

東北地方太平洋沖地震における宅地の液状化被害可能性の簡易判定手法の検証

橋本 隆雄¹・宗川 清²・明石 達生³・大橋 征幹⁴

¹正会員 千代田コンサルタント事業統括部防災対策室長 (〒114-0024東京都北区西ヶ原3-57-5)
E-mail: t-hashimoto@chiyoda-ec.co.jp

²非会員 千代田コンサルタント社会システム部地盤防災室課長 (〒114-0024東京都北区西ヶ原3-57-5)
E-mail: v-sokawa@chiyoda-ec.co.jp

³非会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所都市研究部都市計画研究室室長
(〒305-0802 茨城県つくば市立原1)
E-mail: akashi-t2fw@nilim.go.jp

⁴非会員 国土交通省 国土技術政策総合研究所都市研究部都市計画研究室主任研究官
(〒305-0802 茨城県つくば市立原1)
E-mail: ohashi-m92j7@nilim.go.jp

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、関東地方の埋立地や旧河道の地域で液状化現象が発生し、戸建て住宅やライフライン施設等が甚大な被害を受けた。その後、国土交通省では、宅地の液状化被害可能性について判定法を取りまとめ、2013年2月に「宅地の液状化被害可能性判定に係る技術指針(案)」が提示された。しかし、その適用に当たって、地震前のボーリング調査結果以外に地震後の結果を使用しているため、十分な検証となっていない。そこで本論文では、東北地方太平洋沖地震で液状化による戸建て住宅の被害のあった地区の中から、地震前のボーリング調査結果と直上の建物被害程度が明確な5地区を選定し、国土交通省の指針に基づいた複数の指標を組み合わせる液状化被害可能性の簡易判定手法の検証及び今後の地震動が異なる場合の検討を行った。

Key Words : 2011-Tohoku (Northeast) Earthquake, Housing site, earthquake damage, Liquefaction

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、関東地方の埋立地や旧河道の地域で液状化現象が発生し、戸建て住宅やライフライン施設等が甚大な被害を受けた。被災した住宅の復旧や再液状化の抑制とともに、液状化に伴う噴砂による道路交通障害や土砂流入による下水道復旧の長期化などは、地震発生後の都市機能を保全し速やかな復旧・復興を図る上で大きな社会問題となっている。これまで液状化の予測手法は、建築基礎構造設計指針¹⁾、道路橋示方書²⁾、に示されているものの、戸建て住宅の宅地への適用性については言及されておらず、宅地の液状化被害の程度を定量的に判断できる手法とまでは至っていなかった。その後、国土交通省では、「H24年度宅地の液状化対策の推進に関する研究会」を開催し、検討成果として複数の指標による判定図を用い、宅地の液状化被害可能性についてランク付けを行う判定

法を取りまとめ、2013年4月に「宅地の液状化被害可能性判定に係る技術指針」³⁾(以下、技術指針という。)が通知された。また、佐藤・西丸^{4), 5)}らは、道路橋示方書に基づき東日本大震災の被害実態と既存の液状化被害程度の判定手法を用いた判定結果とを比較し、既存判定手法の課題を修正した新たな液状化被害可能性の簡易判定手法の提案を行っている。しかし、その適用に当たって、地震前のボーリング調査結果以外に地震後の結果を使用しているため、十分な検証となっていない。

そこで本論文では、東北地方太平洋沖地震で液状化による戸建て住宅の被害のあった地区の中から、地震前のボーリング調査結果と直上の建物被害程度が明確な5地区を選定し、建築基礎構造設計指針に基づき技術指針に基づいた複数の指標を組み合わせる液状化被害可能性の簡易判定手法の検証及び今後の地震動が異なる場合の検討を行った。

2. 検討内容

2.1 検討地区の選定

検討地区は、東北地方太平洋沖地震で液状化による戸建て住宅の被害のあった地区の中から、地震前のボーリング調査結果等から解析断面を設定し各地点の地下水位、地震動、土質種別、N 値、湿潤密度、細粒分含有量等のデータを収集し、かつ直上の建物被害の罹災証明を入手し、被害程度（全壊・大規模半壊・半壊・一部損壊・無被害）を分類することができた地区を選定した。罹災証明は、表-1 に示すように内閣府の東日本大震災の液状化被害に対応して発せられた「地盤に係る住家被害認定の調査・判定方法」（平成 25 年 5 月 2 日）⁶⁾と「災害に係る住家の被害認定基準運用指針」（平成 25 年 6 月）⁷⁾の改定基準が地震直後に issuance、その基準に沿って調査したものである。その結果、図-1 及び表-2 に示すように内陸部の①我孫子市布佐東部地区、②潮来市日の出地区、③神栖市掘割地区、臨海部の④千葉市磯辺美浜地区、⑤習志野市香澄地区の計 5 地区となった。ただし、地震前のボーリング調査で室内試験値があるものは、非常に少なく、この場合は、地震後に実施した室内土質試験値を用いて検討した。①潮来市日の出地区については、地震前のデータが建物被害の罹災証明が一部損壊・無被害しかなかった。



図-1 検討地区の選定箇所⁸⁾

表-1 基礎と柱が一体的に傾く不同沈下の場合の判定

判定	四隅の柱の傾斜の平均	潜り込み量
半 壊	1/100以上, 1/60未満	基礎の天端下 25cmまで
大規模半壊	1/60以上, 1/20未満	床まで
全 壊	1/20以上	床上1mまで

表-2 各地区における地震前ボーリング箇所の建物被害（罹災証明）の内訳：箇所

宅地被害地区	地震前の ボーリング	全壊	大規模半壊	半壊	一部損壊	被害なし
潮来市日の出地区	14	—	—	—	6	8
神栖市掘割地区	10	—	3	4	2	1
我孫子市布佐東部地区	23	3	3	—	6	11
千葉市美浜区磯辺地区	11	—	2	1	4	4
習志野市香澄地区	4	1	1	1	—	1
合計	62	4	9	6	18	25

2.2 各地区の被害状況

選定した5市の地質調査及び地盤の被害状況調査等のデータ収集及び液状化による地盤被害と建物被害の相関関係等の分析を行った。

(1) 我孫子市布佐東部地区

a) 位置図

千葉県我孫子市は、東北地方太平洋沖地震によって市内の住宅約400棟が液状化被害を受けた地域で、その中の約8割の住宅被害が集中した図-2に示す布佐東部地区を調査の対象とした。この地区は、JR成田線「布佐駅」の東約0.7km付近に位置して利根川に隣接しており、地形条件は利根川下流低地に該当する。



