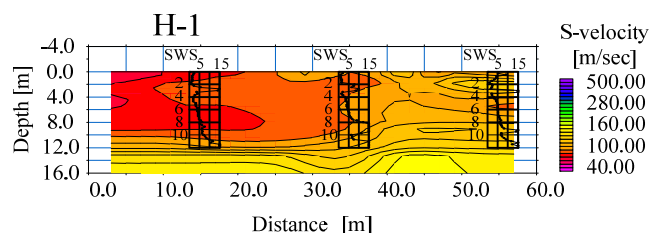


図 3.2.55(b) H-1 表面波探査データ (西より東方向)

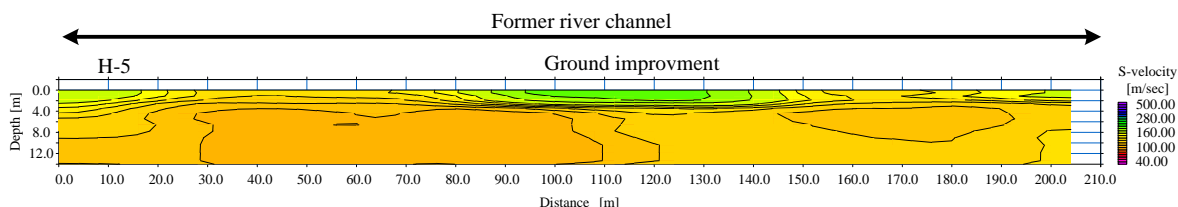


図 3.2.55(c) H-5 表面波探査データ (北より南方向)

iii)建物の不同沈下量および傾斜角

続いて、建物の傾斜方向をみると、旧河川の中心に向かって傾斜しているように見えるが、限られた数の調査結果であり、また建物の重心位置にも依存することから明確な結論まで得られるに至っていない。次に、最大不同沈下量・最大傾斜角を見ると、中越地震以降に建設された数棟の戸建て住宅（建物 No.1、2、6）に関しては、柱状改良や鋼管杭を設置していたため、今回の地震で被害が大きかった地域（建物 No.7～18）よりも相対的に小さかった。H-5 は旧河道の S 波速度を示すが、中央付近で地表面地盤の S 波の大きい地域が確認される。この地域は中越地震の宅地被害地域に一致しており、地盤対策の効果が現れたと考えられる。

iv)まとめ

以上の調査結果をまとめると以下の知見が得られる。

- a) 旧河道は、S 波速度が 100 m/s 程度の緩い砂質土により構成されている。ただし、旧河道でも場所によって S 波速度が異なり、複雑な土質構成になっていると思われる
- b) 旧河道の外周は、S 波速度が 80 m/s 程度と低速度である。
- c) 旧河道上ならびに外周で実施したボーリング調査の結果、旧河道の南側は粘性土地盤を有すると推測される。旧河道地盤の被害が大きい原因は、埋戻し土の性質および旧河

道の南側の地盤が粘性土である地質構造が指摘される。

d) 新潟県中越地震において液状化被害が甚大であった箇所では、その後の適切な規模・方法による液状化対策が施されたことで中越沖地震では被害が抑制された。

e) 液状化対策として実施された地盤改良実施個所において、周辺地盤と比較して速い S 波速度を観測したことより、表面波探査試験においてその効果を評価することができた。

(6) 2007年潟県中越沖地震による柏崎市松波2丁目の液状化被害事例²⁷⁾

①地形の概要

松波2丁目は、JR越後線東柏崎駅の北方約1.5kmに位置する“松波住宅団地”である。この地域は鯖石川河口に近い右岸にあって、荒浜砂丘の後背地に位置している。かつてやや高かった北側の砂丘砂を削って南側の鯖石川の氾濫原（当時松林）に盛土し、昭和48年から51年にかけて宅地化された。

図3.2.56に、調査地周辺の地形分類図を示す。これによると、鯖石川最下流域に位置する調査地の地形は、松波団地の北西部は砂丘に、南東部は鯖石川両岸に発達する自然堤防に分類され、図3.2.57に示す明治43年旧版地形図でもほぼ同様の地形を読み取ることができる。地形分類図の自然堤防分布を地震直後の航空写真3.2.51に投影すると鯖石川が大局的には、東南東-西北西方向の流向形態にあることが分かる。同写真の中の松波2丁目を拡大して見た写真3.2.52によれば、後述するようにやや緩い砂質土が分布する自然堤防領域は、地震による液状化による噴砂の堆積によって、主として東半分の道路が全面的に明るい黄褐色を呈している。

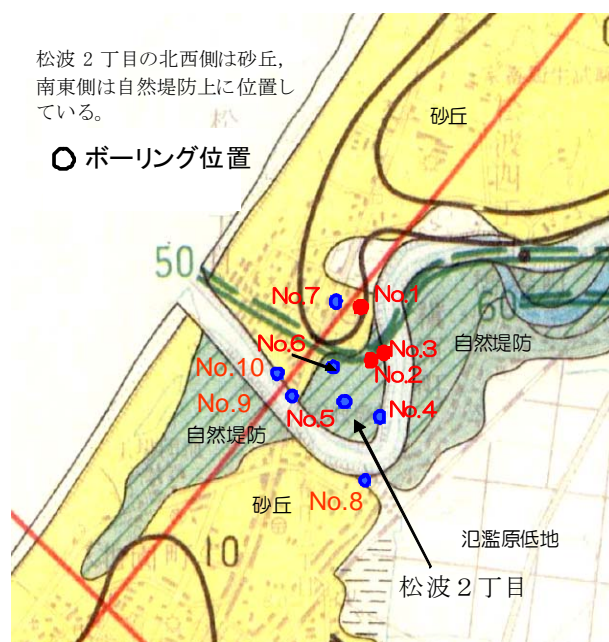


図3.2.56 調査地周辺の地形分類図（青丸：自治体調査、赤丸：民間調査）
（文献²⁸⁾に一部加筆）

明治43年

鯖石川は柏崎平野内を北西方向に流下し、別山川と合流した後、砂丘に阻まれ流路を南西に変える。その後、砂丘を避けるように蛇行しながら、松波地域付近で日本海に注ぐ。

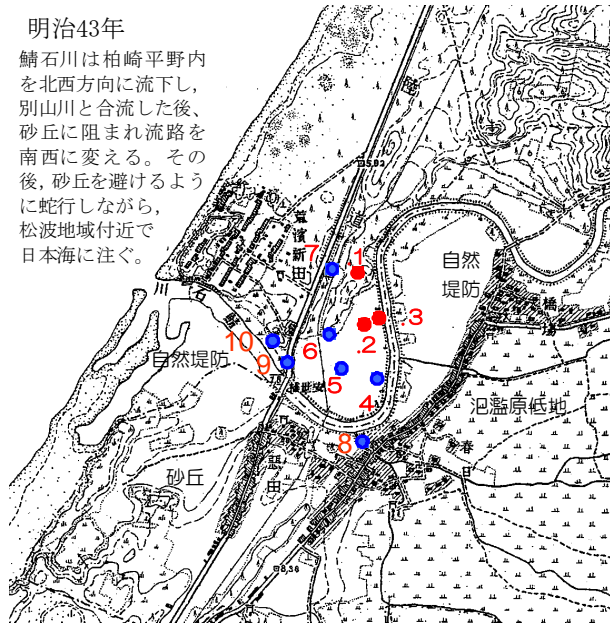
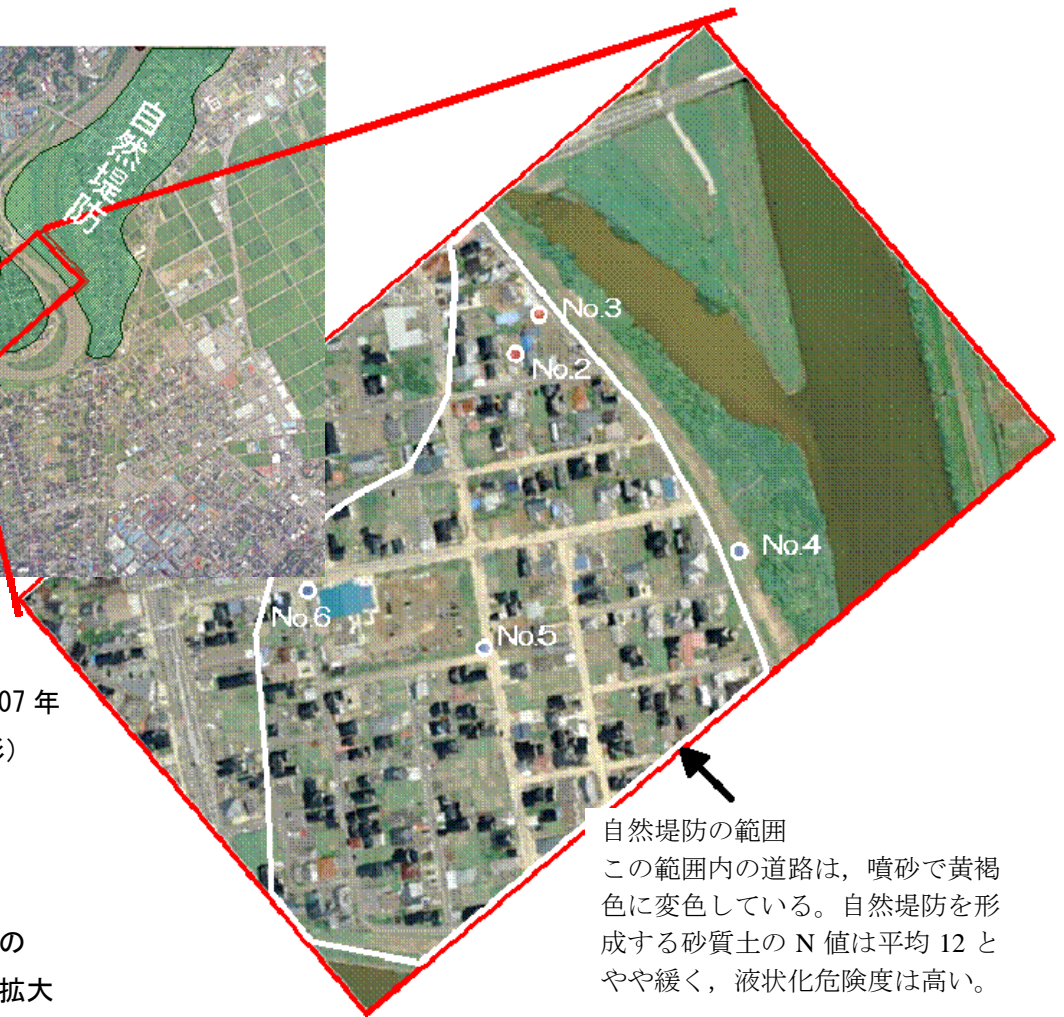


図 3.2.57 明治 43 年の地形図



写真 3.2.51
地震直後の
航空写真（2007年
7月19日撮影）

写真 3.2.52
同上航空写真の
松波 2 丁目の拡大



自然堤防の範囲
この範囲内の道路は、噴砂で黄褐色に変色している。自然堤防を形成する砂質土の N 値は平均 12 とやや緩く、液状化危険度は高い。

②地盤と土質の概要

i)地層区分

松波2丁目とその周辺のボーリング資料の出典は表3.2.12の通りであり、これらから作成した地層想定断面図を図3.2.58に示した。当該地の地層構成は、表3.2.13に示すように、N値や土質の状況等から盛土を含め7層に区分できる。

表 3.2.12 ボーリング資料一覧

No.	調査時期	資料出典	標高(推定)
①	07/8	(株)佐藤住建調査	5.2
②	07/8	(株)佐藤住建調査	4.0
③	07/9	ミサワホーム調査	4.0
④	07/8	鯖石川災害復旧調査	4.5
⑤	76/6	松波体育館建設資料	4.0
⑥	84/11	下水枝線建設資料	3.75
⑦	86/11	污水幹線建設資料	5.12
⑧	67/7	北陸弘済会「新潟県平野部の地盤図集」	4.0
⑨	91/7	鯖石川下水道関連	3.21
⑩	07/7	鯖石川災害復旧調査	5.0

表 3.2.13 地層層序

地質時代	地層区分・記号	N 値					
		最小値	最大値	平均値	資料数	標準偏差	
第四紀	盛土 B	1	11	3	9	3.206	
	新期砂丘砂層 Asd	4	39	21	33	9.128	
	砂質土層 As1	5	30	12	11	7.047	
	粘性土層	上部 Ac1-1	2	4	3	5	0.894
		下部 Ac1-2	5	10	8	10	1.337
	不均質土層 Aall	7	23	11	15	4.008	
	更新世 洪積層	古砂丘砂層 Dsd	14	50	42	30	9.587
		安田層 Dm	9	46	17	44	7.465

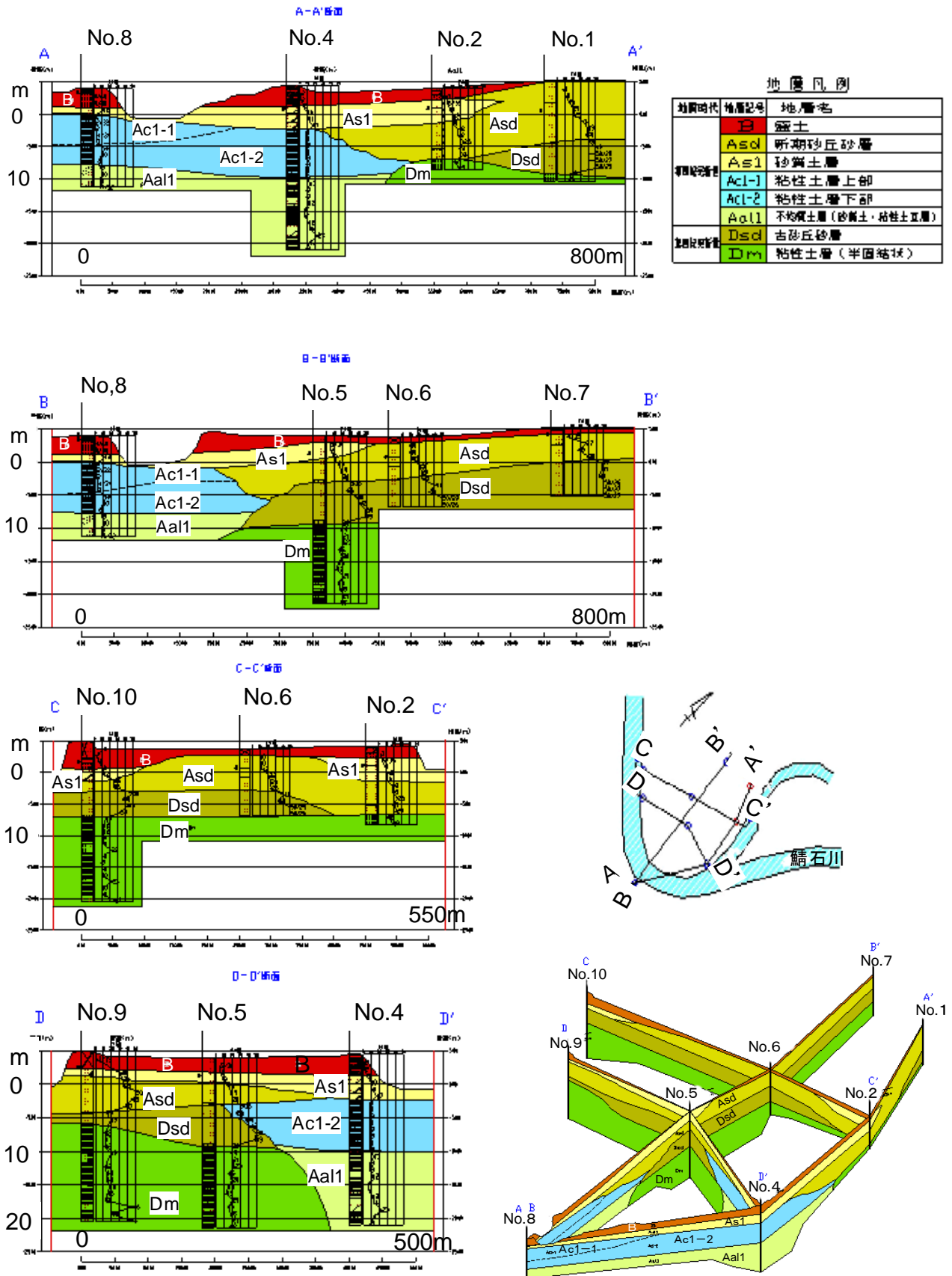


図 3.2.58 松波 2 丁目の地層想定断面図

ii)分布状況

松波 2 丁目の北西側は、ほぼ砂丘砂 Asd、Dsd 層によって構成され、砂丘の下位には半固結状粘土を主体とする安田層（洪積層）が分布していると考えられる。一方、南東側に分布する砂質土（礫混り）As1 層や粘性土 Ac1 層、その下位の粘性土と砂質土の互層からなる不均質土 Aal1 層は、砂丘を迂回して日本海に注ぐ鯖石川の氾濫原堆積物に相当すると考えられ、主に No.4 と No.8 地点で確認されている。

iii)土質状況

鯖石川沿いに分布する砂質土 As1 層は、礫を含む粒径不均一な中砂～粗砂で構成され、一部では粘性土を混入、または挟在する。As1 層の下位に分布する Ac1 層は、均質なシルト質粘土を主体とし、腐植物を少量含む他、所々薄層状に挟在する。

さらに Ac1 層の下位に分布する Aal1 層は、シルト質細砂、砂質シルト、シルト質粘土が互層状に分布する非常に不均質な土質状況を呈している。

一方、当該地北西側の砂丘砂は、粒径均一～やや不均一な細砂及び中砂によって構成され、粘性土を殆ど含まない清浄な砂からなる。砂丘直下に分布する安田層は、腐植物を含むシルト・粘土を主体とし、深さ 20m 付近には貝殻片が少量混入する。また、既往資料によると採取されたコアは硬く、指圧で痕がつく程度の硬さであるとされている。

なお、盛土のうち鯖石川堤体部は礫を含む粘性土を主体とし、堤内地の宅地造成部は砂丘砂とほぼ同等の土質状況にあると考えられ、自然地盤との境界が不明瞭である。

iv)N 値の深度分布

図 3.2.59 に、土質別 N 値の深度分布を示す。盛土の N 値は、砂質土の一部で $N=11$ を示すが、粘性土部では $N=1\sim3$ と軟らかい。氾濫原堆積物である砂質土 As1 層は、 $N=5\sim30$ の広範囲にばらついているが概ね $N=10$ 前後にあり、平均値は $N=12$ の中位な締まり程度を示す。粘性土 Ac1 層は、上部で N 値 2 程度の極めて軟質で、下部では N 値 8～10 の中位～硬い硬軟程度を示すことから、土質の状況に殆ど差異はないと考えられるが、上部を Ac1-1 層、下部を Ac1-2 層に細分した。

新期砂丘砂層である Asd 層は、 $N=4\sim39$ の範囲にあり、深度分布図に示すように大きくばらついている。平均的には $N=21$ の中位な締まり程度を示す。また、古砂丘砂層 Dsd 層は、 $N=14\sim50$ 、平均値 $N=43$ であり、密な締まり程度である。

安田層 Dm は、砂質土部で N 値 30 以上と高くなるが、概ね $N=10\sim20$ 前後の範囲にある。平均的には $N=17$ であり、硬い状態を示している。

ボーリング孔内水位は表 3.2.14 に示すとおりである。このうち、No.7、8 地点は、標高が高い割に観測水位が浅く、他の地点と大分異なる。その他の地点の孔内水位は、標高 $H = +0.50 \sim 1.69\text{m}$ の範囲にあり、砂質土 As1 層内に位置している。また、鯖石川の河川水位とほぼ同様の水位を示していることから、河川水位と地下水位は連動して変化していると考えられる。地点別の N 値の深度分布と地下水位を図 3.2.60 に示した。

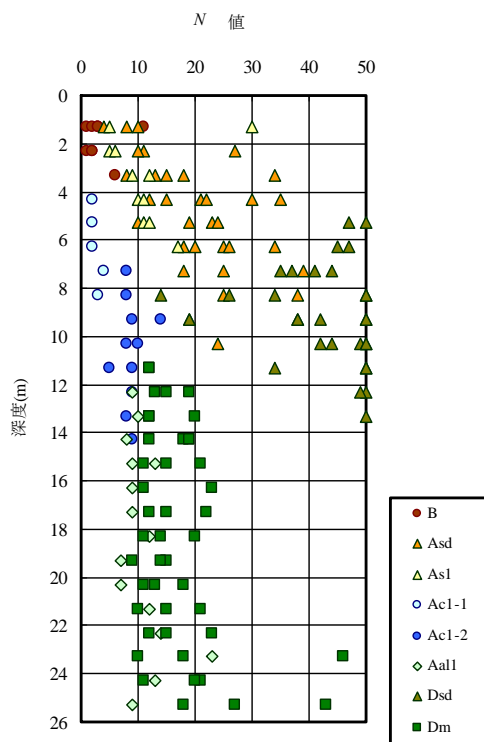


図 3.2.59 土質別 N 値の深度分布

表 3.2.14 孔内水位 (括弧内は推定)

地点番号	地盤標高 H= (m)	孔内水位 GL= (m)	孔内水位 H= (m)	備考
①	(+5.2)	4.70	+0.50	
②	(+4.0)	3.18	+0.82	
④	(+4.5)	3.83	+0.67	
⑤	(+4.0)	2.80	+1.20	
⑥	+3.75	3.08	+0.67	他の地点より 水位が高い
⑦	+5.12	1.10	+4.02	
⑧	(+4.0)	0.70	+3.30	同上
⑨	+3.21	2.55	+0.66	
⑩	(+5.0)	3.31	+1.69	

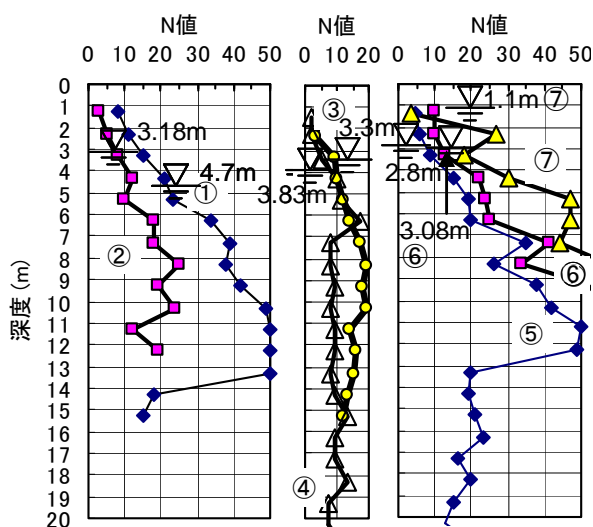


図 3.2.60 地点別 N 値の深度分布と地下水位

v)粒度特性

表 3.2.15 に各地層の主な粒度特性を示す。砂質土 As1 層は、礫分や細粒分を不規則に含む不均質な粒度組成であり、図 3.2.61 の粒径加積曲線はややばらつきが認められる。均等係数は、 $U_c=2.56\sim 4.35$ で、分級された粒径分布である。工学的分類では、細粒分質砂 (SF)、分級された砂 (SP)、細粒分混り礫質砂 (SG-F) 及び細粒分混り砂 (S-F) に分類される。新期砂丘砂層 Asd 層は、細粒分を少量含む均質な砂質土の粒度組成であり、粒径加積曲線はほぼ 1 箇所集中する。均等係数は、 $U_c=1.86\sim 3.69$ で、分級された粒径分布と評価される。主に細粒分混り砂 (S-F) に分類され、No.2 の上部は分級された砂 (SP) に分類される。

古砂丘砂層 Dsd 層は、Asd 層と大差はなく細粒分を少量含む均質な砂質土であり、粒径加積曲線もほぼ 1 箇所集中する。均等係数は、 $U_c=1.94\sim 3.23$ で、細粒分混り砂 (S-F) に分類される。

表 3.2.15 粒度

地層記号		砂質土層 As1	新期砂丘砂層 Asd	古砂丘砂層 Dsd
粒度組成 (%)	礫分 (%)	0~17 (5)	0~1 (0)	0
	砂分 (%)	71~93 (82)	85~99 (94)	89~96 (93)
	シルト分 (%)	5~29	1~9	4~11
	+粘土分 (%)	(13)	(6)	(7)
均等係数 U_c		2.56~4.35 (3.21)	1.86~3.69 (2.52)	2.06~2.46 (2.19)
50%粒径 (mm)		0.26~0.59	0.29~0.49	0.27~0.33

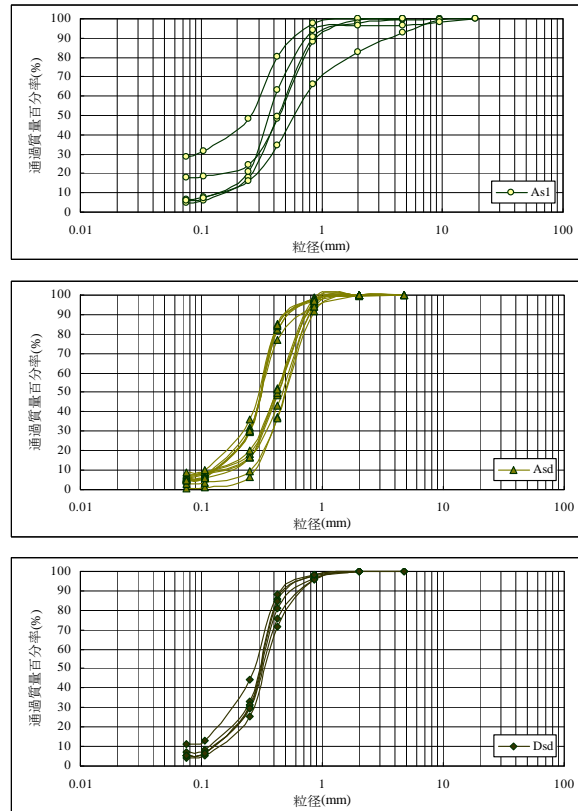


図 3.2.61 粒度分布

③液状化の判定

建築基礎構造設計指針（2001.1）に基づく液状化安全率 F_L の判定と、土木研究所²⁹⁾に基づく液状化抵抗指数 P_L による液状化危険度の判定行う。

i)液状化検討の設定値

- ・地下水位：季節変動を考慮し深さ 1.0m とする。
- ・N 値：表 3.2.16 に示すケース①～④については、実測 N 値を使う。
- ・単位体積重量 γ ：実測値が得られてないため、表 3.2.17 の土質定数の参考値を採用する。
- ・細粒分含有率 F_c 、粘土分含有率 P_c ：No.1 と No.2 地点では、各深度の試験結果を採用した。その他の地点については、表 3.2.17 の一般値を採用する。
- ・地表面における設計用水平加速度 α_{\max} ：
表 3.2.16 のとおり $\alpha_{\max}=200\text{Gal}$ 、 350Gal 、 700Gal 、 1000Gal の 4 ケースとする。
- ・地震のマグニチュード M ：7.5、6.8

表 3.2.16 液状化検討方法

ケース	水平 加速度	M: マグニ チュード	備 考
①	200	7.5	建築基礎構造設計指針で定める設計水平加速度
②	350	7.5	建築基礎構造設計指針で推奨する最大加速度
③	700	6.8	中越沖地震時（柏崎市、出雲崎町などで観測）
④	1000	6.8	中越沖地震時（西山町で観測）

表 3.2.17 土質定数の推定値

土質分類	地下水位面 下の単位	地下水位面 上の単位	平均粒径 D50 (mm)	細粒分 含有率 F _c (%)
	体積重量 γt_2 (kN/m ³)	体積重量 γt_1 (kN/m ³)		
表 土	17	15	0.02	80
シルト	17.5	15.5	0.025	75
砂 質 シルト	18	16	0.04	65
シルト質 細 砂	18	16	0.07	50
微細砂	18.5	16.5	0.1	40
細 砂	18.5	16.5	0.15	30
中 砂	20	18	0.35	10
粗 砂	20	18	0.6	0
砂 礫	21	19	2.0	0

※既往文献：「道路橋示方書・同解説

V耐震設計編平成2年2月」

ii)液状化判定結果

設計水平加速度を 200gal と設定した場合、No.1 地点等の As1 層 (N 値 10 以下の緩い範囲) で液状化の可能性があると判定されたものの、調査地全体にみると局所的といえる。しかし、350gal 以上の設定では、砂質土の特に沖積層 As1、Asd 層の大部分で液状化すると判定され、調査地の広い範囲は液状化危険度が高くなる。

図 3.2.62 に示すケース③ ($M6.8$ 、水平加速度 700gal) は、新潟県中越沖地震 (本震) 発生時に近い液状化の状況を表すと考えられる。ケース③の液状化判定において、 $F_L \leq 1.0$ となり「液状化する」と判定された地層は主に次のとおりである。

- ・砂質土 As1 層 (氾濫原堆積物) 全体
- ・新期砂丘砂 Asd 層上部、特に N 値約 20 以下の部分
- ・不均質土 Aal1 層の一部の砂質土

これらの地層は、No.2~No.5 付近で厚く、液状化の危険度が高い地域であると考えられる。特に No.2 地点は、深さ約 10m 付近まで液状化すると判定され、図 3.2.62 に示すように同地点を中心に液状化の危険度が高くなっている。

また、深さ 20m までのデータが存在する D 断面の、 P_L 法による液状化危険度の判定結果を表 3.2.18 に示す。これによると、今後、中越沖地震と同等の地震動が発生した場合、液状化の可能性は極めて高いと判断される。また、液状化が発生する地層は、As1 層及び Asd 層のうち N 値 20 以下 (やや緩い) を示す区間となる。なお、Aal1 層の砂質土部については、上位に層厚 6~8m の層厚を有する Ac1 層 (液状化対象外) が分布することから、地表部への影響は少ないと考えられる。

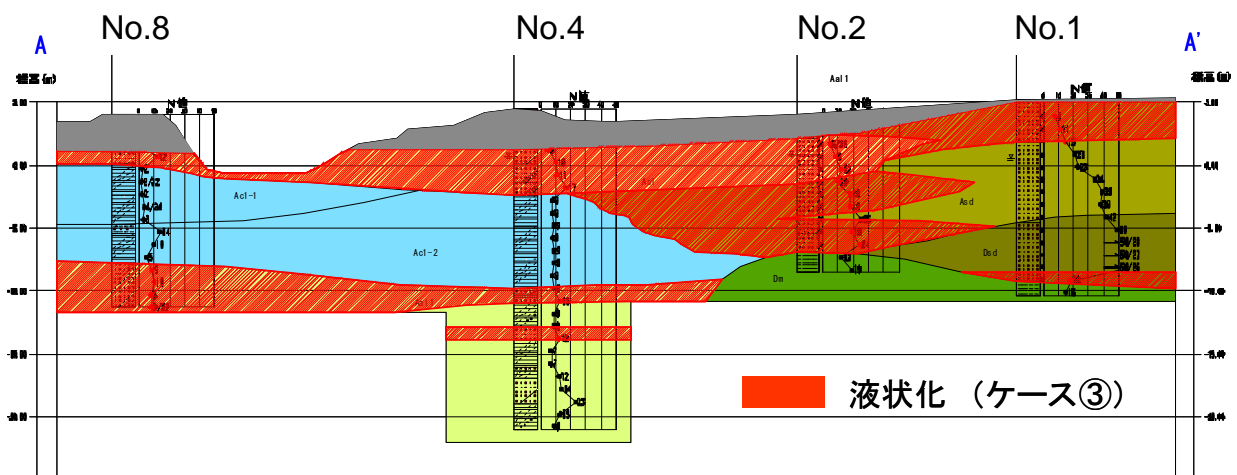


図 3.2.62 液状化判定結果 (ケース③)

表 3.2.18 P_L 法による液状化判定結果

地点 番号	ケース①		ケース②		ケース③		ケース④	
	P_L 値	判 定	P_L 値	判 定	P_L 値	判 定	P_L 値	判 定
No.9	0.00	液状化の 危険度は かなり低 い	1.78	液状化の 危険度は 低い	3.12	液状化の 危険度は 低い	3.64	液状化の 危険度は 低い
No.5	4.42	液状化の 危険度は 低い	15.0	液状化の 危険度は きわめて 高い	27.8	液状化の 危険度は きわめて 高い	33.5	液状化の 危険度は きわめて 高い
No.4	0.43	液状化の 危険度は 低い	9.58	液状化の 危険度は 高い	17.8	液状化の 危険度は きわめて 高い	21.0	液状化の 危険度は きわめて 高い

④液状化エリアと液状化層

前記ボーリング調査資料による松波 2 丁目全体の地盤分析に加えて、噴砂や家屋基礎の破壊などの液状化被害が目立った宅地について、スウェーデン式サウンディング (SWS) 調査と被害状況のヒアリング調査を行った。液状化による被害が顕著だったエリアは図 3.2.63 の楕円内で、SWS 調査地点を数字で標記した。

図 3.2.60 の SPT-N 値と地下水位によれば、楕円内のボーリング②③④地点の N 値は概ね 20 以下である。②～⑤地点のうちで堤防に近い④だけが標高が他よりも 50cm 高いことを考慮すると、液状化被害が集中した④-⑤ラインよりも北側の地下水位は GL-3.2m 程度で、鯖石川の水位に連動していると思われる。図 3.2.58 に示した地層想定鳥瞰図にこの楕円を加えて、図 3.2.64 に示した。北西側楕円外は新砂丘直下に古砂丘、安田層の洪積層が分布し、楕円内では盛砂/埋土の下には、砂丘を迂回する形で上から沖積の礫混り砂質土、粘性土、不均質土（粘性土/砂質土の互層）の鯖石川氾濫源堆積物が堆積している。盛砂厚は②で 1m、埋土を含めて川沿いの③、④で 3.3m である。従って楕円内の地下水位は大部分で沖積砂質土層内に、北側の一部で新砂丘砂内にあり、川沿いでは鯖石川氾濫原の旧地表面にほぼ一致する。



図 3. 2. 63 SWS 調査地点と液状化エリア

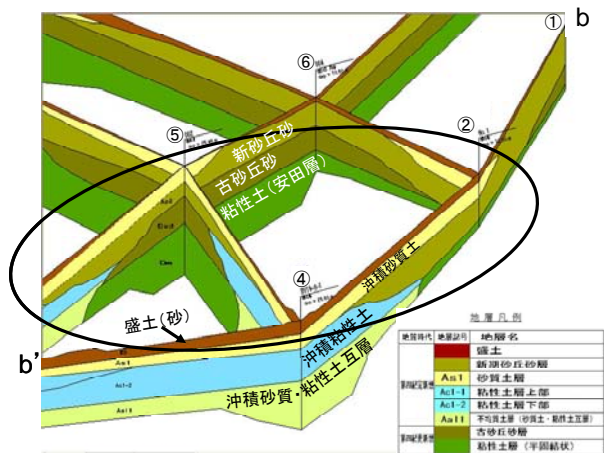


図 3. 2. 64 液状化エリアの地層想定鳥瞰図

SWS の N_{SW} から換算した N 値と地下水位を図 3. 2. 65 に、噴砂あるいは深度 70cm 程度からオーガー採取した砂の粒度分布を図 3. 2. 66 に示す。No.1、3、5、17、21、28 地点で深度 1.5m 以浅に極めて大きな換算 N 値が見られるが、これらは盛砂に混じった石などであろう。No.6 地点では深度 2m~3m で大きな値を示すが、固さにバラツキのある新砂丘砂の固い部分と考えられる。また、楯円内南方向の No.26 地点は深度 3.5m、No.2、4 地点は深度 4m 強で換算 N 値が 20 を超えるが、これらを除けば深さ 5m 以上にわたって換算 N 値は 20 以下である。換算 N 値と粒度から判定した、地下水位以深の液状化に対する抵抗率 F_L の深度分布を図 3. 2. 67 に示す。

a-a'線に沿った F_L 推定断面図を、図 3. 2. 68 に示す。No.15 地点は新砂丘の盛切境界近傍で盛土が 1m 程度と薄く、液状化層は新砂丘砂のうち GL-3.2m~8m 弱の間の $F_L < 1$ の部分であろう。

No.1 地点は深度 3m 以深の新砂丘砂が厚さ 1.5m の範囲で、No.17 地点は深度 2.5m 以深の沖積砂質土または新砂丘砂が厚さ 2m の範囲で、また No.2 地点と 4 地点では深度 2m 以深の沖積砂質土が厚さ 2.5m の範囲で液状化したと考えられる。部分的には、沖積不均質層も液状化した可能性がある。

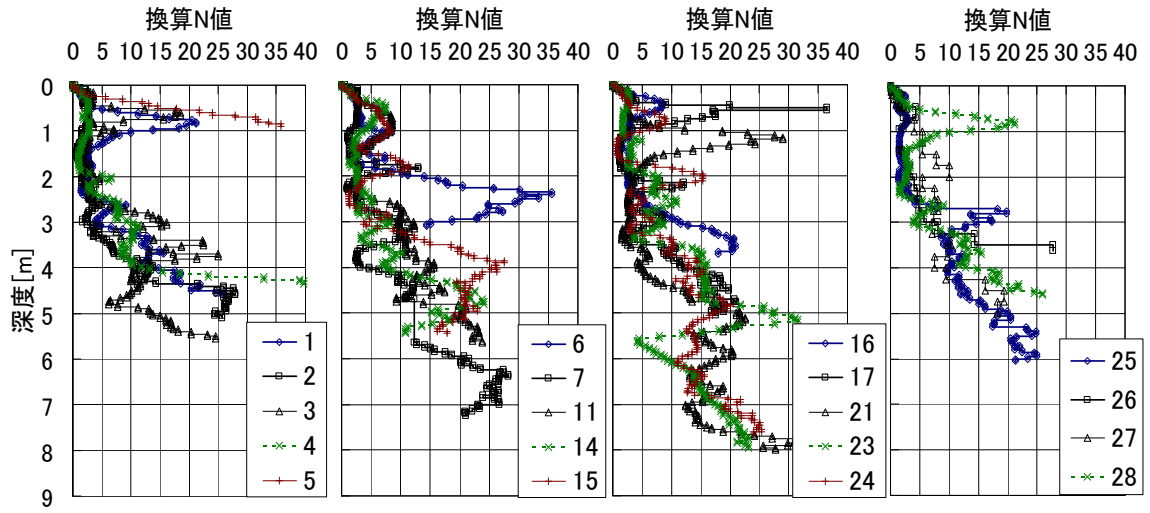


图 3.2.65 换算 N 值的深度分布

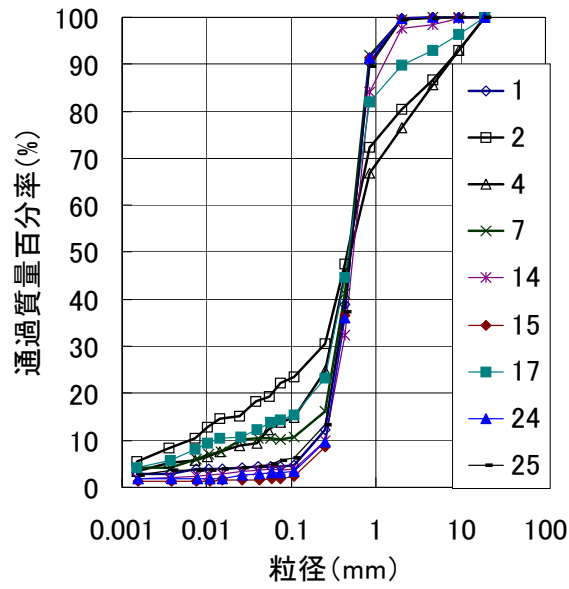


图 3.2.66 粒度分布

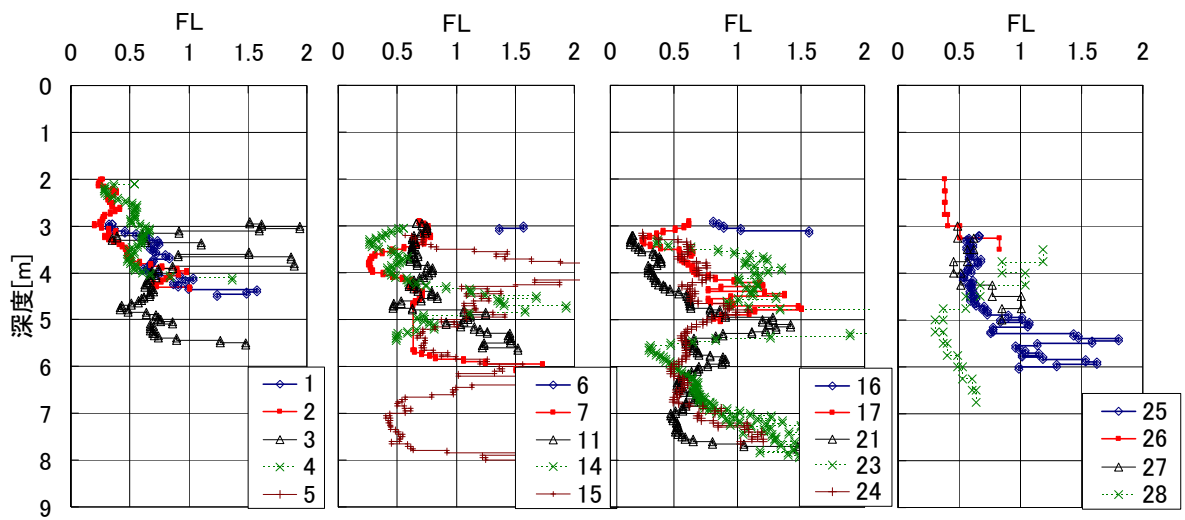


図 3.2.67 FL の深度分布

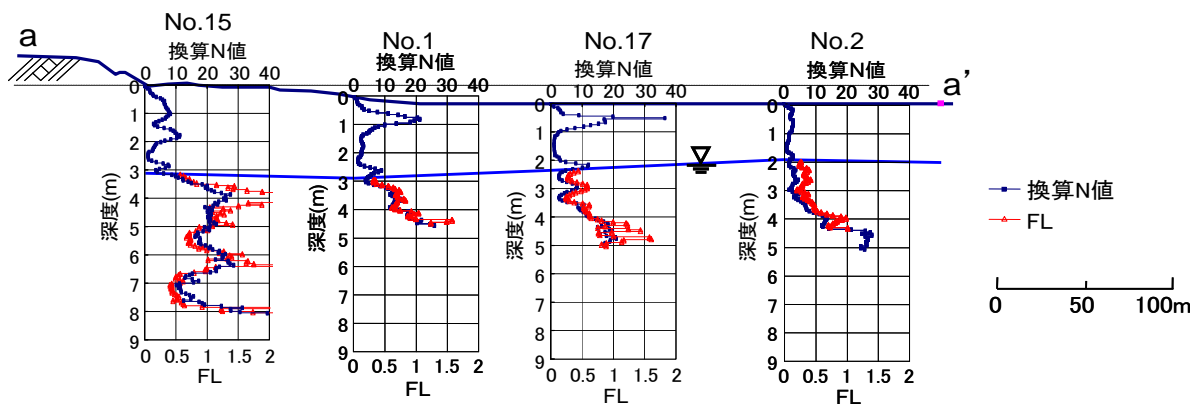


図 3.2.68 液状化層推定図 (a-a' 断面)

