

東日本大震災による神栖市深芝・平泉地区の 採掘跡地における液状化被害の分析

橋本隆雄¹・安田 進²・庄司 学³

¹正会員 千代田コンサルタント復興・防災本部執行役員（〒114-0024 東京都北区西ヶ原3-57-5）

E-mail: t-hashi@chiyoda-ec.co.jp

²フェロー 東京電機大学理工学部建築・都市環境学系教授（〒350-0394 埼玉県比企郡鳩山町石坂）

E-mail: yasuda@g.dendai.ac.jp

³正会員 筑波大学システム情報系准教授（〒305-8573 茨城県つくば市天王台1-1-1）

E-mail: gshoji@kz.tsukuba.ac.jp

神栖市では東日本大震災により広い範囲で液状化が発生し、多くの家屋や上下水道のライフラインや道路等が甚大な被害を受けた。また、川の埋立地や砂利の掘削跡地など種々の地盤で液状化が発生した。東日本大震災の8か月後に創設された「市街地液状化対策事業」によって、地震の翌年から詳細な調査や液状化対策工法の検討が進められている。鰐川・掘割地区では、地下水位低下工法が選定され、施工が実施されているが、その他多くの砂利の掘削跡地では液状化と建物、道路、下水道の被害状況とのメカニズムが明らかでなかった。

そこで、本論文では神栖市の砂利の掘削跡地の深芝・平泉地区を取り上げ、建物、道路、下水道と液状化被害の関係を分析して、今後の液状化対策に役立てることを目的として検討を行った結果について言及する。

Key Words : earthquake, liquefaction, groundwater level, mined areas

1. はじめに

神栖市では東日本大震災により図-1 及び図-2 に示すように広い範囲で液状化が発生し、多くの家屋や上下水道のライフラインや道路等が甚大な被害を受けた。神栖市で被災した家屋は全壊 171 棟、大規模半壊 658 棟、半壊 1,293 棟、一部損壊 3,668 棟で、合計 5,790 棟に及んだ。このうち液状化による被災件数は全壊 134 棟、大規模半壊 442 棟、半壊 620 棟、一部損壊 586 棟で、合計 1,782 棟となっている。国土交通省の調べによると、東日本大震災で液状化によって被害を受けた棟数が多い都市のうち4番目である。また、川の埋立地や砂利の掘削跡地など種々の地盤で液状化が発生した。

東日本大震災の8か月後に創設された「市街地液状化対策事業」によって、地震の翌年から詳細な調査や液状化対策工法の検討²⁾が進められている。鰐川・掘割地区では、地下水位低下工法が選定され、施工が実施されている。しかし、その他多くの砂利の掘削跡地では液状化と建物、道路、下水道の被害状況とのメカニズムが明らかでなかった。

そこで、本論文では神栖市の砂利の掘削跡地の深芝・平泉地区を取り上げ、建物、道路、下水道と液状化被害の関係を分析して、今後の液状化対策に役立てることを目的として検討を行った結果を、以下に述べる。

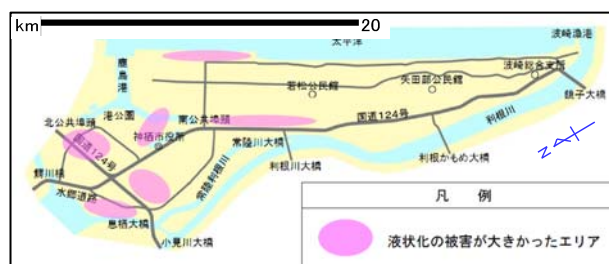


図-1 神栖市内で液状化の被害が大きかったエリア¹⁾

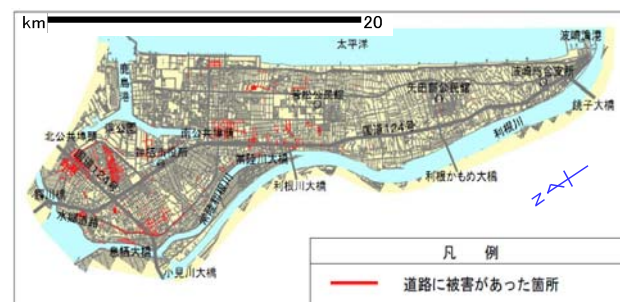


図-2 神栖市内で被災した道路¹⁾

2. 神栖市深芝・平泉地区の被害状況

(1) 神栖市の被害状況

復旧・復興にあたってまだ詳細な調査が続いている段階であるが、これまでに分かってきた被害および地盤の状況について述べる。

a) 地形と土地の変遷

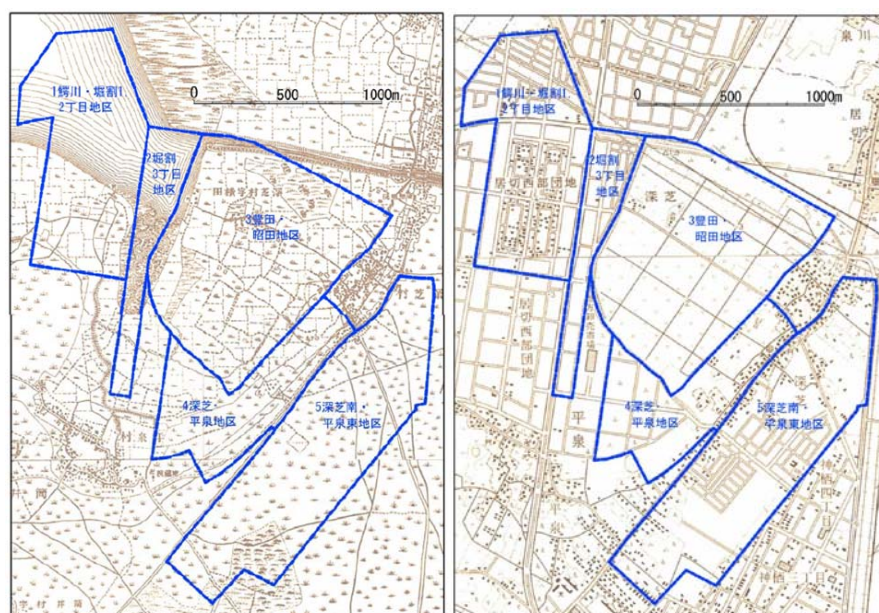
図-3の土地条件図に示すように神栖市の北東側は太平洋に面し、南西側は北浦から流れが続き鰯川・外浪逆浦・常陸利根川、および利根川本流に面している。この間に砂丘と低地が形成されている。図-4に市内の北西部地区における明治18年と昭和59年の地形図を比較して示す。鎌田・池尻ら³⁴⁾は図-5に示すようにが現地形図で砂州・砂堆のよく締まった地盤であり、迅速測図でも一帯が松林で周辺と比べて大きな違いはなく、両地形図から

管路被害集中地域になる要因を見つけるのは難しいと言及している。1960年から鹿島コンビナートが開発され、そのために掘込み式の人工港が造られ、その土砂で鰯川の一部などが埋め立てられた。また市の中央部には広大な神之池があったがこれも鹿島開発のためかなりの広さで埋め立てられた。西側の川沿いでの一部も埋め立てられた。さらに、砂丘の砂利を採取し、その跡を埋め戻すことが各地で行われてきた。現在でも写真-1に示すように採取が行われている。その深さは各地で異なるが最大で15m程度まで掘削されている。

このように、種々の理由で人工に埋め立てたり埋め戻した地区が神栖市内の各地に点在しており、それらが東日本大震災で液状化し、住宅やライフライン・道路などに甚大な被害を与えた。鹿島コンビナートの一部には神