図-2 我孫子市布佐東部地区の位置図⁹⁾

b) 被害状況

我孫子市の建物被害は、図-3に示すように罹災証明によると全壊：134件(113件)，大規模半壊：3件(1件)，半壊：90件(42件)，一部損壊：647件(199件)となり、一部損壊以上の被害認定を受けた建物が約870件に及び、このうち全壊が134件あった¹⁰⁾が、その84%に相当する113件が図-2に示す布佐地区にあった。また、主要道路は2箇所所で通行止めとなり、多数の停電・断水に加えて下水管と農業排水路・樋管の被害も生じた¹¹⁾。写真-1は、我孫子市布佐東部地区で発生した液状化が生じた道路及び建物の沈下状況である。

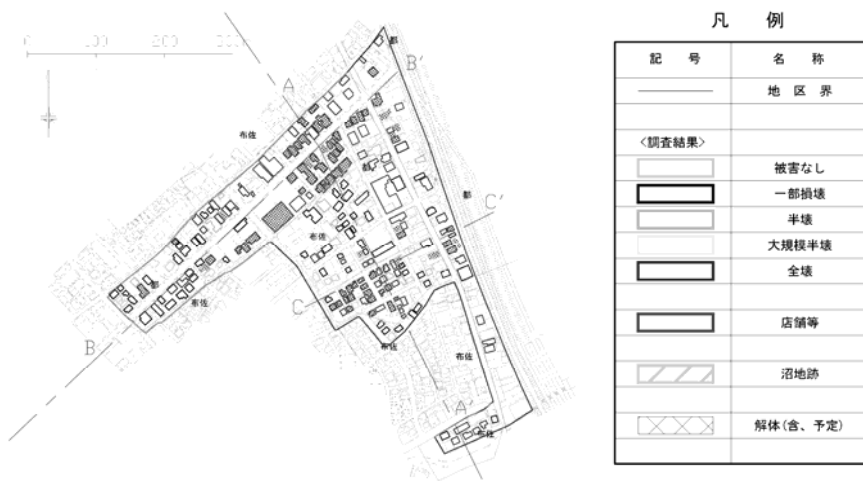


図-3 建物の被害状況¹⁰⁾



(a) 幹線道路の沈下



(b) 建物のめり込み沈下

写真-1 液状化が生じた道路及び建物の沈下状況

c) 布佐東部地区の地形・地盤条件と被害発生状況との関係

同地区における地震前の地盤調査結果の一例を図-4に示す¹⁰⁾ この例では軟弱なシルト層の上に、砂質埋土層が4.5m程度堆積しており、地下水位は地表面から1m程度の位置にある。文献¹²⁾によれば以下のような経緯で埋め立て工事が行われていることから、前述した埋土層はその際に形成されたものと考えられる。

① 1870年の洪水で利根川の堤防が80m以上も決壊し、

当時の布佐村一体で30数棟の家屋が流出した。水が引いた後も5ha以上の沼地が残り、「切所沼」と呼ばれるようになった。

② 1952年から利根川改修工事が開始され、発生した浚渫土砂をポンプで圧送することにより切所沼が埋め立てられた。

1928年の測量結果に基づく地形図を図-5に示す¹³⁾。

沼地は3箇所に点在し、北側に位置するもののほど規模が大きかった。震前後の航空レーザ測量結果に基づく数値標高モデルの差分として算出した沈下量の分布を図-6に示す¹⁰⁾。3箇所の沼地跡とその周辺で比較的大きな沈下が生じたことがわかる。

ただし、地震前の測量は2006年に実施されており、その後も継続して生じていた長期的な圧密沈下挙動の影響が、図-6に示したデータには含まれていることに留意する必要がある。