⑤被害

i)街路に見る液状化の状況

図 3. 2. 69 中の爆発マークは地震直後の自治体調査による全壊家屋を示す。これによると、北陸道沿いと町内の南西方向にも全壊家屋があるが、噴砂などの液状化現象は殆ど楯円内部に限られる。楯円内上部に全壊家屋が集中しているが、道路を横切る亀裂も多数発生し、それらの位置を棒線で示した。道路に沿う矢印は、舗装の変位方向を示す。調査地点 27 と 28 を結んだ線を境に、地盤が南東方向に滑り。南下がりの緩斜面に建つ多数の家屋は、特に地盤の流動に伴う破損が著しい。舗装道路は、本震直後に側溝脇や宅地からの噴砂で街一帯が砂で覆われ、最大余震で再び液状化した。図 3. 2. 70 は、ほぼ図 3. 2. 63 に示す a-a' ラインに沿いの幹線道路付近において、地震直後に撮られた街路の撮影地点と撮影方向を示す。この幹線道路の傾斜は、図 3. 2. 68 の地層断面図に示す通りである。

写真 3. 2. 53～57 は、本震 40 分後の道路の様子で、一面噴砂と噴水に覆われた。ただし写真 3. 2. 58 のように、この幹線道路よりも西側を見ると、同時刻ではあっても噴砂は無く、液状化の痕跡は見られないが、東向きの微傾斜地形のため、地盤の多少の流動による舗装の引っ張り亀裂がみられる。

写真 3. 2. 59～63 は、本震 4 時間後の幹線道路の北方面の様子である。このうち写真 3. 2. 60 は、写真 3. 2. 59 と同じ地点の翌日の状況で、噴砂によって舗装の下に出来た空洞が、翌日は陥没していた。写真 3. 2. 65 と 66 は、隣り合う敷地に跨る噴砂孔で、境界のブロック塀が懸垂し、噴砂の激しさを示している。写真 3. 2. 67 は、本震 9 分後の幹線道路南方面の冠水状況である。写真 3. 2. 68 は、南方面の電柱周りで生じた本震直後の噴水の様子で、写真 3. 2. 69 は、同じ電柱における最大余震直後の噴砂を示す。写真 3. 2. 70 は、この電柱付近の家屋敷地の最大余震直後の噴砂の状況である。

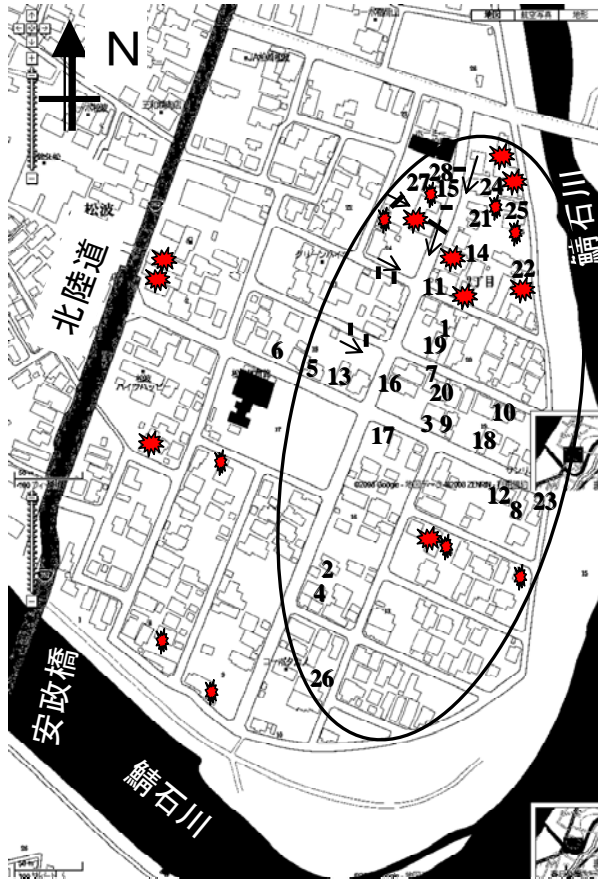


図 3. 2. 69 被災度判定による全壊家屋の分布と液状化エリア

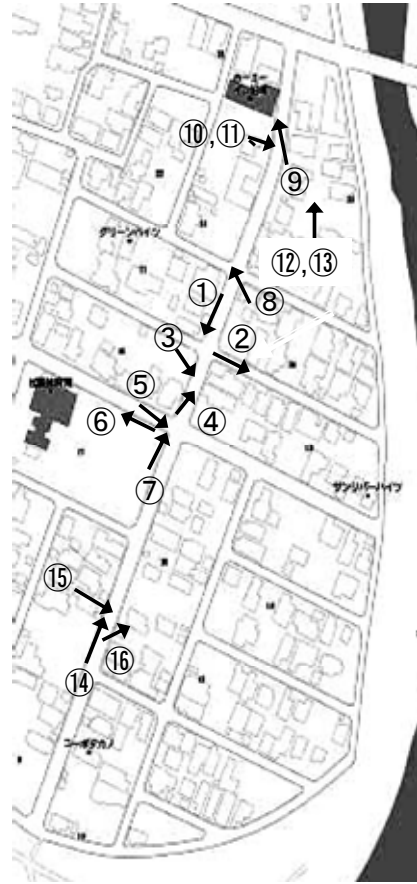


図 3. 2. 70 液状化による地震直後の街路の状況写真撮影地点と方向



写真 3. 2. 53 道路上の泥水 (撮影地点①)
(本震 40 分後) (N 氏撮影)



写真 3. 2. 54 道路上の泥水 (撮影地点②)
(本震 40 分後)



写真 3. 2. 55 道路上の泥水(撮影地点③)
(本震 40 分後)



写真 3. 2. 56 道路上の泥水と電柱の沈下 1. 5m
(本震 40 分後) (撮影地点④)



写真 3. 2. 57 道路上の泥水(撮影地点⑤)
(本震 40 分後)



写真 3. 2. 58 噴砂・噴水が無い町内西半分。
地盤の変形による舗装の亀裂。
(本震 40 分後) (撮影地点⑥)



写真 3. 2. 59 道路上の噴砂 (本震 4 時間後)
(撮影地点⑦) (Te 氏撮影)



写真 3. 2. 60 同左箇所、地震翌日
この間余震あり (豊田浩史氏撮影)



写真 3.2.61 写真 3.2.53 の逆向き
(本震 4 時間後) (撮影地点⑧)



写真 3.2.62 地盤の傾斜方向への舗装の流れ
(本震 4 時間後) (撮影地点⑨)



写真 3.2.63 地盤傾斜方向への舗装の流れ
(本震 4 時間後) (撮影地点⑩)



写真 3.2.64 左の写真の遠景(家屋 24)
(地震翌日、豊田浩史氏撮影) (撮影地点⑪)



写真 3.2.65 敷地境界に跨る噴砂孔と、
懸垂しているブロック塀 (撮影地点⑫)



写真 3.2.66 写真 3.2.65 を別角度から
(撮影地点⑬)



写真 3.2.67 本震 9 分後の噴砂・噴水
(撮影地点⑭) (To 氏撮影)



写真 3.2.68 本震 12 分後の噴砂・噴水
と電柱の沈下 (撮影地点⑮)



写真 3.2.69 写真 3.2.68 と同じ地点の
最大余震 15 分後 (15:29) 電柱周りの噴砂
(撮影地点⑮)



写真 3.2.70 最大余震時の家屋周りの噴砂
(撮影地点⑯)

ii)宅地と家屋の被害状況

図 3.2.63 の楕円内の、特に地表面が南向きに緩く傾斜している北半分で多くの家屋が傾斜し、建物に歪みが生じた。全ての被害は網羅し得ないが、顕著な建物被害例を図 3.2.71 に示した。図中の幾つかの被害状況は以下の通りである。

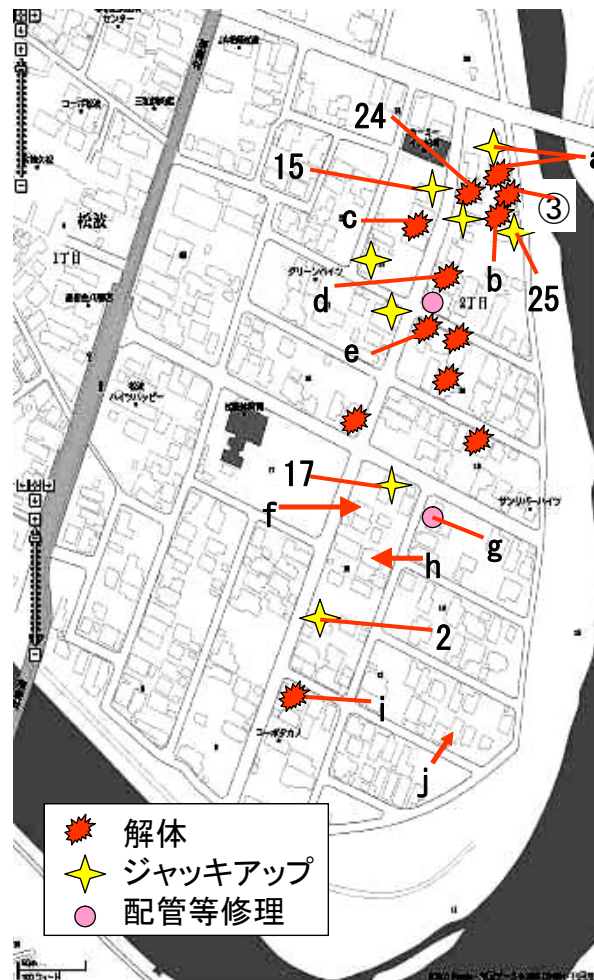


図 3.2.71 顕著な被害のあった建物

a)建屋 a

写真 3.2.71 は、南北に 31m と長い集合住宅の北側 3/4 程度の二階建て部分と南側 1/4 程度の一階建て部分の接合部付近で基礎と建物が裂損し、一階建て部分南端が 66cm 沈下した。北側は砂丘の地山で、南側は盛砂地盤と考えられる。写真 3.2.72 の右側がその南端で、土留めブロック擁壁が地盤の液状化によって湾曲している。正面は解体前の家屋 24 の裏側である。



写真 3. 2. 71 家屋 a の北側二階建て部分と南側一階建て部分の裂損

b)家屋 24

写真 3. 2. 64 の建物で、古い建物の前面（道路側）に増築した二階建て部分の一階（ピロティ式車庫）が大きく傾いた。基礎は連続フーチングのベース上にブロックを敷いた基礎で、縦筋は所々のブロックの孔を通してベースコンクリートにアンカーされているが、主筋に相当する水平鉄筋は確認されなかった。図 3. 2. 72 は、X 軸を道路方向、Y 軸を道路直角方向としたときの家屋 24 の基礎と床の傾斜で、建物は全体として南方向に 18cm 傾いた。破線で示した部屋は、中央が盛り上がっている。



写真 3. 2. 72 建屋 a（写真右）の南側土留め壁の変位、正面は家屋 24

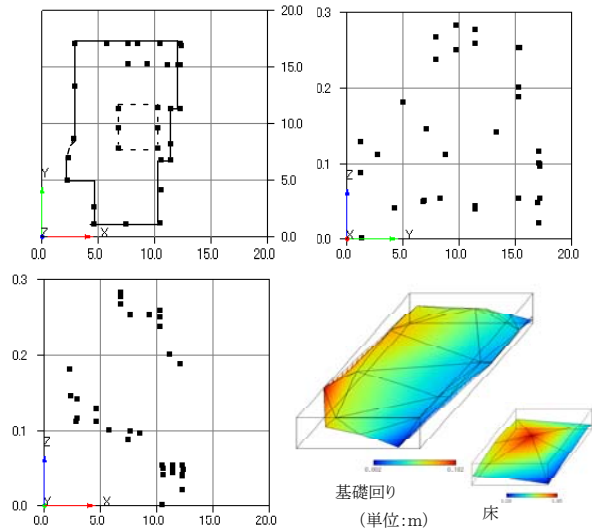


図 3. 2. 72 家屋 24 の基礎と床の傾斜

c)家屋 b (図 3.2.73、西が x、南が y 方向)
 北東が高く、南西に 7cm ほど傾斜した。

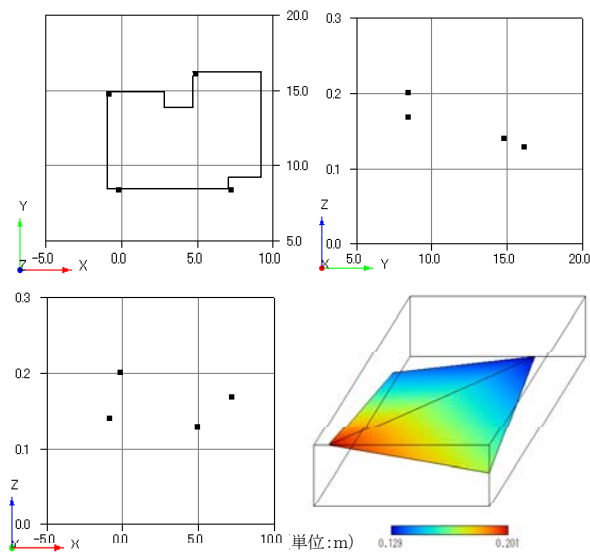


図 3. 2. 73 家屋 b の基礎の傾斜

d)家屋 d (図 3.2.74、西が x、南が y 方向)
 南東が高く、北西に 13cm ほど傾斜した。

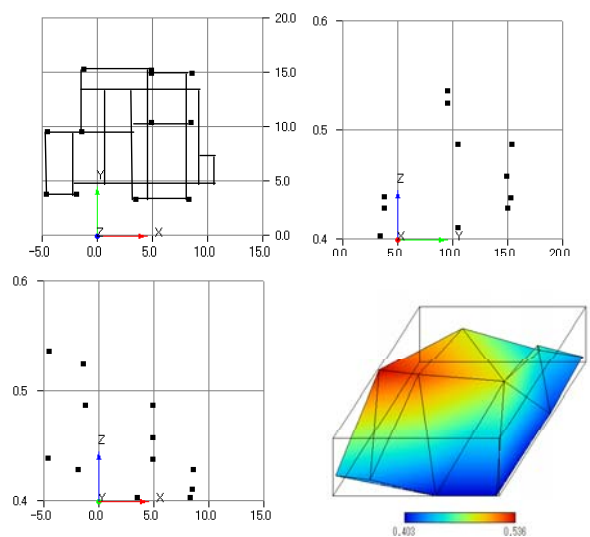


図 3. 2. 74 家屋 d の基礎の傾斜

e)家屋 15

写真 3. 2. 73 に見る建物の北西角（写真右奥）より南東角（写真左手前）が 26cm 沈下し、大きく傾斜した。家屋の沈下に伴って、バルコニーの脚柱が曲がった。この家屋の北側と西側隣地は砂丘の末端で、この家屋の地盤から東と南は均質な細砂による盛土に変わる。基礎は高床式基礎なので建屋の被害は比較的軽く、パイルソケットでフーチングごとジャッキアップした。いずれも地震 3 日後の 7 月 19 日に撮影されたものである。



写真 3. 2. 73 地山端の盛土側に立つ家屋 15
（蔡飛氏撮影）



写真 3. 2. 74 パイルソケットによる
家屋 15 のジャッキアップ

f)建屋 c

写真 3. 2. 73 の左側に写っている建物は集合住宅であるが、写真 3. 2. 75 に見るように、建物と敷地の間で東西に 20cm 程度のギャップがあった。これは家屋 15 のバルコニーの脚の向きと同じであり、敷地が道路側に変位したと思われる。



写真 3. 2. 75 建屋 c の建物と地面のギャップ

g)家屋 e

写真 3. 2. 76、77に見るように、布基礎の打ち継ぎ目やコーナー部に鉄筋が無く、写真3.2.78の床の落下は、基礎がずれて土台が外れたためと思われる。



写真 3. 2. 76 打ち継ぎ目に鉄筋無し（家屋 e） 写真 3. 2. 77 基礎のコーナーにも鉄筋無し

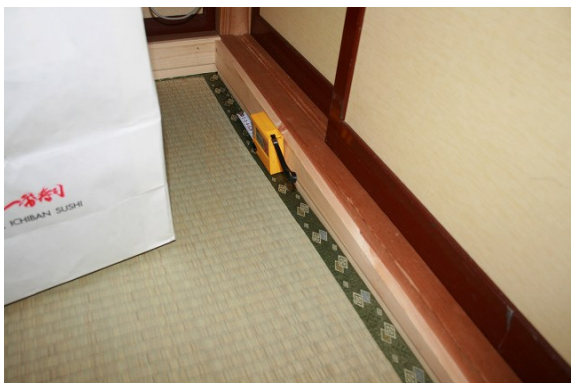


写真 3. 2. 78 土台が外れた床（家屋 e）

h)家屋 17

基礎の傾斜が著しかったが、建物の歪みは軽微で、基礎のジャッキアップで復旧可能であった。



写真 3. 2. 79 傾いた家屋 17 のジャッキアップ

i)家屋 f

建物の全体沈下はあったが、高床式基礎であったために家屋の被害は軽微であった。



写真 3. 2. 80 全体沈下はあるものの、家屋の被害は軽微だった高床式基礎（家屋 h）

j)家屋 h

液状化による地盤の不陸で、布基礎の殆ど全ての通気孔周辺に亀裂が発生した。



写真 3. 2. 81 通気孔のひび割れ（家屋 h）

k)家屋 2

写真 3. 2. 70 のように敷地内全体で夥しい噴砂があり、写真 3. 2. 83 中の注記のように母屋の東側が 2~3cm 沈下して傾斜した。写真 3.2.68 にシャッターが見える車庫兼別棟は南北 3.5 間で南に 2cm、東西 5 間で東に 17cm 沈下して傾いた。この別棟は土台から上をジャッキアップし、基礎の立ち上がり部分の幅を割増して補強された。

l)家屋 i

家屋の中心が低く、四周が 4cm から 10cm 高いすり鉢状の不同沈下を生じた。

m)家屋 j

車庫が敷地奥の母屋の方向に傾き、車庫の屋根が母屋に衝突した。また母屋の玄関周りの液状化による建物のゆがみが顕著で、玄関のドアが閉まらない。

⑥ヒアリング調査結果

スウェーデン式サウンディングを行うにあたって、宅地と家屋の被害状況をヒアリングするとともに、サウンディング調査時に被害の痕跡が残っているものについてはそれらを確認できたものもある。この宅地内のサウンディング位置と被害箇所の関係などを、若干のコメントとともに写真 3.2.82～96 に示す。

また、ヒアリング結果を表 3.2.19、表 3.2.20 にまとめた。表中の整理番号は、図 3.2.63 の家屋番号に一致する。表のデータによれば、液状化被害の特徴は以下の通りである。

- a) 液状化層が GL-3m 以深と深いにも拘わらず、調査した宅地では、噴砂のみ：2/3、地割れ+噴砂：38%、地割れ or 噴砂：90%であった。
- b) 噴砂か地割れがあると、家屋または宅地の 90%は沈下または傾斜し、家屋の 61%が沈下または傾斜した。
- c) 表には現れていないが、家屋の沈下は二階建て部分が大きく、一階が車庫である部分や平屋部分では小さかった。
- d) 液状化エリアのうち、旧地山も盛砂後の現地表面も南向きに傾斜している（図 3.11.4-1 の楕円上部）部分の地点 15 や 24 の家屋は地形の傾斜方向に傾いたが、地点 21 の家屋は地形と逆向きに傾くなど、巨視的地形と家屋の傾斜の間には必ずしも明確な関係は認められなかった。
- e) 居室の床の中央が凸状に相対的に隆起した家屋は表中では 3 軒に過ぎないが、表にない家屋を含めると多い。
- f) 2004 年新潟県中越地震時の被害は少なく、液状化は発生しなかったと推察される。
- g) 豪雨時の浸水や道路の冠水は、凹地状の集水地形であることに起因すると思われる。



写真 3. 2. 82 地点 1



写真 3. 2. 83 地点 2



写真 3. 2. 84 地点 3



写真 3. 2. 85 地点 4



写真 3. 2. 86 地点 7



写真 3. 2. 87 地点 8



写真 3. 2. 88 地点 9



写真 3. 2. 89 地点 10



写真 3. 2. 90 地点 11



写真 3. 2. 91 地点 12



写真 3. 2. 92 地点 13



写真 3. 2. 93 地点 14

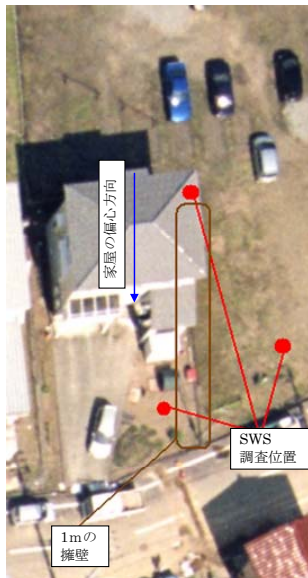


写真 3. 2. 94 地点 15



写真 3. 2. 95 地点 16



写真 3. 2. 96 地点 17

表 3.2.19 ヒアリング結果(1)

設問	整理番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
3.1 家屋の階数		2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	1	2	2	1	3	2	2	2	2	2	1	2
3.2 基礎の形式		杭		杭		杭		べた				布		布	べた	布	べた	布	杭		杭		布
3.3 地盤改良の有無			○			×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○	×
3.4 家屋の偏心の有無		○	○	×	○	○	×	○	○	○	×	○	○	×	○	○	×	×	×	×	×	○	○
3.5 宅地地盤の傾斜の有無		○	○	○	○	○	×	○	○	○	×	○	○	×	○	○	×	○	×	○	×	○	○
3.6 擁壁や背後の山の有無		○	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×
5.1.1 噴砂の有無		○	○	○	○	×	×	○	×	×	×	○	○	○	○	○	×	×	×	×	○	×	○
5.1.2 地割れの有無		×	×	×	○	○	×	×	○	×	×	×	×	○	○	○	○	×	○	○	○	○	×
5.1.3 通路の突き上げの有無		○	×	○	○	○	×	×	○	×	×	×	×	○	×	○	○	○	○	○	×	○	○
5.1.4 宅地地盤の水平変位(流動による)の有無		×	○	×	×	×	○	○	○	×	×	○	○	×	○	○	×	○	×	×	×	○	×
5.1.5 宅地地盤の沈下の有無		×		○	○	○	○	×	×	○	×	○	×	○	○	○	○	○	○	×	○	○	○
5.2.1 めりこみ沈下量 (cm)			2~3	○			○	15			×	10	1	10~20	6~9	30	×		×	×	10~20	×	10
5.2.2 傾斜角							×	2°			×					2°	×	○	×				
5.2.3 床の盛り上がりの有無		○	×	×		×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×
5.2.4 基礎の被害の有無			×		×	×		○		×	○				×	×		×		×		○	×
5.2.5 外壁等の被害の有無			×	○	×	○	×	×	○	×	○	○	○		×	○	×	○	○	×	○	○	×
5.3.1 道路等の被害			○		○							○		○	○	○	×	○		○	○	○	○
5.3.2 裏山等の被害														×	○	×					×		
5.4 その他の被害				○				○	○	○		○	○	○	○	○	○		×	○	○	○	○
5.5.1 屋根の様式		瓦	スレート	瓦	瓦	瓦	瓦	トタン	瓦	瓦	瓦	瓦	瓦	瓦	瓦	瓦	瓦	瓦	瓦	瓦	瓦	瓦	瓦
5.5.3 屋根の被害		×		×	○	×	×	×	○	○	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×
5.5.3 屋根のブルーシート									実施	実施							実施						

表 3.2.20 ヒアリング結果(2)

整理番号	6. 2004年新潟県中越地震時の被害およびその後の復旧方法	7. 昭和39年新潟地震時の被害およびその後の復旧方法	8. 普段の状況(豪雨時の流水状況など)	9. 住民の方からのご要望など
1	基礎に一部ヒビ割れが発生。			
3	被害無し			生活用水が出ず困った。市の中心部や商店街だけでなく個人の住宅をもっと支援して欲しい。
6	被害無し	土壁だったため、壁が崩れた。		知識がないため、家屋外観からだけではなく。もっと家屋の中まで調査して欲しい。
7	被害無し		豪雨時に道路に5cmくらい雨がたまる	溜まった水抜き対策
8			降雨量が多くなると側溝が逆流	再調査を希望
9	被害無し		水はけが悪い	自衛隊の方々に感謝
10	被害無し		車庫に浸水する。	新しい補修剤
12	壁、風呂にひび割れ			どれくらいの歪みか知りたい
13	被害無し			不安を取り除いて欲しい。
14	被害無し			情報開示
15	家具のみ被害あり。		降雨量が多くなると浸水。	自治体からの液状化への対策の説明。
16			庭に水が溜まる	水抜き
17	台所のタイルにひび			地盤の調査希望
18	被害無し			無し
19	被害無し		側溝に水がたまる	被害補償
20	被害無し			不安を取り除いて欲しい。
21	被害無し		液状化によって土が多量にたまる。ライフラインの不備	地盤の状況を知りたい
22	砂地のため当時被害無し			住宅、地盤などの結果報告を早くして欲しい

(7) 2007年潟県中越沖地震による柏崎市山本団地の液状化被害事例³⁰⁾

①調査地の地形

柏崎市山本団地は、**図 3. 2. 75** に示すように柏崎市東部を流れる鯖石川右岸側に位置し、鯖石川と荒浜砂丘の後背地に囲まれた造成地である。**写真 3. 2. 97** に山本団地の航空写真を示すが、地形的には中央を東西に走る道路を境に、砂丘斜面の末端部から沖積低地にかけて小規模な盛土によって雑壇状に造成（昭和 48 年）された北側地域と、鯖石川の自然堤防後背地の水田を埋め立てたほぼ平坦な南側地域に分かれている。

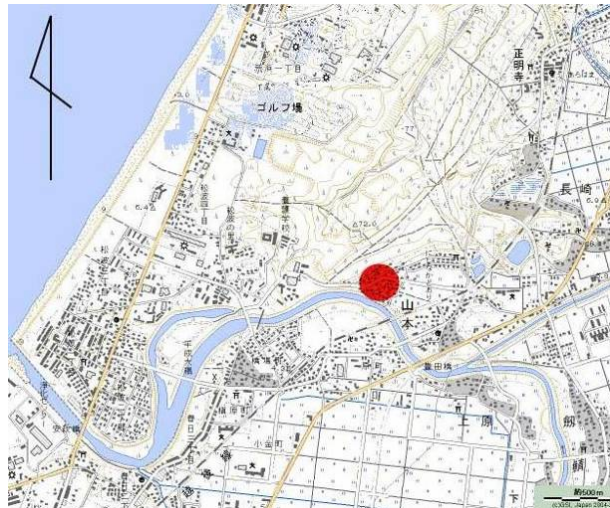


図 3. 2. 75 山本団地の位置（原図：国土地理院）



写真3. 2. 97 山本団地の地盤変状とスウェーデン式サウンディング位置（2007年7月19日八州撮影）

②被害の概要

北側地域では地盤の亀裂や段差が酷く、家屋の傾きや擁壁の被害も顕著で、道路側溝や民家の庭先で噴砂が見られた。一方、東西道路の南で鯖石川に近い地域では、家屋や地表面の被害は、限られた箇所を除けばほとんど見られなかった。

北側地域、すなわち砂丘側の宅地は、砂丘斜面の勾配がそのまま残る上段と盛土の中段、擁壁を挟んだ下段に住宅が建てられている。このうち中段の宅地では、写真上に赤く線を引いたように、斜面に平行な複数の家屋に跨る地盤の開口亀裂（写真 3.2.98）が生じ、中段の家屋の多くは写真 3.2.99 のように、下段側に向かって数段の段差が生じ、基礎から引きずられるように大きく下段側に傾いた。また、写真 3.2.100 のように、上段側の道路との間に大きな開口部が生じるとともに、地盤が大きく下段側に移動した。複数の家屋で、給・排水管が引きちぎられるように破断した。また、中段の盛土を支える擁壁も崩壊したり、大きく下段側に変位するとともに、頭部が下段の家屋側に傾いて、下段の家屋に衝突しているところもある。擁壁の下段側における足元周辺に噴砂跡が見られるとともに、地下水位が湧出しているなど、噴砂跡や湧水は北側宅地の下段（砂丘斜面の末端部）で多く見られた。

一方、南側の宅地では、山本公園の中など、所々で小亀裂と噴水が生じた跡が見られたものの、ほとんど地表面の変状は見られなかった。建物についても、外観からは不同沈下や大きな損傷は見受けられなかった。



写真 3.2.98 敷地を跨いで生じている亀裂
(北側地域中段の敷地)
(北側地域の上・中段間道路より撮影)



写真 3.2.99 下段側 (写真奥) へ大きく
傾いた中段の家屋

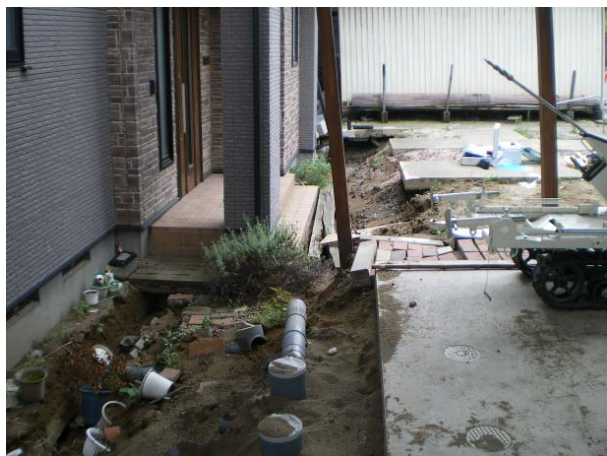


写真 3. 2. 100 開口部を生じさせ移動した家屋
(北側地域中段、写真 3. 2. 85 のサウンディング地点④)

③ヒアリング調査結果

家屋被害と地盤変状に関するヒアリング調査の結果を表 3. 2. 21 に示す。これらから山本団地の被害の特徴をまとめると以下のようなになる。

- a) 液状化の痕跡が見られたのは、大部分が砂丘側斜面末端部の宅造地で、鯖石川寄りの平坦部では液状化の痕跡はほとんど見られなかった。ただし、地中部でも液状化が生じていないことを示すものではない。
- b) 調査対象の家屋はほとんどが布基礎かべた基礎であった。従って、地盤変状の影響を大きく受けたと考えられる。
- c) 2004 年新潟県中越地震時の被害は、屋内の柱やタイルなどに多少の亀裂が生じた程度であった。
- d) 噴砂が見られた領域は全面積の 30%程度であったが、地割れは 2/3 以上の領域で確認できた。
- e) 被災による傾斜角が大きな家屋は、大半が斜面上段に位置する家屋である。
- f) 瓦屋根の被害は全ての家屋で発生しておらず、振動被害ではなく、液状化に起因する被害であった可能性が高い。
- g) 唯一、表層改良を行っていた家屋では、地割れや沈下が全く生じていなかった。
- h) 地域住民はその多くが避難していたため、地割れの発生が地震と同時なのか、地震後に徐々に拡大したのかは定かでない。
- i) 北側地域の宅地の傾斜、水平変位、沈下の発生率は、いずれも 70%以上であるが、南側地域においては、傾斜した地盤はなく、水平変位、沈下は、それぞれ 22%、13%となっている。

表 3.2.21 家屋ならびに宅地被害のヒアリング結果

設問	整理番号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
3.1 家屋の階数		2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	1	1	2	2	2	2	2	2
3.2 基礎の形式		布	べた	布	布	布	布	布	布	布	布	布	布	布	布	布	布	布	杭				べた	布	布	べた	べた	べた	べた	べた	
3.3 地盤改良の有無		×	×		×	×	×		×			×				×	×	○		×			×	×	×	×	×	×	×	×	
3.4 家屋の偏心の有無		×	×	○	○	○	○	×	○	×	○	○	○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	×	×	○	○	○	○	○	○	
3.5 宅地地盤の傾斜の有無		○	×	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	×	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	
3.6 擁壁や背後の山の有無		×	×	○	○	×	○	○	×	×	○	×	○	○	×	×	×	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	
5.1.1 噴砂の有無		○	○	×	○	×	○	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	×	×	×	×	×	○	×	×	×	
5.1.2 地割れの有無		×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
5.1.3 通路の突き上げの有無		×	×	×	○	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	
5.1.4 宅地地盤の水平変位(流動による)の有無		×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	×	×	×	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	
5.1.5 宅地地盤の沈下の有無		×	×	○	○	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	×	○	×	○	○	×	○		×	×	×	×	×	
5.2.1 めりこみ沈下量 (cm)		×								○	45	57		○	○									×	×				○	×	
5.2.2 傾斜角		×		○	0.2°		0.1°	2°	6°	8°	4°	×	○		○		○		○		○	10°		×	×				×	×	
5.2.3 床の盛り上げの有無		○		×	○	○	○				×			×	×	○		○		○		×		×	×				×	×	
5.2.4 基礎の被害の有無		×	○	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	○	×	×	○	×	
5.2.5 外壁等の被害の有無		×	×	○	×	×	○	×	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	○	×	
5.3.1 道路等の被害		×	×	○	○	○	○	○	×	×	○	×	○		×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	
5.3.2 裏山等の被害		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
5.4 その他の被害		×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	○		○	×	○				
5.5.1 屋根の様式		瓦	瓦	瓦	瓦	瓦	瓦	瓦	瓦	瓦	瓦	スレート	瓦	瓦	瓦	瓦	瓦	瓦	瓦	瓦	瓦	瓦	瓦	瓦	瓦	瓦	瓦	瓦	瓦	瓦	
5.5.3 屋根の被害		×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	
5.5.3 屋根のブルーシート																															

④山本団地の地盤

図 3. 2. 76 中のボーリング位置における柱状図を図 3. 2. 77 に、地層想定断面図を図 3. 2. 78 に示す。ただしボーリング No.1 を、A-A'測線上の同じ標高に描いた。これによると、北側地域中段のボーリング No.2 地点で深度 4.7m まで、No.3 地点で深度 5.6m まで砂丘砂である。No.2 地点では、深度 4.7m から 6.3m まで腐植土を含むルト層、6.3m から 8.45m まで一部に炭化物を含むシルト混じり細砂層となり、それらの平面的広がり確認できていないが、部分的に盛り上がった氾濫原堆積物の可能性もある。その下位に、N 値 2 程度の軟弱な柏崎沖積層が堆積している。ただしこれまでの調査で南側地域のボーリングデータは得られていないので、地層想定断面図で山本公園よりも右側の鯖石川方向の砂丘砂の厚さは不明である。次項のスウェーデン式サウンディングで認められるシルト質の土は、ボーリング No.2 と No.3 の砂丘砂の下のシルト層と考えられる。

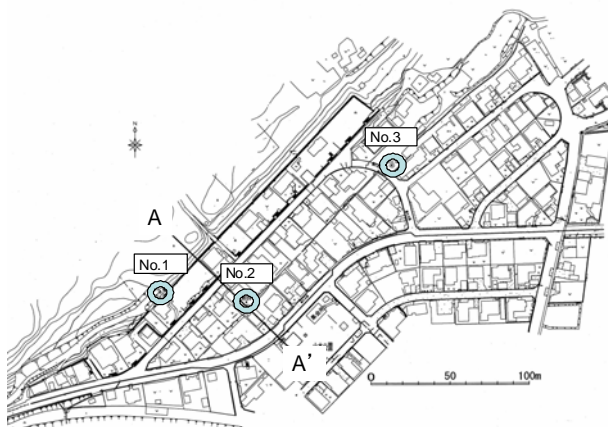


図 3. 2. 76 ボーリング位置と想定断面図の測線
(柏崎市、新潟県、(株)日さく提供資料一部改)

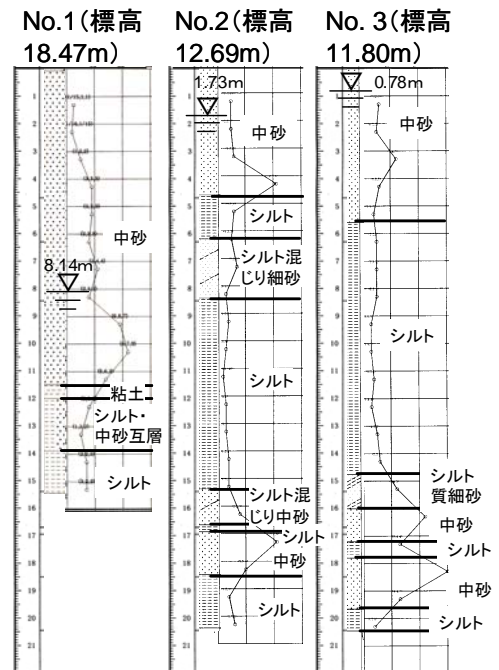


図 3. 2. 77 ボーリング柱状図

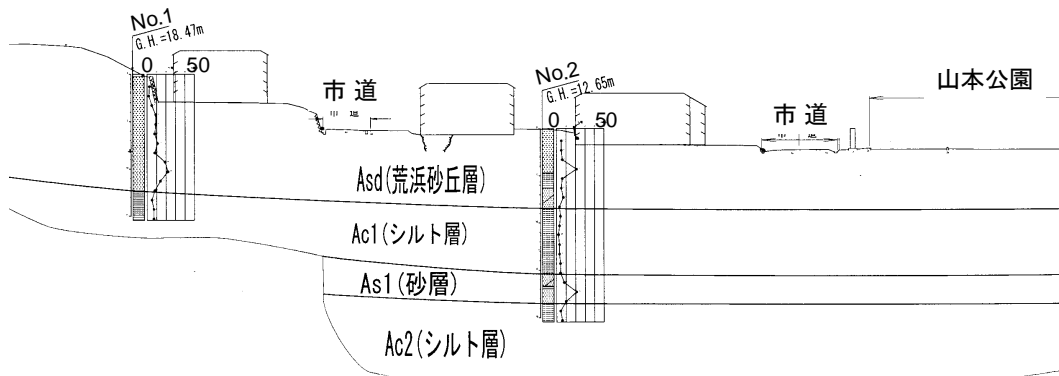


図 3. 2. 78 地層想定断面図 (株)日さく資料改)

⑤スウェーデン式サウンディング調査結果

被害および被害形態の差が生じた原因を探るため、現地においてスウェーデン式サウンディング試験を実施した。調査地点は、写真 3.2.97 に番号を付してプロットした箇所である。いずれの地点も、地表面から約 10m 程度の深さまでサウンディングを実施し、換算式によって換算 N 値に置き換え、地盤の N 値の深さ方向分布を求めた。図 3.2.79 (a)、(b) には、北側地域、南側地域の代表的な調査結果を示す。(a)、(b) の 2 点間では、北側地域が標高で約 2m 程度高い位置にある。それによると北側地域（砂丘末端部側）は、表土の下に盛土と思われる N 値 5-10 前後の緩い砂層が堆積しており、その下に砂礫混じりのやや締まった層が堆積している。その層を抜けると、再び N 値 5 前後の砂層が連続して堆積していた。図 3.2.80 はロッドに付着してきた土の粒度試験結果である。細粒分を殆ど含まない均質な砂であることがわかる。

一方、南側地域では、表土の下に N 値 5 前後の地盤が堆積しているが、サウンディングの際の音とロッドの振動の観察から、シルトおよび粘土を含んだ地盤であると予想された。また、ロッド引き抜き時にも低塑性のシルト質の土が付着していたことを確認している。その下層には礫混じり層が堆積し、さらに下層は N 値 10 以下の砂層が堆積していた。この地域が、旧河道に沿った自然堤防の後背地であり、幾度も河道変遷があったことを鑑みると、河床堆積物と粘土混じり砂を中心に地盤が構成されていることが窺える。そこで、図 3.2.81 には、現在の鯖石川の法線方向に断面をとり、サウンディング結果をもとにした推定地層断面を示す。