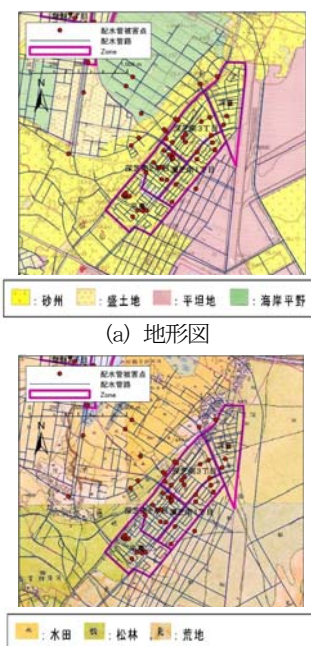


図-3 神栖市の北西部の土地条件図



(1) 明治18年の地形図（国土地理院による） (2) 昭和59年の地形図（国土地理院による）

図-4 北西部地区における明治18年と昭和59年の地形図の比較



(a) 地形図

(b) 迅速測図

図-5 深芝地域の管路被害と地形図との関係

之池を埋め立てた地区もあり、そこでは産業施設も液状化によって被害を受けた。また、隣接する鹿嶋市に位置する鰯川浄水場も液状化によって共同溝が浮き上がるなどの被害を受けた。



写真-1 砂利採取工事

b) 液状化発生地点と被害の概要

液状化発生箇所は上記の地盤の形成過程で分類すると下記ようになる。

- ①川の埋立地：鰯川，掘割，太田宝山
- ②砂利の掘削跡地：豊田・昭田，深芝・平泉，下幡木，賀，浪逆，筒井大沼，息栖原，大野原，横瀬，太田新町
- ③池の埋立地：東深芝
- ④砂丘間低地：知手

(2) 深芝・平泉地区

深芝・平泉地区は標高 5m 程度と微高地にあたる。過去に砂利採掘が随所で行われ、その後に区画整理が行われて道路と宅地が造られた。したがって、豊田・昭田地区と異なり、宅地に加えて道路部にも掘削跡地が点在している。この掘削跡地が地震時に液状化に伴って大きく沈下し、写真-2 及び写真-3 に示すように周囲の原地盤との間で段差が発生した。見かけ上、陥没が起きたようになり、この沈下量は 20～50cm 程度である。住民の方のアンケート⁵⁾によると噴水が発生したのは、本震時 31%，余震時 20%，噴水なし 49%となっており、他地区に比べて余震で発生したと答えた方の割合が多い。

図-6にこの地区を南北に通る断面図を示す。採掘跡地不規則に分布し、その深さもまちまちである。地表面の標高が高いこともあり、地下水位はGL-2～3m程度と他

地区に比べて深い。原地盤は締まった砂層のため、採掘跡の埋戻し部で地下水位以下だけが液状化したものと考えられる。したがって、液状化した深度はGL-2m～GL-10m程度と考えられる。そして、地下水位がGL-3m程度と深い場合には、地下水位以下で液状化が発生しても

噴水が地表面まで生じ難かったので、噴水なしとの回答が多かったのではないかと考えられる。ただし、この回答の中には掘削跡地でなく液状化が発生しなかった箇所での回答も含まれているであろう。



写真-2 砂利採取跡地縁で発生した段差



写真-3 砂利採掘跡地縁の段差が発生したために傾いた家屋

住宅の被害状況で多いのは半壊～大規模半壊であり、上述した他地区ほどは被害がひどくなかった。この中には写真-3に示すように掘削跡地の境界上に建っていて、家屋が地盤にめり込み沈下したというよりは、段差の発生によって傾いたのではないかと考えられる被害もあった。したがって、この地区では図-7(1)～(3)に示す3つのパターンがあったのではないかと考えられる。まず、掘削地内に家屋が建っている場合、地下水位が浅いと図-8のように家屋のめり込み沈下と地盤の圧縮沈下が発生したのに対し、地下水位が深い場合には図-7(1)に示すように地盤の圧縮沈下のみが発生したと考えられる。当然、

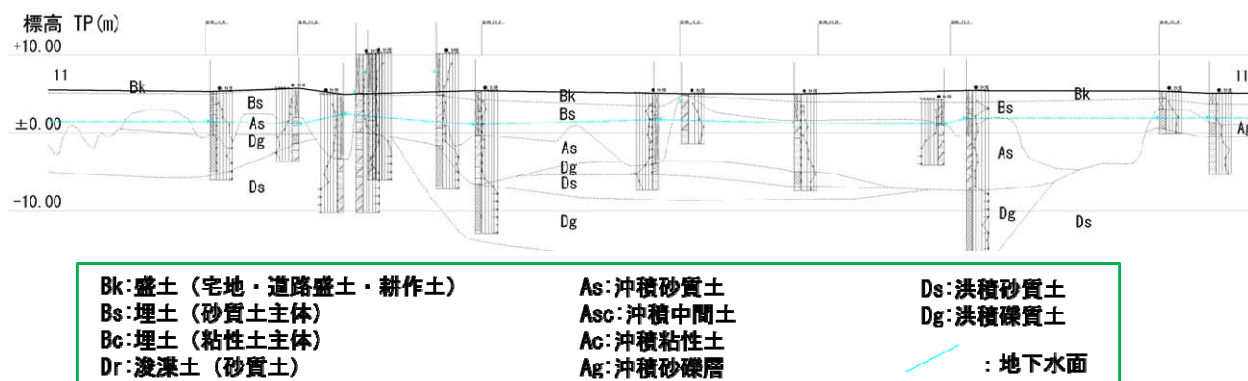
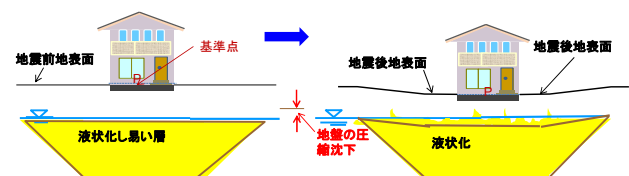


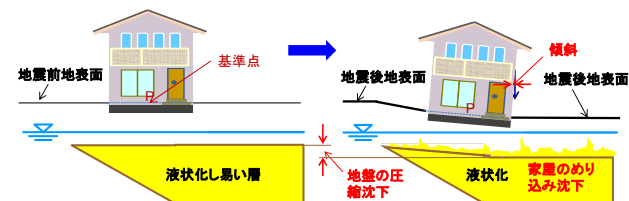
図-6 深芝・平泉地区の南北測線に沿った地質断面図⁵⁾

後者では被害は軽かったはずである。

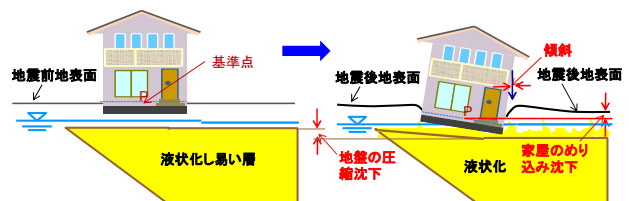
一方、丁度掘削地の境界や掘削深度が異なる場所に家屋が建っていた場合は、地下水位がGL-3m程度と深くても地盤の圧縮によって地表面に段差が生じて家屋が傾き（図-7(2)）、地下水位が浅い場合にはめり込み沈下と段差によって大きく傾いた（図-7(3)）のではないかと考えられる。