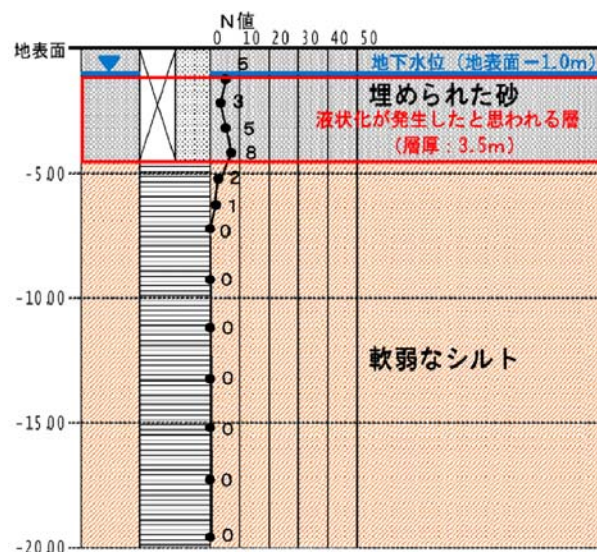


図-4 地震前の地盤調査結果¹⁰⁾

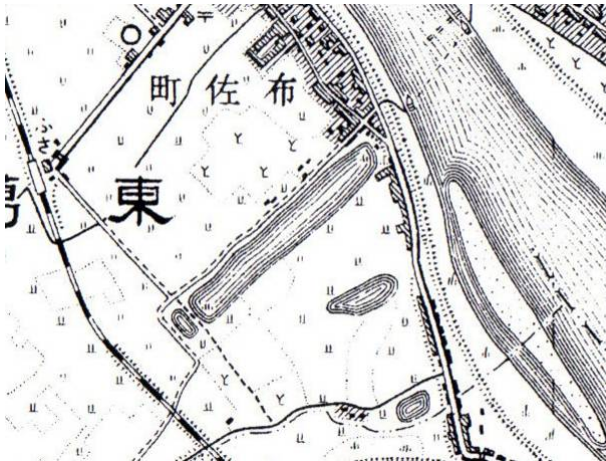


図-5 1928年に測量した布佐東部地区の地形図¹³⁾

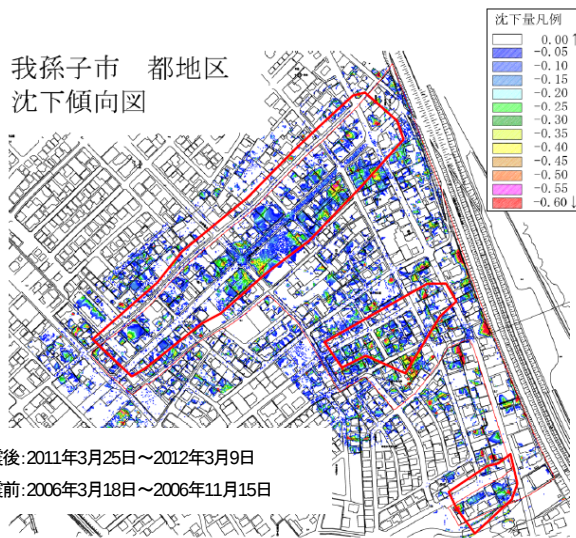


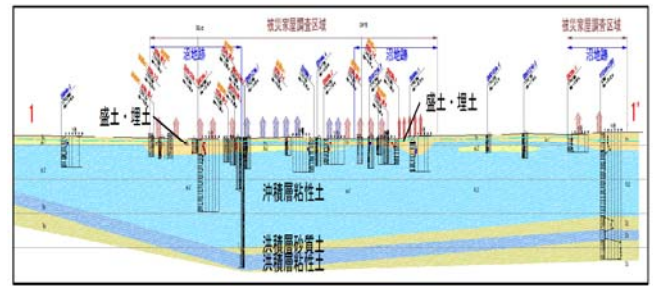
図-6 布佐東部地区における沈下量の分布¹⁴⁾

d) 地質状況

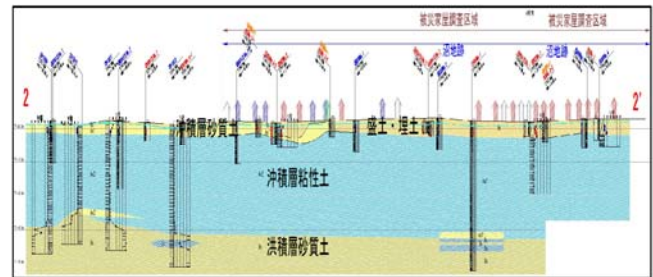
布佐東部地区の地質状況は、図-7に示すように地下水位が地表面から0.5m程度に分布するN値5以下の埋土層(砂主体)が地表面から5m程度分布し、これが液状化被害をもたらしたものと推定され、その下に粘性土が15m程度堆積している状況である。



(a)平面図



(b)1-1'断面図



(c)2-2'断面図

図-7 我孫子市布佐東部地区の地質平面・断面図¹⁴⁾

(2) 潮来市日の出地区

a) 位置図

茨城県潮来市は、東北地方太平洋沖地震によって市内の住宅約5千棟が被害を受けた地域で、その中で最も被害が顕著であった図-8に示す日の出地区を調査の対象とした。



図-8 潮来市日の出地区の位置図⁹⁾

b) 被害状況

潮来市の建物被害は、図-9に示すように罹災証明によると日の出地区の被害状況の内、一部損壊の建物が大多数を占め、その中に半壊の建物が点在し、大規模半壊、全壊の建物は少ない状況である。写真-2は、潮来市日の出地区で発生した液状化が生じた宅地の噴砂及び歩道部のライフラインの浮上状況である。

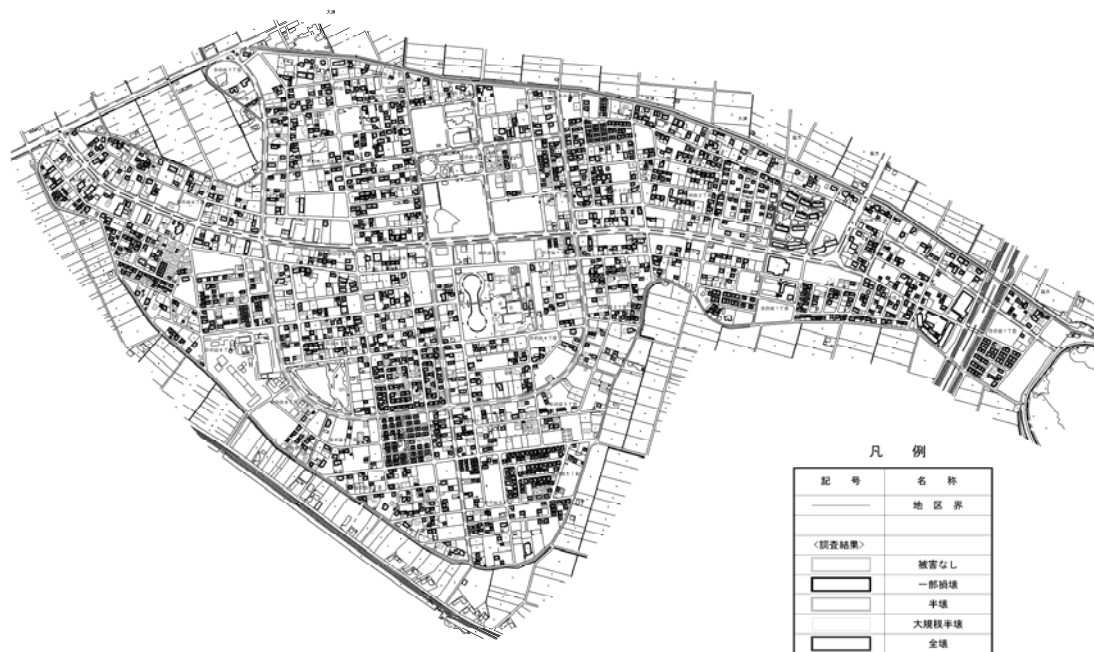


図-9 建物の被害状況¹²⁾



(a)宅地地盤の噴砂



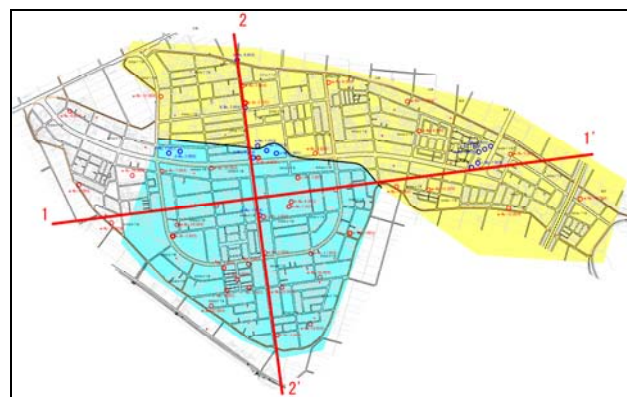
(b)ライフラインの浮上

写真-2 液状化が生じた宅地及び道路の被害状況

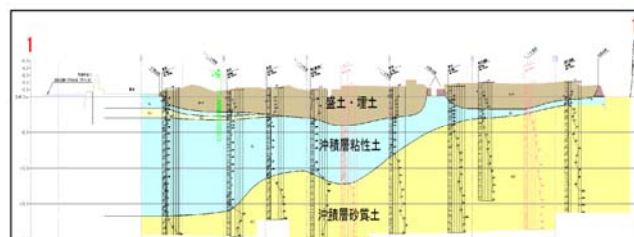
c) 地質状況

日の出地区の地質状況は、図-10に示すように地下水位が地表面から1m程度に分布するN値10前後の埋土層(砂主体)が地表面から3～5m程度に堆積し、これが液状

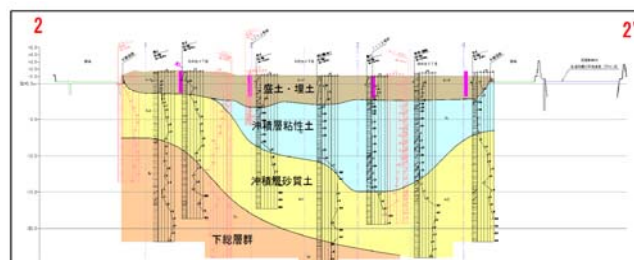
化被害をもたらしたものと推定される。また、埋土層の下は一部地域で最大15m程度の粘性土が堆積している。日の出地区の地質断面図を以下に示す。