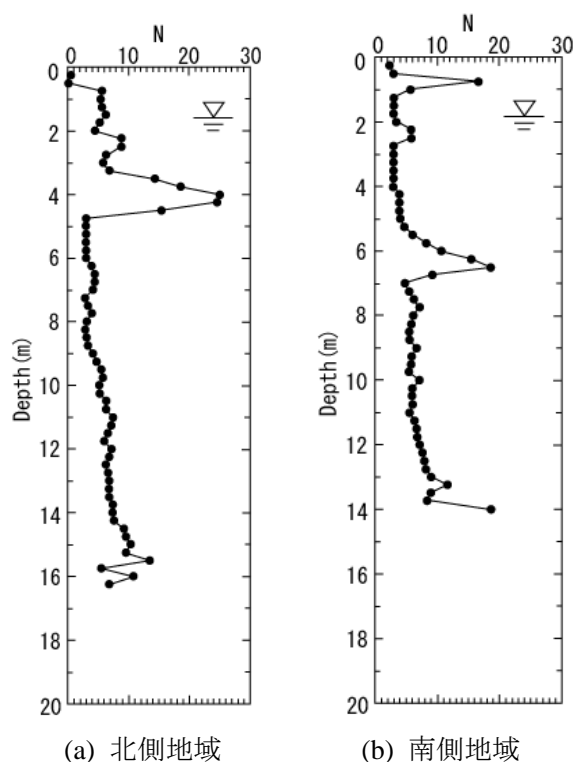


図 3.2.79 山本団地でのサウンディング結果

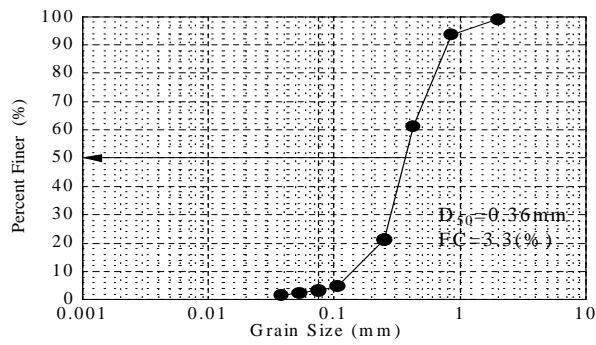


図 3.2.80 粒度試験結果（山本団地・砂丘側）

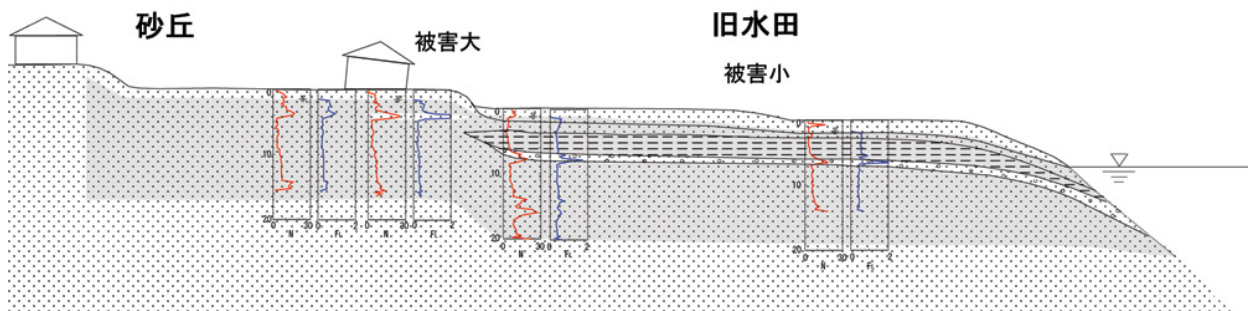


図 3.2.81 サウンディング試験から推定断面（タイプⅡ地震動，設計水平震度 0.6）

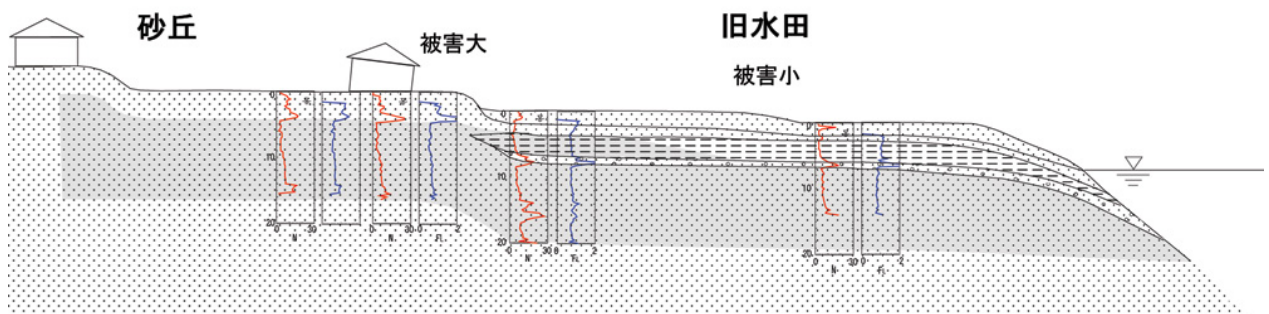


図 3.2.82 サウンディング試験から推定断面（タイプⅠ地震動，設計水平震度 0.2）

⑥液状化層の推定

サウンディング結果の右側のグラフは、道路橋示方書に従い、タイプⅡ地震動、設計水平震度 0.6 で液状化判定を行った結果である。液状化が生じると判定された層を濃くハッチングしている。

ただし、この地域の加速度情報は得られていないので、あくまで参考図である。この結果からは、山本団地の北側地域、南側地域の全域が、地下水位面以下で、ほぼ全層に液状化が生じる結果となり、被害形態と一致しない。また、この地域ならびに周辺地域の建物被害の状況を見ると 600gal 相当の揺れが生じたとは考えにくい。そこで、タイプⅠ地震動、設計水平震度 0.2 で液状化判定を行った結果を図 3.2.82 に合わせて示す。これによると、南側（鯖石川の後背地側）では、地表面から GL-5m 程度までは、地下水位と地盤材料から、表層付近では液状化が生じない結果となり、液状化の生じる可能性があるのは GL-5m 以深である。そのため地表面に大きな変状が生じていなかったと考えれば説明がつく。また、地層想定断面図（図 3.2.78）によれば、南側地域の GL-5m 以深はシルト層である可能性も有るので、南側地域では液状化は生じなかったとも考えられる。

一方、砂丘末端部の北側地域では、盛土と地山（砂丘ならびに古砂丘）の境界付近から以深で液状化が生じる可能性がある。

北側地域でも、中段部より 2m 程度高位にある上段部の宅地の庭先では、噴砂や噴水の痕跡は見られず、低位側の庭先で多く見られたことから、液状化が生じたのは、地表面よりやや深い位置ではないかと思われる。

北側地域では、砂丘末端部の砂層が液状化して、その上位にあった盛土との境界部で滑りが生じ、その結果、家屋被害が生じたのではないかと考えられる。下段側は特に地下水位が地表面下 0～50cm 程度と浅く噴砂痕が多い。また中段の地盤の流動とブロック塀の移動に伴って、一部で道路側への宅地の水平流動や家屋の不同沈下が生じた。

南側地域は、砂丘末端部を幾分離れ、地下水位の低い砂層の下は後背湿地で粘性土が卓越しており、地表面付近で液状化が生じなかったため、不同沈下や噴砂、噴水といった被害は見られなかったものと考えられる。砂層の深部の厚さの薄い範囲で液状化が生じた可能性は否定し得ないが、その場合でも表層の非液状化層の存在が、地表面で地盤変状を起さなかった理由と考えられる。

⑦被災家屋の分布

山本団地は後背部に砂丘が迫り、砂質土の卓越する地盤に造成された宅地である。地下水位は総じて高く、地震中に砂層の液状化が生じたことにより地盤に大きな残留変形がもたらされた。砂丘南側の緩傾斜宅地における被災家屋等の分布を図3.2.83に示す。砂丘崖そのものが崩壊して直接家屋に土砂が衝突した箇所もあったが、大部分は家屋そのものが地震力により破損したか、あるいは基礎地盤の大きな変状により上部に載った家屋が被害を受けたものである。

特に地盤変状が大きかった中段の三軒の住宅について、家屋周囲の地表面沈下量と家屋の基礎梁の鉛直変位量を計測した(図3.2.84)。宅地内の地表面には広範囲に顕著な沈下や隆起が見られ、最大70cm前後の鉛直相対変位が観測された。一部にはすべり面のような数本の大きな亀裂・段差が宅地内を横断していた。全体的な傾斜や沈下とあわせてこのような不連続的な残留変形が、家屋および基礎の被害をより深刻化させたと考えられる。同図中に示した三箇所から撮影した写真を写真3.2.101、102、103にそれぞれ示す。段差部分からはゆるい砂層の一部が見られ、これらが地震時に液状化したため、宅地全体に大きな変状をもたらしたと推定される。

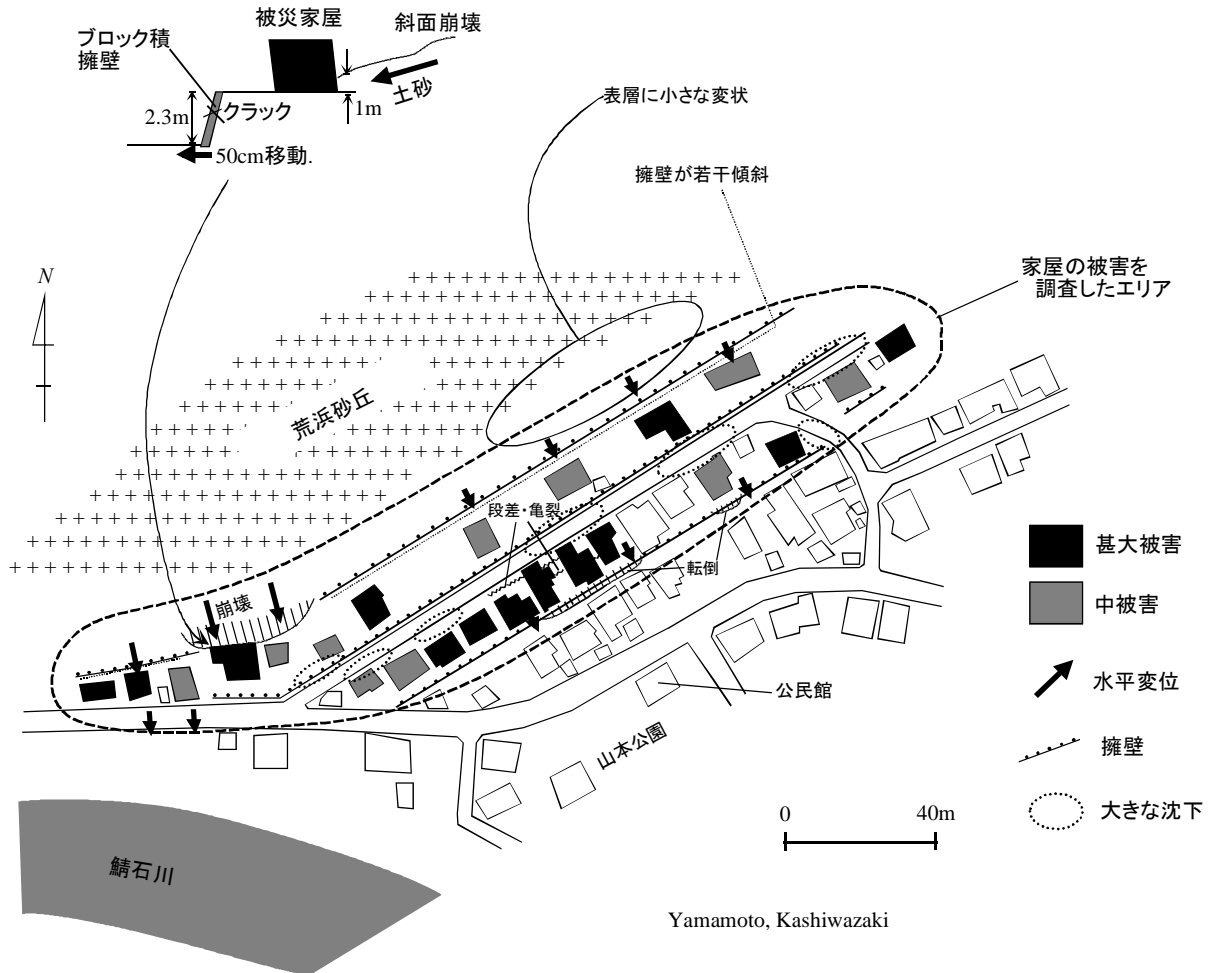


図 3. 2. 83 被災家屋等の分布

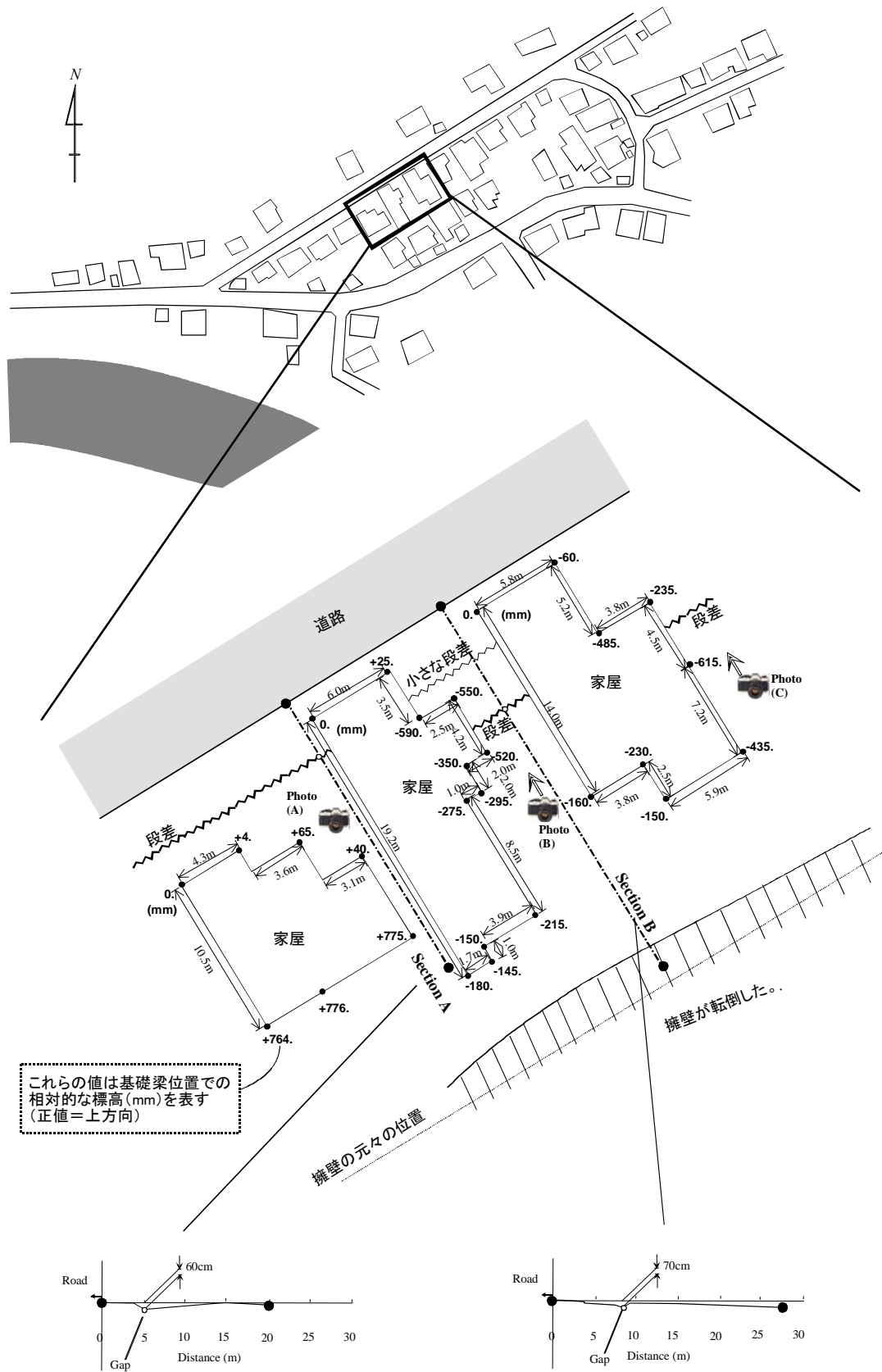


図 3.2.84 特に被害の大きかった家屋の宅地変状



写真3. 2. 101 宅地内に生じた段差
 (図3. 2. 84のPhoto(A))
 (写真3. 2. 100の家屋の別アングル)



写真3. 2. 102 宅地内に生じた段差
 (図3. 2. 84のPhoto(B))
 (写真3. 2. 99の家屋の別アングル)



写真3. 2. 103 宅地内に生じた段差
 (図3. 2. 84のPhoto(C))

⑧その他の各種個別被害の状況

図3. 2. 85に記号を印した地点における、宅地・建物・外構等の被害状況は以下の通りである。



図 3. 2. 85 その他の被害状況説明箇所 (柏崎市, 新潟県, (株)日さく提供資料一部改)

i)a 宅

前項に記したように、砂丘崖そのものが崩壊して家屋を損傷した一例で、砂丘斜面を土留めしていた擁壁が前傾し、写真 3.2.104 のように家屋の背面に衝突した。



写真 3.2.104 a 宅の背面に衝突した擁壁

ii)b 宅と c 宅

図 3.2.84 の 3 軒のうち左側と真ん中の家屋で、前者は写真 3.2.100 と写真 3.2.101、後者は写真 3.2.99 と同写真 3.2.102 のような状況である。b 宅は、図 3.2.83 中の波線の滑落崖が家屋前面に発生して大きく傾いたものの家屋の損傷は目立たないが、c 宅はこの滑落崖の上に建物が跨っていたために、写真 3.2.105 のように建物が裂損した。南側に隣接する下段の宅地との境界を土留めしていたブロック擁壁が、同写真 (d) のように崩壊し、下段の敷地も南側に水平変位した。



写真 3.2.105 家屋下を過った滑落崖被害 (c 宅)

iii)d 宅

写真 3.2.103 に見る宅地内の段差によって、図 3.2.86 に示すように建物が V 字型に折損し、建物の道路側の部位で 70~80cm の鉛直変位を生じた。

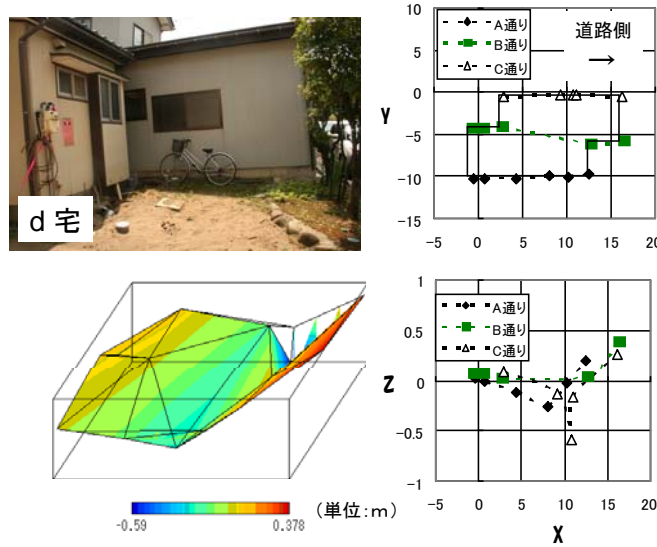


図 3.2.86 宅地の段差による d 宅の折損

iv)敷地境界ブロックと中・下段境界土留め擁壁

図 3.2.87 は、中段の e 宅と f 宅の敷地境界ブロックの変位を示す。延長 15m で約 55cm 沈下し、中央の大きな段差とともに、中・下段の境界ブロック擁壁の前傾に伴う擁壁背面の落ち込みが見られる。写真 3.2.106 のように、前傾したブロック擁壁が下段の家屋背面を直撃した。

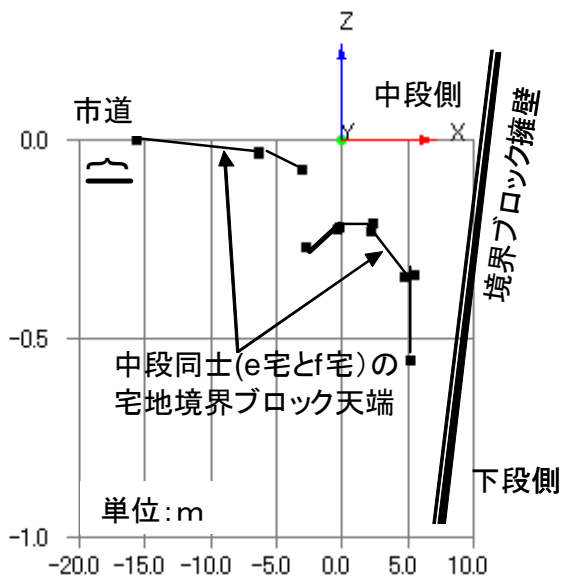


図 3.2.87 中段の敷地境界ブロックの変位

写真 3.2.106 土留めブロック擁壁の衝突

v)g 宅と h 宅およびその周辺

写真 3.2.107 は、g 宅（手前）と h 宅（奥）前の道路の亀裂で、写真左の砂丘斜面にも亀裂が目立つ（写真 3.2.108）。突き当たりの畑の中に噴砂痕があり（写真 3.2.109）、g 宅の宅地にも噴砂が見られる（写真 3.2.110）。h 宅は傾斜しており、宅地の南側部分は盛土のようで、南端は急傾斜になっている。写真 3.2.111 は、その下の水路で、地震によって水路の一部が消えたために、掘削し直したとのことであった。これらのことから、h 宅付近では砂丘から水路にかけて広い範囲で、地盤の液状化に伴う地すべりが惹起され、地すべり舌部の表層の変位と、液状化による川底の盛り上がりによって水路が消失したと考えられる。



写真 3.2.107 g 宅と h 宅前の道路の亀裂写真



写真 3.2.108 h 宅と向かいの砂丘斜面の亀裂



写真 3.2.109 h 宅奥の畑の噴砂痕

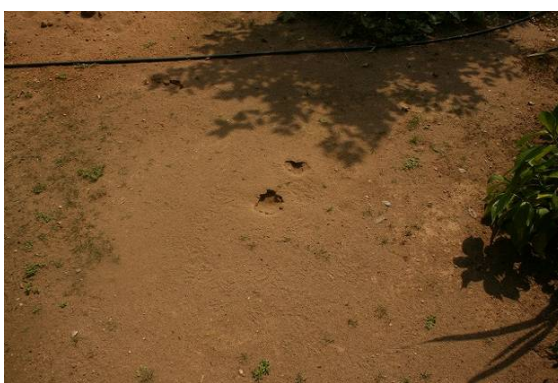


写真 3.2.110 g 宅の敷地の噴砂



写真 3.2.111 閉塞後に開削された i 宅裏の水路

vi)k 宅

k 宅の敷地は中段よりも低く下段よりも高いところに立地しており、道路側、l 宅、m 宅の 3 方が低く、3 方に変位した。道路側では側溝が潰れ、l 宅側の擁壁が前傾して車庫が傾いた。m 宅敷地との高低差は 1m 程度で、土留めブロック擁壁が前傾して m 宅側にも地盤が変位し、建物基礎が引っ張られて破断した。その結果、写真 3.2.112 のように土台の継手も外れ、床が開いた。やや高い中段側の敷地から押された水平変位量は建物中央で大きく、建物は弓なりに変形しているため、写真に見るように床の開きが不均等である。



写真 3.2.112 床の開きと基礎の離隔 (k 宅)

vii)m 宅

中段との境界ブロック擁壁がせり出し (写真 3.2.113 (a))、幅 47cm 程度の通路だった家屋背面の通路が 26cm に狭まり、上は建物に衝突した。同写真 (b) のように、地盤よりも家屋が 8cm ほど多く押されて前に出た。基礎の被害は見られないが、南西側敷地で液状化痕が著しく、居間の床は中央が隆起した (同写真 (c))。擁壁から離れた部屋であるので、中段から押された土が隆起したものでなく、建物下地盤の液状化による軽量部分の浮き上がりと思われる。後に住人が床下に潜って砂地を均し、束の高さを調節して補修した。



写真 3.2.113 擁壁の衝突と建物の変位 (m 宅)

viii) o 宅

中断の f 宅の擁壁がせり出して家屋背面に衝突し、家屋と敷地を玉突き状に前面道路側に押し出した（写真 3.2.114）。擁壁前面の宅地表面に水が滲出して湿地状態であり、地下水位は宅地表面にほぼ一致する。敷地内に噴砂が見られるとともに道路側の庭は隆起し、写真の宅地内のコンクリート通路も道路より 20cm 余り隆起した。



写真 3.2.114 玉突き状に押された下段 (o 宅)

ix)r 宅

この家屋は写真 3.2.86 (d) の崩壊した擁壁下に位置し、写真 3.2.115 の雨樋パイプの曲がりによると、建物よりも敷地が 8cm 多く変位した。



写真 3.2.115 建物と敷地の相対変位 (r 宅)

⑨山本団地の液状化被害模式図

当該地の液状化被害の典型的パターンは、**図 3.2.88** の A-A'断面の被害模式図に代表される。なお、山本団地は 2004 年新潟県中越地震では大きな被害が無く、東隣の新興住宅地であるピーチタウンに被害が顕著であったが、今回はピーチタウンに液状化した痕跡は見られなかった。

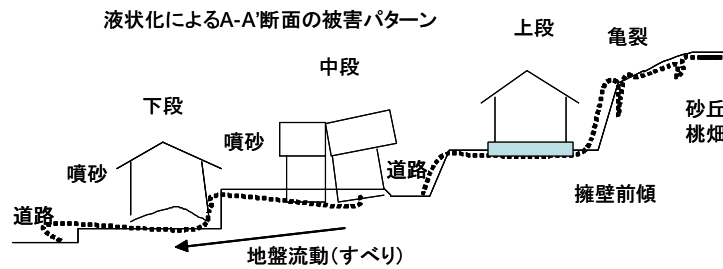


図 3.2.88 山本団地の被害のパターン

⑩山本団地の被災要因と復旧方法

山本団地は、被災建築物応急危険度判定の結果、団地戸数 129 戸中 49 戸が危険度判定要
注意以上となった。被災を受けた要因としては、地下水位が高い砂地盤の宅地であり、そ
の地盤の砂の粒子が均一であることから、元から液状化が発生しやすい状況であったとこ
ろに、地震動によって液状化現象が起こったといえる。復旧の方法として「大規模盛土造
成地滑動崩落防止事業」を導入するにあたり、宅地耐震化のスキームである「造成宅地防
災区域」の新潟県指定が平成 19 年 12 月 21 日公示された。

対策工法は、砂地盤の液状化対策として、深さ 2~3m に暗渠管を布設し、地下水位を低下
させ、地震発生時に生ずる間隙水圧の低減を図るものである。

⑪自然流下方式による液状化対策

i) 工事概要

大規模盛土造成地滑動崩落防止事業の工事概要
は、以下の通りである。**図 3.2.89** は、暗渠管の
断面図で、地下 2.0~3.5m の深さに、直径 20 c
m から 30 c m の暗渠排水管を布設し、管の廻り
には吸出し防止シートを巻き、その上には、フ
ィルター材としてクラッシュランを埋め戻す。

○暗渠排水管：φ 200~300mm L=約 1.3km

○全体事業費：約 160、000 千円

地元負担 1/4 40、000 千円

○工事期間：H19 年度~H20 年度

○事業主体：柏崎市

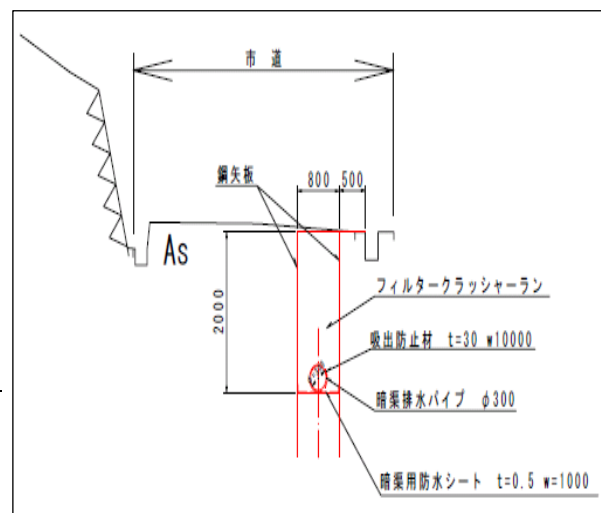


図 3.2.89 暗渠管断面図

図 3.2.90 は、暗渠排水管を配置する平面図で、青線が平成 19 年度発注工事区間、赤線が平成 20 年度発注工事区間となる。基本的に市道に埋設するが、この地域は湧水量が多いため、宅地内にも配管する必要がある。

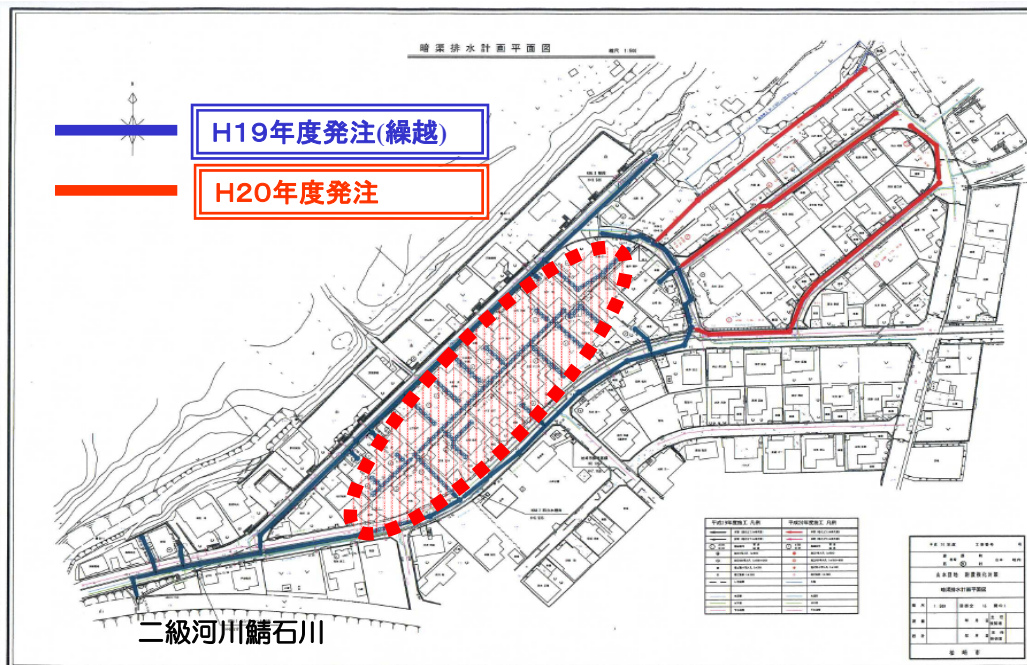


図 3.2.90 暗渠排水管平面図

図 3.2.91 は、山本団地の横断面図及び暗渠排水管の位置である。A 地区は、裏山の砂山が地すべりを起こしたため、地すべり対策を講じた。B 地区は山本団地の造成地で、3 段のひな壇状となっており、この 2 段目、3 段目の造成地が液状化現象を起こしたため、市道内に暗渠排水管を埋設し、地下水位の低下を図る。また、2 段目と 3 段目の間にも、1.5 m ほどの段差があるため、ここにも暗渠排水管を埋設し、さらに、市道と直角方向に宅地内にも暗渠排水管を配管する。

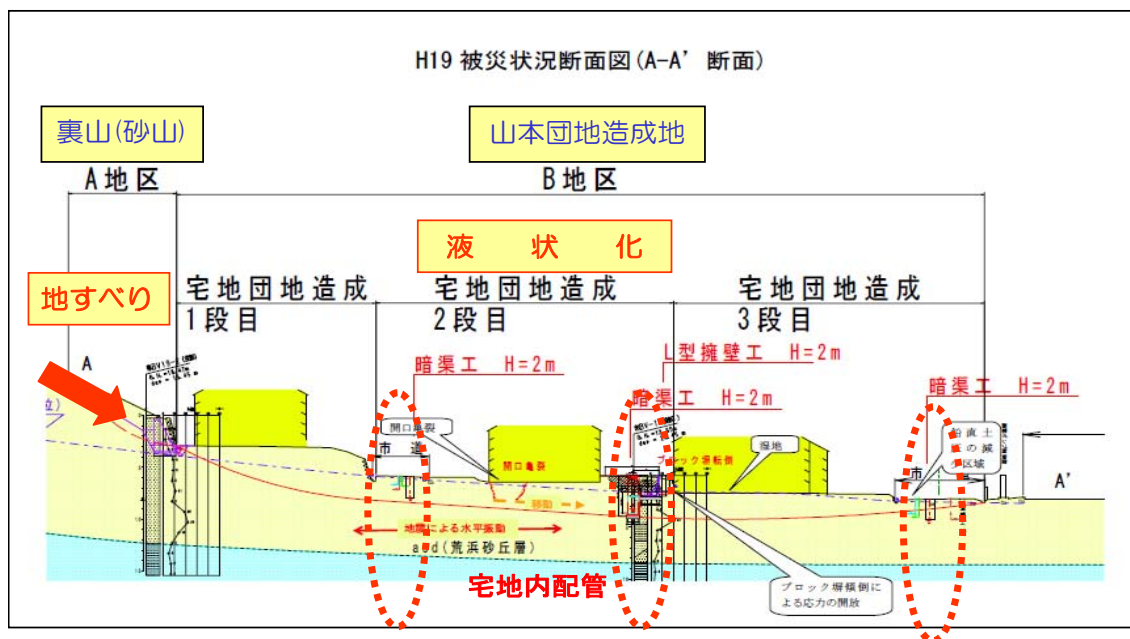


図 3.2.91 山本団地の横断面及び暗渠排水管位置

ii) 工事状況

写真 3.2.116 は、団地の 2 段目と 3 段面の中間の暗渠管布設位置で、段差は 1.5m くらいある。写真 3.2.117 は、暗渠排水管の布設状況で、土被り 2~3m に暗渠管を布設する。地下水位が高いので、ウエルポイントを布設し、地下水の低下を図りながら工事を進めた。



写真 3.2.116 暗渠管布設位置



写真 3.2.117 暗渠排水管の布設状況

iii)工事見学会

以下の写真は、平成20年7月末に実施した地元住民への工事見学会の状況である。柏崎市が事業主体となっており、地域住民に現地の水の出具合や、工事の難しさ等を確認してもらうため、実施した。この見学会によって、その後の説明会において、大量の地下水を一刻も早く排除する工事を進める要望や、工事関係者への現場の苦勞に対しねぎらいの言葉があった。



写真 3.2.118 工事見学会の様子



写真 3.2.119 工事見学会の様子

⑫住民との合意形成

復旧に向けた住民の思いとしては、「この地で再建する強い思い」、団地造成後30数年を経過し「今まで築いてきたコミュニティを守りたい思い」、「個人個人でなく、地域全体で地盤を復旧したい思い」があった。

一方、行政は、地域全体で地盤変動していることから、その原因の追跡のため、「地域全体の地質調査の実施」、住宅も被災を受けているので、「地元住民の負担軽減を国や県に要望」、「大規模盛土造成地滑動崩落防止事業の被災宅地への適用」を推進していた。

そこで、復興基金の受け皿や、その後の管理を担う、「山本団地宅地管理組合」を地元主導で設立し、市も参加することで、住民との合意形成を図った。この管理組合の役員と協議を重ね、「市で工事を発注」「市で地元負担分の分担金の考え方を決定」「市が賦課徴収権者」となった。地元負担額は、4,000万円になった。

⑬まとめ

i)大規模盛土造成地滑動崩落防止事業に携わって

既存メニューの中で、私有財産である土地の復旧を公的支援できるのは、この事業だけであった。山本団地では、被災状況の差はあっても、地域全体で液状化対策が必要のため、地域が復旧に向けてまとまっていた。しかし、滑動崩落防止工事等の事業主体は、造成後の団地における地域住民では不可能で、一日も早い復旧に向け、地方公共団体が行わざるを得ない。また、今後予測される地震に備えた未然防止工事には、住民負担が伴うため、合意を得るのは困難である。

ii)ハザードマップの作成について

災害に対する備えという点では、自らが自分や家族、財産を守る日頃からの備えと行動する「自助」により災害対応力を高める上で、ハザードマップの作成は必要と思われる。自らが住んでいる地域及び土地の状況を知る上でも、重要な役割を示す。近年ようやく、洪水ハザードマップ、土砂災害ハザードマップの作成が進んできている。

(8) 建物の耐震性能と限界状態

(出典：液化化を考慮した地盤と構造物の性能設計、一部加筆修正)

①建築物基礎の耐震性能と限界状態の考え方

基礎構造は建物を支える重要な役割を負っており、さらにその基礎を支えるのが地盤である。建築物に求められる耐震性能は、表 3.2.22 に示すように、終局状態、損傷限界状態、使用限界状態の3つに分けられており、「建築基礎構造設計指針」では、それらの限界状態に対して基礎構造全体、基礎部材および地盤に求められる性能が設定されている。

ただし、地震の大きさに対応させた性能ではない。想定される地震に対してどの耐震性能を選択するかは、使用者である建築主や設計者が設定することが前提となっている。

終局限界状態は構造物や地盤の最大の損傷レベルを指し、構造物が人命を保護することを基本としている。この性能を満足するために基礎に求められる性能は建物の転倒、倒壊を防ぐことである。損傷限界状態は構造上何らかの被害が生じる状態を想定しており、再使用するために構造上の補修・補強などが必要な状態である、基礎に求められる性能は建物の継続使用を可能とする範囲に基礎の損傷を抑えることである。使用限界状態では建物・基礎を含めて常時の供用性を確保することが求められている。

表 3.2.22 建築物に求められる耐震性能³¹⁾

性能レベル (限界状態)	性能内容		
	基礎構造全体の性能(上部個々の基礎に関する性能)	個々の基礎に関する性能	
		基礎部材に関する性能	地盤の強度・変形に関する性能
終局限界状態	<u>基礎の破壊または変位によって、建物が破壊または転倒しない</u>	基礎部材が脆弱的に破壊しない。変形性能の限界に達して耐力の低下を生じない	<u>地盤の極限抵抗力を超過しない</u>
損傷限界状態	<u>基礎の変位によって、建物の損傷を生じさせない。基礎の残留変形によって、建物の使用性や機能性、耐久性に支障を生じない</u>	基礎部材に構造上の補修・補強を必要とするような損傷が生じない	<u>上部構造や基礎の耐久性に有害な残留変形を生じない</u>
使用限界状態	<u>基礎の変位によって、建物の使用性や機能性、耐久性に支障を生じない</u>	基礎部材に耐久性に支障が生じない	<u>上部構造の使用性や機能性、耐久性に支障を生じるような過大な沈・変形を生じない</u>

②建物の限界傾斜角

建物基礎の供用性は一般的に不同沈下で決まることが多い。表 3.2.23 は建築の傾斜角と障害の程度の関係で、地震によって建物が不同沈下した場合の沈下修正や建替えの際の目安となる。人間の生活に生理的な支障が生じるのは第 4 期段階である 15/1000 以上の傾斜を生じる場合であるが、被災事例においては木造、RC 造などとも 1/100 以上傾斜した場合について沈下修正や建替えをしているので、建物の供用性を考えると概ね 1/100 を限界傾斜角としている例が多いと考えられる。

表 3.2.23 建物の傾斜角と障害の程度³²⁾

段階	RC 造・CB 造・S 造	木造	傾斜角の限度
初期	壁に幾分かの亀裂が発生するが使用上の障害とはならない	モルタル外壁・コンクリート 犬走りに亀裂発生	1/1000
第 1 期	壁の亀裂、仕上材の障害起こる。天井クレーンの走行障害起こる	束立床に不陸を生じ、布基礎 土間コンクリートに亀裂発生	3/1000
第 2 期	非たわみ性仕上材の変形の限界。外見上傾斜が気になる	構造材・窓出入口枠材の接合部に隙間を生じ、壁に亀裂が発生	5/1000
第 3 期	<u>たわみ性仕上材の変形限界。床が傾斜して支障をきたす</u>	<u>柱が傾き、建具の開閉不良。床が傾斜して支障をきたす</u>	<u>10/1000</u>
第 4 期	倒壊の危険あり。床の傾斜の生理的限界	柱の傾斜著しく倒壊の危険あり、床の傾斜は生理的限界	15/1000

注) RC 造：鉄筋コンクリート造、CB 造：コンクリートブロック構造、S 造：鉄骨造

③液状化に起因する被災モードから見る耐震性能・限界状態

表 3.2.24 は、過去の地震で被災した建築物についての液状化に起因する特徴的な被災事例である。また、写真 3.2.120 は鳥取県西部地震における直接基礎の戸建て住宅(表 3.2.24 の No.5)の液状化によって不同沈下が生じている事例である。同様に兵庫県南部地震の集合住宅でも不同沈下が生じている事例があり、いずれの場合も建て起こしの基準として 1/100 が境界となっている。これは、床の傾斜が 1/100 を超えると人間の居住性に支障が生じることを考慮したためと思われる。特に建物を居室として利用する場合は、生活時間が長いいため床の傾斜に対する感覚はシビアになると考えられる。

一方、杭基礎である No.2、3、4 の事例は上部の建物には大きな被害が見られないものの、杭が液状化や流動に伴う地盤の変形により亀裂を生じたり傾斜したりすることで、建物が傾斜したと考えられる。No.4 の事例では、海側の杭が液状化に伴う流動により 2 点ヒンジを生じたことで支持性能を喪失し、建物が大きく傾斜している。なお、No.3 の事例では最

大 1/38 も建物が傾斜したにもかかわらず、1 年半も利用している。事務所は室内での生活時間が居室に比べると短いことから、供用性の面では居室より限界状態が緩いとも判断できる。

表 3.2.24 液状化による建築物の被災事例³³⁾

No.	1	2	3	4	5
対象構造物	建築(集合住宅、直接基礎)	建築(事務所、杭基礎)	建築(事務所、杭基礎)	建築(事務所、杭基礎)	戸建て住宅
被災モード	建物の不同沈下	・建物:不同沈下(最大1/30)構造被害はなし ・杭:亀裂、傾斜(最大 1/20)	・建物:不同沈下(最大 1/38)構造被害はなし ・杭:せん断クラック、傾斜(最大 1/27)	・建物:不同沈下(最大 1/18)構造被害はなし ・杭:水平クラック、傾斜(最大 1/10)	家屋の不同沈下
事例	西宮共同住宅	Nビル(ポートアイランド) RC造 2F PHC 杭 A 種 (L=35m)	深江浜 Mビル S造 3F PC 杭 A 種 (L=28m)	東灘区のビル RC造 3F PC 杭 A 種 (L=20m)	米子市安倍彦名団地
液状化の寄与度	液状化によって沈下が生じた。周辺で噴砂が確認されている	液状化に伴う地盤変形によって杭が変形し、被害が生じた。護岸からの距離 260m	液状化に伴う地盤変形によって杭が変形し、被害が生じた。護岸からの距離 350m	液状化に伴う流動によって海側の杭に大きな変形が生じた。護岸からの距離 6m	団地内の各所で噴砂が生じた。
要求性能(重要度高低)	地震後も、快適に日常生活を送れる(床の傾斜によって目眩や吐き気を生じない)	床の傾斜が生理的限界を超えない	床の傾斜が生理的限界を超えない	床の傾斜が生理的限界を超えない	地震後も、快適に日常生活を送れる(床の傾斜によって目眩や吐き気を生じない)
要求性能は何によって決まるか	供用性	供用性	供用性	供用性	供用性
限界状態	1/100 以下?	15/1000 以下?	15/1000 以下?	15/1000 以下?	不同沈下 1/100 程度以下
対象地震	兵庫県南部地震	兵庫県南部地震	兵庫県南部地震	兵庫県南部地震	鳥取県西部地震
対応	1/100 以上傾斜した棟(5 棟/150 棟)について建て起こしを実施した。	建物解体	地震後 1 年半使用したあと解体	不明	各戸によって異なるが 1/100 程度以上不同沈下した家屋は持ち上げて水平化