(1) 掘削跡地内に家屋が建っていて地下水位が深い場合



(2) 掘削跡地境界に家屋が建っていて地下水位が深い場合



(3) 掘削跡地境界に家屋が建っていて地下水位が浅い場合

図-7 深芝・平泉地区における異なった種類の家屋被害の模式図⁹⁾

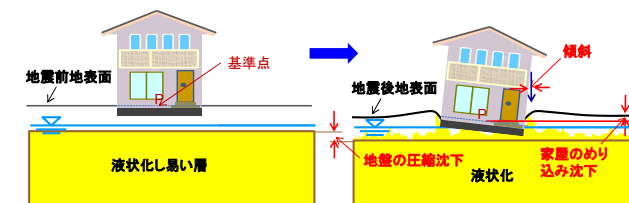


図-8 鰐川、掘削地区の家屋被害の模式図⁹⁾

3. 道路被害と建物被害の相関

(1) 道路被害と建物被害の関係

図-9 は、震災直後に行った道路の縦断測量結果から道路縦断の変化が著しい段差等の被害箇所と罹災判定結果を重ねた図で、両者の被害箇所が一致している。写真-4 の航空写真に点在する採掘跡地とも相関が見られる。

(2) 沈下量との道路被害の関係

図-10 は、地震前後の航空写真の差分から求めた沈下量と震災直後に行った道路の縦断測量結果から、道路縦断の変化が著しい段差等の被害箇所と罹災判定結果を重ねた図である。採掘跡地の際に顕著な道路被害が多い相関が見られる。