(a)平面図



(b)1-1' 断面図



(c)2-2' 断面図

図-10 潮来市日の出地区の地質平面・断面図¹²⁾

(3) 神栖市堀割地区

a) 位置図

茨城県神栖市は、東北地方太平洋沖地震によって市内の住宅約5千棟が被害を受けた地域で、その中で最も被害が顕著であった図-11に示す堀割地区を調査の対象とした。



図-11 神栖市堀割地区の位置図⁹⁾

b) 被害状況

神栖市の建物被害は、図-12に示すように罹災証明によると堀割地区の被害状況の内、半壊の建物が大多数を占め、その中に一部損壊の建物、大規模半壊、全壊の建物も点在する状況である。写真-3は、神栖市堀割地区で発生した液状化が生じた歩道部における排水路の浮上及び宅地の噴砂状況である。



(a)歩道部における排水路の浮上

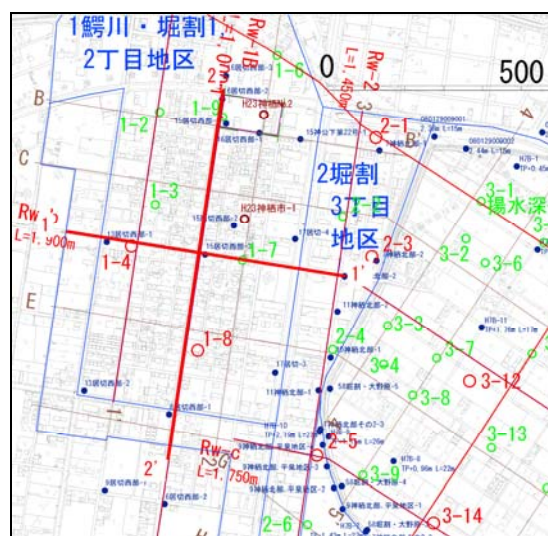


(b)宅地地盤の噴砂

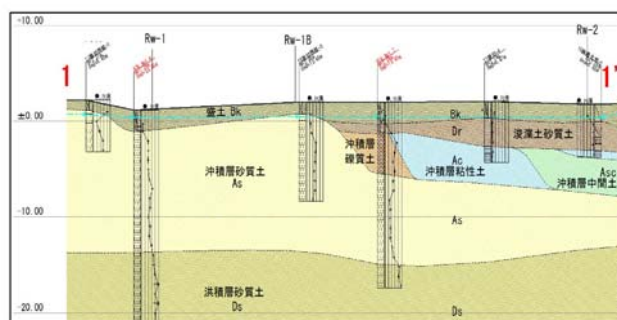
写真-3 液状化が生じた宅地及び道路の被害状況

c) 地質状況

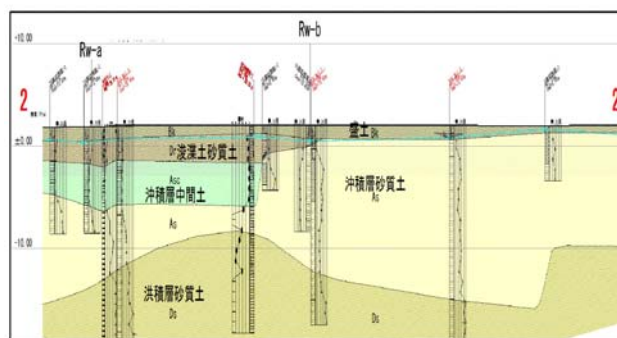
堀割地区の地質状況は、図-13に示すように地下水位が地表面から1 m程度に分布するN値5以下の埋土層(砂主体)が地表面から3~5m程度に堆積し、これが液状化被害をもたらしたものと推定され、埋土層の下は5m程度の粘性土が一部堆積しているが、大部分は、15m程度の砂質土が分布する状況にある。豊田・昭田地区の地質状況は、地下水位が地表面から1 m程度に分布するN値5以下の埋土層(砂主体)が地表面から10m前後に堆積し、これが液状化被害をもたらしたものと推定される。また、埋土層の下は5m程度の砂質土が堆積している。地質断面図を以下に示す。



(a)平面図



(b)1-1'断面図



(c)2-2'断面図

図-13 神栖市堀割地区の地質平面・断面図¹⁶⁾



図-12 建物の被害状況¹⁶⁾

凡 例	
記 号	名 称
—	地 区 界
<調査結果>	
□	被害なし
■	一部損壊
□	半壊
□	大規模半壊
□	全壊

(4) 千葉市美浜区磯辺地区

a) 位置図

千葉市は、東北地方太平洋沖地震によって市内の住宅1,190棟¹⁷⁾が液状化被害を受けた地域で、その中で最も被害が顕著であった図-14に示す美浜区磯辺地区を対象とした。



図-14 千葉市美浜区磯辺地区の位置図⁹⁾



図-15 建物の被害状況¹⁸⁾

凡 例	
記 号	名 称
—	地 区 界
<調査結果>	
□	被害なし
■	一部損壊
□	半壊
□	大規模半壊
□	全壊

b) 被害状況

千葉市の建物被害は、図-15に示すように罹災証明によると美浜区磯辺地区の被害状況の内、一部損壊、半壊、大規模半壊が同程度に分布し、一部全壊が点在する状況である。写真4は、美浜区磯辺地区で発生した液状化が生じた歩道部における排水路の浮上及び宅地の噴砂状況である。