写真 3. 2. 120 鳥取県西部地震で不同沈下した住宅の例³⁴⁾

3.2.2 現地調査

2011年3月11日14時46分に発生した東北地方太平洋沖地震(M9.0)によって、関東地方で液状化した都道府県と市町村をまとめた³⁵⁾のが表3.2.25である。茨城県で液状化が発生した市町村数は36市町村、次に千葉県で25市町村となり、両県の液状化被害が非常に多い。

東北地方太平洋沖地震では、図3.2.92、93に示すように関東地方の広い範囲にわたり地盤の液状化現象が発生し、住宅、道路、河川堤防、港湾施設、ライフライン等に多大な被害が発生した。国土交通省関東地方整備局と公益社団法人地盤工学会では、既にこれらの地盤液状化現象の実態を把握、解明するために共同で調査を実施し、その成果を報告書に取りまとめている^{35) 36)}。各地域の液状化被害については、大学や建築研究所のホームページ(HP)でも現地調査報告がなされている。また、1987年12月17日に発生した千葉県東方沖地震等過去の地震においても液状化の発生が報告³⁵⁾されている。

東日本大震災の関東地方において液状化が発生した各地の被害状況について現地調査を行った。宅地液状化被害では、図3.2.94に示す潮来市日の出地区のように埋立地、干拓地の湖沼部分で埋め立て地盤全体に激しい液状化が発生している。地震直後の液状化による噴砂の状況は、2011年3月29日撮影の衛星画像Google Earthの写真3.2.121から噴砂量が多く地区全域が住宅被害を受けていることがわかる。潮来市日の出地区では、主な被害状況として写真3.2.122の宅地地盤の液状化に伴う大規模な噴砂状況、写真3.2.123の建物の基礎部の割れや段差、写真3.2.124の中学校の校舎や体育館での建物基礎地盤の沈下、写真3.2.125の木杭の抜け上がり、写真3.2.126の道路の側溝の隆起現象、写真3.2.127のライフラインの浮き上がり現象等が生じている。

潮来市日の出区では、周囲は液状化による被害を受けた中で、図3.2.95のように建物の沈下・傾斜を測定した2丁目から6丁目の住宅のうち、建物の傾斜や沈下が生じていなかった箇所があったので、住宅の所有者に直接的にヒアリング調査を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- a) a宅：造成前に鋼管杭を50本程度、長さ7mを打設している。建物の沈下は一切発生していないが周辺地盤が多少沈下している。隣接地の同時期の同建物構造で鋼管杭をしていないものは25cm程度沈下し、沈下修正工事をしていた。
- b) b宅：造成前に鋼管杭を40本程度打設している。建物・地盤の沈下は一切発生していない。
- c) c宅：他の敷地に対して周囲を擁壁で囲み、1m程度盛土している。建物の傾斜・沈下はなく、敷地に噴砂やクラック等の地盤変状が見られない。ただし、敷地の周辺の擁壁の一部が変状していた。

この地域の地下水位は地表面下0.7~0.8m程度にあることから、液状化対策は支持層までの杭工法や非液状化層1.7~1.8m程度以上あればよいことが明らかとなった。このメカニズムは、石原らの液状化層(H1)と非液状化層(H2)の関係にあるように、非液状化層が浅

層盤上に一様に噴砂が地表面に出ることがなく、建物の傾斜・沈下を軽減できたためであると考えられる。このことから、非液状化層を一様に確保する浅層盤状改良工法は、液状化対策工法として有効性が高いと考えられる。また、さらに、盛土や地下水位低下ができる場合には、浅層盤状改良厚さを薄くし、コスト軽減を図ることも考えられる。

九十九里の旭市では、砂丘地形であるものの液状化が多数発生している。かつて外房は砂鉄の産地であり、旭市周辺にも砂鉄鉱床が多く存在する。過去の砂鉄採掘跡地の地図⁴²⁾を図 3.2.96 に、液状化による宅地被災箇所を図 3.2.97 に示す。この砂鉄採掘跡地の液状化は、図 3.2.98 に示すように 1987 年の千葉県東方沖地震の際にも液状化の発生報告⁴³⁾がある。図 3.2.99 は、過去の砂鉄採掘跡地の地図と液状化被災地箇所の重ね図で、位置が合致することが分かる。ただし、図 3.2.98 の日本の液状化履歴マップと過去の砂鉄採掘跡地の地図とは一致していないが、液状化被災地箇所と一致している。写真 3.2.128 は液状化による建物の基礎地盤の沈下、写真 3.2.129 は道路側溝の沈下を示す。このような採掘跡地が不確定な場合の液状化対策工法を行うためには、一般的な戸建て住宅のスウェーデン式サウンディング調査では把握できないために、高密度表面探査等を駆使して地盤条件を行う必要がある。このように地盤条件が不確定な場合には、浅層盤状改良工法が有効な液状化対策と考えられる。

このような条件が揃う場所は、微地形で分類すると、海岸や池・沼などの水面を埋め立てた所や、旧河道、砂丘のきわ、自然堤防のきわといったところが多い。東日本大震災の関東地方において液状化が発生した各地の被害状況について現地調査を行った。その結果、液状化被害が甚大な箇所を①地下水が浅くて、②砂地盤で、③緩い状態にある地盤の 3 つの条件が揃う微地形分類等とその特徴によって大まかに分類整理すると表 3.2.26 のようになった。このように、微地形分類等に応じた液状化対策工法が考えられるべきだが、これまでの液状化被害分析により一様な非液状化地盤を形成できる浅層盤状改良工法は、建物の強固な支持地盤となり、液状化が発生してもめり込み沈下が生じにくく、戸建て住宅の液状化対策工法としては有効性が高いと考えられる。

表 3. 2. 25 液状化発生箇所を含む市区町村

都道府県	市区町村	液状化が発生した市区町村数
茨城県	水戸市、日立市、土浦市、古河市、石岡市、結城市、龍ヶ崎市 下妻市、常総市、常陸太田市、北茨城市、取手市、つくば市 ひたちなか市、鹿嶋市、潮来市、守谷市、那珂市、筑西市、坂東市 稲敷市、かすみがうら市、神栖市、行方市、銚田市、つくばみらい市 茨城町、大洗町、東海村、美浦村、阿見町、河内町、八千代町 五霞町、境町、利根町	36
栃木県	栃木市、真岡市、大田原市	3
群馬県	館林市、板倉町、邑楽町	3
埼玉県	さいたま市、熊谷市、川口市、行田市、加須市、春日部市、羽生市 越谷市、戸田市、鳩ヶ谷市、和光市、久喜市、八潮市、幸手市 吉川市、宮代町	16
千葉県	千葉市、銚子市、市川市、船橋市、木更津市、松戸市、野田市 成田市、東金市、旭市、習志野市、柏市、八千代市、我孫子市 浦安市、袖ヶ浦市、印西市、南房総市、匝瑳市、香取市、山武市 栄町、神崎町、東庄町、九十九里町、	25
東京都	中央区、港区、墨田区、江東区、品川区、大田区、北区、板橋区 足立区、葛飾区、江戸川区	11
神奈川県	横浜市、川崎市	2
総 計		96

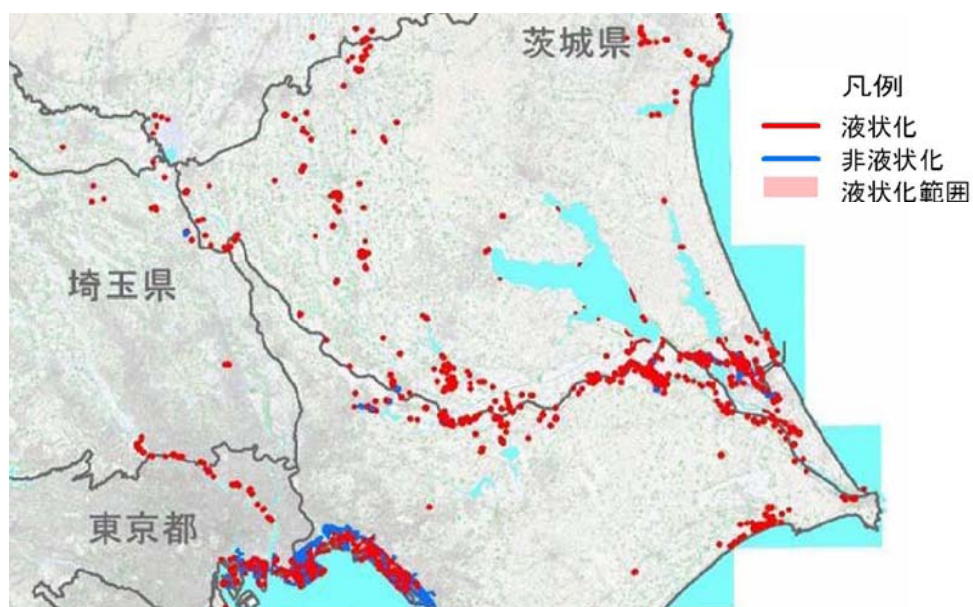


図 3. 2. 92 関東地方の液状化発生分布³⁵⁾

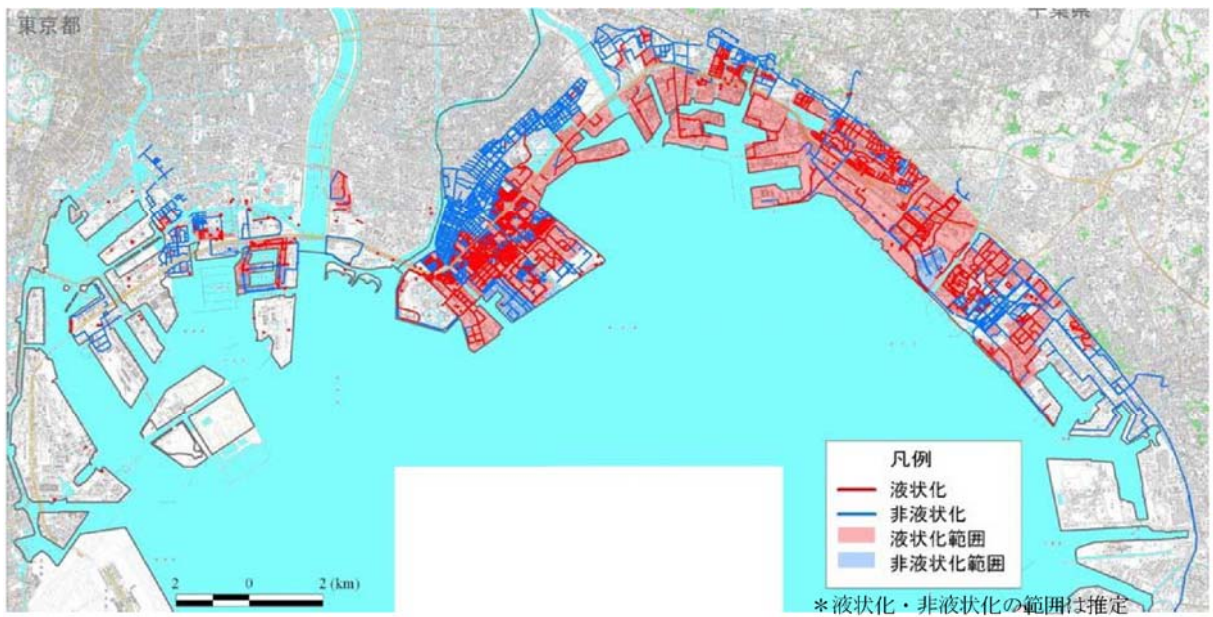


図 3.2.93 東京湾岸の液状化発生分布³⁶⁾

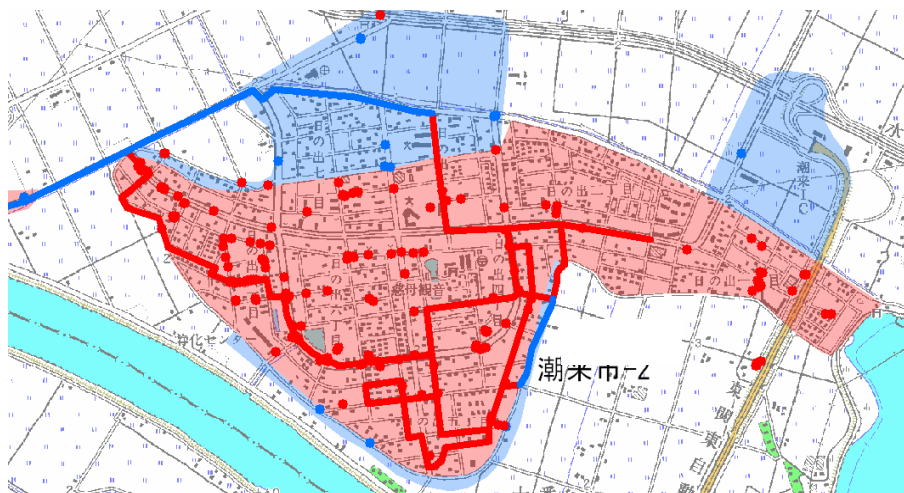


図 3.2.94 IH地区における液状化被害の全体図³⁶⁾

注) 赤色は液状化、青色は非液状化である。



写真 3. 2. 121 敷地での噴砂現象 (Google Earthより)



写真 3. 2. 122 宅地地盤の液状化に伴う大規模な噴砂状況



写真 3. 2. 123 建物の基礎部の割れや段差



写真 3. 2. 124 建物の基礎地盤の沈下



写真 3. 2. 125 木杭の抜け上がり



写真 3. 2. 126 道路側溝の隆起現象



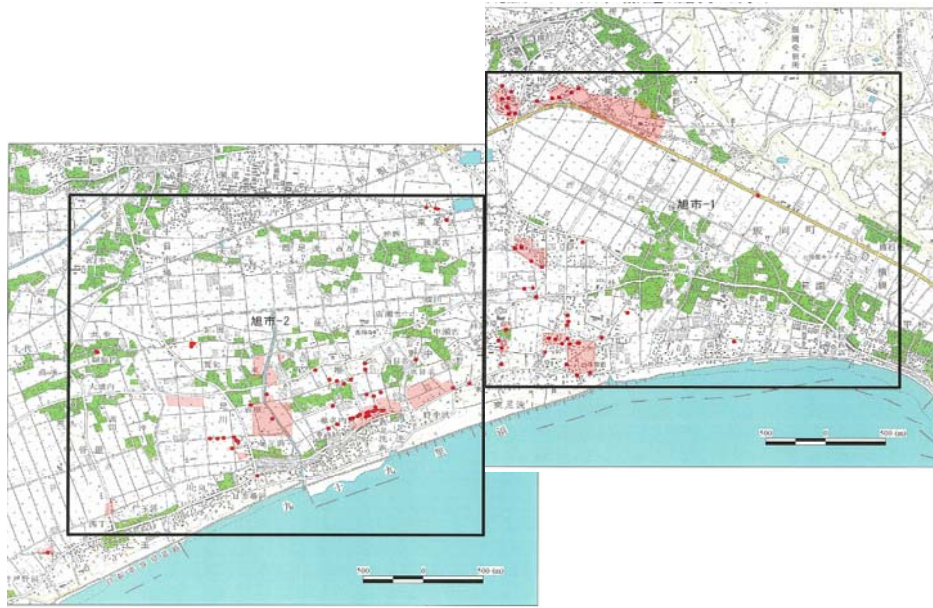
写真 3. 2. 127 ライフラインの浮き上がり現象



図 3. 2. 95 液状化による建物沈下が無い住宅



図 3. 2. 96 旭市の砂鉄採掘跡⁴²⁾



(a)地盤工学会調査



(b)罹災証明（黒地点が被災宅地）

図 3. 2. 97 液状化による宅地被災箇所



図 3.2.98 日本の液状化履歴マップ 745-2008 (若松加寿江著)



図 3.2.99 過去の砂鉄採掘跡地の地図と液状化被災地箇所の重ね図



写真 3. 2. 128 建物の基礎地盤の沈下



写真 3. 2. 129 道路側溝の沈下

表 3.2.26 液状化被害地区の旧地形分類

旧地形分類等	写真	特徴	地区
河川 (利根川の一部を埋め立てたところ)		<ul style="list-style-type: none"> ・側方流動を生じている。 ・大きな沈下・隆起を生じている。 	香取市佐原地区
池・沼 (池・沼を埋めたところ)		<ul style="list-style-type: none"> ・液状化層は浅いが、沈下量が大きい。 	鹿嶋市栗生団地 我孫子市布佐・都地区、久喜市南栗橋地区
湖 (内浦を埋めたところ)		<ul style="list-style-type: none"> ・干拓地全域が液状化している。 ・地下水位が非常に高い。 	潮来市日の出地区 (内浪逆浦)
海岸埋立地		<ul style="list-style-type: none"> ・液状化対象層が20m位ある。 ・粘性土地盤が液状化層の下にあるため、地下水低下・盛土による圧密沈下が生じる。 	浦安市、江東区新木場地区、千葉市美浜区磯辺地区、習志野市、鹿嶋市平井海岸地区一部横浜市港北区/金沢区、ひたちなか市、
採掘跡地 (良質な砂利・砂鉄採取のために掘削して埋め戻したところ)		<ul style="list-style-type: none"> ・周辺地盤は液状化しない。 ・10m位の採掘がある。 ・沈下量が大きい。 	神栖市掘割地区 神栖市深芝地区 鹿嶋市平井東部地区 旭市(砂鉄採取跡地)
丘陵谷埋め造成地		<ul style="list-style-type: none"> ・基盤傾斜に沿って側方流動している。 ・大きな亀裂、隆起現象が総じている。 	鹿嶋市駅周辺(宮中・宮下地区) 鹿嶋市鉢形 東海村緑ヶ丘団地 東海村南台団地
津波被害箇所		<ul style="list-style-type: none"> ・津波のために液状化の痕跡がなくなっている。 ・沈下量が大きい。 	鹿嶋市長栖地区(北公共埠頭) 鹿嶋市平井海岸地区一部 神栖市南公共埠頭

3.2.3 アンケート調査

平成23年3月11日にマグニチュード(M)9.0の東北地方太平洋沖地震が発生し、特に関東地方においては、震度6弱を観測した茨城県南部の内陸部の潮来市・神栖市や千葉県北部の震度5を観測した臨海部の浦安市・船橋市等の埋立て地盤等において、継続時間の長い地震動を伴う液状化の発生によって、約27,000件もの戸建て住宅等の傾斜・沈下等の広範囲で甚大な被害を生じた。

現在、液状化被害による傾斜程度の評価基準は、品確法(3/1000、6/1000)、被災度判定(1/100、1/60、1/20)など、統一されたものとなっていない。液状化判定の結果を基に対策工を検討する場合においては、設計の許容値(目標値)が明確でないため、どの程度の地震に対してどのような対策をすればよいのかが判らない状況にある。

そこで、液状化により沈下傾斜した住宅において、生活に支障を及ぼす傾斜の程度を数値化するために、沈下修復された、又は、沈下修復する予定の住宅がどのくらい傾斜していたのかを明確にするために、大手住宅メーカー・沈下修復業者に対して下記の内容についてアンケート調査を実施した。

- ① 建物構造(木造、木造軸組、木質プレブ、鉄骨造、RC造等)
- ② 階数(1階、2階等)
- ③ 用途(住宅、集合住宅等)
- ④ 基礎(布、べた)
- ⑤ 地震前の地盤(表層改良工法、柱状改良工法、鋼管杭工法、対策工法無し、深さ、本数)
- ⑥ 被害程度(N/1、000、不同沈下量)
- ⑦ 修復工法(土台揚げ工法、耐圧版工法、鋼管圧入工法、薬液注入工法、硬質ウレタン工法)
- ⑧ 費用:万円(～250、250～500、500～750、750～1000、1000～)
- ⑨ 受注形態(住宅会社、オーナー、地盤改良会社等)

このアンケート調査の総数は、東日本大震災で津波被害を受けた東北地方や新潟県等も含めた494件である。この中から、関東地方全域で液状化被害を受けた地域の458件、そのうち浦安市内の257件を抽出して分析を行った。分析内容は、主に以下の項目について行った。

- ①地盤対策工法の傾斜と沈下量の関係
- ②沈下修復工法と建物の傾斜と沈下量の関係
- ③建物構造別の傾斜と沈下量の関係
- ④地盤対策工法別の傾斜と沈下量の関係

3.3 戸建て住宅の被災調査結果

3.3.1 被災事例の収集の結果

(1) 2000年鳥取県西部地震による安倍彦名団地

地下水位調査の結果、下記のようなことが明らかとなった。

- ①ペーパードレーンとサーチャージ盛土を施工した地盤改良部は、液状化による被災が見られなかった。井戸を使用しているために液状化被害がなかった。
- ②在来水路の埋立てにより地下水位が上昇し、非液状化層が浅くなったために被災が大きくなった。
- ③無処理部は地下水位の傾斜が急であると、非液状化層の差により被災が大きくなった。
- ④地盤改良部の周辺では、地下水位が上昇するため無処理部の境界部分の家屋の被災が大きくなった。
- ⑤井戸を使用している箇所は、1.9mの非液状化層があるために液状化被害がなかった。

(2) 1995年兵庫県南部地震による尼崎築地地区

築地地区の地下水位はほとんどが G.L. -0.0 ~ -1.0m の深さにあるのに対し、水路を挟んで 43 号周辺から北寄りの地区では地下水位が G.L. -2.0m 以深と深く、これらの地区では液状化被害は見られなかった。そこで、対策工法は、圧密沈下はあるが嵩上げ盛土 1.5m と地下水位低下最大 1.5m の計 3.0m の非液状化層の設置を行った。

(3) 2007年潟県中越沖地震による刈羽村稲場

主な対策工法として、鋼管杭基礎の打設、暗渠による地下水位低下、アンダーピニング工法、柱状改良工法が施されていた。柱状地盤改良を施した建物は、裏山斜面の崩壊により建物は道路側へ約 50cm 水平移動し、それに伴い道路側の柱状改良体が道路側へ傾斜していた。鋼管杭を施した建物は、周辺地盤が約 20cm 沈下、建物が 5cm 不同沈下し、給排水管が断裂していた。鋼管杭と暗渠を施した建物では、13cm ほどの不同沈下、7/1000 の傾斜が発生していたが、他の建物と比較して外見上大きな被害は見受けられなかった。この家屋は鋼管杭を基礎に用いていたため、家屋の沈下および偏心は軽微であったが、道路側に約 15cm 移動した。宅地の地盤変状および家屋の被害は軽微であり、暗渠排水が液状化に対して効果を発揮したと推察される。暗渠のない裏庭の砂丘法尻付近では地盤が隆起したが、水位は非常に高い。

(4) 2007年潟県中越沖地震による柏崎市橋場町

新潟県中越地震以降に建設された数棟の戸建て住宅は、柱状改良や鋼管杭を設置していたため、今回の地震で被害が大きかった地域よりも地盤と家屋の被害が軽微であり、最大不同沈下量・最大傾斜角が相対的に小さかった。また、地下水位が浅いほど地盤や家屋に及ぼす液状化に起因した被害が大きくなるという傾向にあることが分かった。これは 1983

年の日本海中部地震における秋田市新屋松美町や、2000年鳥取県西部地震による米子市安倍彦名団地の傾向と同様の結果である。

(5) 2007年潟県中越沖地震による柏崎市松波2丁目

既存ボーリング調査資料による全体の地盤分析に加えて、噴砂や家屋基礎の破壊などの液状化被害が目立った宅地について、スウェーデン式サウンディング（SWS）調査と被害状況のヒアリング調査を行った結果、以下のことが明らかとなった。

- ①液状化層がGL-3m以深と深いにも拘わらず、調査した宅地では、噴砂のみ：2/3、地割れ＋噴砂：38%、地割れ or 噴砂：90%であった。
- ②噴砂か地割れがあると、家屋または宅地の90%は沈下または傾斜し、家屋の61%が沈下または傾斜した。
- ③表には現れていないが、家屋の沈下は二階建て部分が大きく、一階が車庫である部分や平屋部分では小さかった。
- ④巨視的地形と家屋の傾斜の間には必ずしも明確な関係は認められなかった。

(6) 2007年潟県中越沖地震による柏崎市山本団地

広範囲な液状化被害がある中で、噴砂、沈下等の地表面での地盤変状を起こさなかった箇所は、表層の非液状化層の存在が厚かったためと考えられる。そこで、大規模盛土造成地滑動崩落防止事業の液状化対策工法として地下水位低下工法が採用された。地下水位低下工法は、地下2.0～3.5mの深さに直径20～30cmの暗渠排水管を布設し、管の廻りには吸出し防止シートを巻き、その上フィルター材としてクラッシャーランを埋め戻した構造とした。

3.3.2 現地調査の結果

東日本大震災の関東地方において液状化が発生した各地の被害状況について現地調査を行った。潮来市日の出区では、周囲は液状化による被害を受けた中で、建物の傾斜や沈下が生じていなかった箇所があったので、ヒアリング調査を行った。

その結果、鋼管杭を打設している建物は、建物自体の傾斜・沈下はないが、周辺地盤に沈下が生じていた。また、建物の敷地に対して周囲を擁壁で囲み1m程度盛土している箇所は、建物自体の傾斜・沈下および周辺地盤の沈下はないが、敷地の擁壁が変状していた。この地域の地下水位は地表面下0.7～0.8m程度にあることから、液状化対策は支持層までの杭工法や非液状化層1.7～1.8m程度以上あればよいことが明らかとなった。このメカニズムは、石原らの液状化層（H1）と非液状化層（H2）の関係にあるように、非液状化層が浅層盤上に一様に噴砂が地表面に出ることがなく、建物の傾斜・沈下を軽減できたためであると考えられる。

この現地調査の結果、この液状化被害が甚大な箇所は、河川（利根川の一部を埋め立てたところ）、池・沼（池・沼を埋めたところ）、湖（内浦を埋めたところ）、海岸埋立地などの水面を埋め立てた所や、採掘跡地（良質な砂利・砂鉄採取のために掘削して埋め戻したところ）、丘陵谷埋め造成地、津波被害箇所等の微地形分類ができることが分かった。

3.3.3 アンケート調査の結果³⁸⁾

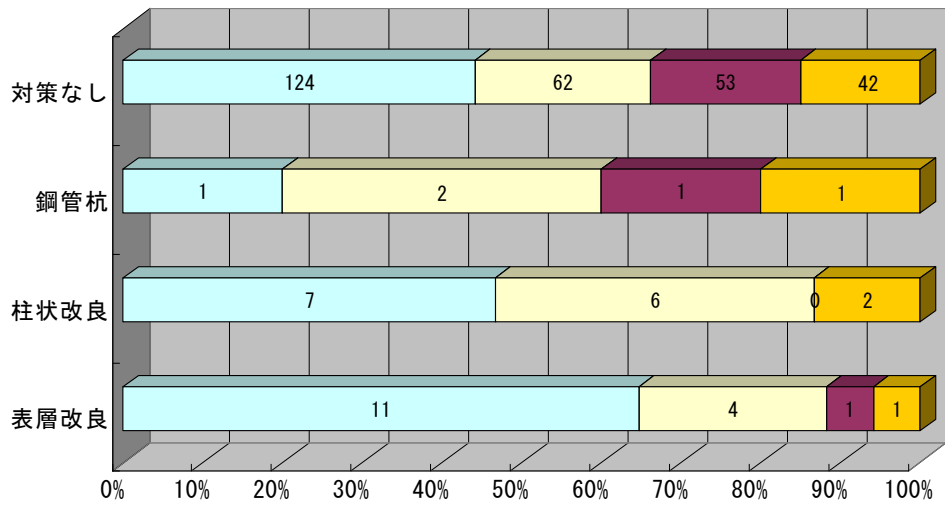
戸建て住宅の液状化被害の液状化対策としては、経済的で効果的な対策工法を評価する必要が生じた。そこで、地震前の支持地盤対策として施した各種地盤対策工法が液状化対策工法としての効果を検証するために、東日本大震災で被災した住宅の復旧に当たった大手住宅メーカー・沈下修復業者から広くアンケート調査により情報の提供を依頼した。入手した全数は、東日本大震災で津波被害を受けた東北地方や新潟県等も含めた 494 件である。この中から、関東地方全域で液状化被害を受けた地域の 458 件および浦安市内の 257 件を抽出し、分析を行った。

その結果、以下の分析結果のように柱状改良工法や鋼管杭工法が支持層にまで達していない場合は、表層改良工法の方が液状化発生した際に建物の傾斜角および不同沈下量が小さく、高い軽減効果があることが明らかとなった。

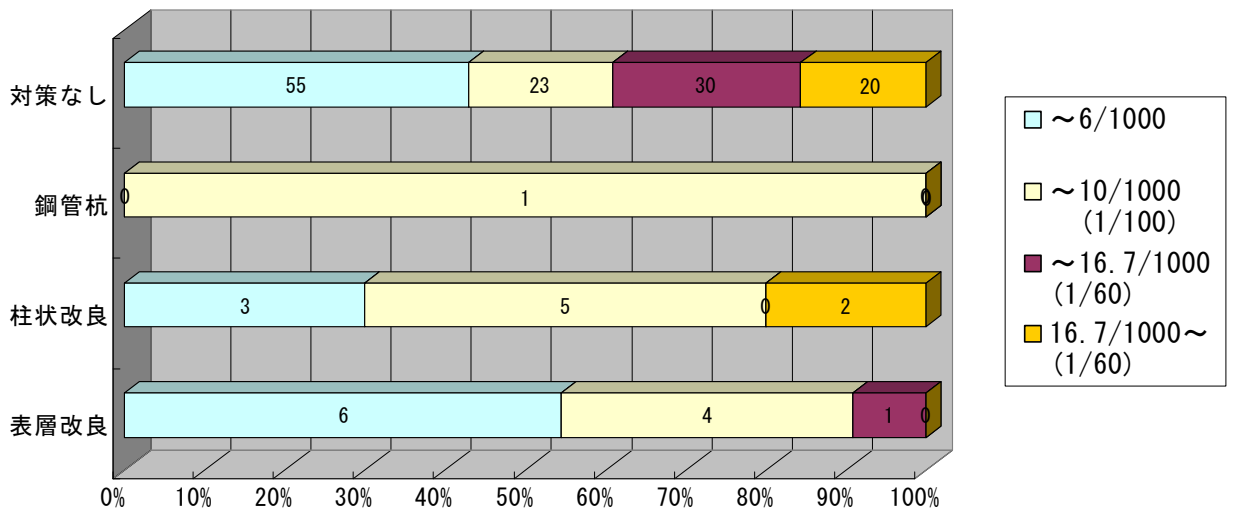
(1) 地盤対策工法の建物の傾斜と沈下量の関係

①地盤対策工法と建物の傾斜角の関係

図 3.3.1 は、地震前の地盤対策工法として行った表層改良工法、柱状改良工法、鋼管杭工法及び対策工法無しの 4 区分と建物の傾斜角の関係を関東地方全域と浦安市内の場合で帯グラフにしたものである。この結果から表層改良工法は、他の工法に比較して建物の傾斜角が小さく、高い軽減効果があることがわかる。ただし、この改良工法および鋼管杭工法は、6.5m程度の長さで支持層まで定着していない。



(a)関東地方全域

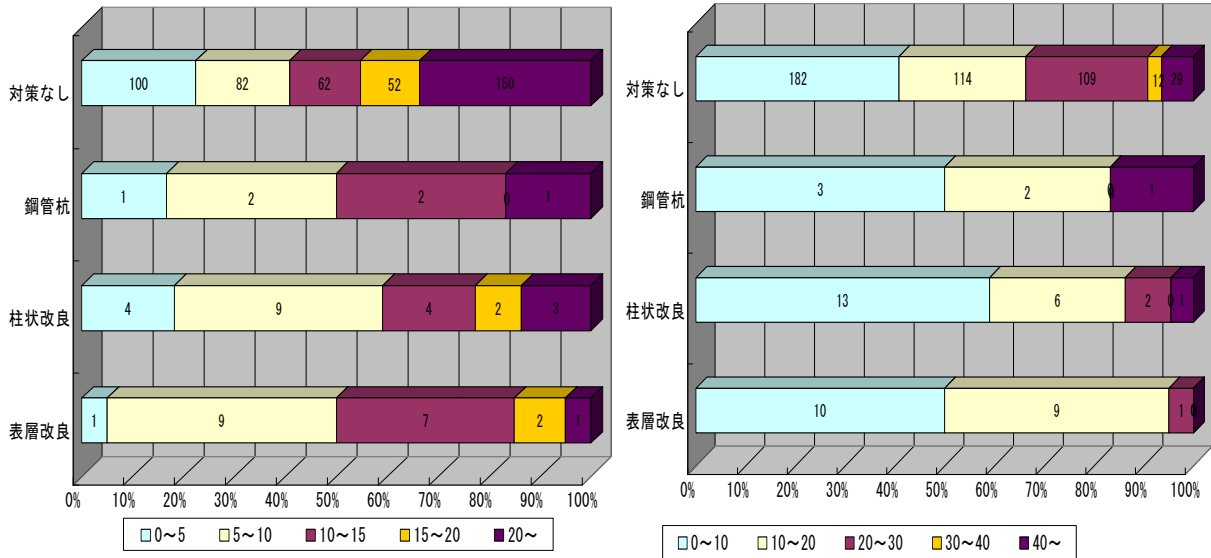


(b)浦安市内

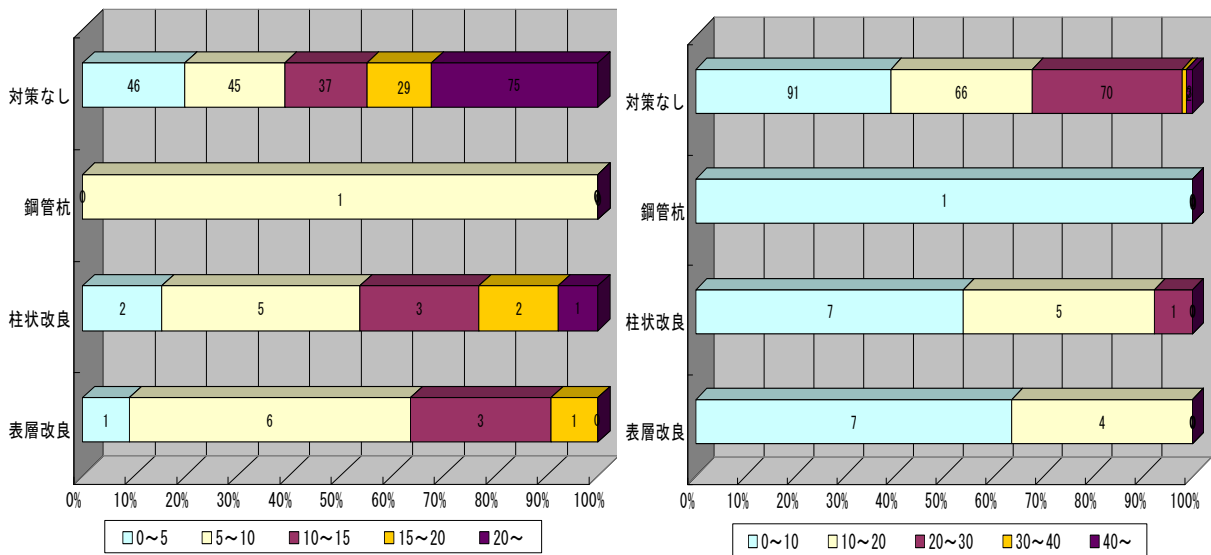
図 3.3.1 地盤対策工法と建物の傾斜角の関係

②地盤対策工法と建物の不同沈下量の関係

図 3.3.2 は、地震前の地盤対策工法として行った表層改良工法、柱状改良工法、鋼管杭工法及び対策工法無しの4区分と建物の不同沈下量の関係を関東地方全域と浦安市内の場合で帯グラフにしたものである。この結果から表層改良工法は、他の工法に比較して建物の不同沈下量が小さく、高い軽減効果があることがわかる。ただし、浦安市内の鋼管杭工法は、1件しかないので比較の対象として判断できない。



(a)関東地方全域

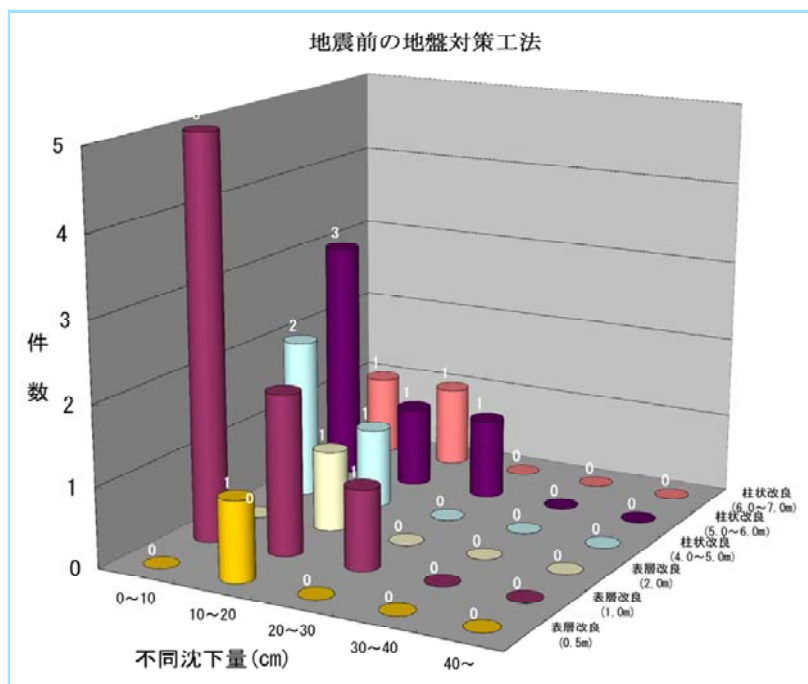


(b)浦安市内

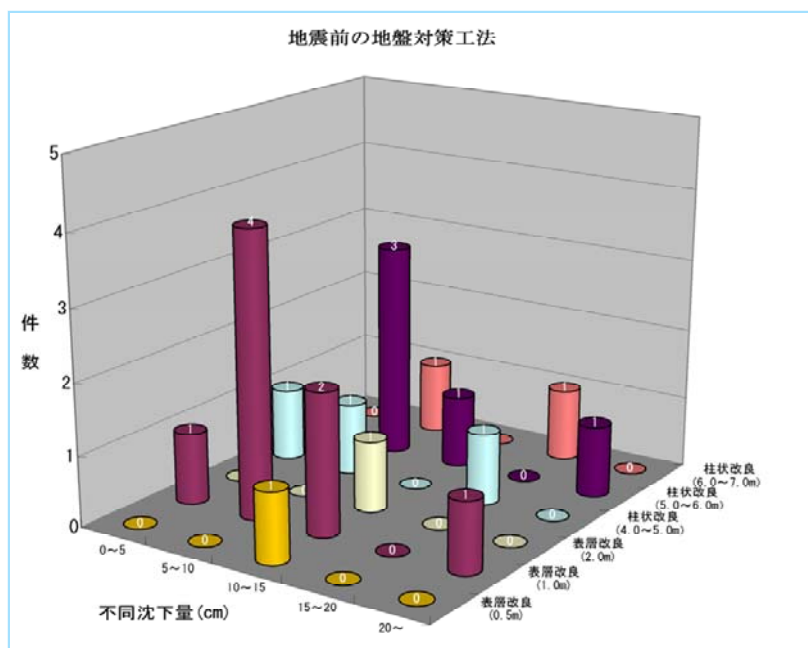
図 3.3.2 地盤対策工法と建物の不同沈下量の関係

③表層改良工法および柱状改良工法と建物の不同沈下量の関係

図 3.3.3 は、地震前の地盤対策工法として行った表層改良工法（0.5m、1.0m、2.0m）と柱状改良工法（4.0～5.0m未満、5.0～6.0m未満、6.0～7.0m）の場合と不同沈下量の比較を行ったものである。その結果、表層改良工法の方が柱状改良工法よりも不同沈下量が少ないことが分かった。



(a) 不同沈下量 50cm 以下の場合



b) 不同沈下量 25cm 以下の場合

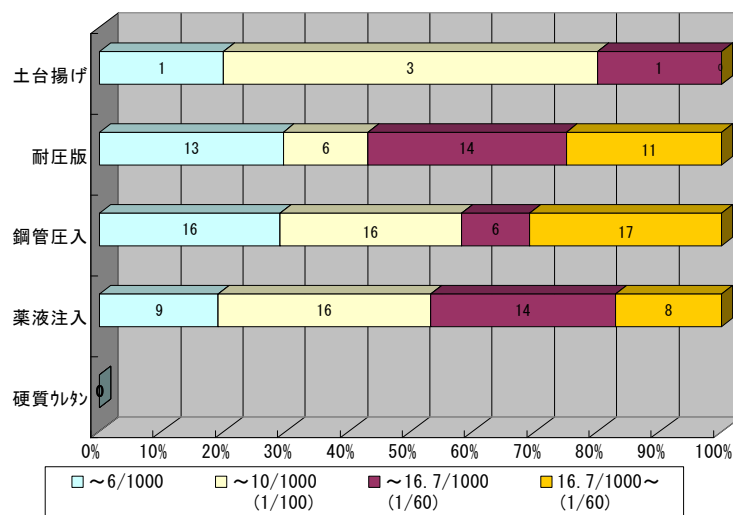
図 3.3.3 地盤対策工法と建物の不同沈下量の関係

(2) 沈下修復工法と建物の傾斜と沈下量の関係

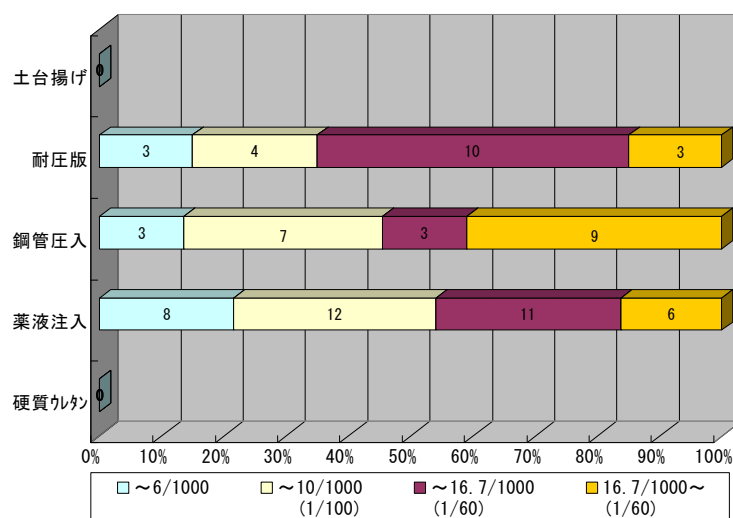
①沈下修復工法と建物の傾斜角の関係

図 3.3.4 は、地震後の沈下修復工法として行った①土台揚げ工法、②耐圧版工法、③鋼管圧入工法、④薬液注入工法、⑤硬質ウレタン工法の 5 区分と建物の傾斜角の関係を関東地方全域と浦安市内の場合で帯グラフにしたものである。⑤硬質ウレタン工法は、アンケート調査の結果で沈下のみ件数で傾斜の件数の記載がないために不明である。この結果から各沈下修復工法の傾斜角の目安は、以下のようにになると考えられる。