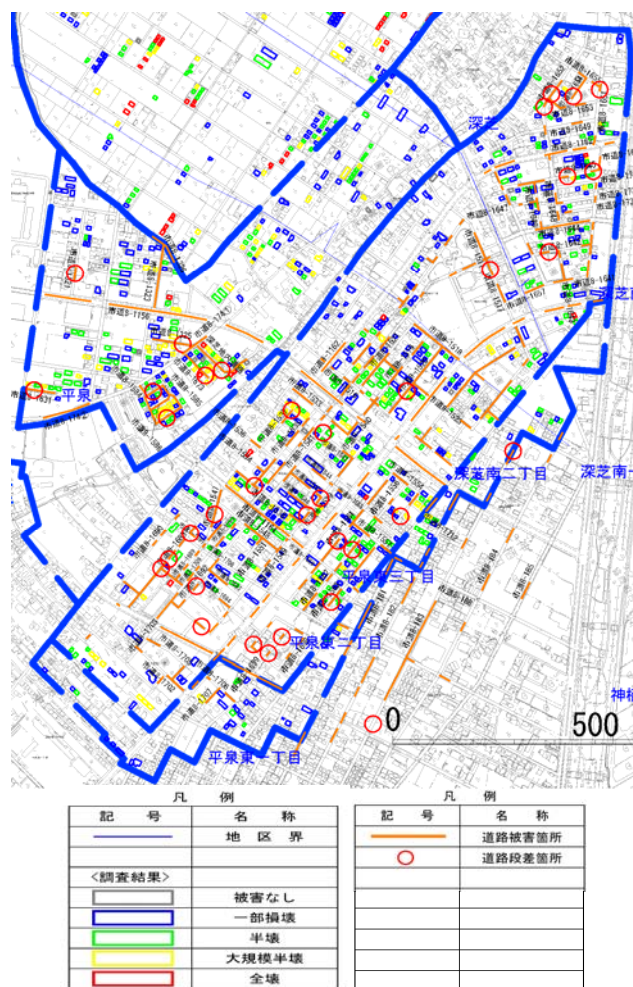


図-9 道路被害と建物被害の重ね図



(1)1975年

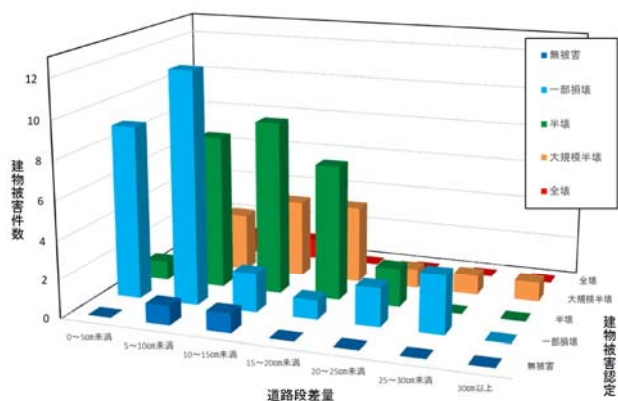
(2)1979年



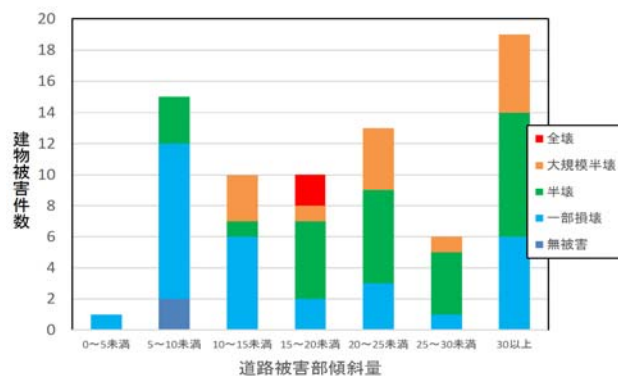
(3)1984年

(4)2012年

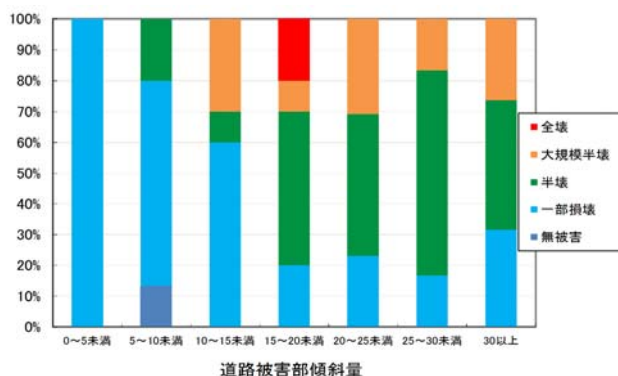
写真-4 地震前の航空写真履歴



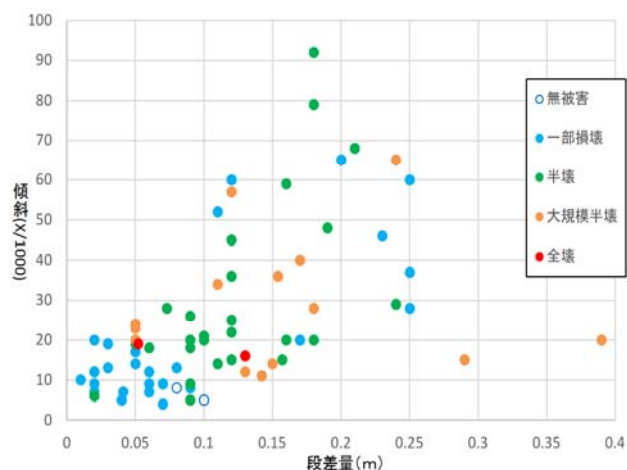
(3) 道路被害(段差量)と建物被害の3次元表示



(1)道路被害(傾斜量)と建物被害の件数



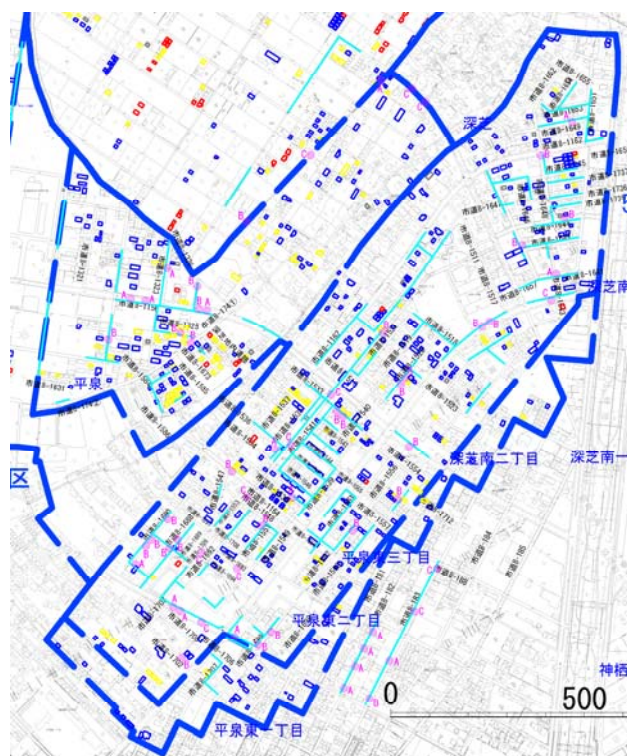
(2)道路被害(傾斜量)と建物被害の割合



4. 下水道被害と建物被害の相関

(1) 震災後の下水道測量結果と建物被害箇所の関係

図-15は、震災直後に行った下水道管内のカメラによる被害調査結果から、下水道被害が著しい箇所と罹災判定結果を重ねた図である。図-10に示した航空写真内に点在する採掘跡地との相関が見られる。



凡 例		凡 例	
記 号	名 称	記 号	名 称
	下水道被害箇所		地 区 界
	下水道被害 (A.B.Cランク)	<調査結果>	
			被害なし
			一部損壊
			半壊
			大規模半壊
			全壊

図-15 下水道被害箇所と建物被害箇所

マンホールは地表面と一緒に沈下したと仮定し、地震前後のマンホール高の測定結果の差分から図-17のように地盤沈下量を推定し標高コンター図を作成した。さらに震災直後に行った下水道の被害調査結果から、下水道被害箇所と罹災判定結果も重ねて示した。採掘跡地の際に顕著な下水道被害が多い相関が見られる。

a) 下水道被害箇所と建物被害の関係

さらに顕著な下水道被害箇所をピンク色●で示した。その結果、ピンク色●箇所は液状化に伴う下水道管の破損等の下水道被害箇所が採掘跡地との境界付近に生じていることが分かった。

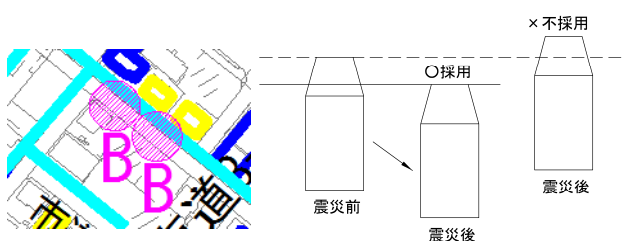
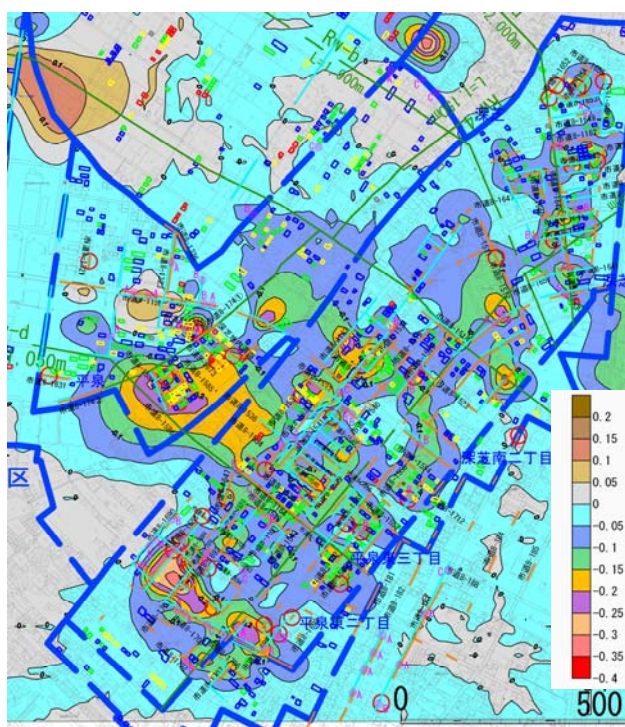


図-16 下水道被害検討の手順



凡 例		凡 例	
記 号	名 称	記 号	名 称
	下水道被害箇所		地 区 界
	下水道被害 (A, B, Cランク)	＜調査結果＞	
			被害なし
			一部損壊
			半壊
			大規模半壊
			全壊

図-17 沈下量と下水道被害・建物被害の重ね図

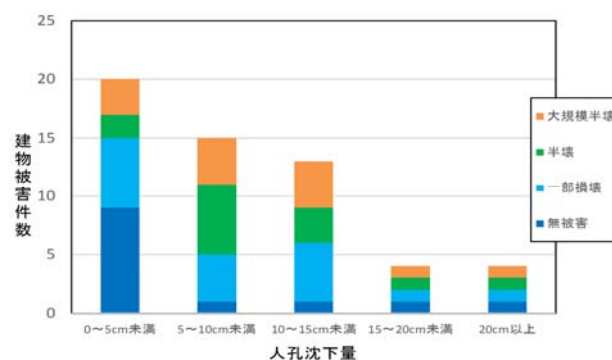
図-18 はこのピンク色●箇所(道路被害箇所、直近)に含まれる建物を被災判定別に集計した下水道被害程度(沈下量)と建物被害の関係である。このグラフから半壊以上の建物被害の割合は沈下量が 5cm 以上から大きくなっていることが分かる。

次に図-17のように神戸市が行った地震後の下水道マンホールの測量計測から作成した標高コンター図から算出したピンク色●箇所(道路被害箇所、直近)に含まれる建物被害と下水道被害から求めた傾斜量と建物被害割合の関係を示す。このグラフから半壊以上の建物被害割合は下水道高さから求めた傾斜量が多いほど多い傾向があることが分かる。

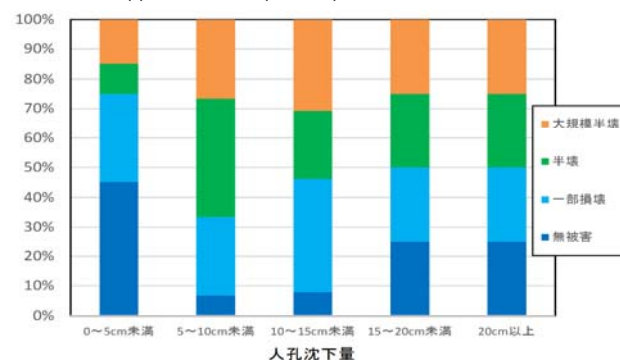
ただし、建物被害は 1/1,000 未満で半壊が 3 割、無被害・一部損壊が 7 割を占め、1/1,000 以上で傾斜量が多いほど被害程度が大きくなるが、道路被害のように傾斜量が大きくならなかった。

この原因としては、マンホールの高さから傾斜量を計測しているために、道路のように段差による急激な勾配ではなく緩やかな勾配となったためと考えられる。

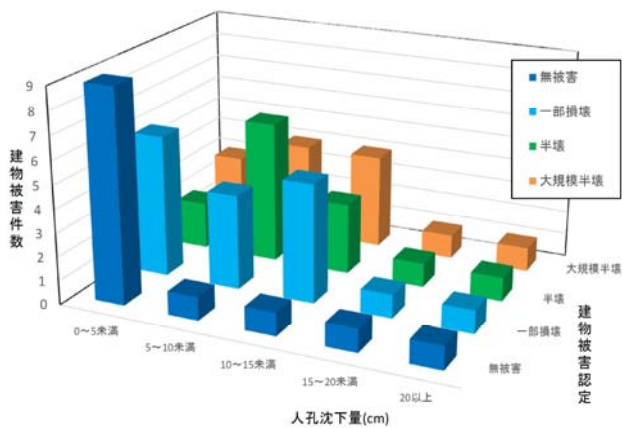
沈下量と傾斜量は図-24のように比例の関係にある。ただし、下水道被害はわずかな沈下量・傾斜量でも被害が多いが、建物被害は沈下量・傾斜量が大きいのほど被害程度も大きくなることが分かる。