(a)道路の噴砂状況



(b)宅地のめり込み沈下状況

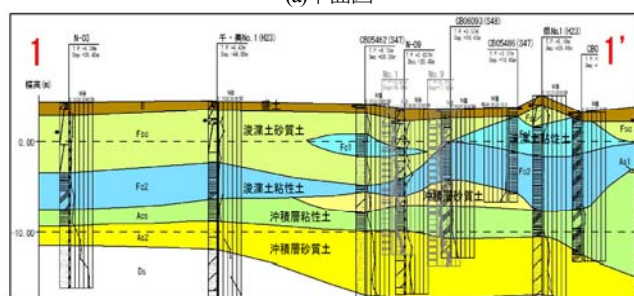
写真-4 液状化が生じた道路及び建物の沈下状況

c) 地質状況

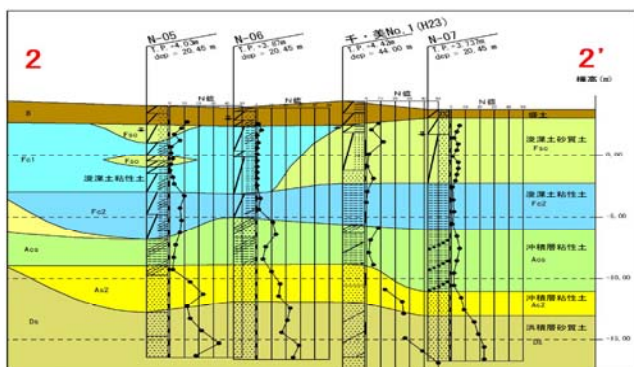
磯辺七丁目地区の地質状況は、図-16 に示すように地下水位が地表面から1m程度し、地表面を1m程度の盛土層が覆う状況で、盛土層の下は、N値10未満の埋め土層が深度10m程度まで堆積している。埋め土層は、砂と粘土の中間土で、場所によって異なる。地質断面図を以下に示す。



(a)平面図



(b)1-1'断面図



(c)2-2'断面図

図-16 千葉市美浜区磯辺地区の地質平面・断面図¹⁸⁾

(5) 習志野市香澄地区

a) 位置図

習志野市は、東北地方太平洋沖地震によって市内の住宅約5千棟が被害を受けた地域で、その中で最も被害が顕著であった図-17 に示す香澄三丁目を調査の対象とした。



図-17 習志野市香澄地区の位置図⁹⁾

b) 被害状況

習志野市の建物被害は、図-18 に示すように罹災証明によると習志野市霞三丁目地区の被害状況は、一部損壊、半壊、大規模半壊が同程度に分布する状況である。写真-5 は、美浜区磯辺地区で発生した液状化が生じた歩道部における排水路の浮上及び宅地の噴砂状況である。

習志野市で調査した罹災証明結果を基に、被害状況の整理を行った。

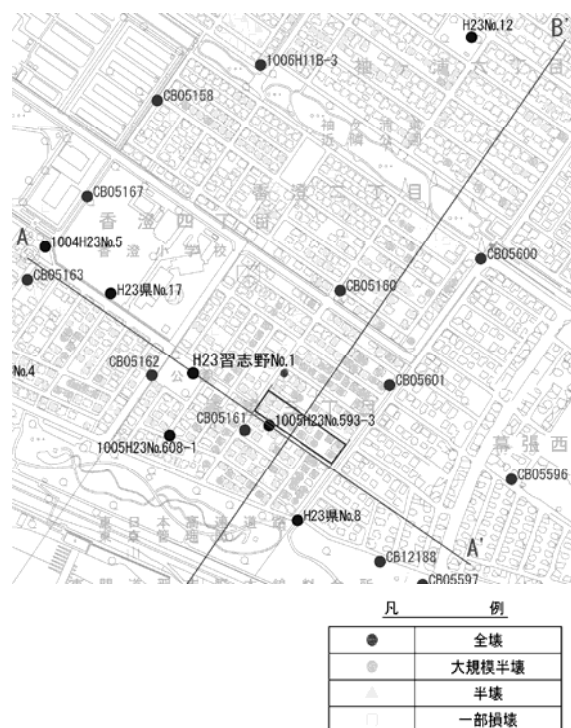


図-18 建物の被害状況¹⁹⁾



(a)道路の陥没状況

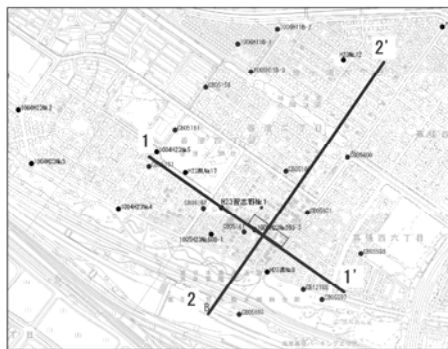


(b)噴砂・電柱の傾動状況

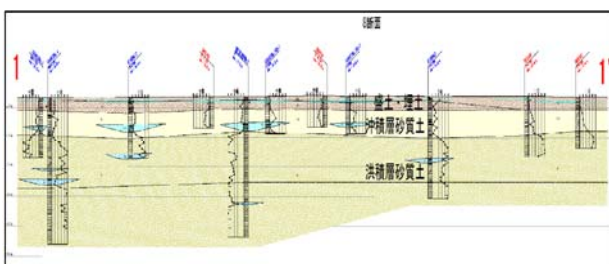
写真-5 道路の液状化に伴う噴砂状況

c) 地質状況

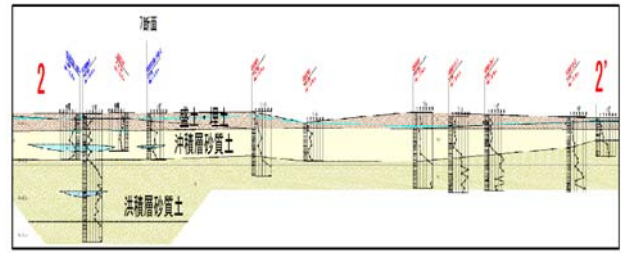
香澄三丁目地区の地質状況は、地下水位が地表面から1.5m程度に分布するN値5以下の埋土層(砂主体)が地表面から5m程度、埋土層の下は10m程度の砂質土がそれぞれ堆積し、これらが液状化被害をもたらしたものと推定される。地質断面図を以下に示す。



(a)平面図



(b)1-1'断面図



(c)2-2'断面図

図-19 習志野市香澄地区の地質平面・断面図¹⁹⁾

3. 検討内容

62本のボーリング調査結果を収集し、ボーリング地点の被害状況の確認を行い、各地点の液状化安全率 F_L 値を算定し、 P_L 法¹⁾²⁰⁾や非液状化層厚 H_1 と液状化層厚 H_2 の関係による判定(以下、「 H_1 - H_2 法」と略す。) ²¹⁾により液状化被害程度を判定した。実際の液状化被害と判定結果とを比較し、両者の整合性を評価した。

3.1 液状化被害程度の判定手法

液状化被害程度の判定の計算は、国土交通省・国土技術政策総合研究所ホームページから「宅地の液状化被害可能性判定計算シート」²²⁾等により計算を行った。この計算ソフトは、国土交通省都市局の「宅地の液状化被害可能性判定に係る技術指針」における二次判定の計算を簡易に行うことを目的として、国土技術政策総合研究所が作成したものである。この計算シートは、地盤調査の結果と想定する地震規模をExcelに入力することで、簡易に宅地の液状化被害の可能性を判定することができる支援ツールである。