- a. 土台揚げ工法：1/100 以下
- b. 耐圧版工法：1/60 以下
- c. 鋼管圧入工法：すべて
- d. 薬液注入工法：1/60 以下
- e. 硬質ウレタン工法：不明（傾斜のデータなし、沈下のみ）



(a) 関東地方全域



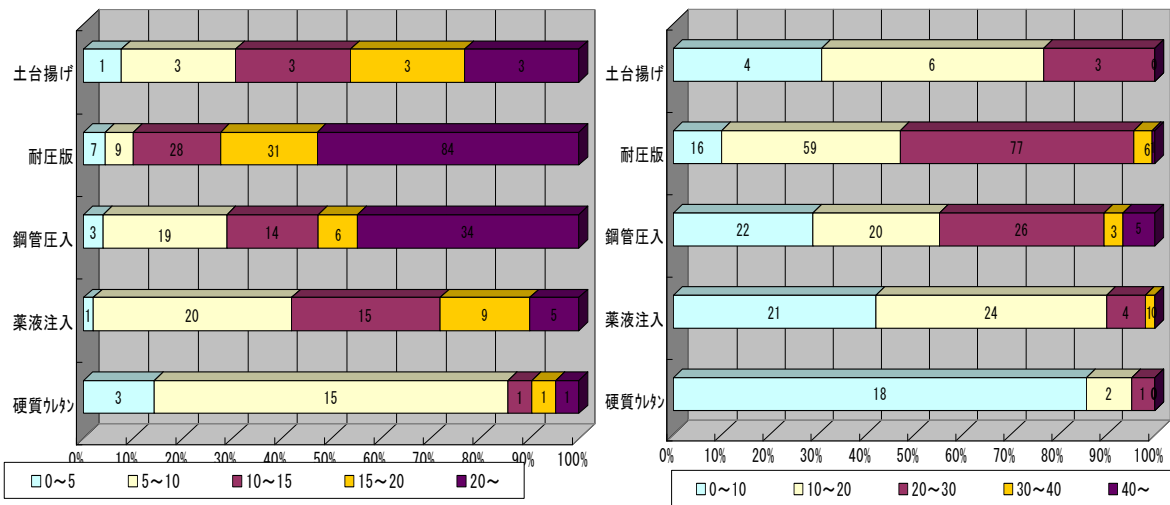
(b) 浦安市内

図 3.3.4 沈下修復工法と建物の傾斜角の関係

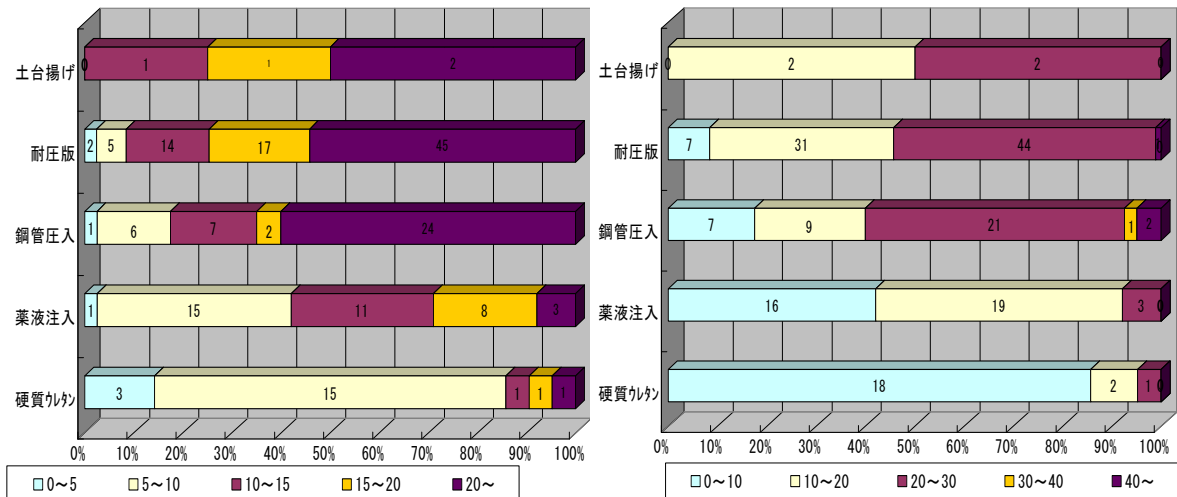
②沈下修復工法と建物の沈下量の関係

図 3.3.5 は、地震後の沈下修復工法として行った①土台揚げ工法、②耐圧版工法、③鋼管圧入工法、④薬液注入工法、⑤硬質ウレタン工法の 5 区分と建物の沈下量の関係を関東地方全域と浦安市内の場合で帯グラフにしたものである。この結果から各沈下修復工法の不同沈下量の目安は、以下のように考えられる。

- a. 土台揚げ工法：20 c m以下
- b. 耐圧版工法：30 c m以下
- c. 鋼管圧入：すべて
- d. 薬液注入：20 c m以下
- e. 硬質ウレタン：10 c m以下



(a)関東地方全域



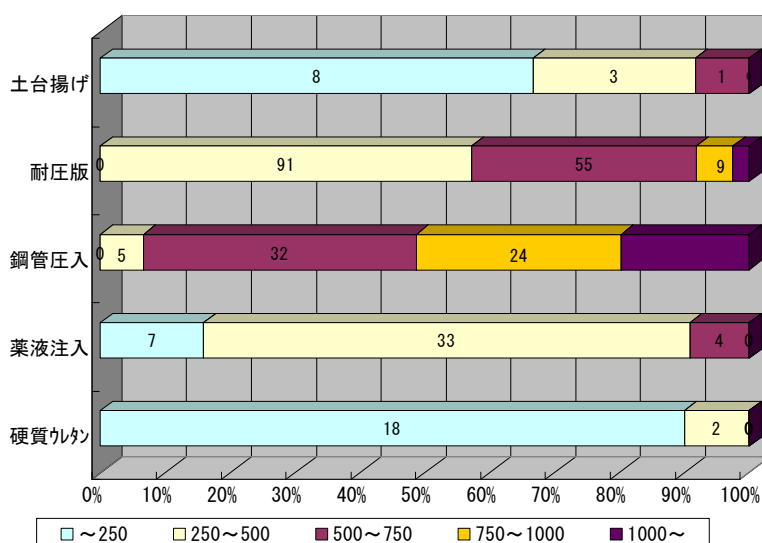
(b)浦安市内

図 3.3.5 沈下修復工法と建物の沈下量の関係

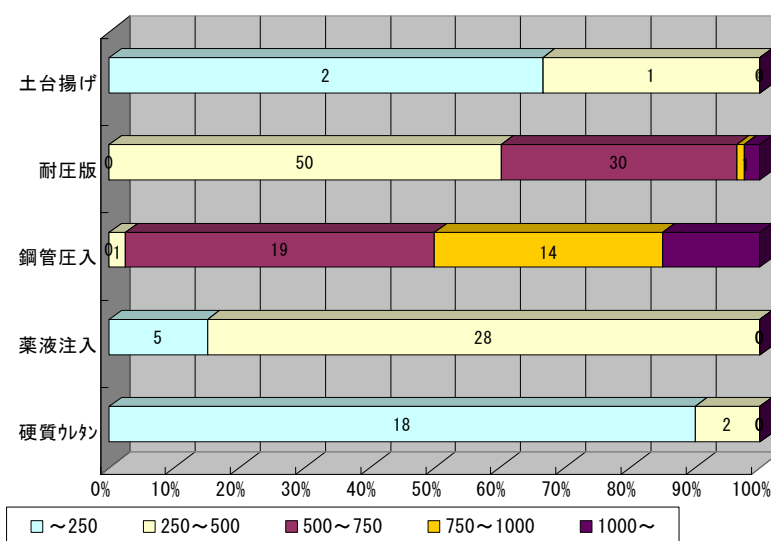
③沈下修復工法と費用との関係

図 3.3.6 は、地震後の沈下修復工法として行った①土台揚げ工法、②耐圧版工法、③鋼管圧入工法、④薬液注入工法、⑤硬質ウレタン工法の 5 区分と費用の関係を関東地方全域と浦安市内の場合で帯グラフにしたものである。この結果から各沈下修復工法の費用の目安は、以下のように考えられる。

- a. 土台揚げ工法：250 万以下
- b. 耐圧版工法：750 万以下
- c. 鋼管圧入：750 万～1,000 万
- d. 薬液注入：500 万以下
- e. 硬質ウレタン：250 万以下



(a) 関東地方全域



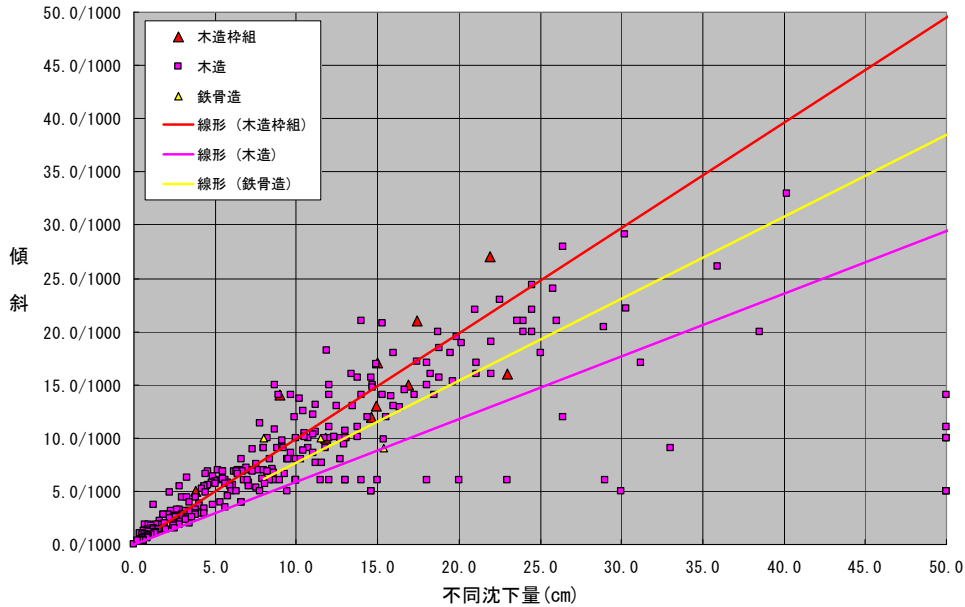
(b) 浦安市内

図 3.3.6 沈下修復工法と費用との関係

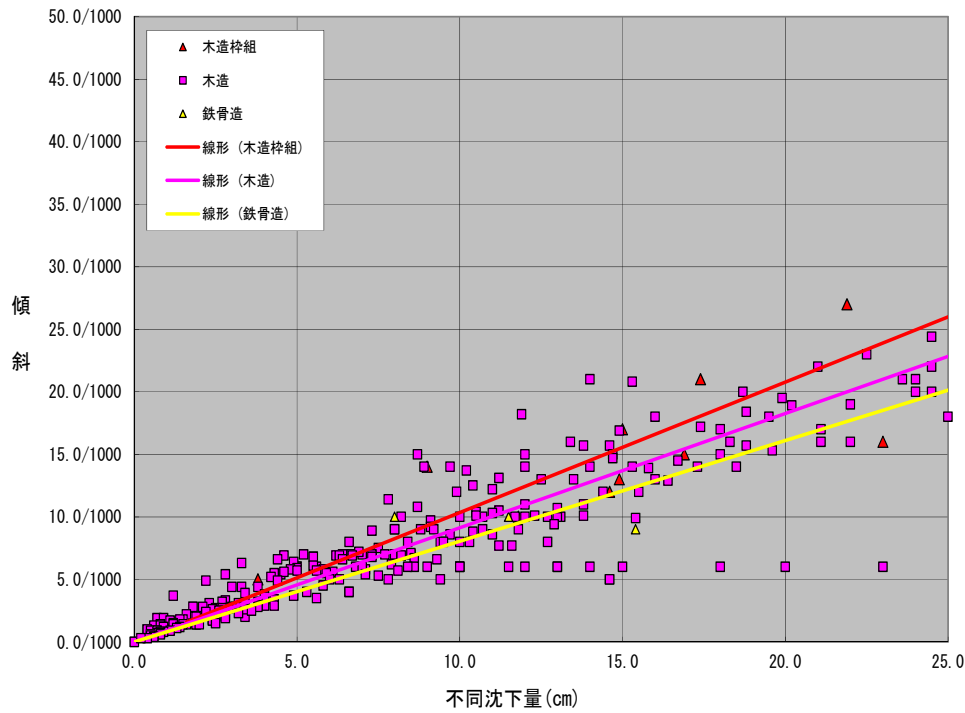
(3) 建物構造別の傾斜と沈下量の関係

①全国における建物構造別の傾斜と不同沈下量の関係

図 3.3.7 は、全国を対象とした木造枠組み、木造、鉄骨造の3つの建物構造別に傾斜と不同沈下量の関係を示したものである。この結果から、不同沈下量に対して建物の傾斜は、木造枠組み>鉄骨造>木造の順に大きい傾向になっていることが分かる。



(a)不同沈下量 50cm 以下の場合

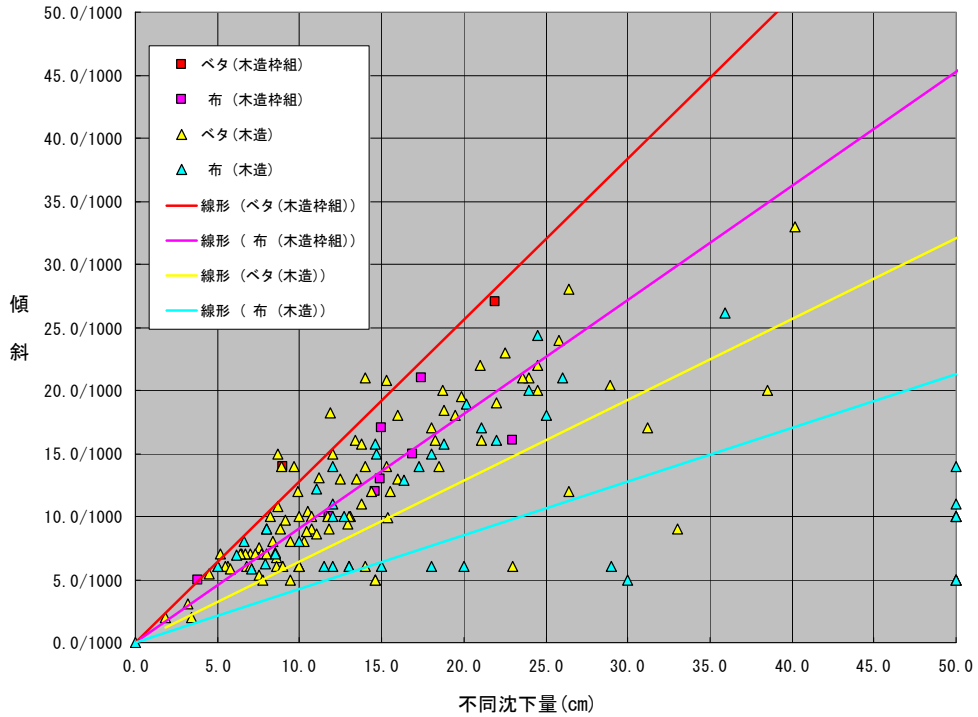


(b)不同沈下量 25cm 以下の場合

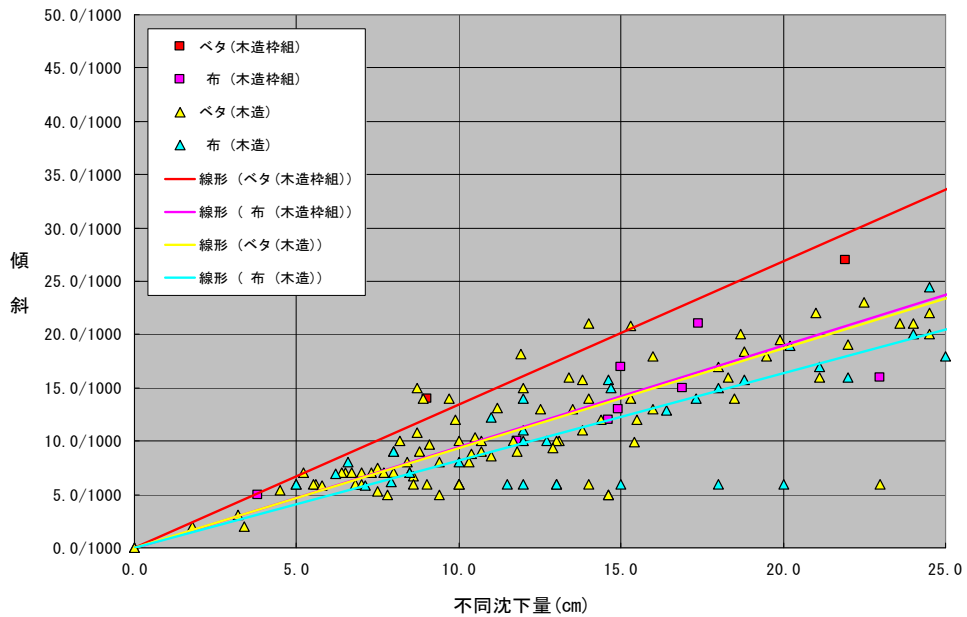
図 3.3.7 全国における建物構造別の傾斜と不同沈下量の関係

②全国における建物基礎構造別の傾斜と不同沈下量の関係

図 3.3.8 は、全国を対象とした木造枠組み及び木造建物構造別のべた基礎と布基礎構造2つの傾斜と不同沈下量の関係を示したものである。この結果から、不同沈下量に対して建物の傾斜は、べた基礎木造枠組み>布基礎木造枠組み>べた基礎木造>布基礎木造の順に大きい傾向になっていることが分かる。



(a)不同沈下量 50cm 以下の場合

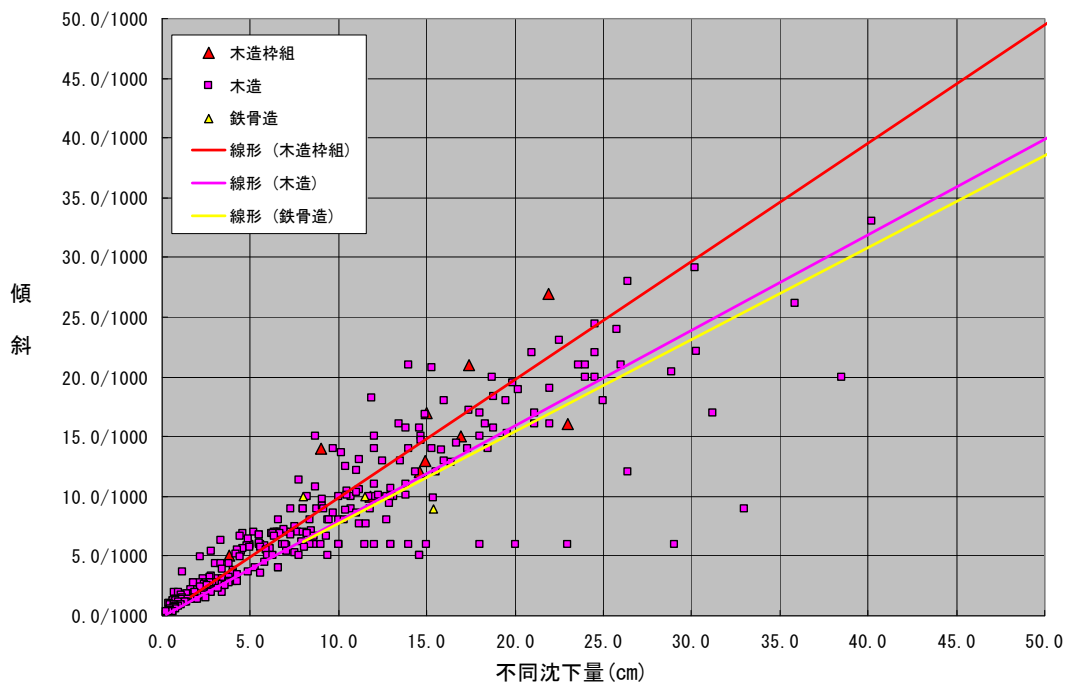


(b)不同沈下量 25cm 以下の場合

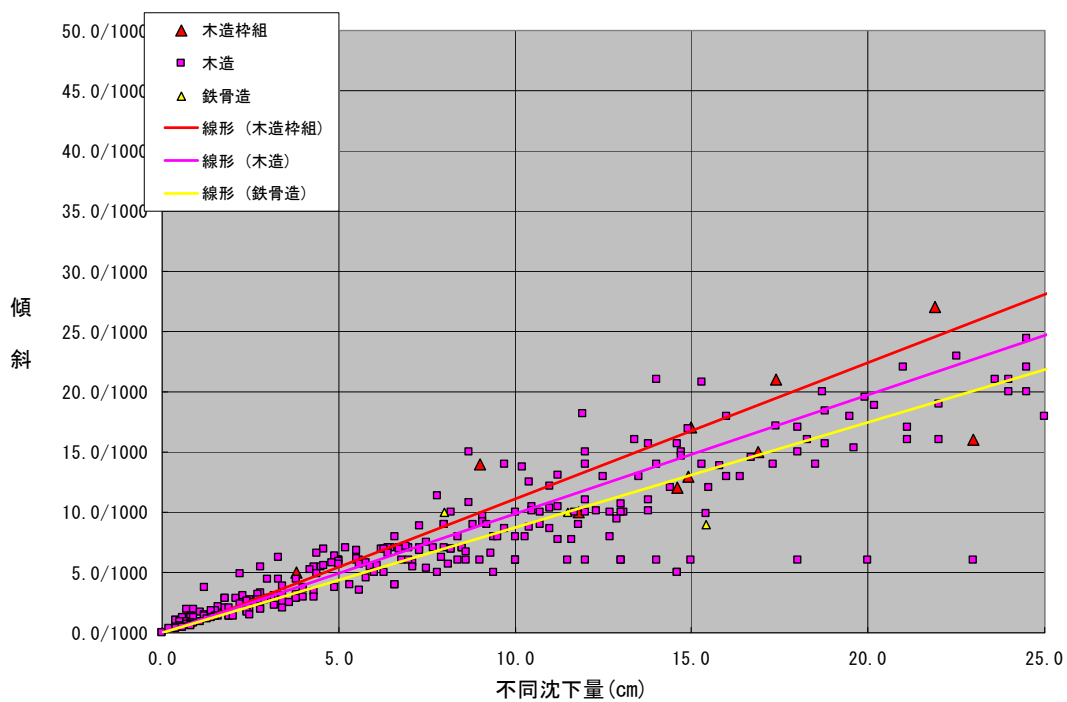
図 3.3.8 全国における建物基礎構造別の傾斜と不同沈下量の関係

③関東における建物構造別の傾斜と不同沈下量の関係

図 3.3.9 は、関東を対象とした木造枠組み、木造、鉄骨造の3つの建物構造別に傾斜と不同沈下量の関係を示したものである。この結果から、不同沈下量に対して建物の傾斜は、木造枠組み>鉄骨造≧木造の順に大きい傾向になっていることが分かる。



(a)不同沈下量 50cm 以下の場合

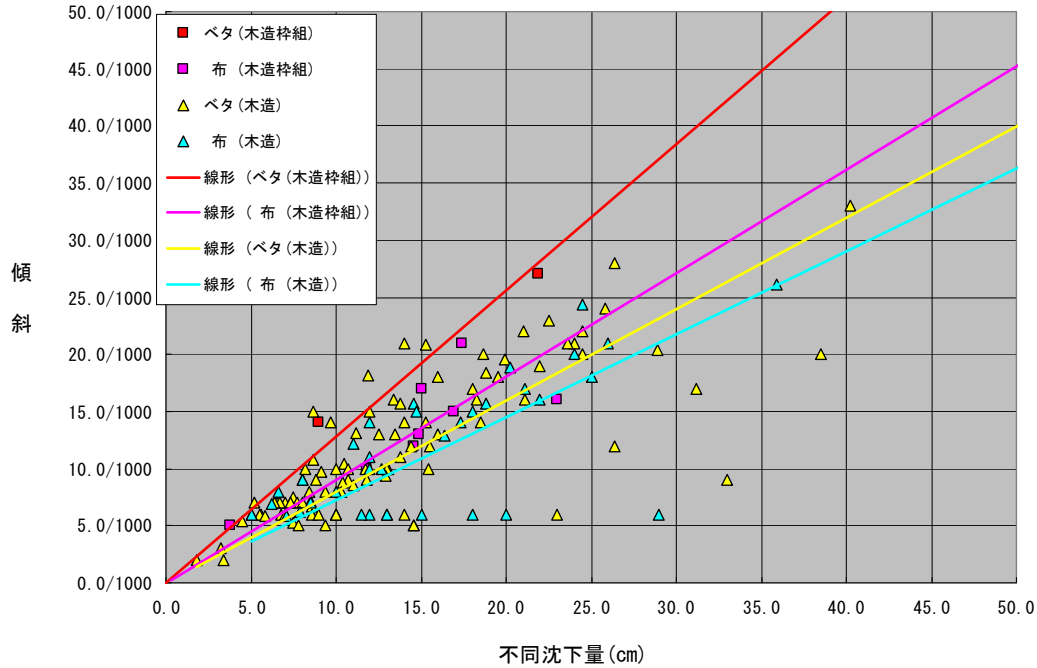


(b)不同沈下量 25cm 以下の場合

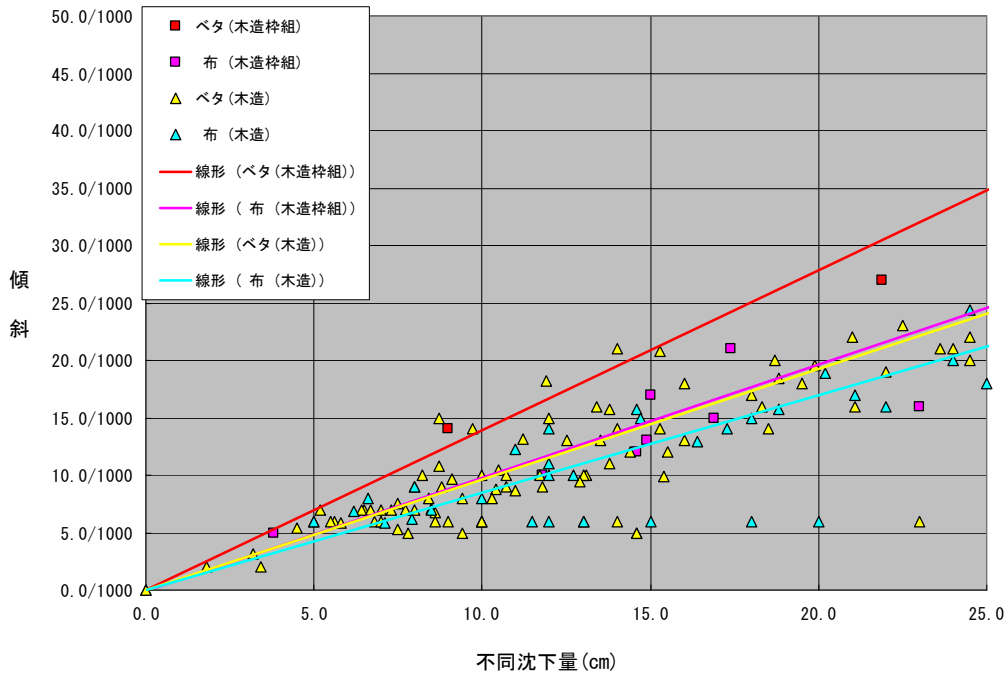
図 3.3.9 関東における建物構造別の傾斜と不同沈下量の関係

④関東における建物基礎構造別の傾斜と不同沈下量の関係

図 3.3.10 は、全国を対象とした木造枠組み及び木造建物構造別にのべた基礎と布基礎構造 2 つの傾斜と不同沈下量の関係を示したものである。この結果から、不同沈下量に対して建物の傾斜は、べた基礎木造枠組み > 布基礎木造枠組み > べた基礎木造 > 布基礎木造の順に大きい傾向になっていることが分かる。



(a) 不同沈下量 50cm 以下の場合

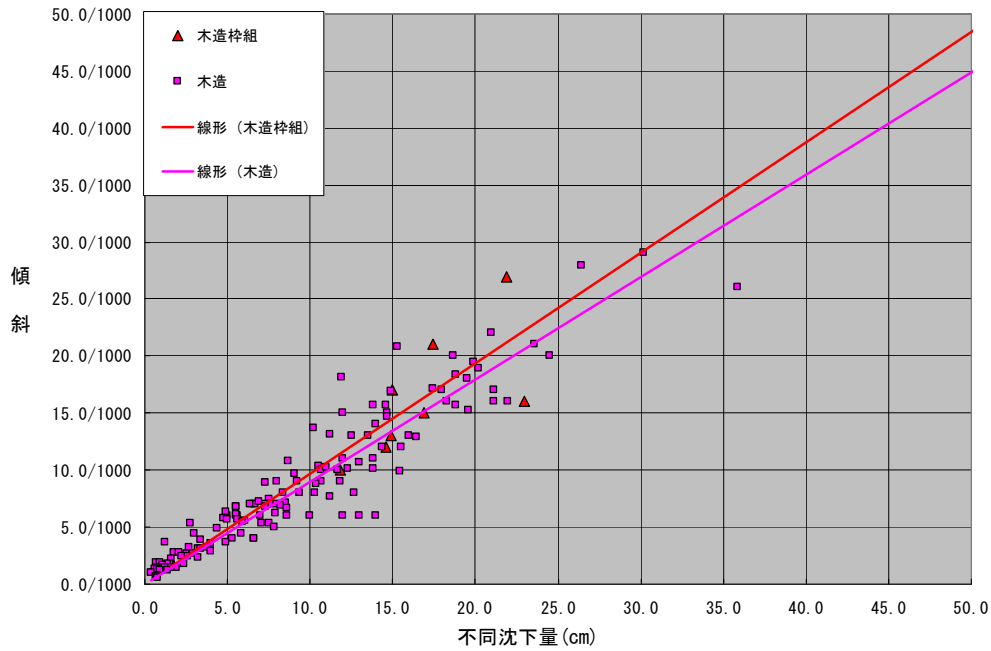


(b) 不同沈下量 25cm 以下の場合

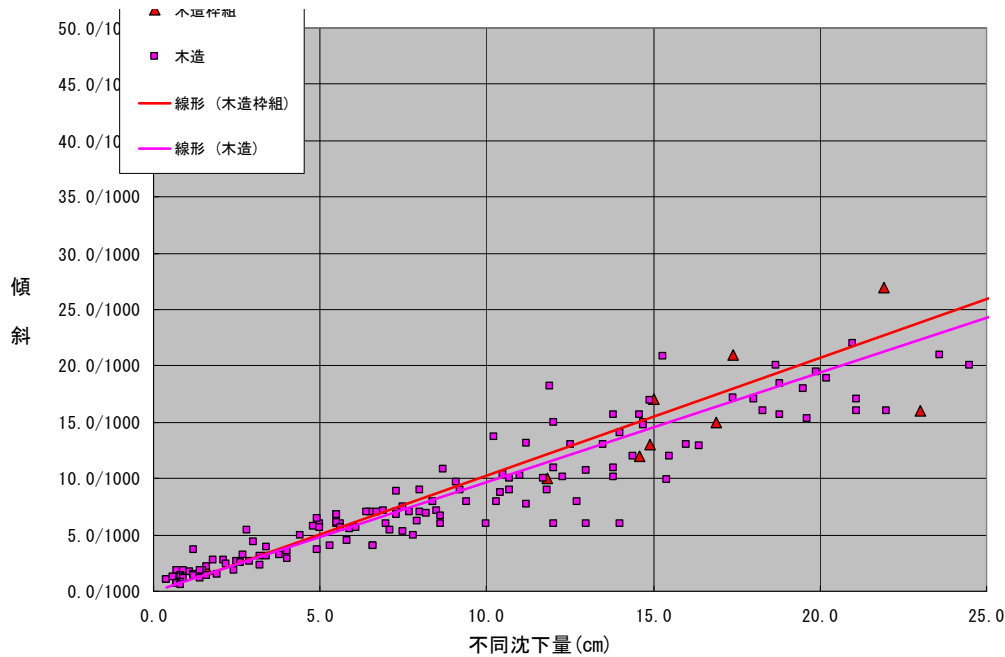
図 3.3.10 関東における建物基礎構造別の傾斜と不同沈下量の関係

⑤浦安市における建物構造別の傾斜と不同沈下量の関係

図 3.3.11 は、全国を対象とした木造枠組み、木造の 2 つの建物構造別に傾斜と不同沈下量の関係を示したものである。この結果から、不同沈下量に対して建物の傾斜は、木造枠組み > 木造の順に大きい傾向になっていることが分かる。なお、鉄骨造については、データが極端に少ないことから分析から除いた。



(a) 不同沈下量 50cm 以下の場合

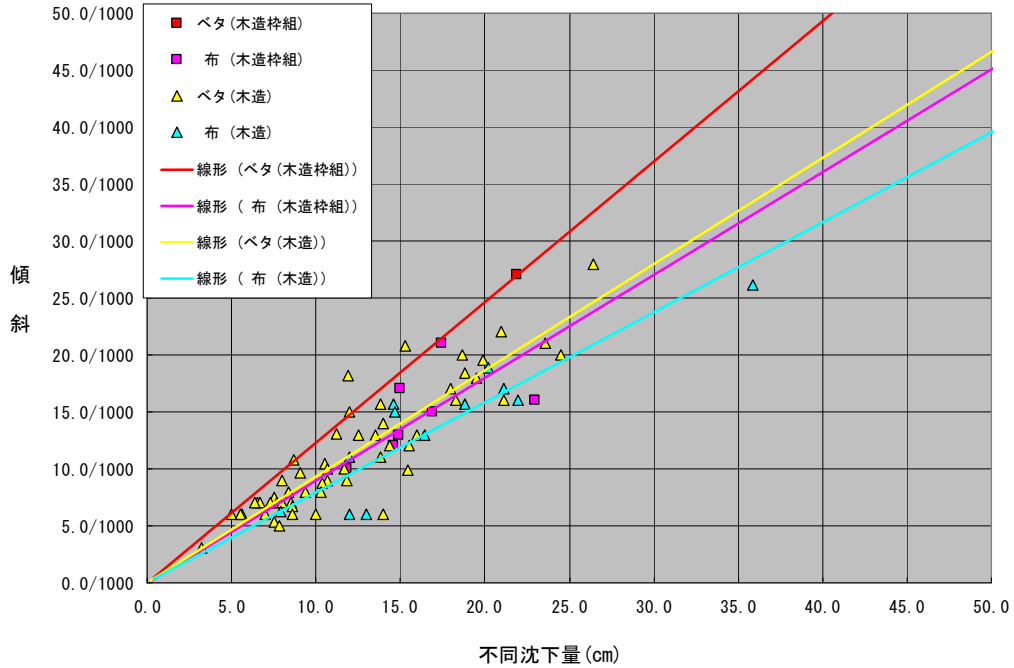


(b) 不同沈下量 25cm 以下の場合

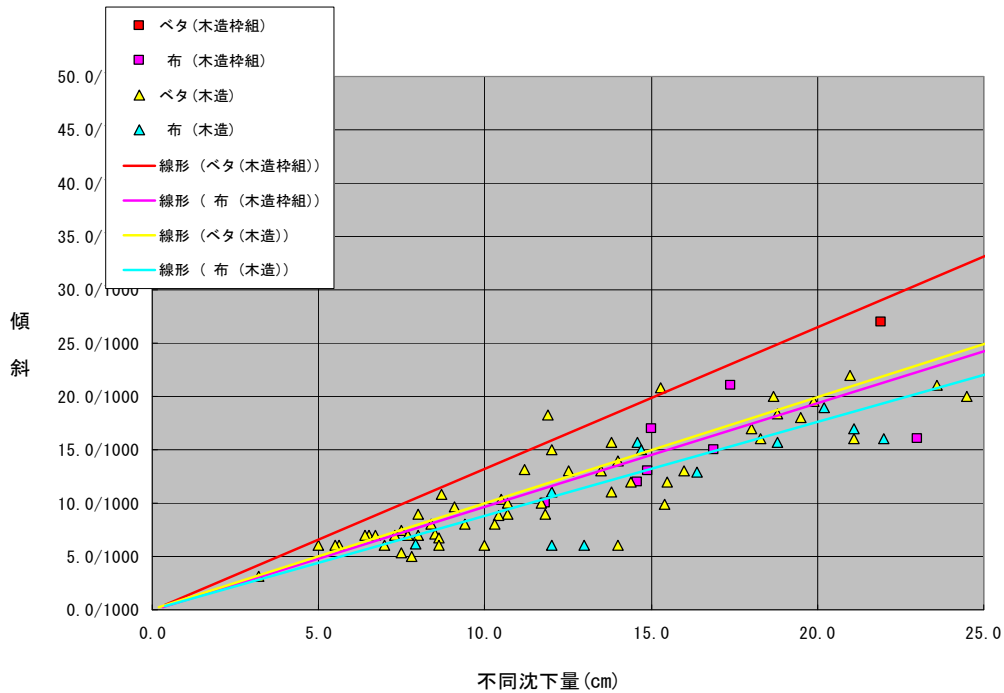
図 3.3.11 関東における建物構造別の傾斜と不同沈下量の関係

⑥浦安市における建物基礎構造別の傾斜と不同沈下量の関係

図 3.3.12 は、全国を対象とした木造枠組み及び木造建物構造別にのべた基礎と布基礎構造 2 つの傾斜と不同沈下量の関係を示したものである。この結果から、不同沈下量に対して建物の傾斜は、べた基礎木造枠組み>べた基礎木造≧布基礎木造枠組み>布基礎木造の順に大きい傾向になっていることが分かる。



(a)不同沈下量 50cm 以下の場合



(b)不同沈下量 25cm 以下の場合

図 3.3.12 浦安市における建物基礎構造別の傾斜と不同沈下量の関係

(4) 地盤対策工法別の傾斜と不同沈下量の関係

図 3.3.13~3.3.15 は、全国、関東、浦安市を対象とした地盤対策工法別に鋼管杭、柱状改良、表層改良の3つの傾斜と不同沈下量の関係を示したものである。この結果から、不同沈下量に対して建物の傾斜は、下記のような傾向になっていることが明らかとなった。ただし、鋼管杭や柱状改良の建物の傾斜が大きいのは、対策の目的が液状化対策でなく支持力対策であるために深い支持層に達していないためである。