(1) 下水道被害(沈下量)と建物被害の件数

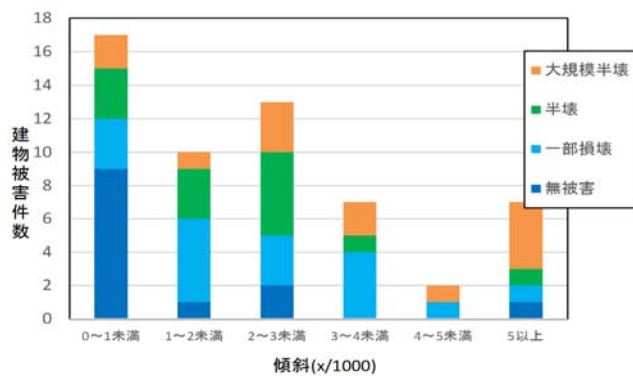


(2) 下水道被害(沈下量)と建物被害の割合

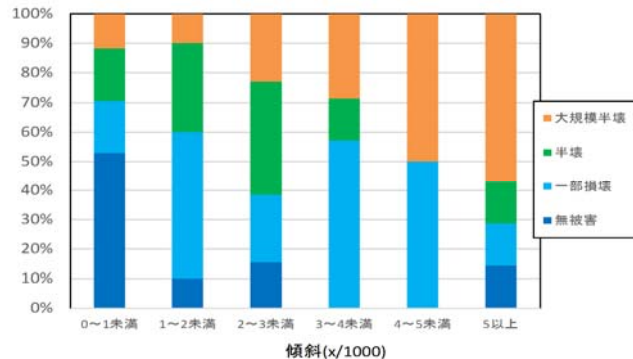


(3) 下水道被害(沈下量)と建物被害の3次元表示

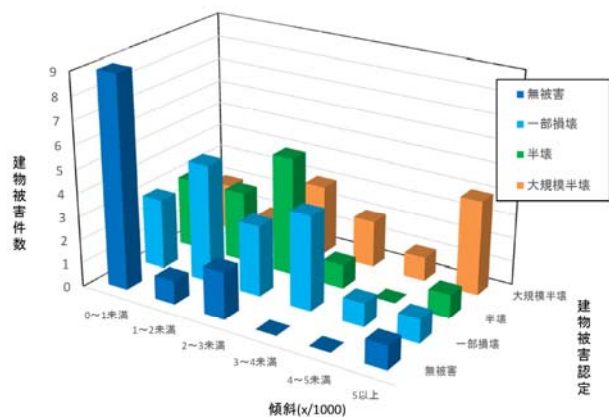
図-18 下水道被害(沈下量)と建物被害の関係



(1) 下水道被害(傾斜量)と建物被害の件数



(2) 下水道被害(傾斜量)と建物被害の割合



(3) 下水道被害(傾斜量)と建物被害の3次元表示

図-19 下水道被害(傾斜量)と建物被害の関係

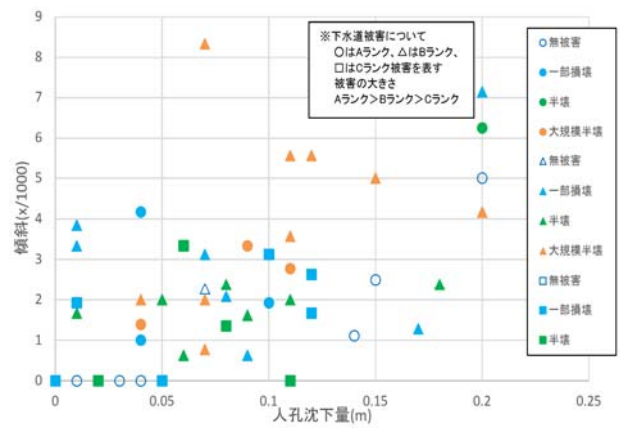


図-20 下水道被害(沈下量・傾斜量)と建物被害の関係

(4) 項目・ランク別による下水道被害分析

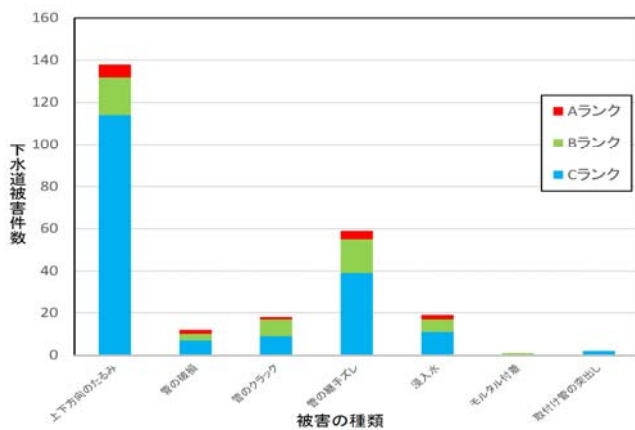
下水道被害を表-1に示すように、①上下方向のたわみ、②管のクラック、③管の継手ズレ、④注入水、⑤管の突出し、⑥モルタル付着と分け、被害程度をAランク、Bランク、Cランクに分けて示すと図-21のようになる。ただし、管の腐食がAランク23件あったが、地震による直接被害と考えられないため省略した。また油脂の付着と樹木根混入は件数うが無いために省略した。このグラフから下水道の被害件数は全体に上下方向のたわみと管の継手ズレが多く、Bランク以上の被害では管のクラック、管の破損、管の継手ズレ、侵入水の被害が多いことが分かる。

表-1 カメラ調査判定基準

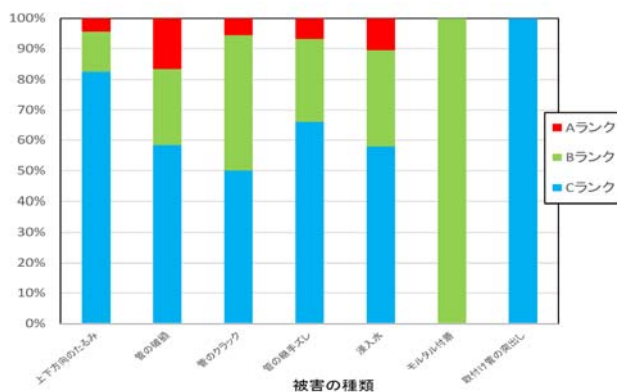
スパン全体で評価	項目	ランク		
		A	B	C
1) 管の腐食	鉄筋露出状態	鉄筋露出状態	骨材露出状態	表面が荒れた状態
	2) 上下方向のたわみ	管渠内径700mm未満 内径の1/2以上	管渠内径700mm以上1650mm未満 内径の1/4以上	管渠内径1650mm以上3000mm以下 内径の1/8未満
		内径の1/2以上	内径の1/4以上	内径の1/8未満
		内径の1/4以上	内径の1/8以上	内径の1/8未満