簡易シートを用いた液状化被害の検討は、ボーリング調査結果等から解析断面を設定し各地点の地下水位、地震動、土質種別、湿潤密度、細粒分含有量等のパラメータを入力することにより、①各層の液状化に対する安全率(F_L 値)の計算、②液状化による地表変位量(D_{eq} 値)を沈下量と考えた計算、③液状化被害の指標値(P_L 値)の計算、④非液状化層厚(H_1)と液状化層による沈下量を定量的に反映できる D_{eq} 値を組み合わせた H_1 - D_{eq} 判定図の作成、⑤非液状化層厚 H_1 と液状化層の液状化程度を定量的に反映できる P_L 値とを組み合わせた H_1 - P_L 判定図の作成ができるシートである。 F_L 値に基づく各数値の算定は「建築基礎構造設計指針(日本建築学会 平成13年10月)」、「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編(日本道路協会 平成24年3月)」を基にしている。

ただし、②液状化による地表変位量(D_{eq} 値)を沈下量と考えた計算は、建築基礎構造設計指針に基づいている。

3.2 想定地震動

東北地方太平洋沖地震の想定最大加速度 ($\alpha_{\max}$) は、表-3のように様々であるが、各委員会で決定された検討箇所近傍の地表面における地震観測記録を適用した。東北地方太平洋沖地震のマグニチュード (M) は、本震がM9.0、余震がM7.5程度であるが、本震と余震の影響を受け観測されたような継続時間の長い地震動であったことから、「建築基礎構造設計指針」に準じて各液状化検討委員会で用いられているすべて9.0として検証した。

3.3 液状化被害程度の判定手法

(1) 判定対象層

液状化判定の対象層の深度は地表から20m までとした。「建築基礎構造設計指針」では、細粒分含有率35%以下の層に関する規定は「沖積層」、細粒分含有率35%以上の低塑性シルト層に関する規定は「埋立て地盤・盛土地盤」に適用しているが、技術指針では「沖積層、埋立て地盤、盛土地盤」とともに、細粒分含有率35%以下の層及び細粒分含有率35%以上の低塑性シルト層に関する規定を適用することとしている。

そこで、判定対象層は技術指針に準じて地表面から20m程度で浅の沖積層・埋立層・盛土層とし、細粒分含有率35%以下の層、及び細粒分含有率35%を超える層でも粘土分含有率が10%以下の層または塑性指数15以下の層とした。ただし、想定する地盤面は、判定対象宅地の地表面標高とするが、盛土工事等によってボーリング調査時の地表面標高と判定対象宅地の地盤面標高が異なる場合には、ボーリング調査時の各層の液状化強度比をそのまま用いた。

(2) 液状化に対する安全率 (F_L 値)

液状化に対する安全率 (F_L 値) は、判定対象層について、「建築基礎構造設計指針」を基本として算定した。

(3) 非液状化層厚 (H_1)

非液状化層厚 (H_1) は、技術指針に準じて地盤面から連続する地下水位より浅い層、地下水位より深い層でも①液状化の安全率 (F_L 値) が1.0より大きい層、②N値が2より大きい粘性土層 (埋立土・盛土)、③細粒分含有率35%を超える層 (沖積層・埋立土・盛土) でも粘土分含有率が10%以下の層または塑性指数15以下の層とした。地下水位の設定は、ボーリング調査の孔内水位を基本として設定した。

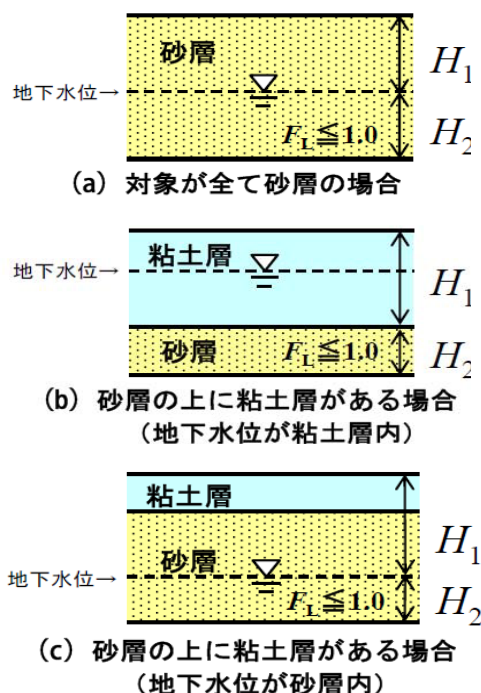


図-20 非液状化層厚 (H_1) と液状化層厚 (H_2) の関係²⁾

表-3 想定する地震動

宅地被害地区	地震前のボーリング箇所	加速度 (gal)					マグニチュード (M) ^{注2)}
		出典	3成分	NS方向	EW方向	適用 ^{注1)}	
潮来市 日の出地区	14	気象庁潮来市辻 (本震)	522.4	468.2	422.5	460	M9.0
神栖市 掘割地区	10	kik-net神栖市溝 口 (余震) ^{注3)}	337.9	328.2	270.0	340	M9.0 (M7.6)
我孫子市 布佐東部地区	23	電力中央研究所 (我孫子)	—	203.9	199.8	200	M9.0
千葉市 磯辺美浜地区	11	気象庁美浜区真 砂 (本震)	276.5	190.8	207.9	200	M9.0
習志野市 香澄地区	4	気象庁習志野市 鷺沼 (本震)	245.7	226.4	202.5	200	M9.0

注1) : 各液状化検討委員会で決定された検討箇所近傍の地表面における地震観測記録を適用した。

注2) : kik-net神栖市溝口 (余震) のマグニチュード (M) は7.6であるが、神栖市液状化検討委員会で決定された長時間地震動であることからM9.0を適用した。

注3) : 電力中央研究所(我孫子)における観測波形を用いて、布佐東部地区の代表的な地盤構成に対して次元地震応答解析 (SHAKE) を実施した結果である。

(4) 地表変位量 (D_{cy} 値) の算定方法

地表変位量 (D_{cy} 値) の算定は, 「建築基礎構造設計指針」4.5 節地盤の液状化, “2.液状化に伴う地盤物性と地盤変形量の予測”に準拠した。宅地は, 表-4のように建築基礎構造設計指針¹⁾に定める液状化判定法 (F_L法) に基づき, 沖積砂層を含む地盤の変形を考慮した地表変位D_{cy} が少ない (概ね5~10cm 以内) ことが求められる。