- a. 全国：鋼管杭＞表層改良＞柱状改良
- b. 関東：鋼管杭＞柱状改良＞表層改良
- c. 浦安市：柱状改良＞鋼管杭＞表層改良

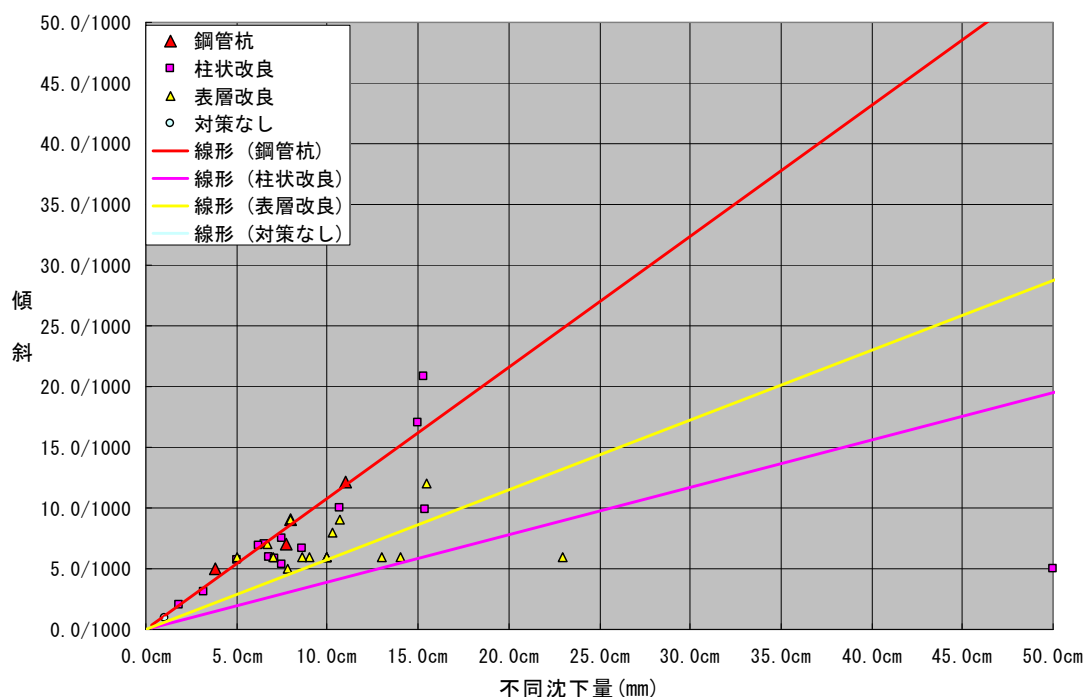


図 3.3.13 全国における地盤対策工法別の傾斜と不同沈下量の関係

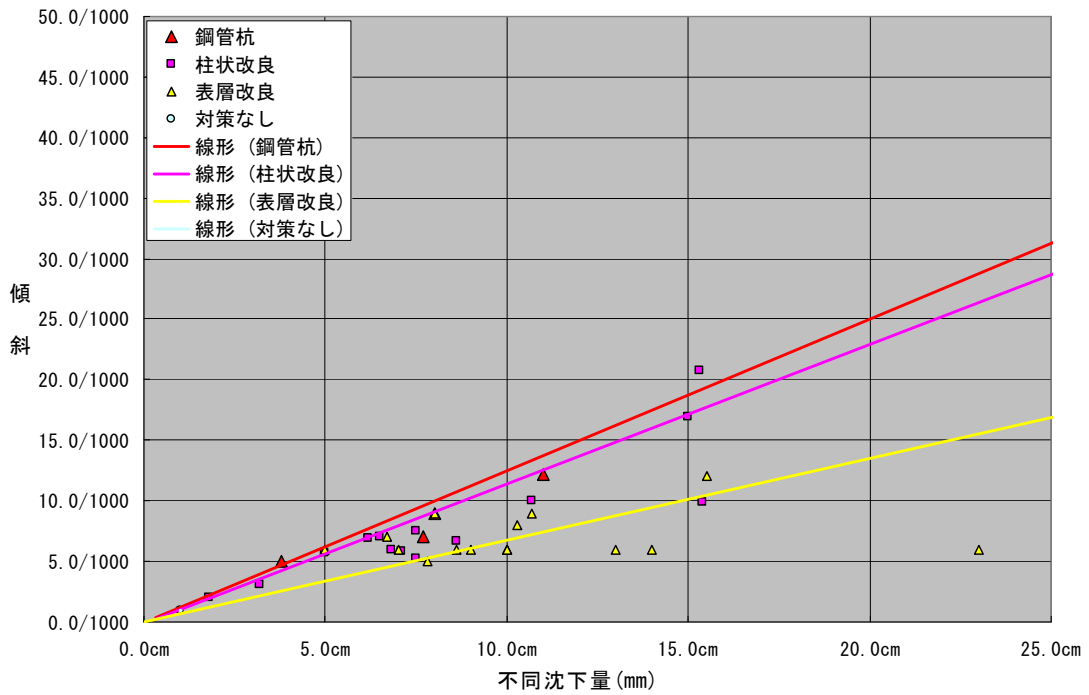


図 3.3.14 関東における地盤対策工法別の傾斜と不同沈下量の関係

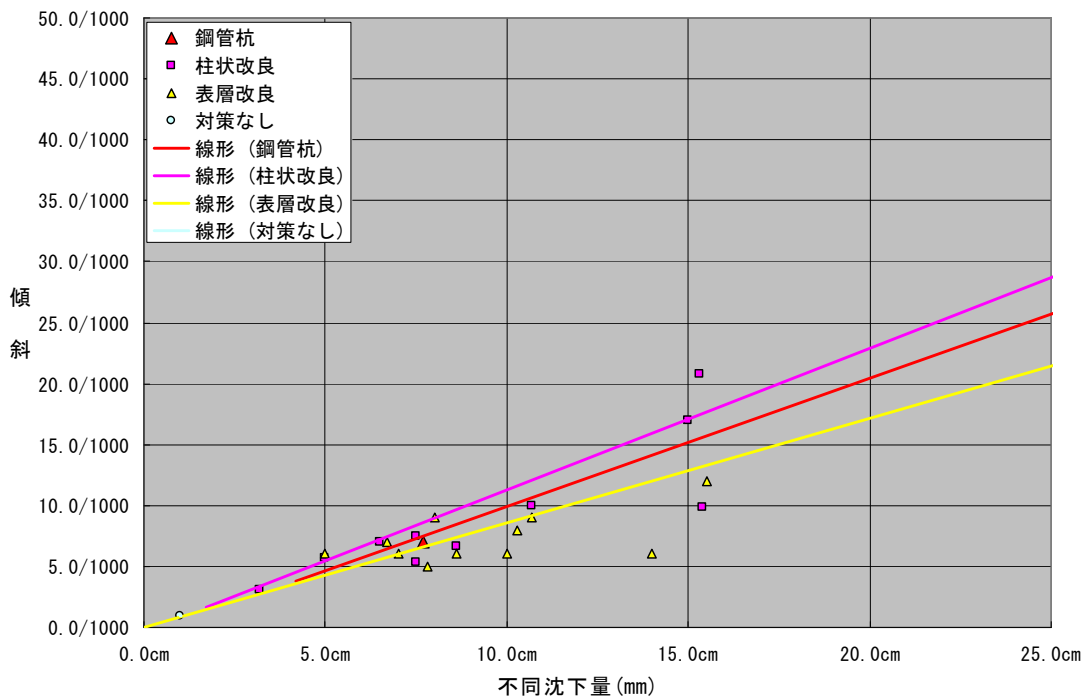


図 3.3.15 浦安市における地盤対策工法別の傾斜と不同沈下量の関係

(5) まとめ

①地盤対策工法の傾斜と沈下量の関係

柱状改良工法や鋼管杭工法が支持層にまで達していない場合は、表層改良工法の方が液化発生時に建物の傾斜角および不同沈下量が小さく、高い軽減効果があることが明らかとなった。

②沈下修復工法と建物の傾斜と沈下量の関係

各沈下修復工法の傾斜角・不同沈下量・費用の目安は、以下のようになった。

i)傾斜角の目安

- a. 土台揚げ工法：1/100 以下
- b. 耐圧版工法：1/60 以下
- c. 鋼管圧入工法：すべて
- d. 薬液注入工法：1/60 以下
- e. 硬質ウレタン工法：不明（傾斜のデータなし、沈下のみ）

ii)不同沈下量の目安

- a. 土台揚げ工法：20 c m以下
- b. 耐圧版工法：30 c m以下
- c. 鋼管圧入：すべて
- d. 薬液注入：20 c m以下
- e. 硬質ウレタン：10 c m以下

iii)費用の目安

- a. 土台揚げ工法：250 万以下
- b. 耐圧版工法：750 万以下
- c. 鋼管圧入：750 万～1、000 万
- d. 薬液注入：500 万以下
- e. 硬質ウレタン：250 万以下

③建物構造別の傾斜と沈下量の関係

全国および関東を対象にした調査の結果、不同沈下量に対して建物構造別の傾斜は、下記のような傾向になっていることが明らかとなった。

- a. 木造枠組み>鉄骨造>木造
- b. べた基礎木造枠組み>布基礎木造枠組み>べた基礎木造>布基礎木造

④地盤対策工法別の傾斜と不同沈下量の関係

不同沈下量に対して建物の傾斜は、下記のような傾向になっていることが明らかとなった。ただし、鋼管杭や柱状改良の建物の傾斜が大きいのは、対策の目的が液状化対策でなく支持力対策であるために深い支持層に達していないためである。

- a. 全国：鋼管杭＞表層改良＞柱状改良
- b. 関東：鋼管杭＞柱状改良＞表層改良
- c. 浦安市：柱状改良＞鋼管杭＞表層改良

3.4 航空レーザを用いた液状化被災調査

液状化が発生した場合の特徴的な現象として地盤沈下などの地表面変状が挙げられるが、これを広範囲かつ定量的に求めるための手法の一つとして航空レーザ測量がある。本節では、2011年東北地方太平洋沖地震後に千葉県浦安市で実施された航空レーザ測量結果を用いて、戸建て住宅の液状化対策として浅層盤状改良工法の有効性を検討した。

しかし、戸建て住宅は個々に異なる複雑な屋根形状を有することなどから、その沈下量や傾斜角を単純に出力することは容易ではない。そこで本節では、舗装面の形状が単純な構造物である道路に着目して、その横断方向に生じた沈下量と傾斜角に及ぼす断面構造の影響について検討した。一般的に、舗装面や碎石を主体に締め固められた路盤部では液状化は発生しないと考えられることから、表層の非液状化層の層厚とその直下の地盤が液状化したことによる路面変状の関係を調べることは液状化対策工法の一つである浅層盤状改良工法の有効性の検討に繋がると考えた。

3.4.1 標高補正值と精度検証および現場調査結果との比較

2011年東北地方太平洋沖地震による液状化被災地（千葉県浦安市）にて実施した航空レーザ測量によって得られた地表面標高と、地震前の標高の差分を、同地震によって生じた液状化による地盤沈下と仮定した。地震前のデジタル地表面モデル（DSM）データは、2006年12月から2007年1月にかけて計測されたものである。また、浦安市周辺域における地震後のDSMデータは、2011年4月に計測されたものである。航空レーザ測量結果の補正と精度検証の詳細は朝倉ら(2012)を参照されたい。ここでは標高補正の方法について簡単に述べる。

同地震による杭基礎構造物の構造被害はほとんど見受けられないため、これを不動点とし、地震前後で支持層から屋上までの高さの変化はないものと仮定した。図3.4.1に標高補正に利用した浦安市内の杭基礎構造物の分布を示す。上記の仮定によると、これらの構造物での地震前後の標高差はゼロになるはずであるが、実際には計測誤差および地震に伴う支持層以深の変動（所謂広域的な地殻変動）などがこの標高差に含まれる。計測結果によると、杭基礎構造物の屋上の標高は、地震前後で平均20.85 cmの差が生じており、ここではこの値を地盤標高の補正值として利用した。なお、この標準偏差値は1.45 cmであり、10cm~数十 cm程度の地盤沈下量を議論する上では十分な精度を満たしていると判断した。

千葉県浦安市周辺の航空レーザ測量に基づく液状化沈下図を図3.4.2に示す。また、国土交通省関東地方整備局が地盤工学会（東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態解明委員会、東畑郁生委員長）に委託して実施された調査に基づく同地域の液状化分布図を図3.4.3に示す。

図3.4.2の液状化沈下図は、青色が濃くなるほど沈下量が大きくなることを示している。また、図3.4.3の液状化分布図は、現場調査により噴砂が確認された道路を赤色、噴砂が確認されなかった道路を青色で示している。これらの対比より、比較的大きな沈下量を示

すエリアにおいて実際に噴砂が確認されたことが伺える。地震後の現場調査では、戦後の埋立以前の海岸線（図の実線）を境界として液状化発生の有無が明確に分かれたが、航空レーザによる液状化沈下図は、この傾向に調和している。

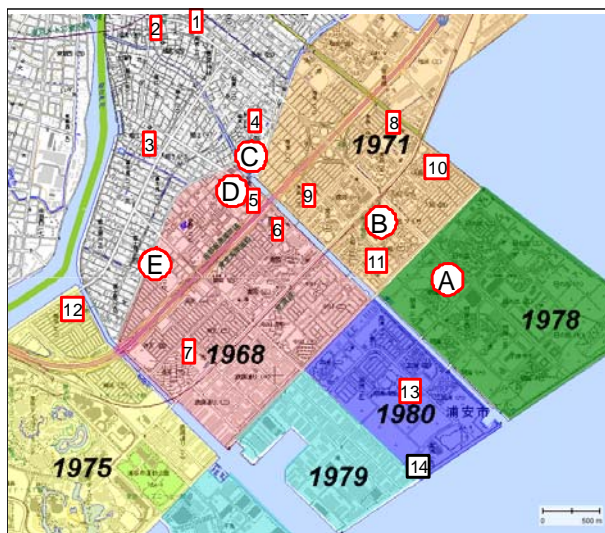


図 3. 4. 1 標高補正に利用した浦安市内の杭基礎構造物の分布図³⁹⁾



図 3. 4. 2 航空レーザ測量による浦安市の液状化沈下図⁴⁰⁾

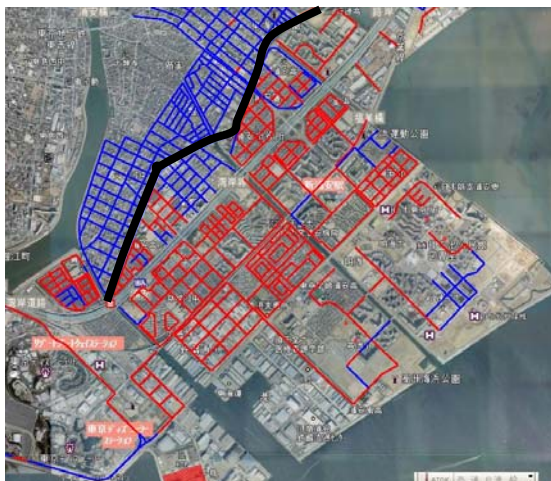


図 3. 4. 3 現場調査に基づく浦安市の液状化分布図⁴¹⁾

3. 4. 2 道路変状の検討箇所と断面構造

浦安市において顕著な液状化被害が生じた地域のうち、富岡地区、入船地区、今川地区、弁天地区、および舞浜地区の幹線道路と生活道路の変状を、航空レーザによる液状化沈下図から抽出した。図 3. 4. 4 に各地区で検討した道路の位置を示す。また、図 3. 4. 5 に各地

区の変状を抽出した道路横断面の位置を示す。ここでの目的は、表層の非液状化層の厚さ（ここでは舗装と路盤の厚さの和）と地表面変状の関係を求めることであるため、比較する道路の基礎地盤は同じ構造であることが望ましい。したがって、変状を抽出した幹線道路と生活道路は、それぞれ平行に隣接するものを採用した。

レーザ測量結果を基に道路変状を抽出するに当たり、道路の端部では家屋や植樹などの道路外の変状の影響を受ける可能性がある。したがって、ここでは道路の端部を除外し、幅員の約8割に相当する部分の変状を抽出した。

各地区の道路の舗装と路盤の層厚を表 3.4.1 に示す。



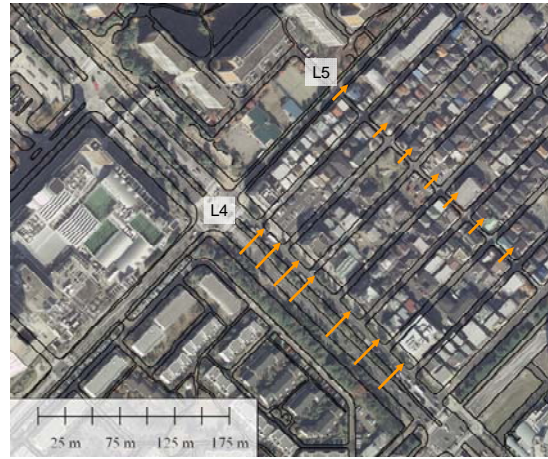
図 3.4.4 変状調査を実施した道路位置図

表 3.4.1 各地区の道路の舗装と路盤の層厚

地区名	生活道路	幹線道路
富岡地区	45cm (L1: 舗装 10cm, 路盤 35cm) L1: 市道、L3: 私道	90cm (舗装 15cm, 路盤 75cm) L2: 県道 276 号
入船地区	35cm (舗装 5cm, 路盤 30cm) L5: 市道	65cm (舗装 10cm, 路盤 55cm) L4: 市道
今川地区	50cm (舗装 10cm, 路盤 40cm) L7: 市道	115cm (舗装 20cm, 路盤 95cm) L6: 企業庁道路
弁天地区	45cm (舗装 10cm, 路盤 35cm) L9: 市道	85cm (舗装 10cm, 路盤 75cm) L8: 市道
舞浜地区	50cm (舗装 10cm, 路盤 40cm) L11: 市道	65cm (舗装 25cm, 路盤 40cm) L10: 市道



(a) 富岡地区



(b) 入船地区



(c) 今川地区



(d) 弁天地区



(e) 舞浜地区

図 3.4.5 変状を抽出した道路横断面の位置

3.4.3 液状化による道路変状と道路構造および地盤条件の関係

航空レーザ測量によって求められた各道路断面の変状と変形モードを表 3.4.2 に示す。また、代表的な道路の変形を図 3.4.6 に示す。ここでは、道路の変形を図中に示すような直線で近似し、道路の平均総沈下量 $S_{t,av}$ 、最大総沈下量 $S_{t,max}$ 、および平均傾斜角 θ_{av} を求めた。

道路断面の変状パターンは、図 3.4.6 に示されるような一方向に単純に傾斜するものと、図 3.4.7 のように道路中間部で局所的な変状を呈するものとに大別される。表 3.4.2 にも示されるように、後者の局所的な変状は、舗装と路盤の層厚が比較的厚い幹線道路では 1 箇所、比較的層厚が薄い生活道路では 8 箇所において認められた。ここでは、舗装や締め固められた路盤では液状化は発生せず、戸建て住宅の浅層盤状改良に相当すると仮定している。したがって上記の傾向は、改良厚が十分でない場合は、液状化に対して改良体が盤状として機能せず、上部構造に大きな被害が生じる可能性を示唆している。

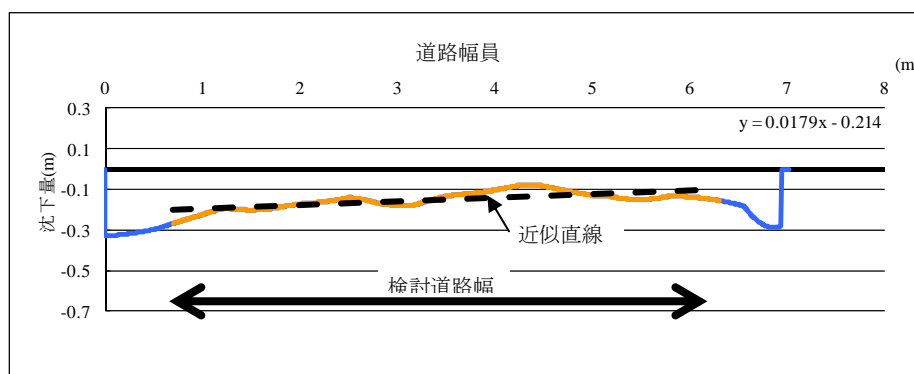


図 3.4.6 道路の沈下・傾斜の例（富岡地区，生活道路）

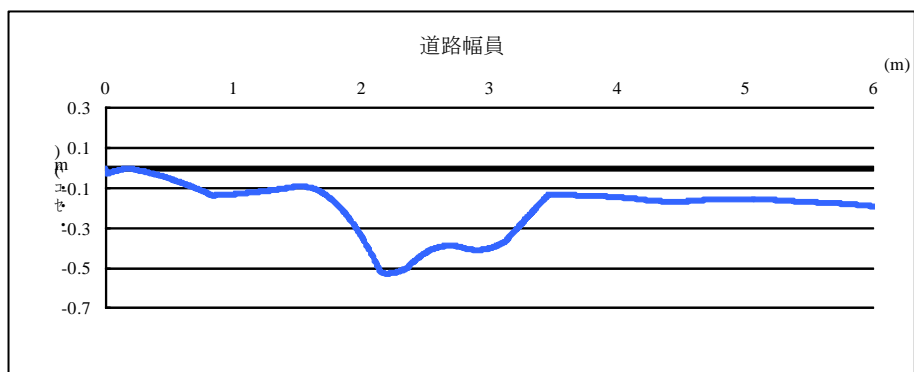


図 3.4.7 局所的に変状が生じた例（富岡地区，生活道路）

表 3.4.2(a) 各道路断面の変状と変形モード

	No.	検討幅員(m)	平均傾斜角 ξ_{av} (n/1000)	平均総沈下量 $S_{t,av}$ (cm)	最大総沈下量 S_t (cm)	変形モード
富岡地区 L1 生活道路	1-1	4.0	14.7	12.3	36.8	傾斜
	1-2		21.6	16.2	35.1	傾斜
	1-3		13.0	10.9	24.8	傾斜
	1-4	4.8	7.5	18.3	27.8	傾斜
	1-5		11.0	17.5	20.2	傾斜
	1-6		8.8	17.6	27.2	傾斜
	1-7	5.6	8.3	25.3	29.1	傾斜
	1-8		2.1	20.0	31.8	傾斜
	1-9		11.7	11.6	15.3	傾斜
	1-10		17.9	15.1	26.7	傾斜
富岡地区 L2 幹線道路 県道276号	2-1	11.2	7.7	13.3	27.0	傾斜
	2-2		6.2	12.8	22.3	傾斜
	2-3		0.8	9.3	13.6	傾斜
	2-4		7.2	10.0	20.0	傾斜
	2-5	12	8.2	11.1	28.4	傾斜
	2-6		3.9	10.9	18.7	傾斜
	2-7	11.2	6.6	6.6	15.5	傾斜
	2-8		5.0	7.4	14.4	傾斜
	2-9		7.3	1.1	11.6	傾斜
	2-10		5.5	5.2	15.5	傾斜
富岡地区 L3 生活道路	3-1	4.8	8.6	12.3	21.8	傾斜
	3-2		21.0	13.9	18.9	傾斜
	3-3		3.4	11.6	14.1	傾斜
	3-4		-	22.0	52.6	局所
	3-5		-	18.6	65.9	局所
	3-6		8.0	10.5	14.9	傾斜
	3-7		40.0	18.5	34.8	傾斜
	3-8		11.9	21.8	26.1	傾斜
	3-9		9.5	11.0	17.6	傾斜
	3-10		12.1	15.4	51.8	傾斜
入船地区 L4-1 幹線道路 幹線9号	4-1-1	11.2	3.9	11.5	16.7	傾斜
	4-2-1	10.0	2.6	11.0	17.8	傾斜
	4-3-1	8.0	7.6	8.5	14.6	傾斜
	4-4-1		28.3	10.2	28.1	傾斜
	4-5-1		16.3	6.8	34.9	傾斜
	4-6-1		2.1	9.3	13.9	傾斜
	4-7-1		6.7	13.3	23.8	傾斜
入船地区 L4-2 幹線道路 幹線9号	4-1-2	8.0	-	28.1	53.3	局所
	4-2-2		6.8	18.8	25.6	傾斜
	4-3-2		6.2	22.4	33.0	傾斜
	4-4-2		0.7	16.5	23.3	傾斜
	4-5-2	3.9	15.7	22.1	傾斜	
	4-6-2	8.8	4.5	14.0	28.9	傾斜
	4-7-2	9.6	5.2	13.5	21.9	傾斜
入船地区 L5 生活道路	5-1	3.2	-	21.0	64.9	局所
	5-2		-	9.2	31.0	局所
	5-3		205.0	31.6	67.6	傾斜
	5-4		5.4	14.6	22.3	傾斜
	5-5		77.6	13.2	28.6	傾斜
	5-6		6.6	20.2	27.5	傾斜
	5-7		14.3	4.9	13.3	傾斜

表 3.4.2 (b) 各道路断面の変状と変形モード

	No.	検討幅員(m)	平均傾斜角 η_{av} (n/1000)	平均総沈下量 $S_{t,av}$ (cm)	最大総沈下量 S_t (cm)	変形モード
今川地区 L6 幹線道路 将来県道	6-1	12	6.8	10.7	18.8	傾斜
	6-2		4.1	10.6	18.0	傾斜
	6-3	11.2	5.4	11.9	19.0	傾斜
	6-4		2.4	9.6	19.3	傾斜
	6-5		0.6	7.5	13.2	傾斜
	6-6		7.6	5.2	13.9	傾斜
	6-7		5.6	0.2	8.2	傾斜
	6-8		3.3	1.0	9.1	傾斜
	6-9		4.3	2.4	9.3	傾斜
	6-10		2.0	4.6	11.8	傾斜
	6-11		3.4	4.8	10.1	傾斜
	6-12		2.4	2.8	8.1	傾斜
	6-13		0.2	2.6	10.1	傾斜
	6-14		3.7	5.1	14.5	傾斜
	6-15		2.6	1.7	9.5	傾斜
今川地区 L7 生活道路	7-1	3.68	93.7	17.8	60.9	傾斜
	7-2		7.7	15.4	21.7	傾斜
	7-3		12.2	6.7	13.1	傾斜
	7-4		54.8	(3.7)	3.3	傾斜
	7-5		115.0	11.3	58.7	傾斜
	7-6		37.0	(2.1)	7.6	傾斜
	7-7		44.6	8.4	14.6	傾斜
	7-8		-	8.1	22.3	局所
	7-9		4.5	5.3	9.1	傾斜
	7-10		31.0	16.5	24.4	傾斜
	7-11	3.00	60.7	21.2	50.1	傾斜
	7-12	3.68	38.4	25.1	43.0	傾斜
	7-13		-	24.8	38.6	局所
	7-14		28.9	25.4	32.5	傾斜
	7-15	3.00	12.5	18.0	26.7	傾斜
弁天地区 L8 幹線道路 幹線5号	8-1	11.2	12.1	19.2	41.5	傾斜
	8-2		5.4	21.5	27.3	傾斜
	8-3		8.6	18.5	35.0	傾斜
	8-4		8.0	21.1	27.6	傾斜
	8-5		1.4	22.6	27.8	傾斜
	8-6		7.0	17.4	28.4	傾斜
	8-7		5.0	14.3	27.7	傾斜
弁天地区 L9 生活道路	9-1	4.8	3.3	12.9	28.4	傾斜
	9-2		12.0	20.3	24.9	傾斜
	9-3		3.3	18.5	36.0	傾斜
	9-4		17.2	32.6	54.7	傾斜
	9-5		60.3	28.0	66.8	傾斜
	9-6		111.0	13.7	64.7	傾斜
	9-7		53.6	8.9	34.1	傾斜
舞浜地区 L10 幹線道路 国道357号	10-1	6.4	13.1	2.1	7.4	傾斜
	10-2		10.4	0.7	6.2	傾斜
	10-3		18.1	4.6	18.2	傾斜
	10-4		13.1	16.2	39.8	傾斜
	10-5		13.3	17.8	28.8	傾斜
	10-6		26.0	19.1	37.8	傾斜
	10-7		1.8	15.4	21.2	傾斜
舞浜地区 L11 生活道路	11-1	4.8	2.0	17.5	24.7	傾斜
	11-2		35.7	22.7	33.2	傾斜
	11-3		56.5	19.5	52.8	傾斜
	11-4		-	20.5	52.6	局所
	11-5		1.6	18.5	38.8	傾斜
	11-6		7.0	18.7	31.4	傾斜
	11-7		-	21.2	43.0	局所

図 3.4.8 に、全調査地点から抽出した平均総沈下量 $S_{t,av}$ と平均傾斜角 θ_{av} の関係を示す。道路の舗装と路盤の層厚が比較的厚い幹線道路については、平均総沈下量は概ね 20cm 以下となっている。また、平均傾斜角は入船地区と舞浜地区の一部で若干大きな値を呈するが、概ね 20/1000 以下に集中している。生活道路については、データが広い範囲にばらついており、特に平均傾斜角の値が幹線道路と比較して非常に大きくなる傾向が認められる。

一般的に、液状化による構造物の沈下量と傾斜角には正の相関があるとされているが、図 3.4.9 のように最大総沈下量 $S_{t,max}$ と平均傾斜角 θ_{av} の関係からはこの傾向が認められる。なお、この傾向から若干外れた 3 つのデータ（丸で図示）は今川地区で得られたものである。今川地区の検討道路は旧堤防と隣接しているが、この旧堤防の存在により液状化時の周辺地盤が揺動し、道路が隆起するなど変形が複雑になることが安田ら(2011)により報告されている。実際、この内 2 箇所の平均総沈下量は負の値を示しており、その他の地区とは異なる傾向の変形が生じたものと考えられる。

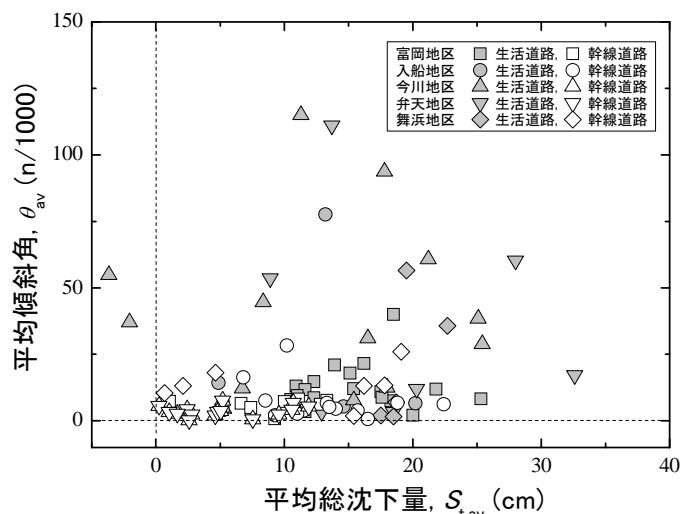


図 3.4.8 平均総沈下量 $S_{t,av}$ と平均傾斜角 θ_{av} の関係

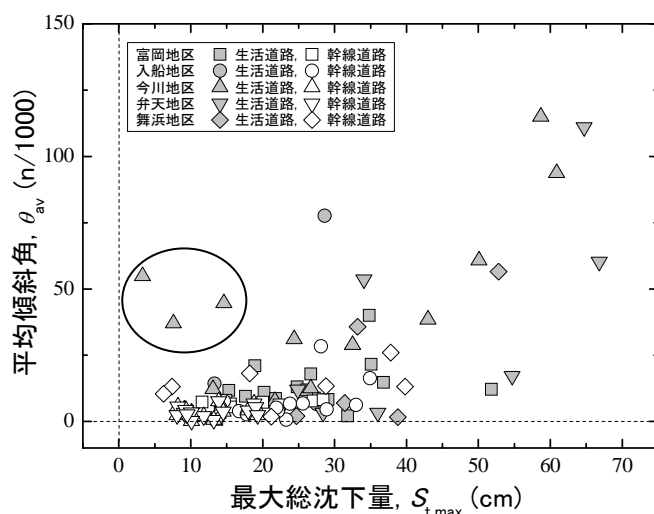


図 3.4.9 最大総沈下量 $S_{t,max}$ と平均傾斜角 θ_{av} の関係

図 3.4.10 および図 3.4.11 に、道路の舗装と路盤の層厚と各地区の平均総沈下量 $S_{t,av}$ の平均値、および平均傾斜角 θ_{av} の平均値の関係をそれぞれ示す。今回検討を実施した道路は限定的であること、および路盤下部層の地盤改良の有無が明確でないことなどから一概には言えないが、道路の舗装と路盤の層厚が厚い幹線道路の方が、層厚の薄い生活道路よりも平均総沈下量、平均傾斜角ともに低減される傾向が認められる。

液状化による戸建て住宅の被害の程度は、一般に家屋の傾斜角に基づいて分類される。

図 3.4.11 に示されるように、舗装と路盤の層厚が増すことによる平均傾斜角の顕著な低減は、戸建て住宅の液状化被害低減に対して浅層盤状改良工法が有効であることを示唆している。

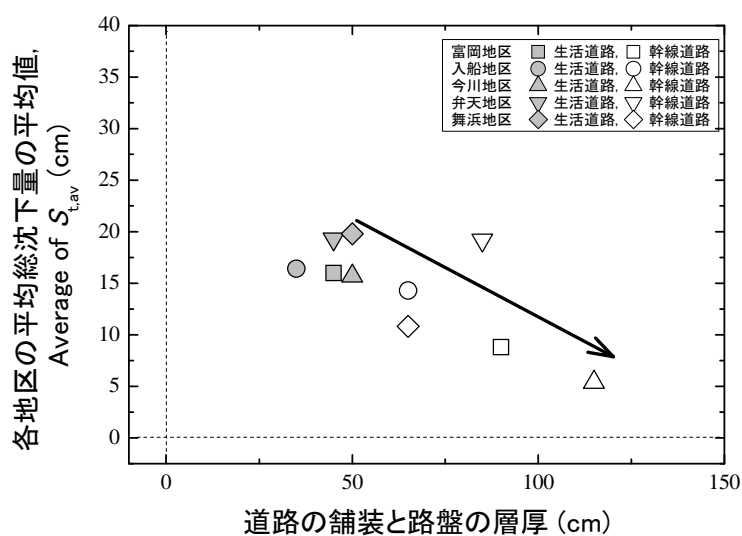


図 3.4.10 各地区の平均総沈下量 $S_{t,av}$ の平均値と道路の舗装と路盤の層厚の関係

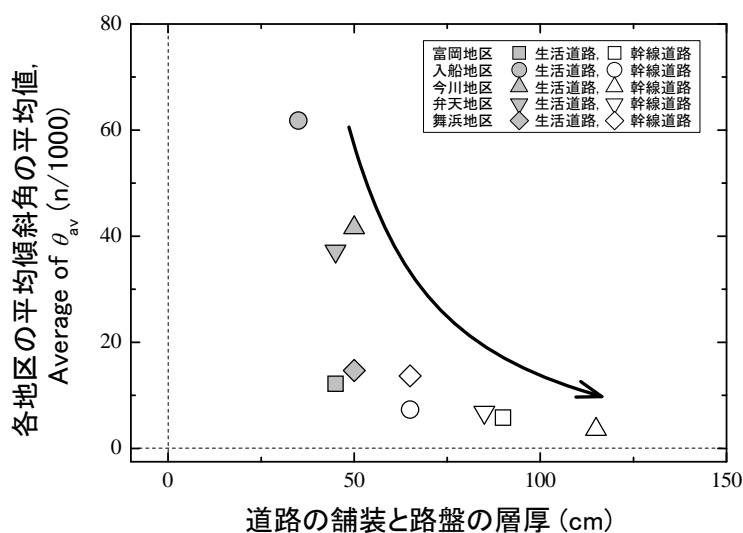


図 3.4.11 各地区の平均傾斜角 θ_{av} の平均値と道路の舗装と路盤の層厚の関係

ここでは、道路の変状に及ぼす液状化層厚の影響について述べる。図 3.4.12 と図 3.4.13 は、地下水位以深の浚渫土層と各地区の平均総沈下量 $S_{t,av}$ 、および平均傾斜角 θ_{av} の平均値の関係である。ここでは、安田ら(2011)の報告に基づき、地下水位以深の浚渫土層を 2011 年東北地方太平洋沖地震によって液状化した地層と仮定した。なお、浚渫土層の厚さは参考文献⁴¹⁾を基に設定した。

図 3.4.12 より、液状化による道路の平均総沈下量 $S_{t,av}$ は、液状化層厚および道路種別の影響を受ける傾向があり、特に後者の影響が顕著である。道路の舗装と路盤の層厚が比較的厚い幹線道路では、道路の平均総沈下量 $S_{t,av}$ の平均値は液状化層厚の 1~2%程度を示している（弁天地区を除く）。一方、道路の舗装と路盤の層厚が比較的薄い生活道路では、平均総沈下量 $S_{t,av}$ は液状化層厚の 3~5%以上を示している。従来、液状化に伴う地盤沈下は液状化層厚との比で示されてきたが（e.g., Ishihara & Yoshimine, 1992）、図 3.4.12 は液状化地盤を覆う非液状化層の層厚の影響も考慮する必要があることを示唆している。

一方、図 3.4.13 に示される通り、平均傾斜角 θ_{av} と液状化層厚の間には有意な関係は認められなかった。しかし、道路種別の影響は非常に顕著である。特に入船地区、今川地区、および弁天地区では、道路の舗装と路盤の層厚が厚い幹線道路の平均傾斜角 θ_{av} は、生活道路の約 10~20%程度にまで低減されている。

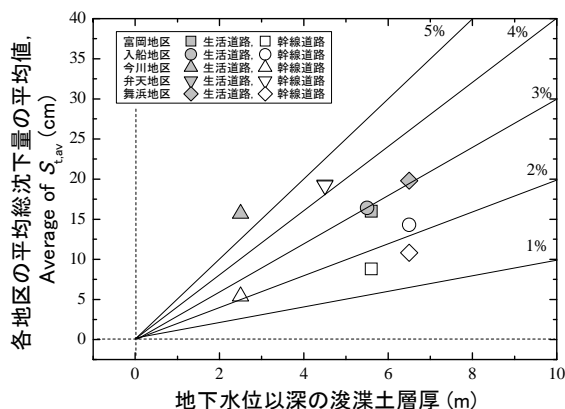


図 3.4.12 各地区の平均総沈下量 $S_{t,av}$ の平均値と地下水位以深の浚渫土層厚の関係

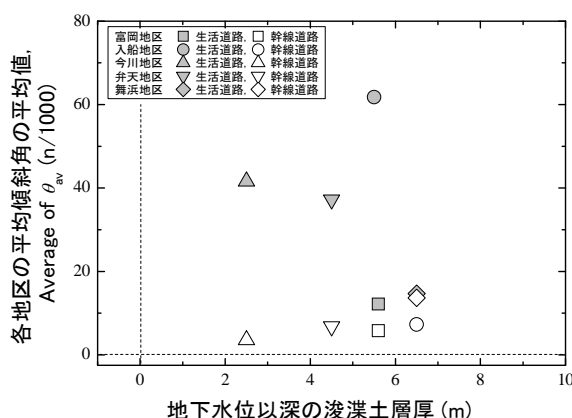


図 3.4.13 各地区の平均傾斜角 θ_{av} の平均値と地下水位以深の浚渫土層厚の関係

3.5 東日本大震災による戸建て住宅のめり込み沈下量と傾斜角の関係³⁹⁾

罹災証明上の被災度判定および地震保険における損壊基準においては、表 3.5.1 に示すようにいずれも 10/1000 程度を超えると半壊、半損、16.7/1000 程度を超えると大規模半壊、全損として認定している。

これらの結果から、第 2 章では本研究開発における戸建て住宅の液状化対策のクライテリアは、以下のように設定した。

- ①中地震動に対しては、有害な沈下変形を許容しない最大傾斜角 10/1000 (1/100) とする。
- ②大地震動に対しては、ある程度の損傷は許容し、修復を容易にする基礎構造 16.7/1000 (1/60) とする。

ただし、最大傾斜角を許容値として設計することは、現状の設計方法からして極めて困難である。そこで本節では、最大傾斜角とめり込み沈下量の関係を検証し、上記中地震動及び大地震動のめり込み沈下量のクライテリアを設定することにした。

表 3.5.1 住宅の最大傾斜角のクライテリア

罹災証明上の被災度判定			地震保険の損壊基準			クライテリア	
判定	四隅の柱の傾斜の平均	※/1000	判定	損壊基準	※/1000	最大傾斜角	地震動レベル
			一部損	0.2° ~ 0.5° 未満	3.5/1000 ~		
半壊	1/100 ~ 1/60 未満	10/1000 ~	半損	0.5° ~ 1° 未満	8.7/1000 ~	10/1000	中地震動
大規模半壊	1/60 ~ 1/20 未満	16.7/1000 ~	全損	1° 以上	17.5/1000 ~	16.7/1000	大地震動
全壊	1/20 以上	50/1000 ~					

前節における航空レーザ測量による検討により、東日本大震災の液状化による道路の総沈下量と傾斜角の関係は、ばらつきはあるものの相関があることが示された。一方、同地震による戸建て住宅のめり込み沈下量と傾斜角の関係は、橋本、安田、山口らによって調査されている。地震発生直後の建物の沈下・傾斜測量実態調査結果による潮来市日の出地区、神栖市掘割・深芝地区、千葉市美浜磯部地区、我孫子市布佐地区の沈下・傾斜の相関関係を、図 3.5.1~3.5.4 に示す⁴⁴⁾。また、図 3.5.5 は、国土交通省都市局市街地整備課による習志野市香澄地区の沈下・傾斜の相関関係である。各地域で住宅の密集度などが異なるためデータはかなりばらついているが、めり込み沈下量が大きくなると傾斜角も大きくなる傾向がある。また、住宅が密集して隣接住宅との間隔が狭い千葉市・習志野市の傾斜角が大きいことが分かる。

半壊以上の建物傾斜と平均めり込み沈下量の関係では、表 3.5.2 に示すように最大傾斜

角 10/1000、16.7/1000 において図 3.5.6 の全地区が 12.5cm、21.0cm と非常にばらつきが多く、図 3.5.7 の内陸地で敷地が大きく隣接建物の影響が少ない潮来市・神栖市が 14.0cm、23.0cm と大きく、図 3.5.8 の臨海部で敷地が狭く隣接建物の影響が大きい千葉市・習志野市が 7.5cm、12.5cm と小さな値になった。そこで、平均めり込み沈下量のクライテリアは、全体よりも小さい最大傾斜角 10/1000 で 10cm、16.7/1000 で 15cm を採用することにした。

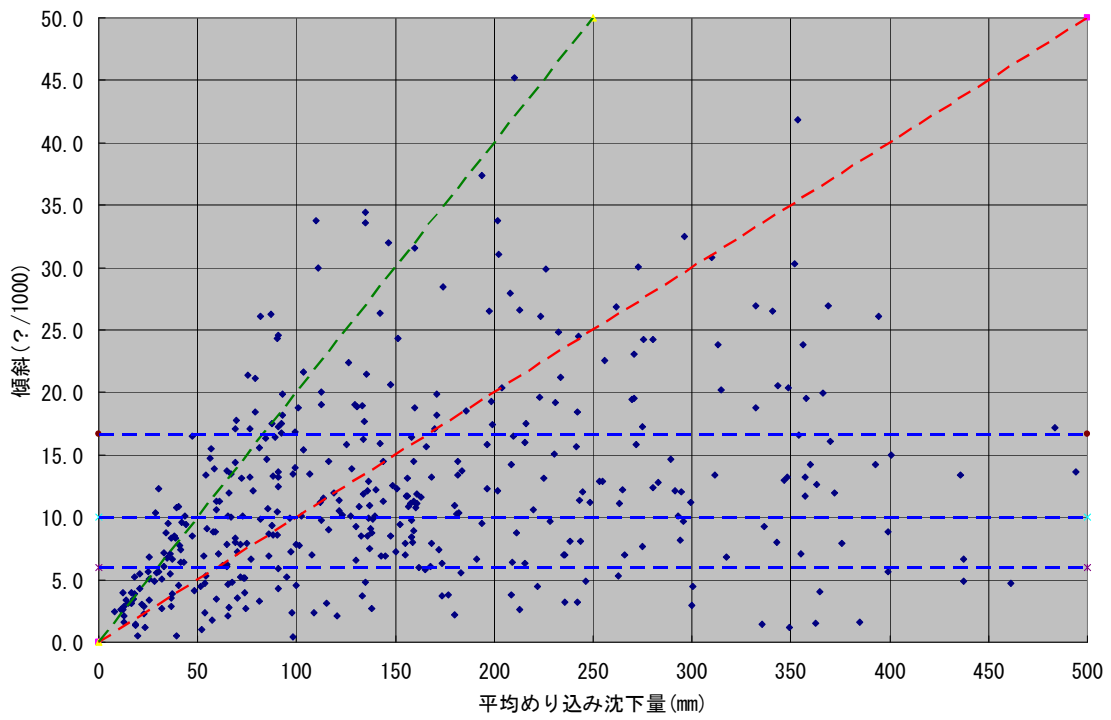
ただし、臨海部で敷地が狭く隣接建物の影響が大きい地区については、7.5cm、12.5cm と小さな値を採用することも考えられる。

表 3.5.2 平均めり込み沈下量のクライテリア (cm)