注) 管径の対象は内径の1/10から

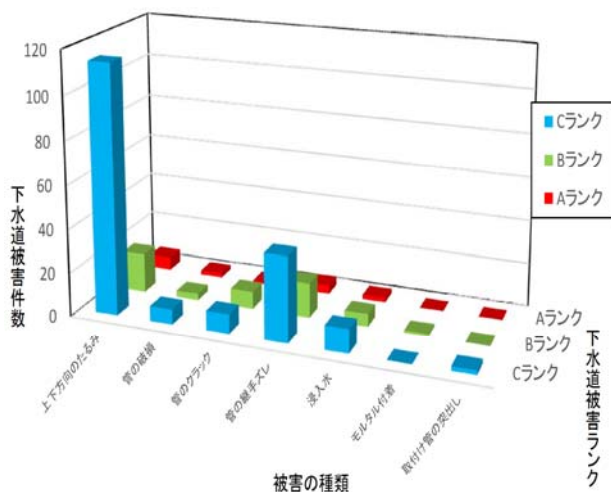
管一本ごとに評価	項目	ランク		
		a	b	c
3) 管の破損	鉄筋コンクリート管等	欠落 軸方向のクラックで幅5mm以上	軸方向のクラックで幅2mm以上	軸方向のクラックで幅2mm未満
	陶管	欠落 軸方向のクラックが管長の1/2以上	軸方向のクラックが管長の1/2未満	—
4) 管のクラック	鉄筋コンクリート管等	円周方向のクラックで幅5mm以上	円周方向のクラックで幅2mm以上	円周方向のクラックで幅2mm未満
	陶管	円周方向のクラックでその長さが円周の2/3以上	円周方向のクラックでその長さが円周の2/3未満	—
5) 管の継手ズレ		脱却	鉄筋コンクリート管等: 70mm以上 陶管: 50mm以上	鉄筋コンクリート管等: 70mm未満 陶管: 50mm未満
6) 浸入水		噴き出ている	流れている	にじんでいる
7) 取付け管の突出し 注2		本管内径の1/2以上	本管内径の1/10以上	本管内径の1/10未満
8) 油脂の付着 注2		内径の1/2以上閉塞	内径の1/2未満閉塞	—
9) 樹木根侵入 注2		内径の1/2以上閉塞	内径の1/2未満閉塞	—
10) モルタル付着 注2		内径の3割以上	内径の1割以上	内径の1割未満



(1) 下水道被害と建物被害の件数



(2) 下水道被害と建物被害の割合



(3) 項目・ランク別の下水道被害と建物被害の3次元表示

図-21 項目・ランク別の下水道被害と建物被害の関係

5. 地盤状況と建物被害の相関

(1) 震災後の地盤状況と建物被害箇所との関係

図-22 は、過去の航空写真を判読した結果採掘跡地と推定される地点である。これを参考にし、震災直後に行ったボーリング試験及び地表面探査解析図から作成した地質断面図に、家屋の罹災判定結果を重ねた図-23 を作成した。○は道路段差箇所を示している。分析は、無被害・軽微な被害箇所も入れて行っている。

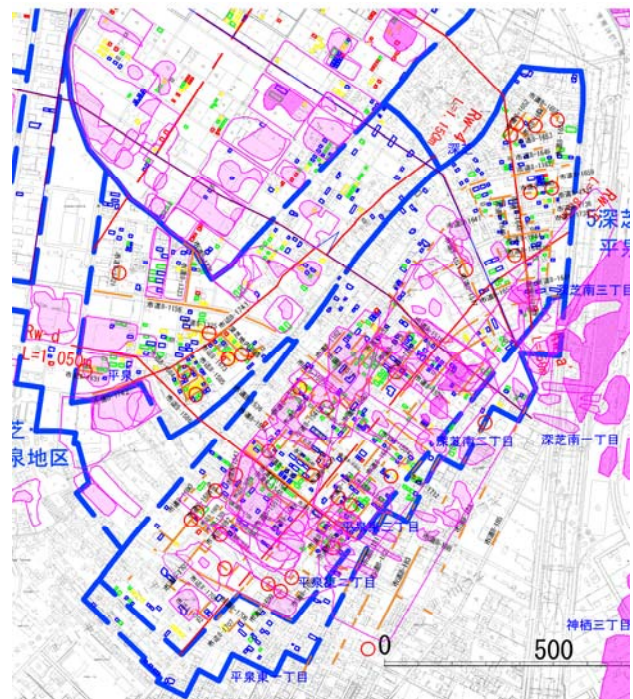


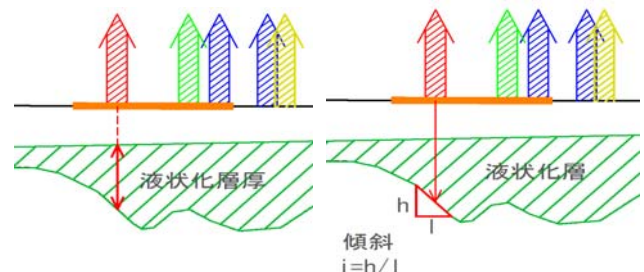
図-22 採掘跡地と検討断面位置

注1) ピンクハッチは航空写真判読による採掘跡地の池

注2) ピンクラインは航空写真判読による採掘跡地の造成地

(2) 地盤状況と建物被害の相関

a) 液状化層厚と建物被害の関係



(1) 液状化層厚 (2) 基盤層(液状化層下部)の傾斜量

①地盤状況から顕著な被害が確認できた箇所の宅地被害件数を被害程度別に集計

②地質断面図から液状化層厚、基盤層(液状化層下部)の傾斜量を算定

③道路の液状化層厚、基盤層(液状化層下部)の傾斜量別に建物被害件数を集計

④道路の液状化層厚、基盤層(液状化層下部)及び傾斜量と建物被害件数の相関を検討

図-24 地盤状況検討の手順

液状化層厚は図-24 のようにボーリング調査や地表面探査から作成した地質断面図に FL 計算により地下水位以下の液状化対象層を緑色で示した後、道路の段差を生じた赤○箇所の直下を計測した。建物被害は段差があつ

た赤○箇所のに最も近い建物を採用している。図-25 はこの赤丸(道路被害箇所、直近)に含まれる建物を被災判定別に集計した液状化層厚と建物被害の関係である。

このグラフから建物被害は液状化層厚 1 m 以下でも 3 割程度半壊があるが、建物被害割合は液状化層厚が 1 m 以上で大きくなり、液状化層厚が大きいほど建物被害程度の割合が大きくなっていることが分かる。

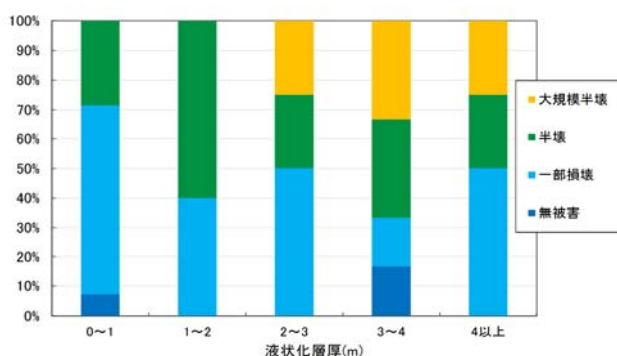
b) 基盤層の傾斜量と建物被害の関係

基盤層の傾斜量は図-24 のようにボーリング調査や地表面探査から作成した地層断面図に FL 計算により地下水位以下の液状化対象層を緑色で示した後、その液状化対象層の下端部（緑色下のラインの勾配）を計測した。建物被害は段差があった赤○箇所のに最も近い建物を採用している。図-26 はこの赤丸(道路被害箇所、直近)に含まれる建物を被災判定別に集計した基盤層の傾斜量と建物被害の関係である。