表-4 地表変位 (D_{cy}) と液状化の程度¹⁾

D _{cy} (cm)	液状化の程度
0	なし
~05	軽微
05~10	小
10~20	中
20~40	大
40~	甚大

(5) 液状化指標値 (P_L値)

液状化指標値 (P_L値) は, 下式により算定した。

$$P_L = \Sigma F \cdot w(Z) \cdot \angle Z$$

$$F = 1.0 - F_L \quad (F_L \leq 1.0 \text{ の場合})$$

$$F = 0.0 \quad (F_L > 1.0 \text{ の場合})$$

ここで, F_L : 液状化に対する安全率

w(Z) : 深さ方向の重み関数

判定深度20m w(Z) = 10.0 - 0.5 · Z

Z : 地表面からの深さ(m)

∠Z : ある深度のF_Lが分布すると想定される土層厚

(6) 判定図

判定は, 各箇所において以下の3つ方法で計算を行い比較検討し, 表-5で判定した。

①「宅地耐震設計マニュアル(案)」に基づく「H₁-H₂法」を行った。なお, H₂層のカウント方法は, 明確に定められた方法がないため, 本研究では, F_L ≤ 1 の層厚を深度20mまで累積して求めることとした。

②「建築基礎構造設計指針」を基本とし, 図-22(a)に示すように非液状化層厚 (H₁) と地表変位量 (D_{cy} 値) の関係から判定する手法 (以下, 「建築H₁-D_{cy}法」と略す。)を行った。

③「建築基礎構造設計指針」を基本とし, 図-22(b)に示すように非液状化層厚 (H₁) と液状化指標値 (P_L値) の

関係から判定する手法 (以下, 「建築H₁-P_L法」と略す。)を行った。

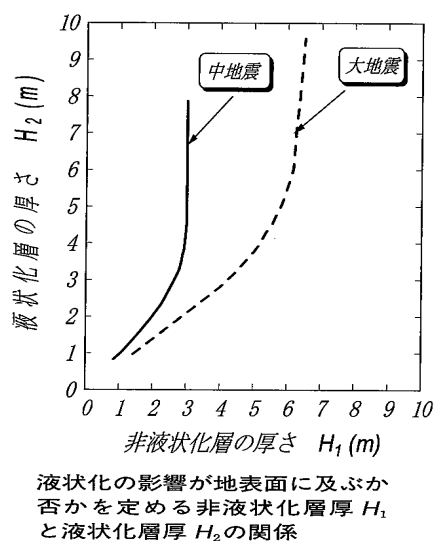
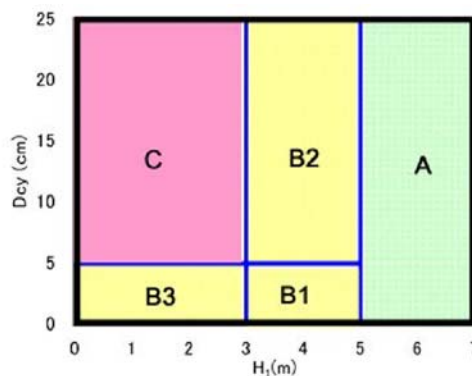
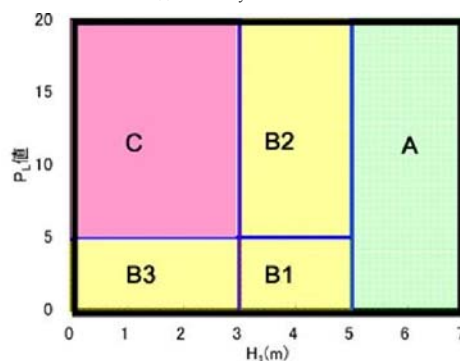


図-21 住宅地における液状化の検討方法の例²⁾



(a)H₁~D_{cy}判定図



(b)H₁~P_L判定図

図-22 H₁値, D_{cy}値, P_L値による判定図³⁾

表-5 判定図の数値表³⁾

判定結果	H ₁ の範囲	D _{cy} の範囲	P _L 値の範囲	液状化被害の可能性
C	3m 以下	5cm 以上	5 以上	顕著な被害の可能性が高い
B3		5cm 未満	5 未満	
B2	3mを超え、5m以下	5cm 以上	5 以上	顕著な被害の可能性が比較的低い
B1		5cm 未満	5 未満	
A	5m を超える	—	—	顕著な被害の可能性が低い

4. 各判定手法による液状化被害程度の判定結果

4.1 各地区の液状化被害程度の判定（今次災害の検証）

液状化被害程度の判定は、各地区の液状化の検証結果と建物被害(地盤調査地点周辺の建物被害)の相関関係について、各判定手法により行った。なお、地震動については、東北地方太平洋沖地震を想定した地震動を用いた。

(1) 我孫子市布佐東部地区の分析(図-23 参照)

- ① H_1 - H_2 法： H_1 が 3m 未満の液状化しやすいエリアに被害箇所が分布する傾向がある。
- ②建築 H_1 - D_{cy} 法： H_1 が 3m 未満で D_{cy} が大きい範囲に被害箇所が分布する傾向がある。
- ③建築 H_1 - P_L 法： H_1 が 3m 未満で P_L が大きい範囲に被害箇所が分布する傾向がある。

(2) 潮来市日の出地区の分析(図-24 参照)

- ① H_1 - H_2 法： H_1 が 3m 未満で液状化しやすいエリアに被害建物が分布する傾向がある。ただし、地震動が大きいいためか、被害なしの箇所も液状化しやすいエリアに点在する。
- ②建築 H_1 - D_{cy} 法： H_1 が 3m 未満で D_{cy} が大きい範囲に被害箇所が分布する傾向がある。
- ③建築 H_1 - P_L 法： H_1 が 3m 未満で P_L が大きい範囲に被害箇所が分布する傾向がある。ただし、「 H_1 - H_2 法」と同様に被害なしの箇所も液状化しやすいエリアに点在する。

(3) 神栖市堀割地区の分析(図-25 参照)

- ① H_1 - H_2 法： H_1 が 3m 未満の液状化しやすいエリアに被害箇所が分布する傾向がある。
- ②建築 H_1 - D_{cy} 法： H_1 が 3m 未満で P_L が大きい範囲に被害箇所が分布する傾向がある。
- ③建築 H_1 - P_L 法： H_1 が 3m 未満の液状化しやすいエリアに被害箇所が分布する傾向はみられる。

(4) 千葉市美浜区の分析(図-26 参照)

- ① H_1 - H_2 法： H_1 が 3m 未満の液状化しやすいエリアに被害建物が分布する。
- ②建築 H_1 - D_{cy} 法： H_1 が 3m 未満の液状化しやすいエリアに被害箇所が分布する傾向にある。
- ③建築 H_1 - P_L 法： H_1 が 3m 未満の液状化しやすい範囲に被害箇所が分布する傾向にある。