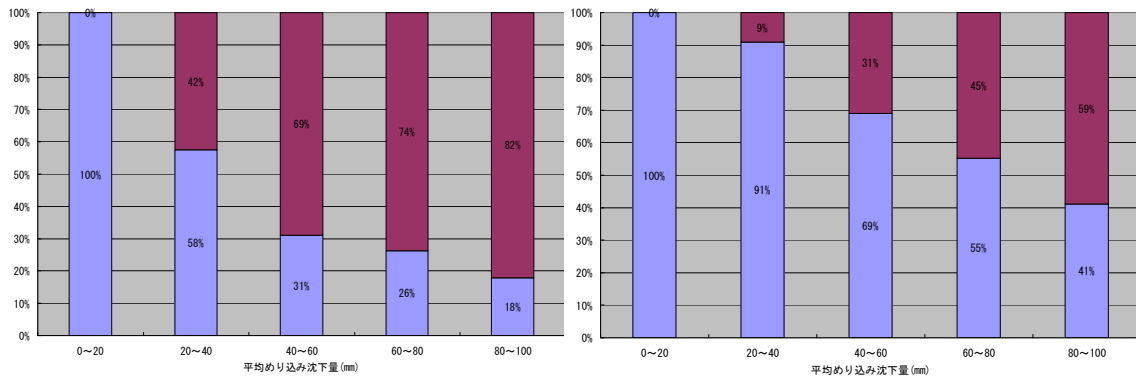
地震動レベル	最大傾斜角	全体	潮来市・神栖市	千葉市・習志野市	採用値
中地震動	10/1000	12.5	14.0	7.5	10.0
大地震動	16.7/1000	21.0	23.0	12.5	15.0

建物構造別の傾斜と平均めり込み沈下量の関係では、図 3.5.10 の潮来市日の出地区、図 3.5.10 の神栖市堀割・深芝地区、図 3.5.11 の我孫子市布佐地区、図 3.5.12 の千葉市美浜磯部地区から、全体的に木造よりも鉄骨造及び RC 造の方が傾斜に対してめり込み沈下量が大きいことが明らかとなった。

建物基礎別の傾斜と平均めり込み沈下量の関係では、図 3.5.13 の潮来市日の出地区、図 3.5.14 の神栖市堀割・深芝地区、図 3.5.15 の我孫子市布佐地区、図 3.5.16 の千葉市美浜磯部地区から、全体的に布基礎よりもべた基礎の方が傾斜に対してめり込み沈下量が大きいことが明らかとなった。

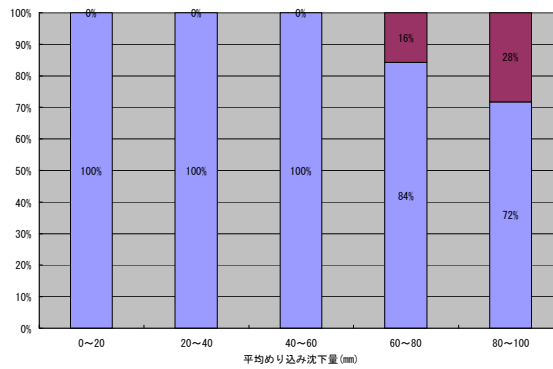


(a) 沈下・傾斜の相関関係



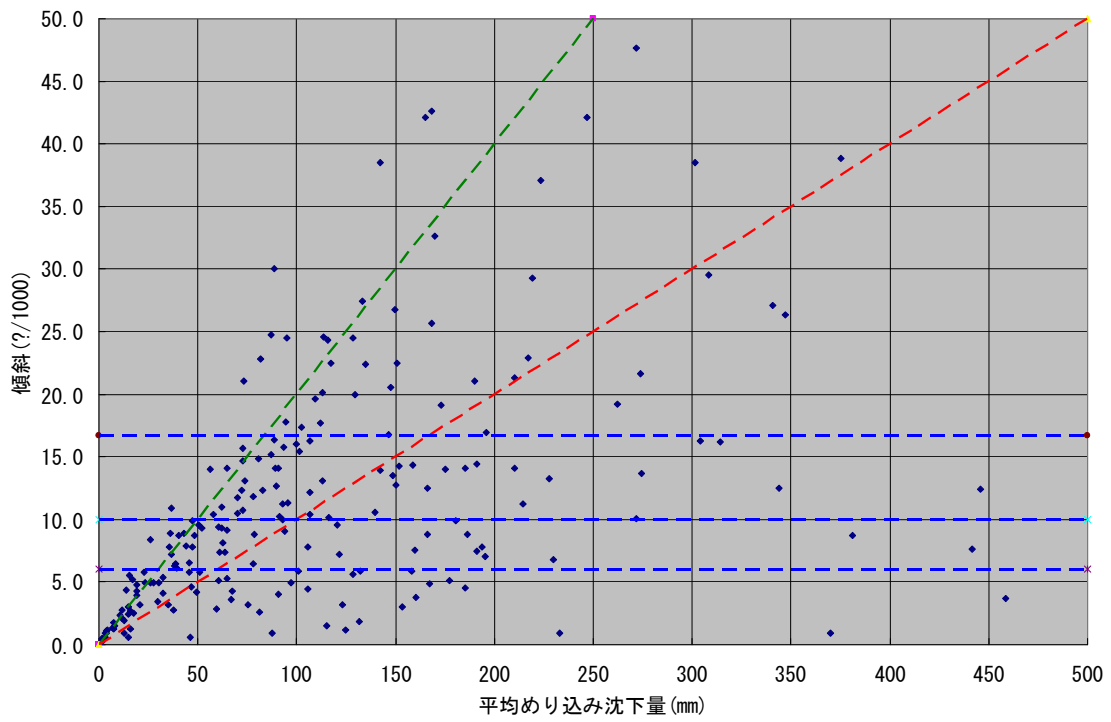
(b) 傾斜 6/1000 以下の割合

(c) 傾斜 10/1000 以下の割合

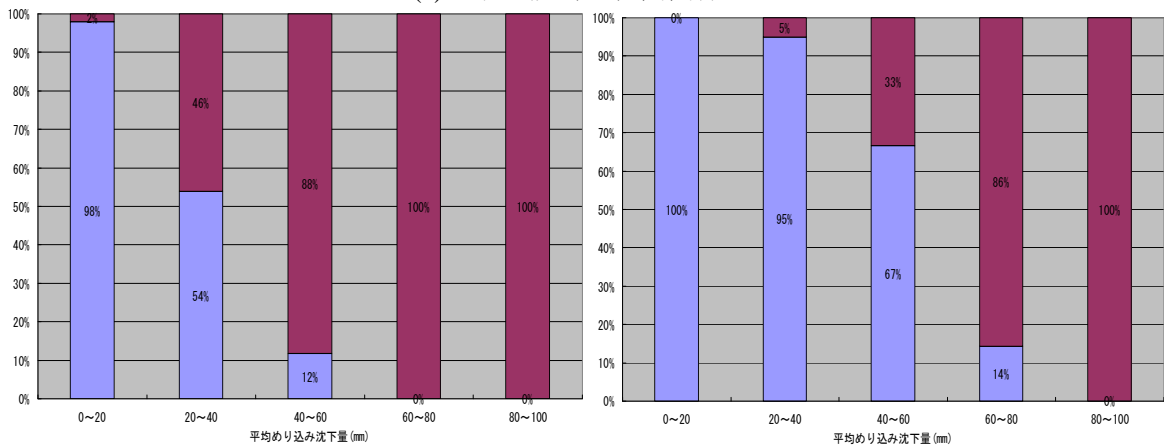


(d) 傾斜 16.7/1000 以下の割合

図 3.5.1 潮来市日の出地区の沈下・傾斜の相関関係⁴⁴⁾

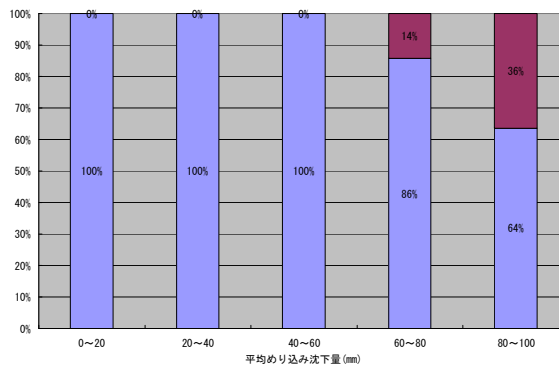


(a)沈下・傾斜の相関関係



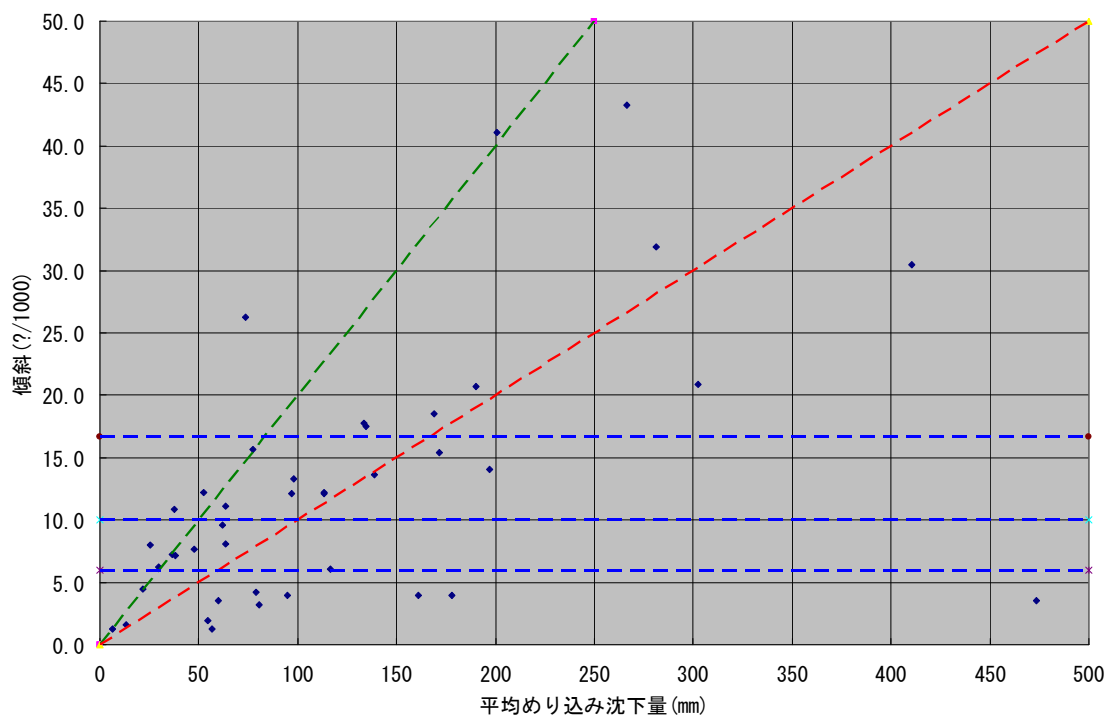
(b)傾斜 6/1000 以下の割合

(c)傾斜 10/1000 以下の割合

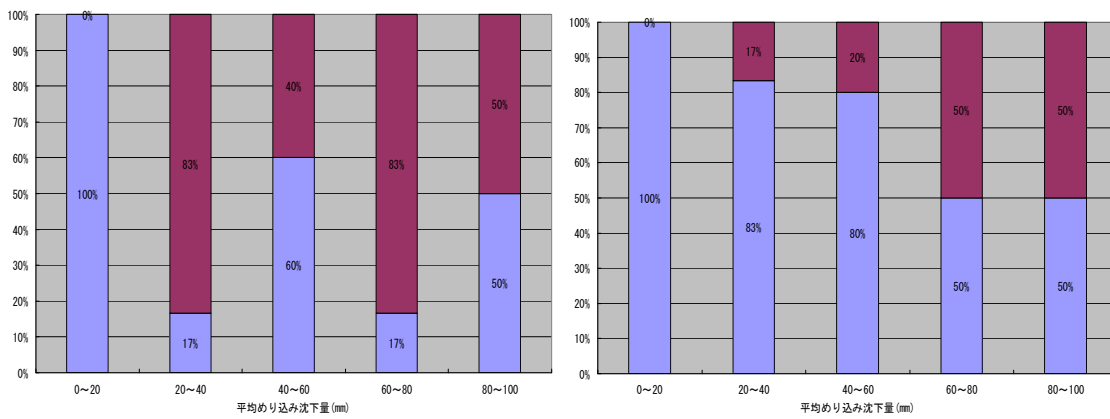


(d)傾斜 16.7/1000 以下の割合

図 3.5.2 神栖市堀割・深芝地区の沈下・傾斜の相関関係⁴⁴⁾

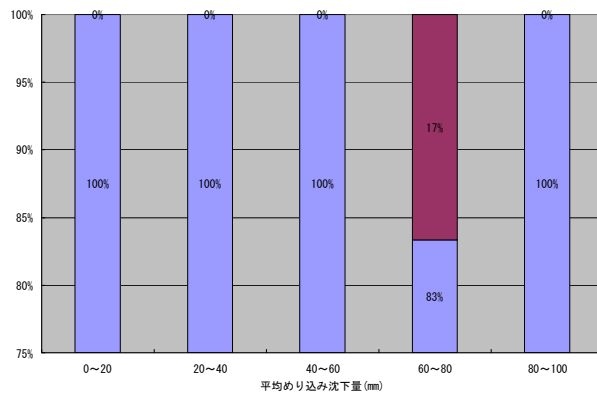


(a) 沈下・傾斜の相関関係



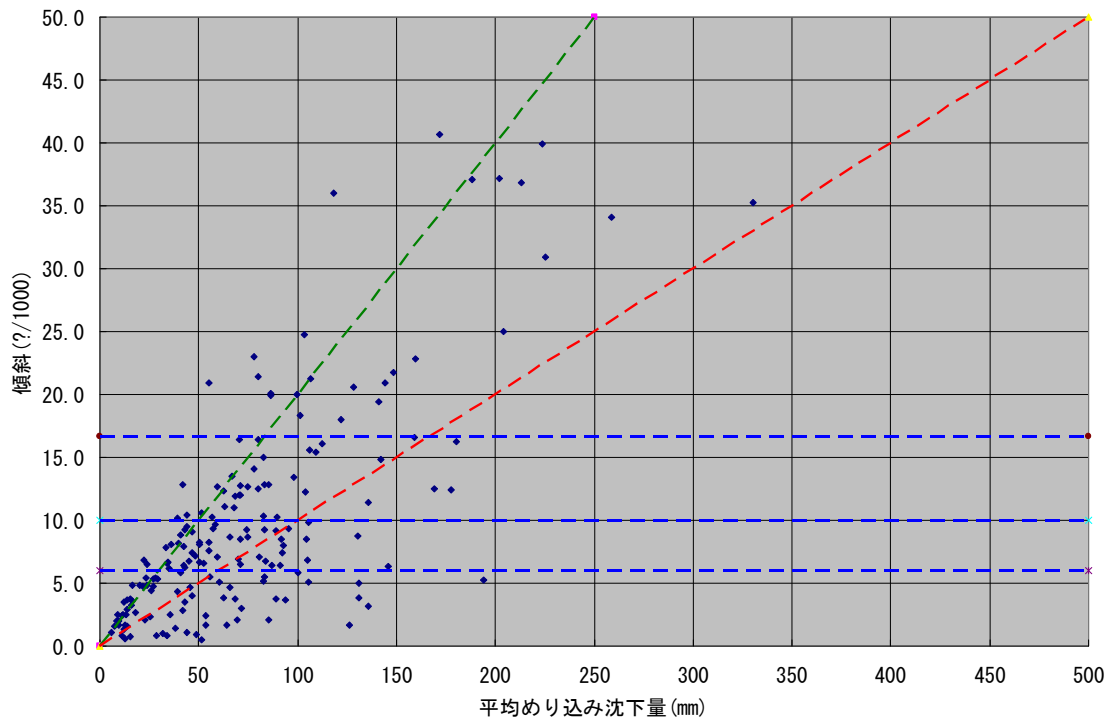
(b) 傾斜 6/1000 以下の割合

(c) 傾斜 10/1000 以下の割合

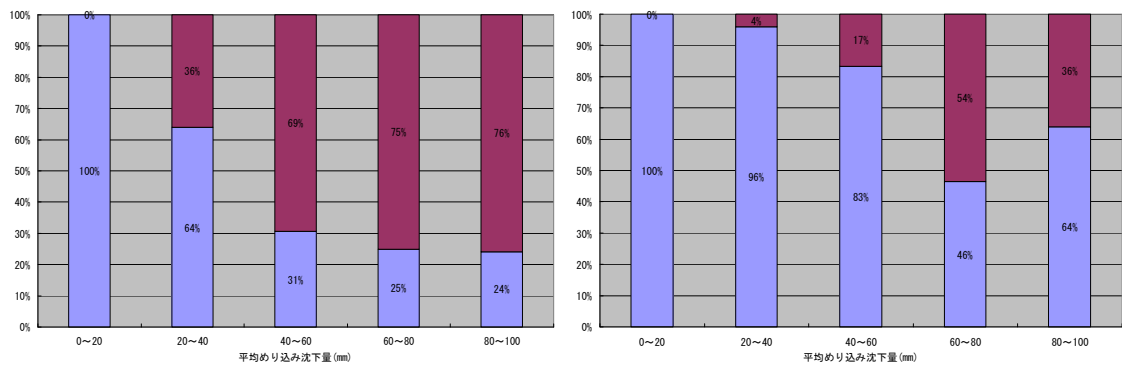


(d) 傾斜 16.7/1000 以下の割合

図 3.5.3 我孫子市布佐地区の沈下・傾斜の相関関係⁴⁴⁾

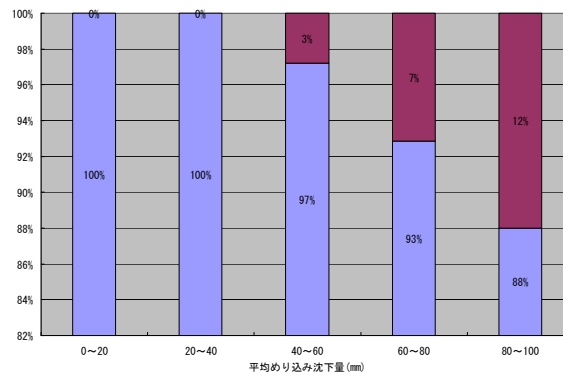


(a)沈下・傾斜の相関関係



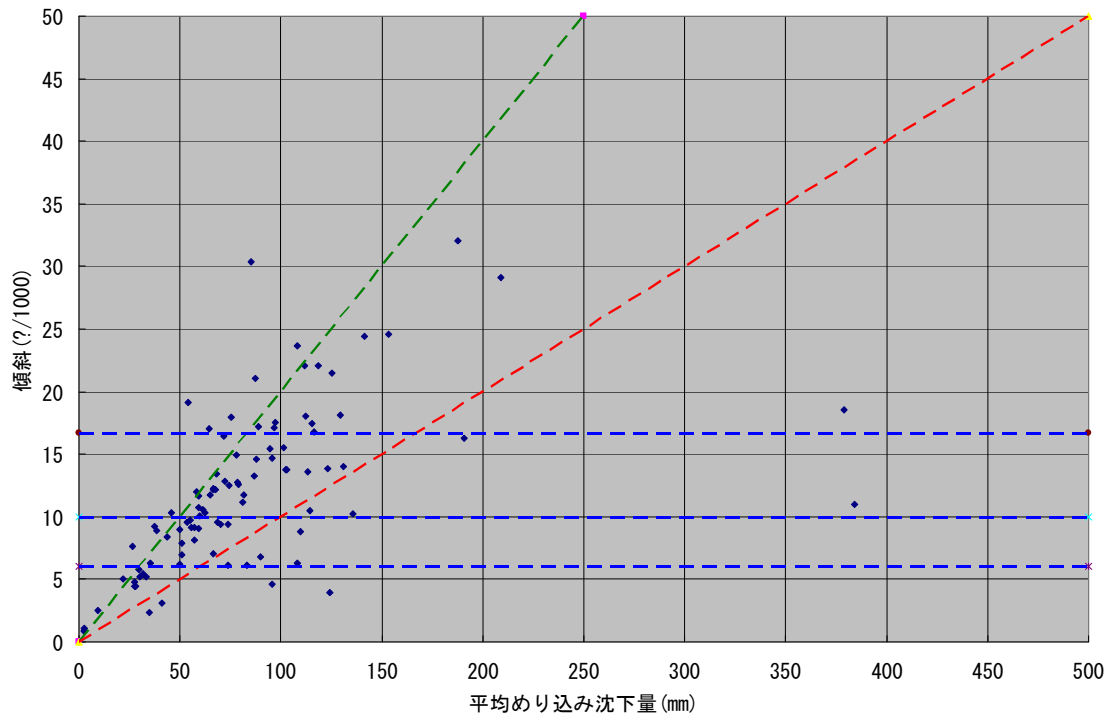
(b)傾斜 6/1000 以下の割合

(c)傾斜 10/1000 以下の割合

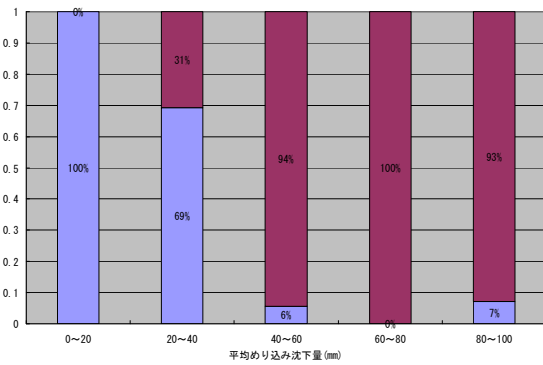


(d)傾斜 16.7/1000 以下の割合

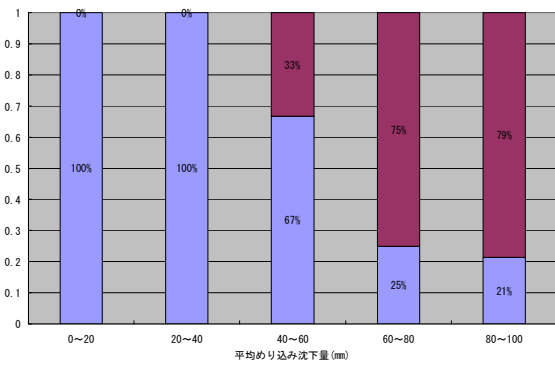
図 3.5.4 千葉市美浜磯部地区の沈下・傾斜の相関関係⁴⁴⁾



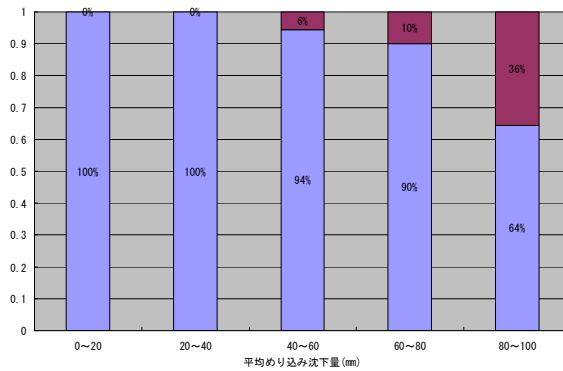
(a)沈下・傾斜の相関関係



(b)傾斜 6/1000 以下の割合



(c)傾斜 10/1000 以下の割合



(d)傾斜 16.7/1000 以下の割合

図 3.5.5 習志野市香澄地区の沈下・傾斜の相関関係

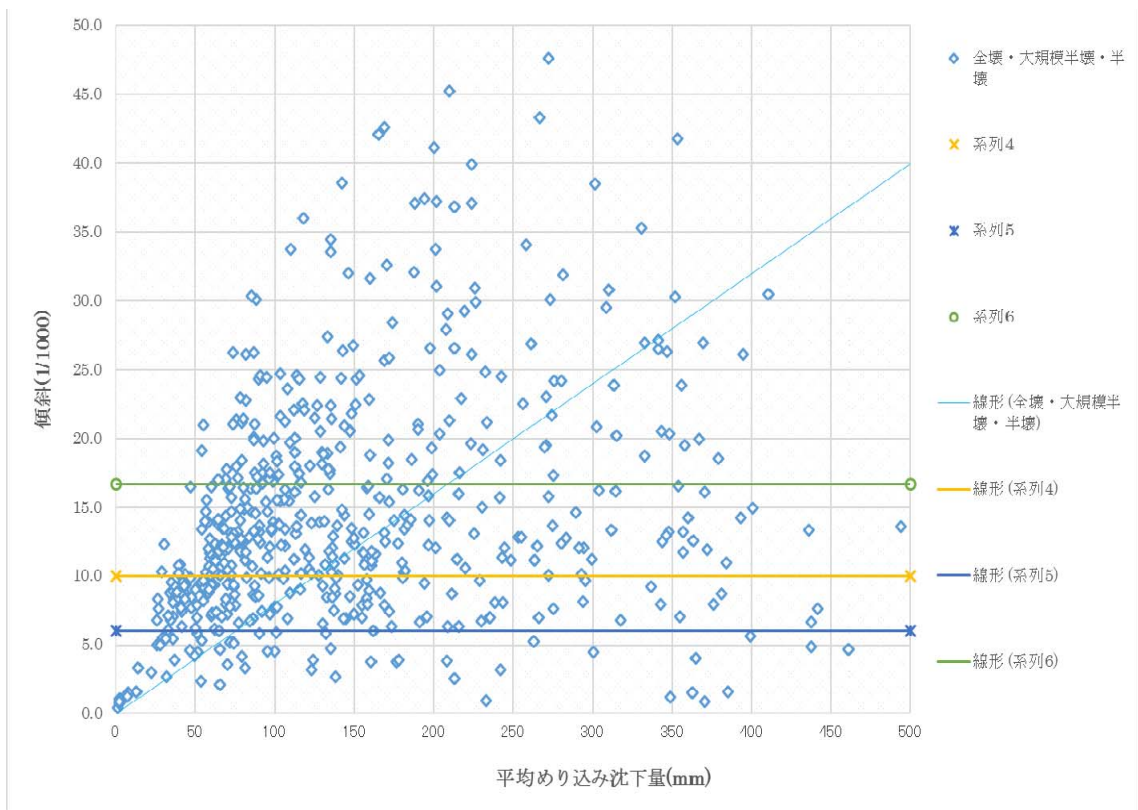


図 3.5.6 全地区の半壊以上の建物傾斜と平均めり込み沈下量の関係

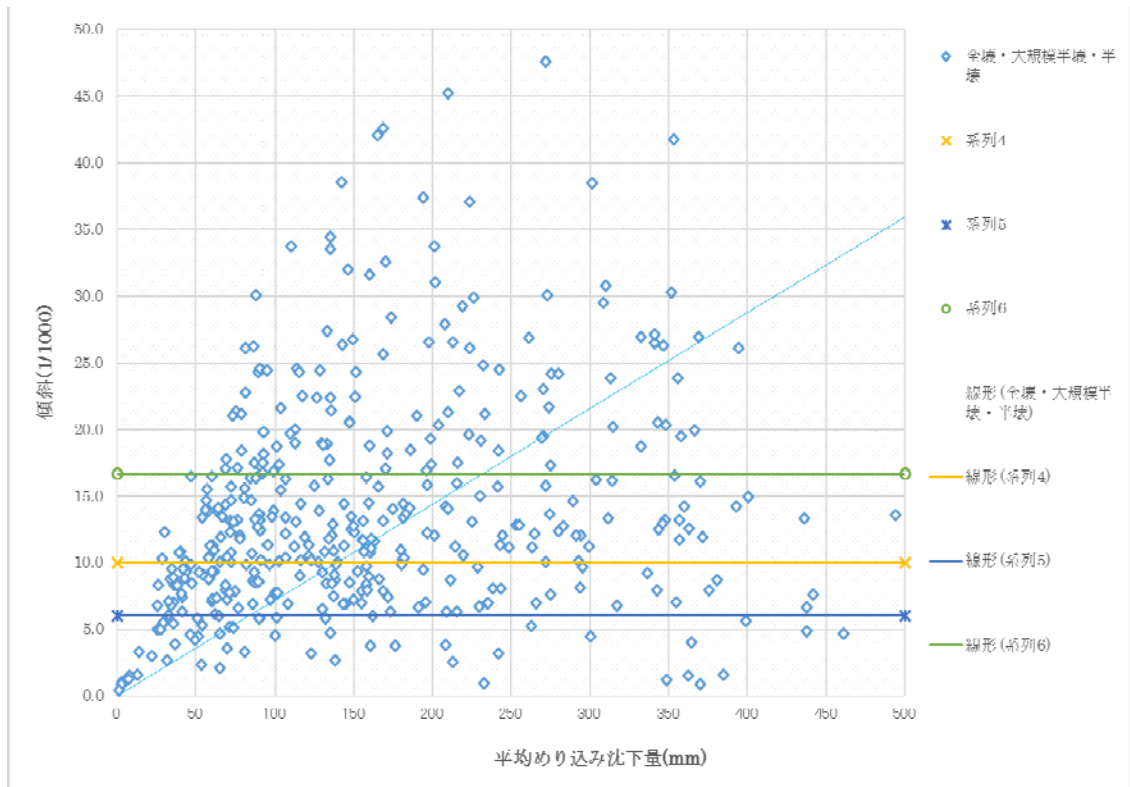


図 3.5.7 潮来市・神栖市の半壊以上の建物傾斜と平均めり込み沈下量の関係

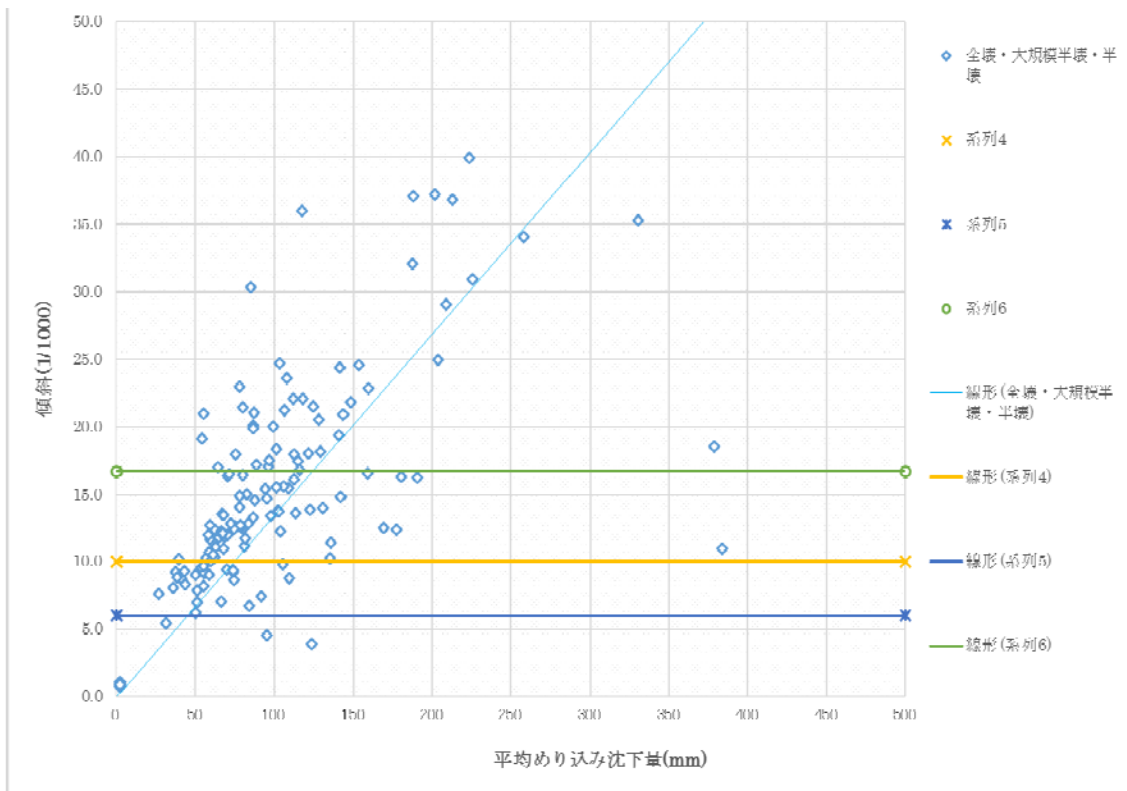
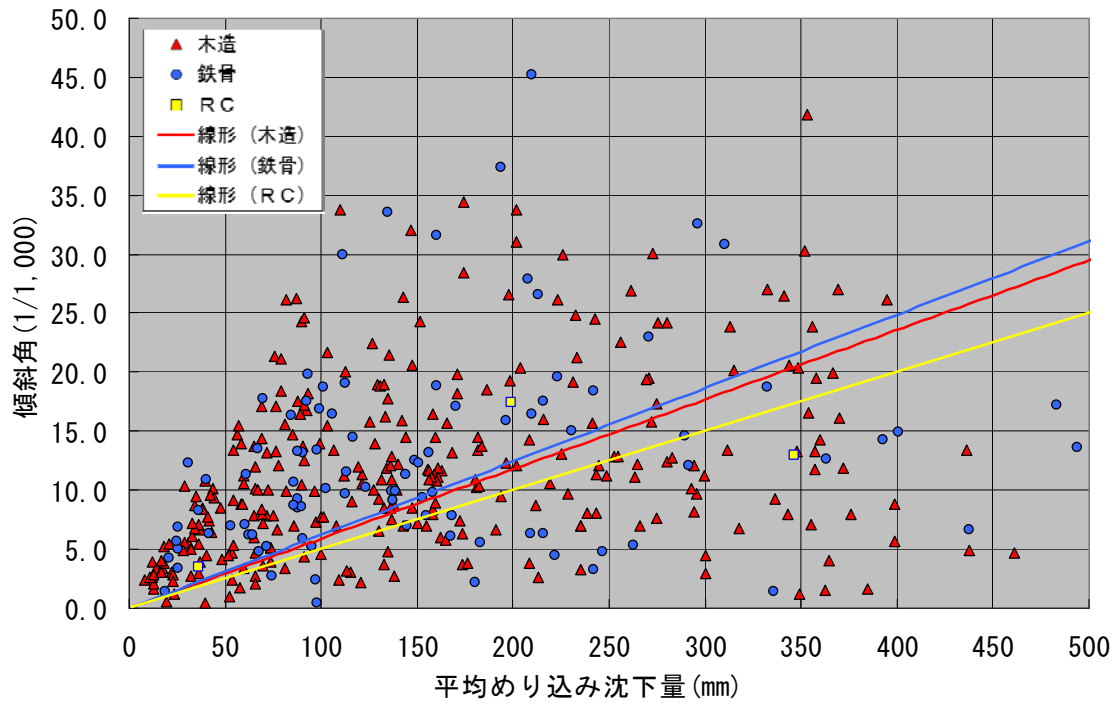
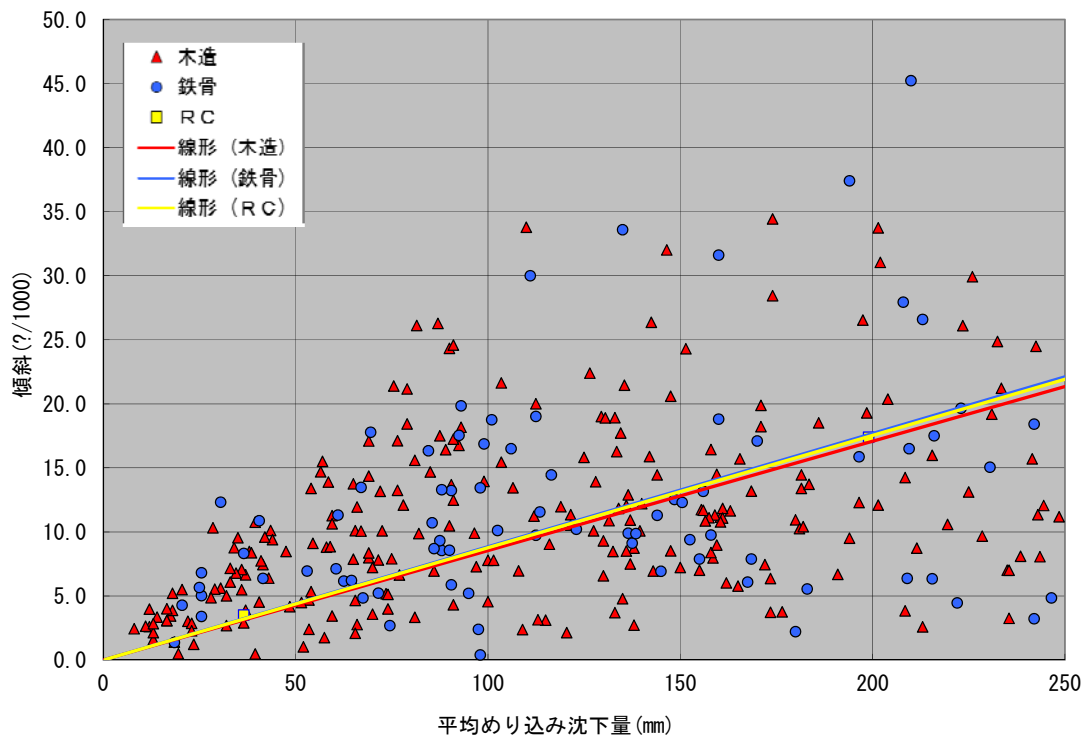