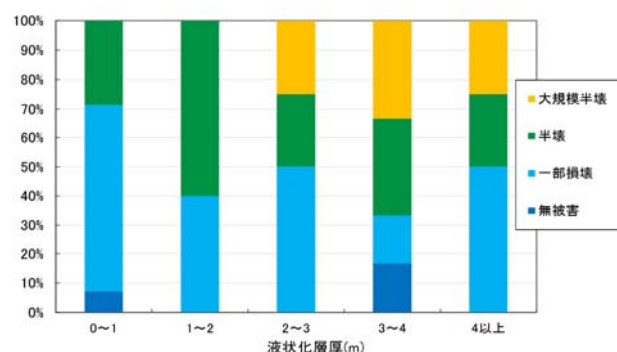
このグラフから基盤層の傾斜量は 10/1,000 未満の建物被害は半壊が 2 割程度であるが、基盤層の傾斜量が大きいほど建物被害程度の割合が大きくなっていることが分かる。

c) 液状化層厚及び基盤層(液状化層下部)の傾斜量と建物被害の関係

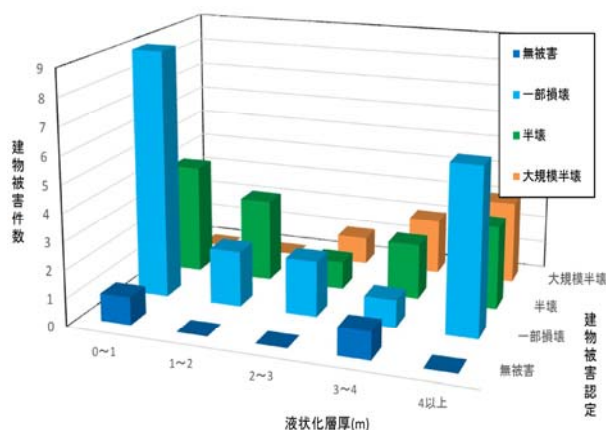
液状化層厚と基盤層(液状化層下部)の傾斜量は図-26 のように比例の関係にある。建物被害は液状化層厚と基盤層の傾斜量が小さくても被害が大きいものがあるが、全体的に基盤層の傾斜量が大きいほど建物被害が大きい傾向があり、液状化層厚よりも傾斜量の影響を受けていることが分かる。



(1)液状化層厚と建物被害の件数

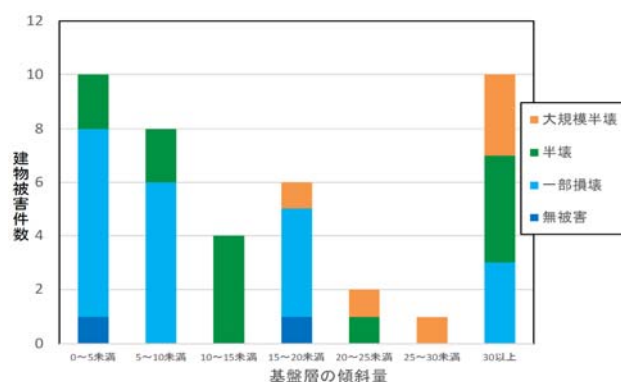


(2)液状化層厚と建物被害の割合

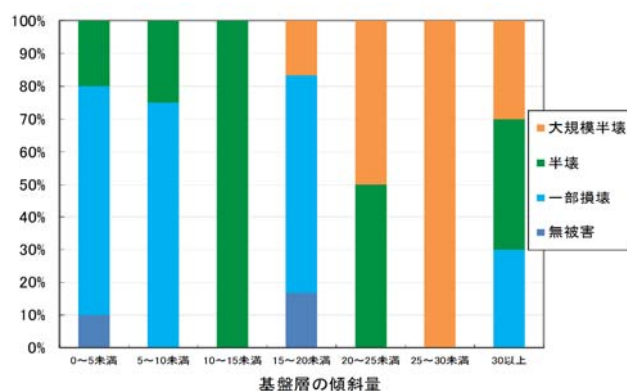


(3)液状化層厚と建物被害の3次元表示

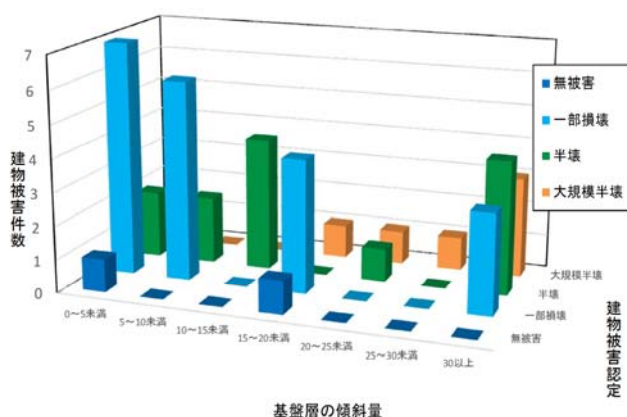
図-25 液状化層厚と建物被害の関係



(1)基盤層の傾斜量と建物被害の件数



(2)基盤層の傾斜量と建物被害の割合



(3)基盤層の傾斜量と建物被害の3次元表示

図-26 基盤層の傾斜量と建物被害の関係

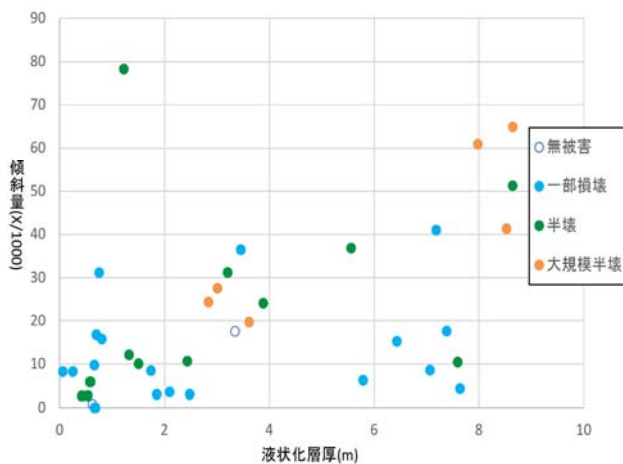


図-27 液状化層厚及び基盤層(液状化層下部)の傾斜量と建物被害の関係

6. まとめ

これまでの検討結果から、以下のようなことが明らかとなった。

(1) 道路被害(段差量・傾斜量)と建物被害の相関

道路被害は採掘跡地内で発生し、特に採掘跡地との境界付近で液状化に伴う沈下の違いによる段差による被害が顕著である。建物被害は、段差量が 5cm 以上、道路傾斜量が 10/1,000 以上で段差量・傾斜量が大きいほど半壊以上の建物被害を生じている。

(2) 下水道被害(沈下量・傾斜量)と建物被害の相関

下水道被害は特に採掘跡地との境界付近で液状化に伴う沈下の違いによる上下方向のたわみと管の継手ズレが

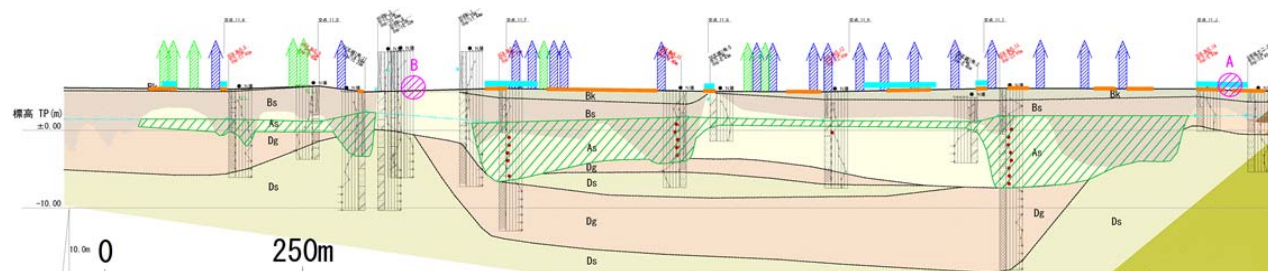
多く、B ランク以上の被害率は管のクラック、管の破損、管の継手ズレ、侵入水の被害が多い。建物被害は、沈下量が 5cm 以上で段差量・傾斜量が大きいほど半壊以上の建物被害を生じている。

(3) 地盤状況(基盤層の液状化層厚、傾斜量)と建物被害の相関

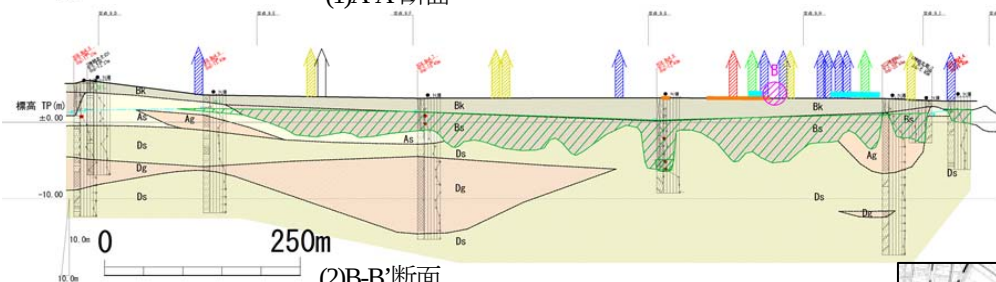
建物被害は液状化層厚 1 m 以上、基盤の傾斜量 10/1,000 以上で半壊以上の被害程度が大きく、液状化層厚が大きいほど建物被害程度の割合が大きくなっている。

参考文献

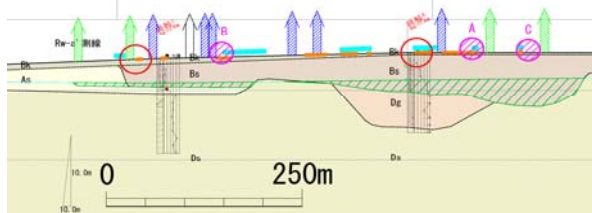
- 1) 神戸市：神戸市震災復興計画，2011.
- 2) 橋本隆雄：神戸市地下水位低下液状化対策工法の実験について，GeoKanto，地盤工学会関東支部，OS-6, 2013.
- 3) 神戸市：神戸市液状化対策検討委員会資料
- 4) 楢田泰子，池尻大介：鹿島地域の液状化による管路被害集中地域と地形変遷，日本地震工学会論文集，第 12 巻，第 4 号（特集号），2012
- 5) 神戸大学 水道地震対策研究会：報告書 東日本大震災に対する水道被害調査と給水・復旧支援の実際～神戸大学と兵庫県南部水道事業体による知見集積～，pp.23-24，2013.
- 6) 地盤工学会関東支部造成宅地の耐震対策に関する研究委員会：造成宅地の耐震対策に関する研究委員会報告書－液状化から戸建て住宅を守るための手引書－，pp.3-4，2013.



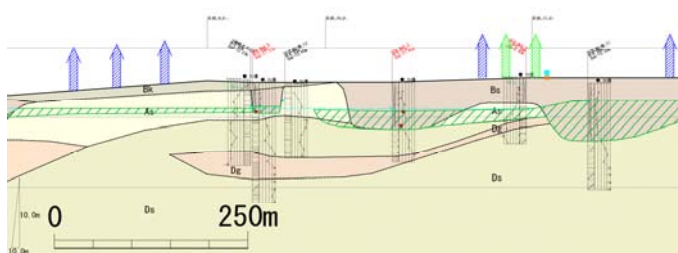
(1)A-A'断面



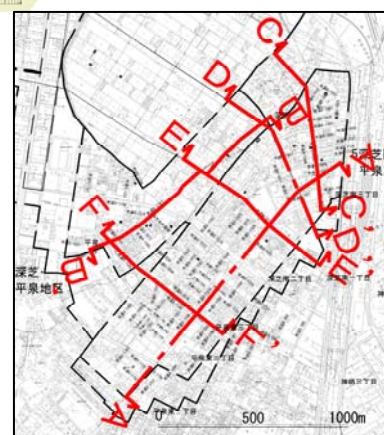
(2)B-B'断面



(3)C-C'断面



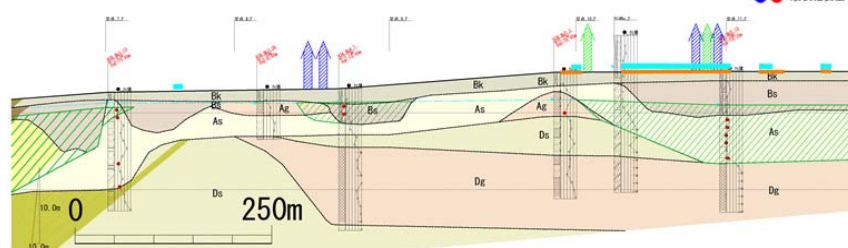
(4)D-D'断面



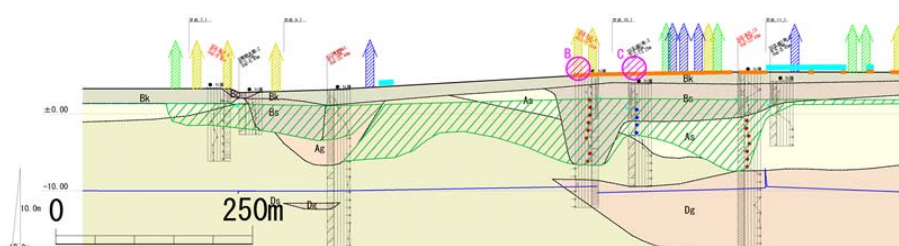
家屋調査凡例	
	被害認定無
	一部損壊
	半壊
	全壊
	大規模半壊

凡 例	
記 号	名 称
	道路被害箇所
	道路経断の乱れ箇所
	下水道被害
	下水道被害ランク

● 液状化安全率(F1) ≤ 1.0



(5)E-E'断面



(6)F-F'断面

Bk	盛土 (宅地・道路盛土, 耕作土)
Bs	埋土 (砂質土主体)
Bc	埋土 (粘性土主体)
Dr	浚渫土 (砂質土)
As	沖積砂質土 (砂州・砂堆)
Asc	沖積中間土
Ac	沖積粘性土 (湖沼堆積物)
Ag	沖積砂礫層
Ds	洪積砂質土
Dg	洪積礫質土

図-22 地質断面図

ANAYSIS ON LIQUEFACTION DAMAGES OF HOUSES, SEWER PIPES AND ROADS DISTRIBUTED IN MINED AREAS AT FUKASHIBA AND HIRAIZUMI IN KAMISU CITY IN THE 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE

Takao HASHIMOTO, Susumu YASUDA and Gaku SHOJI

Damages of houses, sewer buried pipes, and roads subjected to severe liquefaction, which are distributed in mined areas at Fukushima and Hiraizumi in Kamisu city, were clarified by analyzing the associated statistics. Road damages are related with differences in ground level which occur in the boundary between mined area and non-mined area. These differences might cause the partially damages of houses and the damages of sewer buried pipes such as vertical deformation or gaps at joints of pipes. It was also found that the deeper liquefaction layer causes the severer damage of houses.