図 3.5.8 千葉市・習志野市の半壊以上の建物傾斜と平均めり込み沈下量の関係

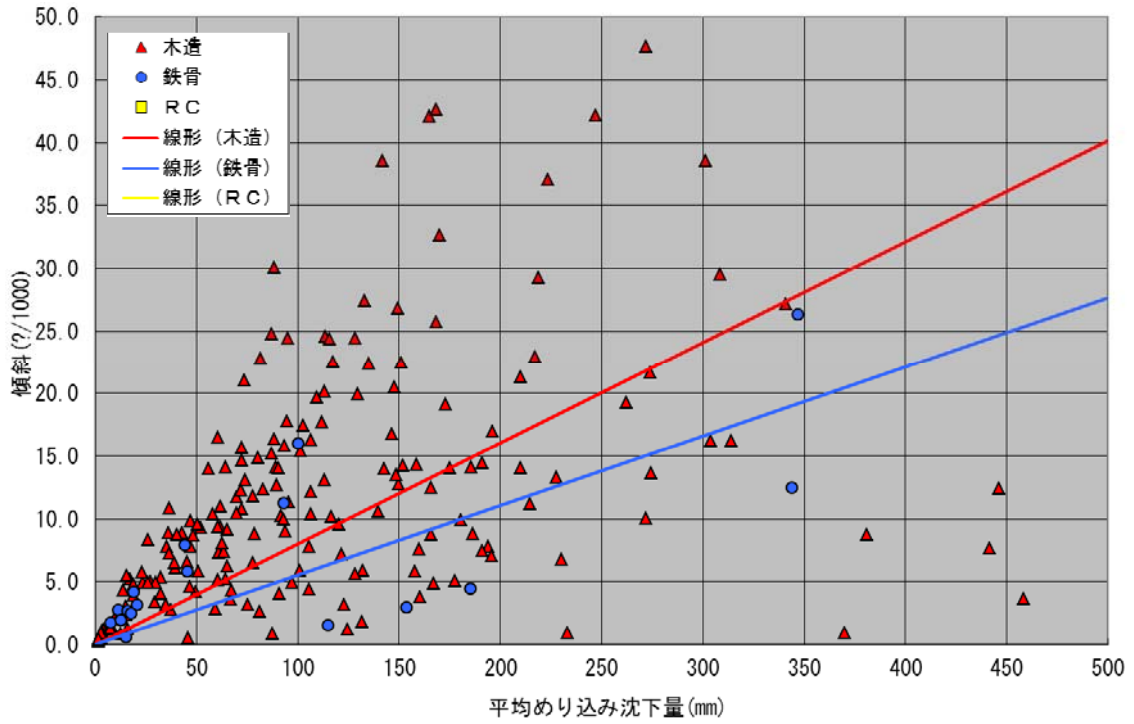


(a) 不同沈下量 50cm 以下の場合

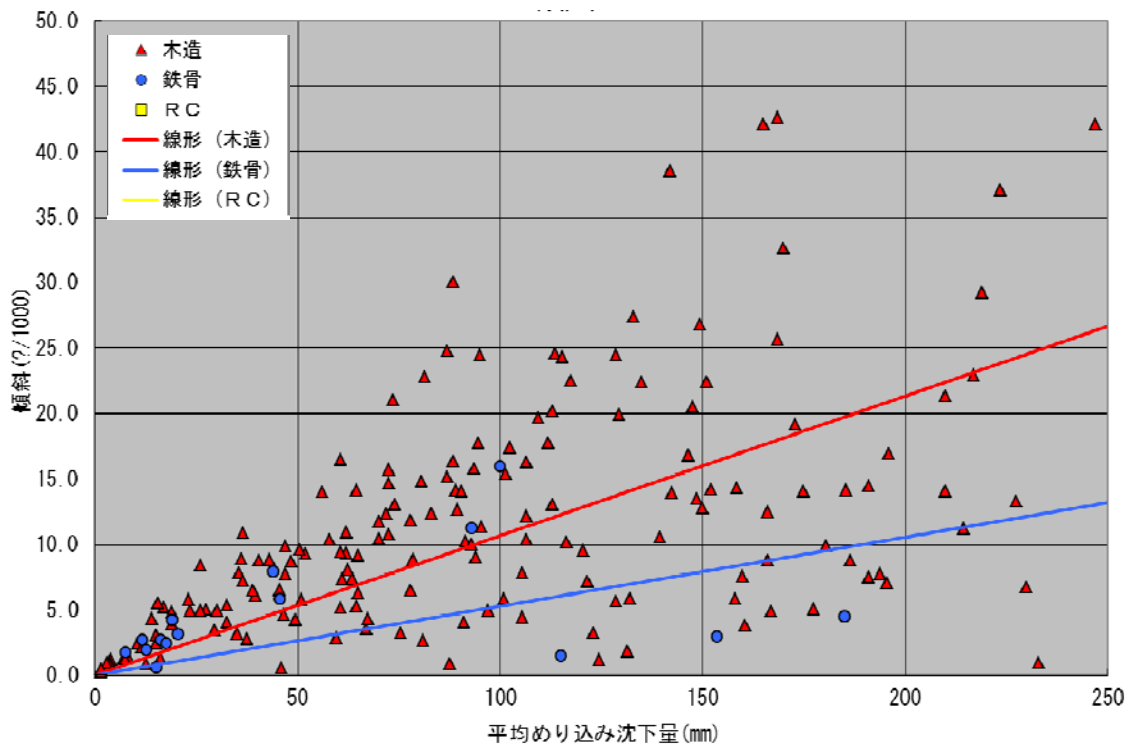


(b) 不同沈下量 25cm 以下の場合

図 3.5.9 潮来市日の出地区の建物構造別の傾斜と平均めり込み沈下量の関係

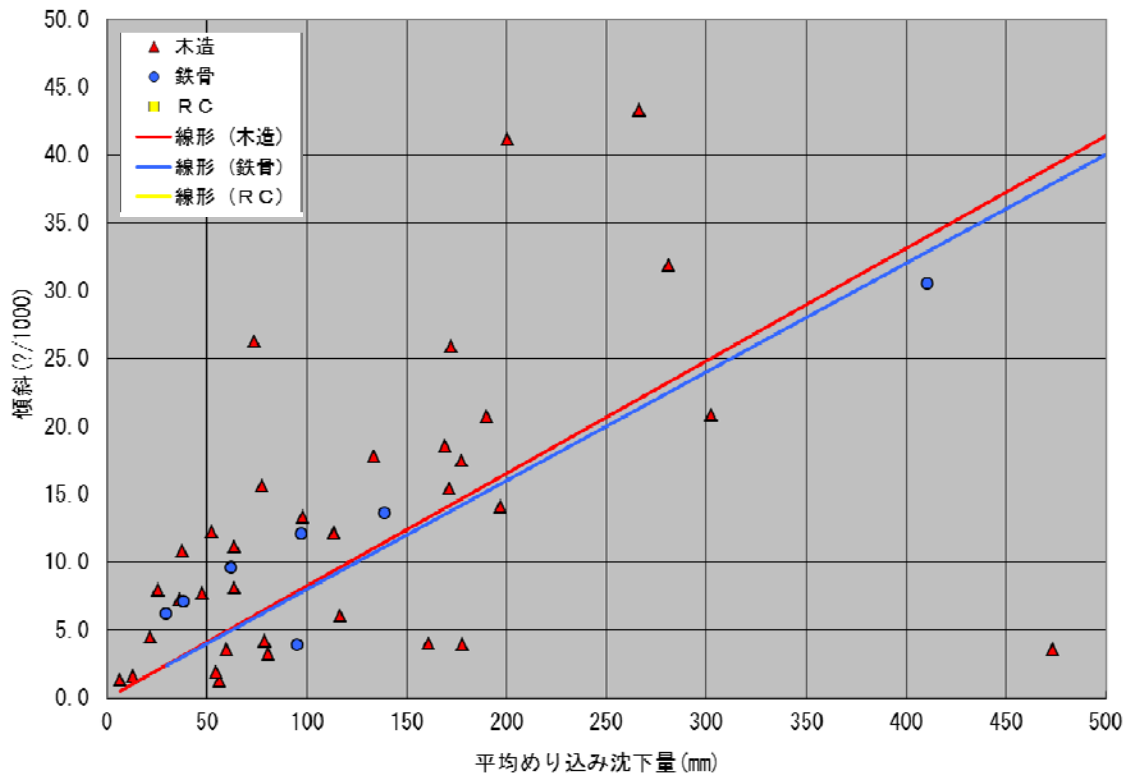


(a) 不同沈下量 50cm 以下の場合

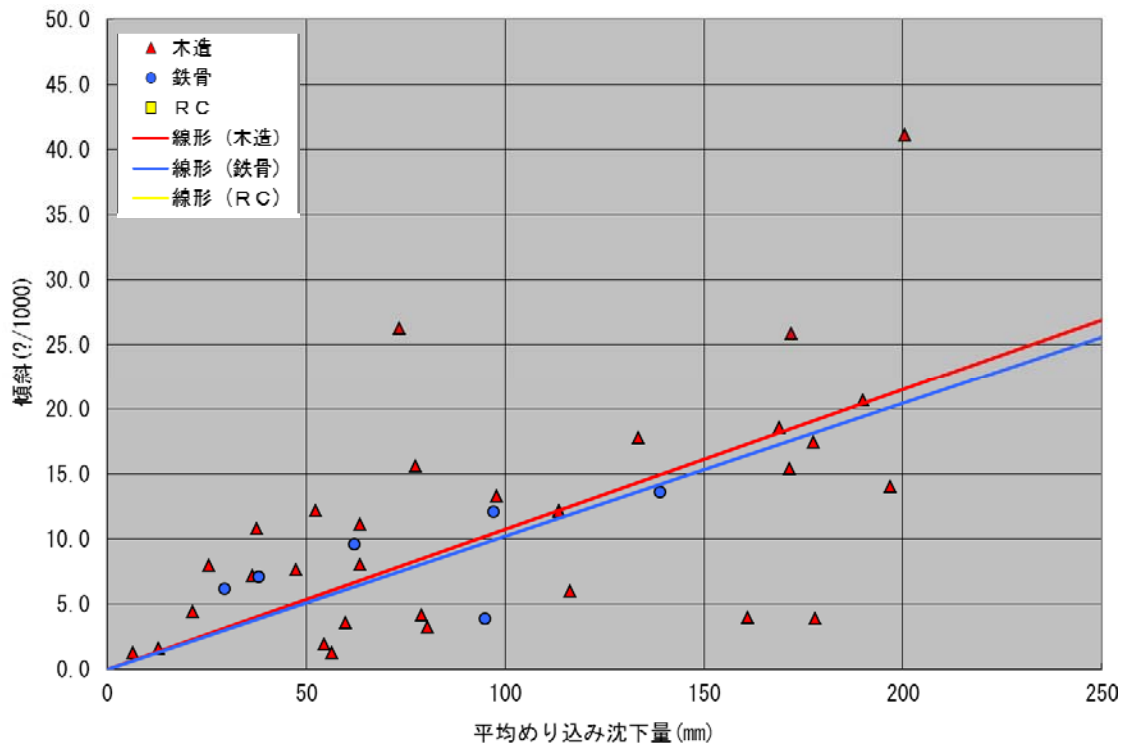


(b) 不同沈下量 25cm 以下の場合

図 3.5.10 神栖市堀割・深芝地区の建物構造別の傾斜と平均めり込み沈下量の関係

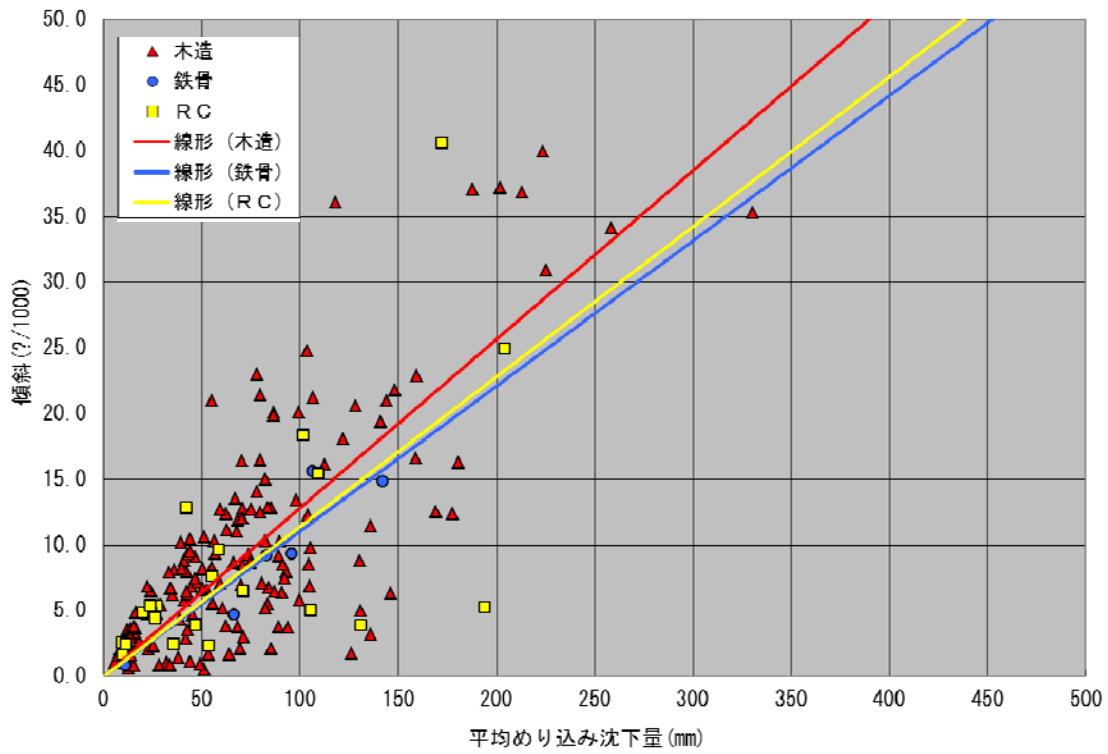


(a) 不同沈下量 50cm 以下の場合

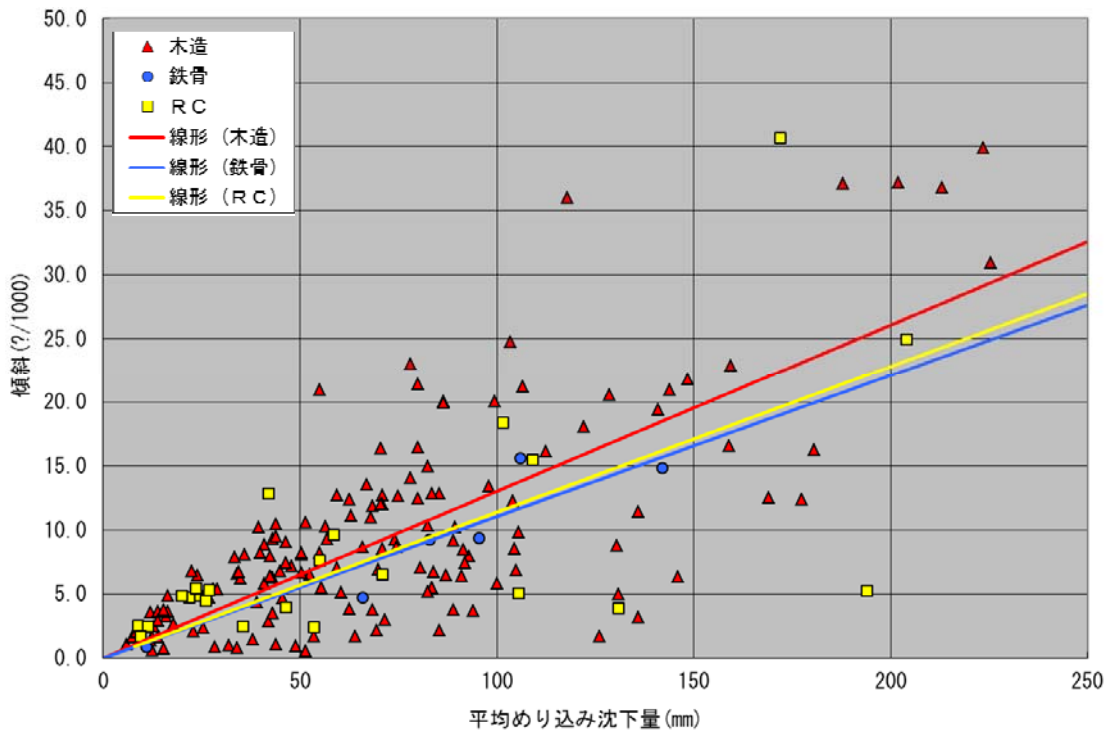


(b) 不同沈下量 25cm 以下の場合

図 3.5.11 我孫子市布佐地区の建物構造別の傾斜と平均めり込み沈下量の関係

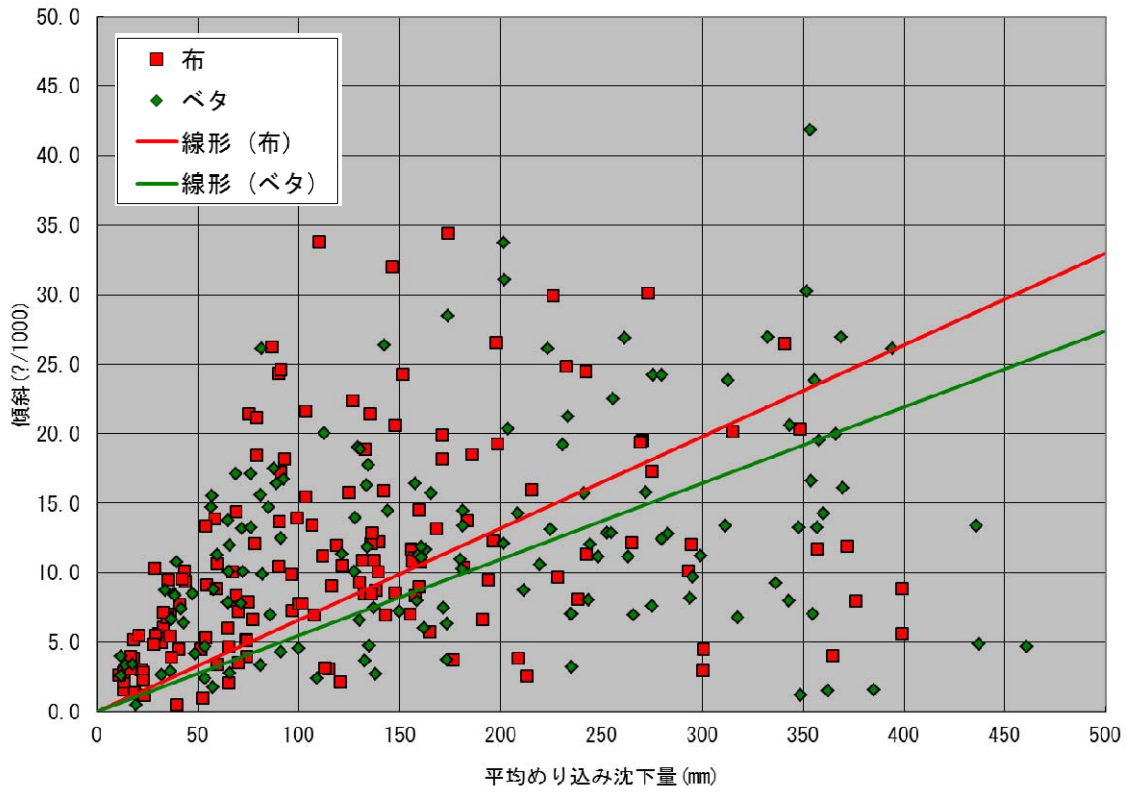


(a)不同沈下量 50cm 以下の場合

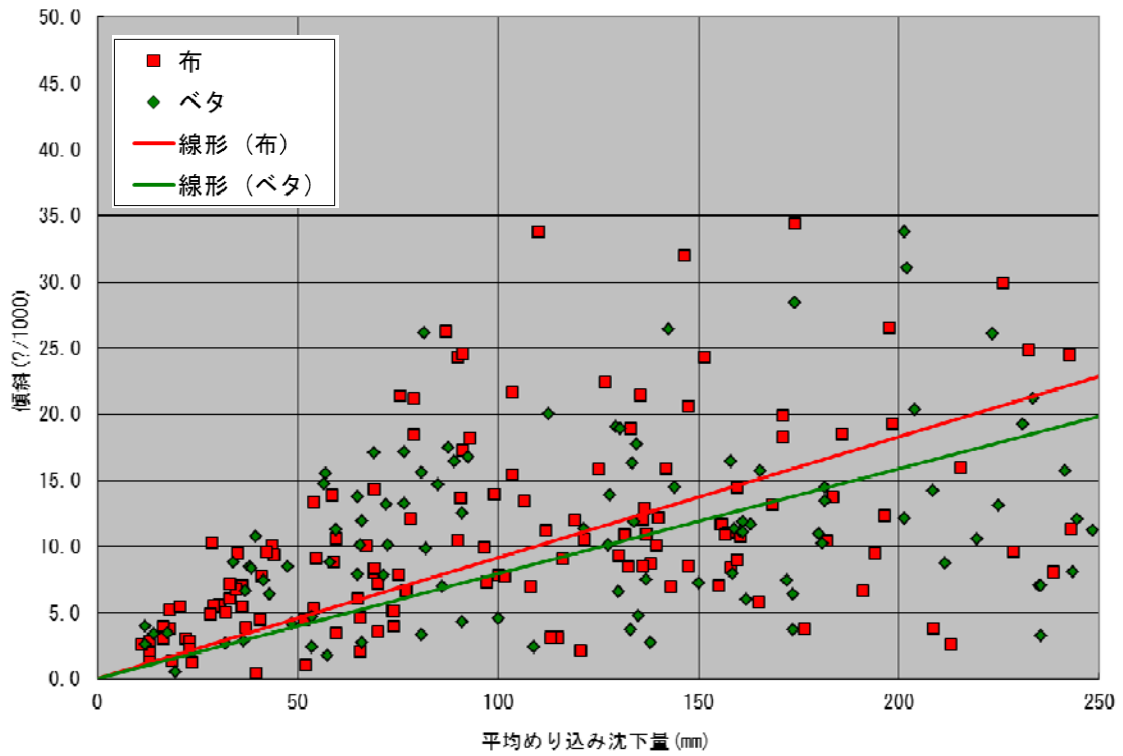


(b)不同沈下量 25cm 以下の場合

図 3. 5. 12 千葉市美浜磯部地区の建物構造別の傾斜と平均めり込み沈下量の関係

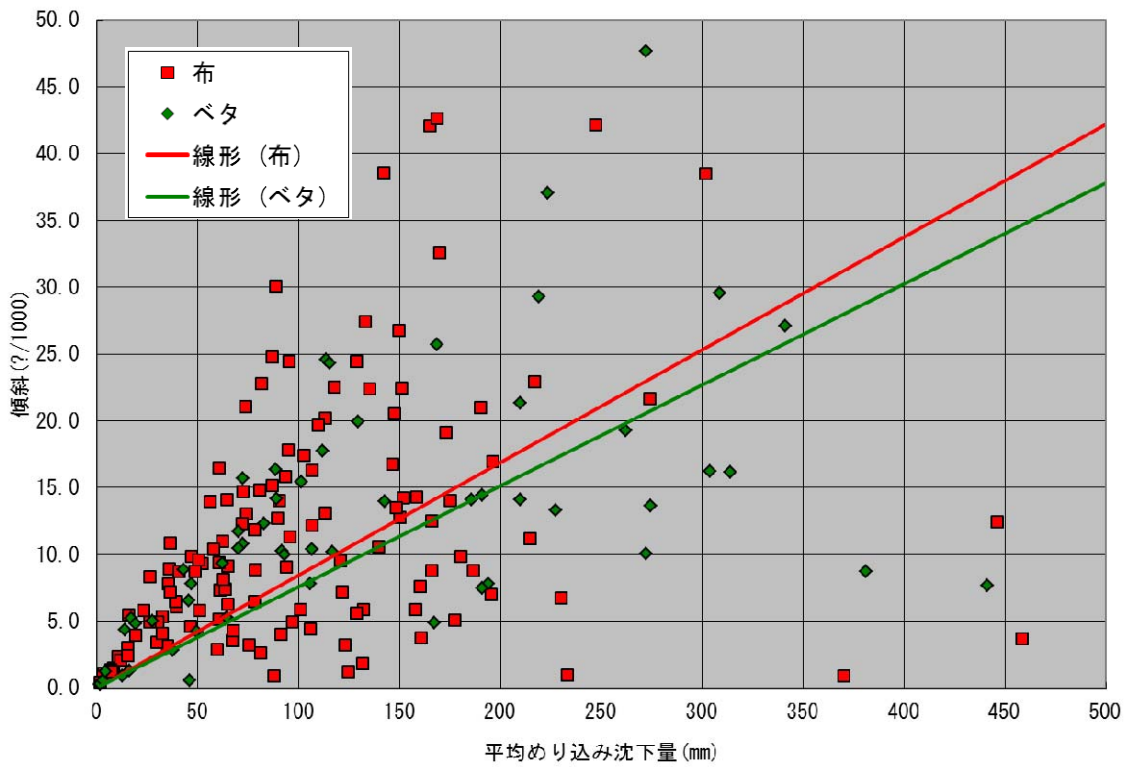


(a) 不同沈下量 50cm 以下の場合

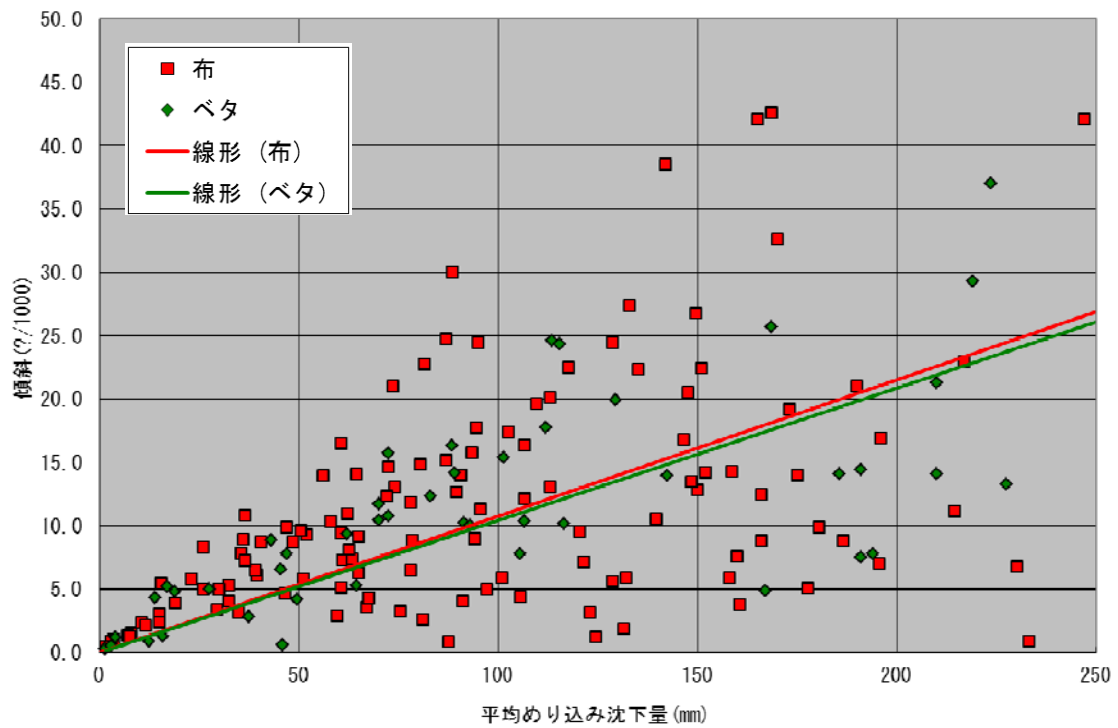


(b) 不同沈下量 25cm 以下の場合

図 3.5.13 潮来市日の出地区の建物基礎別の傾斜と平均めり込み沈下量の関係

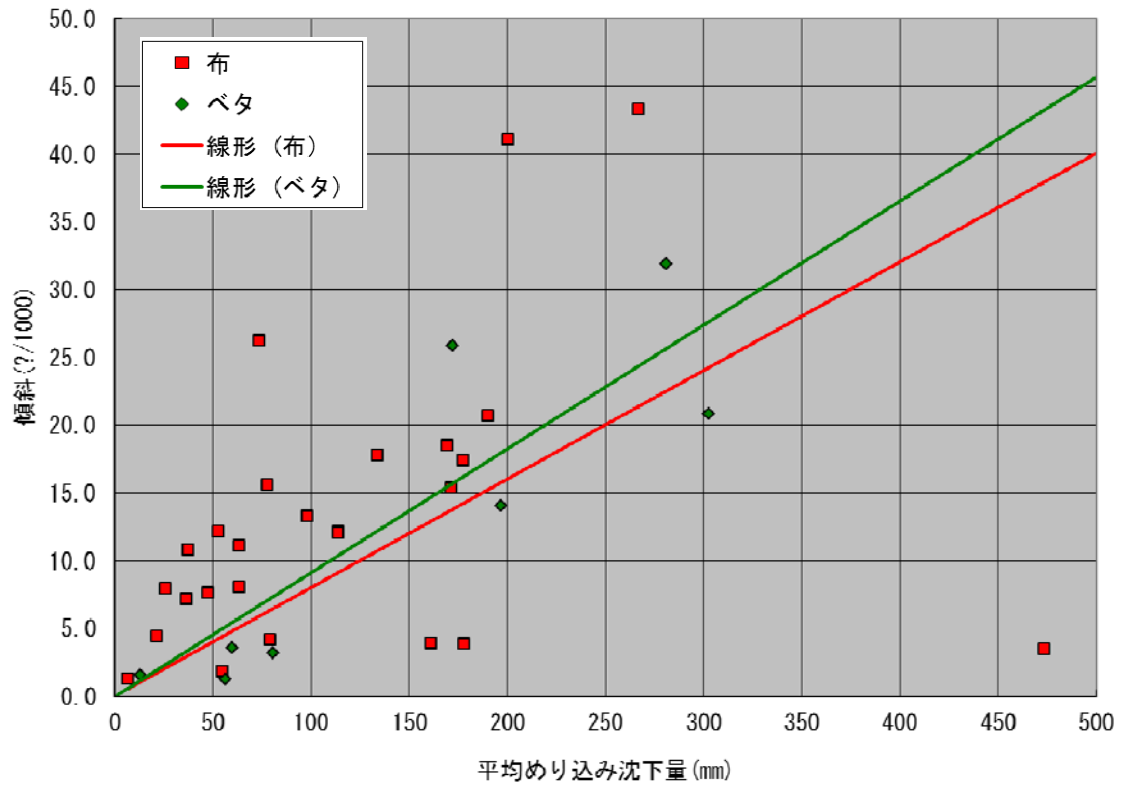


(a) 不同沈下量 50cm 以下の場合

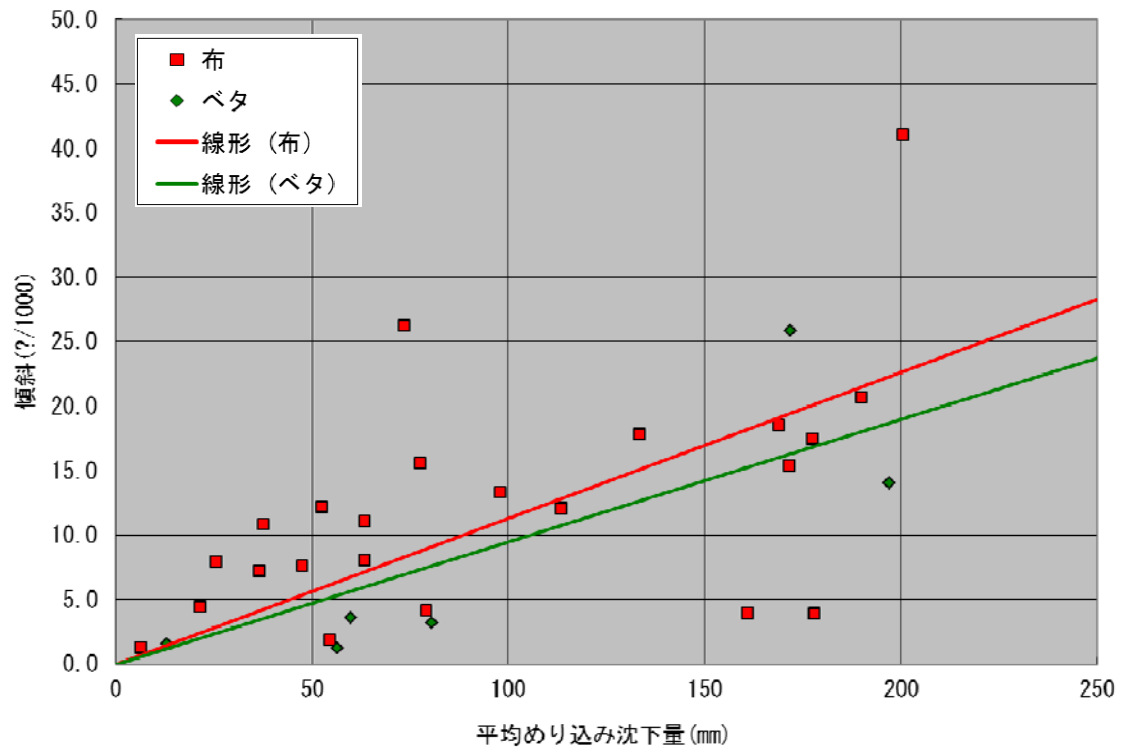


(b) 不同沈下量 25cm 以下の場合

図 3.5.14 神栖市堀割・深芝地区の建物基礎別の傾斜と平均めり込み沈下量の関係

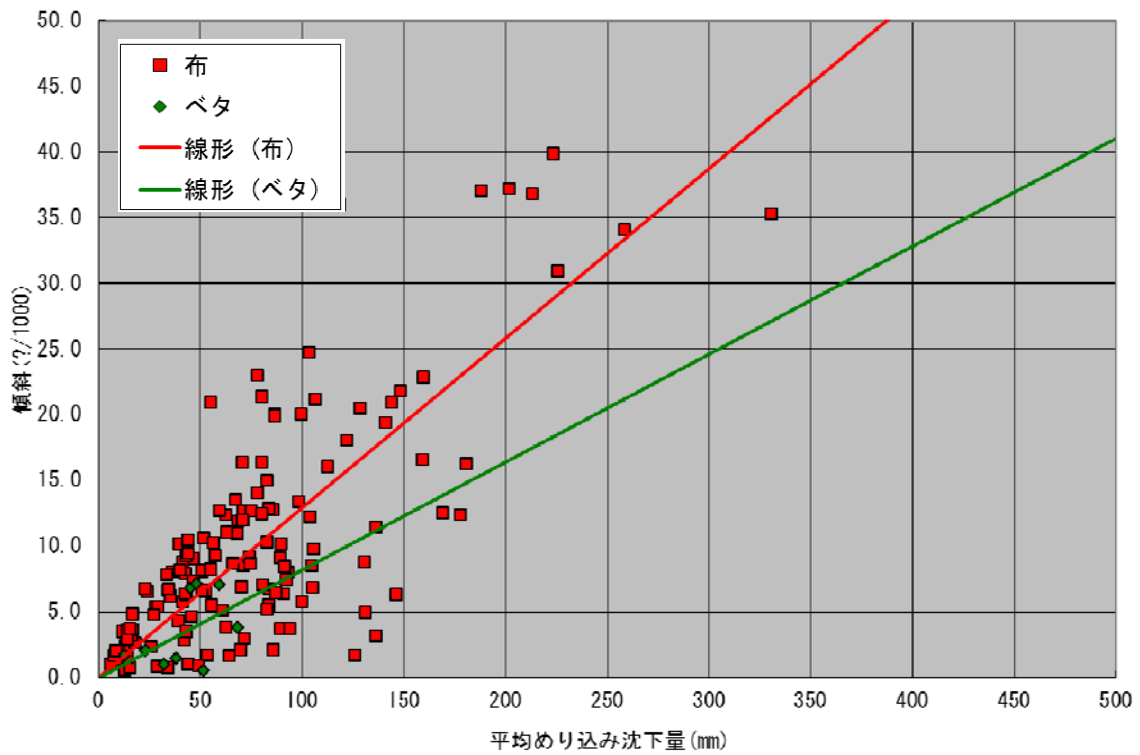


(a) 不同沈下量 50cm 以下の場合

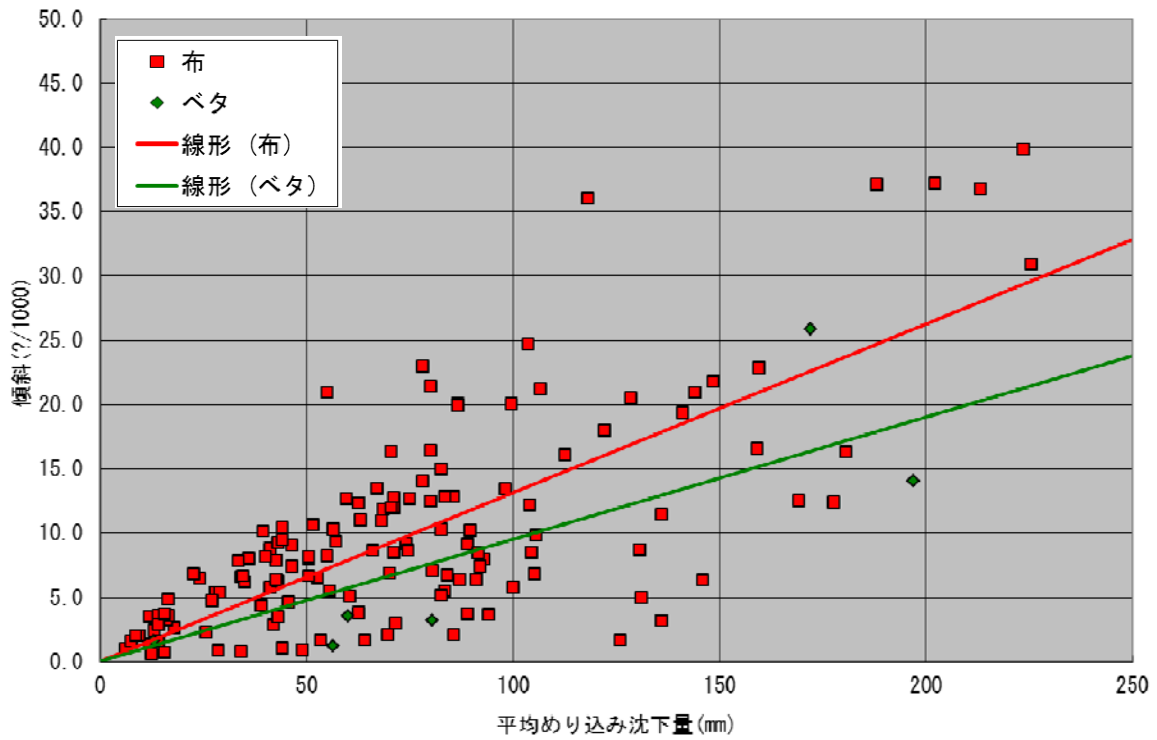


(b) 不同沈下量 25cm 以下の場合

図 3.5.15 我孫子市布佐地区の建物基礎別の傾斜と平均めり込み沈下量の関係



(a) 不同沈下量 50cm 以下の場合



(b) 不同沈下量 25cm 以下の場合

図 3.5.16 千葉市美浜磯部地区の建物基礎別の傾斜と平均めり込み沈下量の関係

3.6 まとめ

東日本大震災を含むこれまでの地震で液状化被害が発生した戸建て住宅の地盤において、表層改良・中層改良等による液状化対策を行った箇所の文献調査、実態調査および大手住宅メーカー・沈下修復業者から広くアンケート調査を行った。主な結果として、液状化の発生に及ぼす地下水位の影響は非常に重要であること、及び鋼管杭や柱状改良などの対策工により液状化被害が軽減されたケースが多くあることが示された。特に、アンケート調査では表層地盤改良が他の対策工と比較して、戸建て住宅の液状化被害軽減に寄与した割合が高いことが示された。

浅層盤状改良による液状化被害軽減効果は、航空レーザ測量による道路の変状調査からも示された。即ち、舗装と路盤部の層厚が厚いほど、液状化による道路の沈下や傾斜が低減される傾向が示された。また、道路の沈下量と傾斜角の間には、ばらつきは大きいものの相関があることが示された。

上記の知見を基に、2章により設定された戸建て住宅の最大傾斜角の基準値に対応するめり込み沈下量の値を、実際に被災した戸建て住宅のめり込み沈下量と傾斜角の計測結果から関係から以下のように設定した。

- ①中地震動に対しては、最大傾斜角の基準値 10/1000 に対し、めり込み沈下量は 10cm
- ②大地震動に対しては、最大傾斜角の基準値 16.7/1000 に対し、めり込み沈下量は 15cm

【参考文献】

- 1) Yasuda, S., Irisawa, T. and Kazami, K.: Liquefaction-induced settlements of buildings and damages in coastal areas during the Kocaeli and other earthquakes, Proc. of the Satellite Conference on Lessons Learned from Recent Strong Earthquakes, 15th ICSMGE, pp.33-42, 2001.
- 2) 鳥取県米子市安倍彦名団地中ノ海2区自治会地震被災復興委員会：液状化被災からこうして復興した、2001
- 3) 安田進・橋本隆雄：鳥取県西部地震における住宅の液状化による沈下について、土木学会第57回全国大会、Ⅲ515、CD-ROM、2002.9
- 4) 橋本隆雄・安田進：鳥取県西部地震における住宅の液状化被害と地下水位の関係、土木学会第57回全国大会、Ⅲ514、CD-ROM、2002.9
- 5) 安田進・吉田望・安達健司・規矩大義・五瀬伸吾・増田民夫：液状化に伴う流動の簡易評価法、土木学会論文集、No.638 /Ⅲ-49、 pp.71-89、 1999.
- 6) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針、2001年10月.
- 7) 社団法人地盤工学会：新潟県中越沖地震災害調査委員会報告書、pp.3-3-1～3-3-18、2009.2.
- 8) 社団法人地盤工学会：新潟県中越地震災害調査委員会報告書、2004.

- 9) 井上波彦, 飯場正紀, 平出務, 林宏一, 大塚悟, 磯部公一:新潟県中越沖地震による宅地地盤被害(その1概要)、第43回地盤工学研究発表会講演概要集、pp.1743-1744、2008.
- 10) 磯部公一, 大塚悟, 平出務, 林宏一, 杉村晋之介:新潟県中越沖地震による宅地地盤被害(その4刈羽村)、第43回地盤工学研究発表会講演概要集、pp.1749-1750、2008.
- 11) 猪爪高見, 尾上篤生, 土田勝範, 大澤拓洋, 鶴飼恵三, 若井明彦, 蔡飛, 樋口邦弘, 黒田清一郎:液状化対策の有無による地震時地盤変状の差異の一事例、第25回土木学会関東支部新潟会研究調査発表会論文集、pp.152-155、2007.
- 12) 尾上篤生, 猪爪高見, 鶴飼恵三, 若井明彦, 蔡飛, 樋口邦弘, 黒田清一郎:中越沖地震による刈羽村砂丘麓の液状化被害について、第4回地盤工学会関東支部発表会発表概要集、pp.207-210、2007.10.
- 13) 尾上篤生:地震時の斜面崩壊と液状化被害に学ぶ、第47回日本地すべり学会研究発表会講演集、pp.32-36、2008.8.
- 14) (社)地盤工学会:新潟県中越沖地震災害調査委員会報告書、p.3-8-1~3-8-14、2009.2.
- 15) (社)地盤工学会:新潟県中越地震災害調査委員会報告書、p.133、2007.
- 16) 国土地理院地図閲覧サービス:1/25000 地形図「柏崎」<http://watchizu.gsi.go.jp/>
- 17) 柏崎市:柏崎市統計年鑑平成19年版、2008.
- 18) 柏崎市立鯖石小学校:川は語る-鯖石川治水の記、1977.
- 19) 新潟県:新潟県地質図、1995.
- 20) 柏崎市西中通公民館:西中通のあゆみ、1995.
- 21) (社)北陸建設弘済会:新潟県平野部の地盤図集(柏崎・高田平野編)、1981.
- 22) (社)地盤工学会:地盤調査の方法と解説、pp.280-289、2004.
- 23) (社)地盤工学会:土質試験の方法と解説、pp.54-79、2000.
- 24) 道路橋示方書・同解説V耐震設計編、1996.
- 25) 橋本隆雄・安田進:鳥取県西部地震における液状化被害と地下水位の関係、土木工学会第57回年次学術講演会、III-514、pp.1027-1028、2002.
- 26) 杉村晋之介, 斉藤美咲, 大塚悟, 磯部公一, 平出務, 林宏一:新潟県中越沖地震による宅地地盤被害(その3橋場・松波の液状化被害)、第43回地盤工学研究発表会講演概要集、pp.1747-1748、2008.
- 27) (社)地盤工学会:新潟県中越地震災害調査委員会報告書、pp.3-11-1~3-11-19、2009.2.
- 28) 北陸建設弘済会:新潟県平野部の地盤図集(柏崎・高田平野編)、昭和56年3月
- 29) 土木研究所地震防災振動研究室:地震時における砂質地盤の液状化判定方法と耐震設計への適用に関する研究、土木研究所資料、第1729号、(1981.9)
- 30) (社)地盤工学会:新潟県中越地震災害調査委員会報告書、pp.3-7-1~3-7-12、2009.2.
- 31) 建築基礎構造設計指針、2001.10
- 32) 芳賀保夫(1990):建物の許容沈下量、土と基礎、Vbl.38、No.8、pp.41・46
- 33) (社)地盤工学会液状化を考慮した地盤と構造物の性能設計に関する研究委員会、液状

- 化を考慮した地盤と構造物の性能設計、pp.18、一部加筆修正
- 34) 安田進、橋本隆雄(2002):鳥取県西部地震における住宅の液状化による沈下について、土木学会第 57 回年次学術講演会講演概要集、III-515、pp.1029-1030
 - 35) 国土交通省関東地方整備局、公益社団法人 地盤工学会：東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態解明報告書、pp.4、2011.8
 - 36) 国土交通省関東地方整備局、公益社団法人 地盤工学会：東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態解明報告書 別冊資料（調査票 No.118）pp.1、2011.8、http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_coNteNt/coNteNt/000043554.pdf
 - 37) 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人建築研究所：平成 23 年東北地方太平洋沖地震による建築物被害第一次調査、茨城県・千葉県境周辺における液状化等の被害（速報）、2011.4
 - 38) 橋本隆雄：東日本大震災による関東地方液状化被害地域における建物基礎地盤対策の効果の分析、第 9 回地盤工学会関東支部発表会、2012.10.
 - 39) 朝倉徹，須山翔太，小長井一男，江藤稚佳子，渋谷研一：航空レーザ計測による液状化地盤沈下マップの精度評価と浦安市の地盤と構造物変位の状況，土木学会論文集 Vol.68，pp.1278-1284，2012.
 - 40) Konagai, K., Asakura, T., Suyama, S., Kyokawa, H., Kiyota, T., Eto, C. and Shibuya, K.: Soil subsidence map of the Tokyo bay area liquefied in the March 11th Great East Japan Earthquake, *Proc. of International Symposium on Engineering Lessons Learned from the Giant Earthquake*, 2012.
 - 41) 国土交通省関東地方整備局：東北地方太平洋沖地震による関東地方の地盤液状化現象の実態解明，<http://www.ktr.mlit.go.jp/bousai/bousai00000061.html>，2011.
 - 42) 安田進，原田健二：東京湾岸の液状化被害，*地盤工学会誌*，**59** (7)，pp.38-41，2011.
 - 43) Ishihara, K. & Yoshimine: M, Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes. *Soils and Foundations*, **32** (1), pp.173-188, 1992.
 - 44) 橋本隆雄・安田進・山口亮：東北地方太平洋沖地震による液状化被災地区における住宅の傾斜とめり込み沈下量の関係、第 47 回地盤工学研究発表会、2012.7.