(5) 習志野市香澄地区の分析(図-27 参照)

- ① H_1 - H_2 法： H_1 が 3m 未満の液状化しやすいエリアに被害箇所が分布するが被害なしも混在する。

②建築 H_1 - D_{cy} 法： H_1 が 3m 未満の液状化しやすいエリアに被害箇所が分布するが被害なしも混在する。

③建築 H_1 - P_L 法： H_1 が 3m 未満の液状化しやすいエリアに被害箇所が分布するが被害なしも混在する。

4.2 各判定手法による液状化被害程度の判定結果

(1) H_1 - H_2 法による液状化被害程度判定結果

図-28(a)の H_1 - H_2 法による判定は、中地震のラインを境に、右側に位置する場合は「液状化の影響が地表面に及ぶ」と判定する。被害が大きい地点は、「液状化の影響が地表面に及ぶ」と判定されていることが分かる。しかし、「被害なし」の地点が「液状化の影響が地表面に及ぶ」範囲に多くプロットされている。この理由として、 H_1 - H_2 法は、 H_1 層以深において非液状化層と液状化層が互層に堆積している場合、 H_2 層厚の設定方法が明確化されておらず、 H_2 層厚を過大に設定している可能性が考えられる。また、ルーズな沖積砂層が厚く堆積している場合、液状化判定において液状化対象層となるため、 H_2 層厚が課題に評価されるためである。

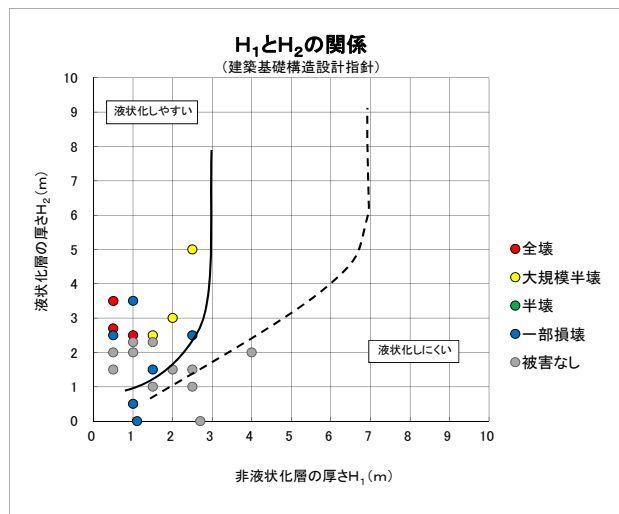
(2) 建築 H_1 - D_{cy} 法による液状化被害程度判定結果

図-28(b)の建築 H_1 - D_{cy} 法による判定は、 $H_1=3.0$ mの中地震のラインを境に、右側に位置する場合は「顕著な液状化の可能性が比較的少ない」、左側の場合で $D_{cy} \geq 5$ cmが「顕著な液状化の可能性が高い」と判定する。ただし、M7.5、200galの場合の中地震が対象であるのに対して、M9.0の場合であるので $D_{cy} \geq 5 \sim 10$ cm程度でも良いものと考えられる。被害が大きい地点は、「顕著な液状化の可能性が高い」と判定されており被害の程度と D_{cy} 値が相対的に整合している傾向が見てとれる。しかし、無被害も含まれ液状化の影響の有無を中地震のラインで区分できるほどの明確な差が認められなかった。

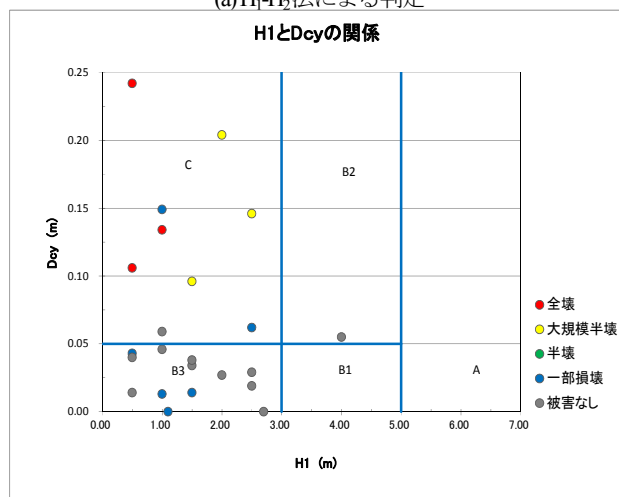
(3) 建築 H_1 - P_L 法による液状化被害程度判定結果

図-28(b)の建築 H_1 - P_L 法による判定は、 $H_1=3.0$ mの中地震のラインを境に、右側に位置する場合は「顕著な液状化の可能性が比較的少ない」、左側の場合で $P_L \geq 5$ が「顕著な液状化の可能性が高い」と判定する。ただし、M7.5、200galの場合の中地震が対象であるのに対して、M9.0の場合であるので $P_L \geq 5 \sim 10$ 程度でも良いものと考えられる。被害が大きい地点は、「顕著な液状化の可能性が高い」と判定されており被害の程度と P_L 値が相対的に整合している傾向が見てとれる。しかし、無被害も含まれ液状化の影響の有無を中地震のラインで区分できるほどの明確な差が認められなかった。また、液状化地域ゾーニングマニュアル¹⁸⁾に示される「液状化による影響

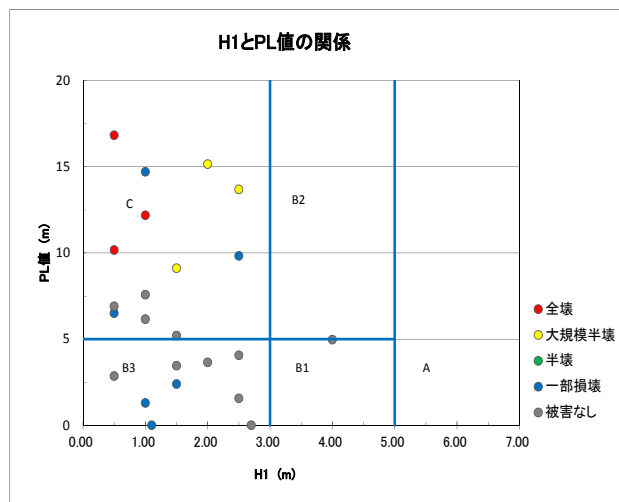
は大きい」範囲 ($5 < P_L \leq 15$) に、無被害の地点が多く分布されており、液状化被害を過大に判定している可能性が考えられる。



(a) H_1 - H_2 法による判定

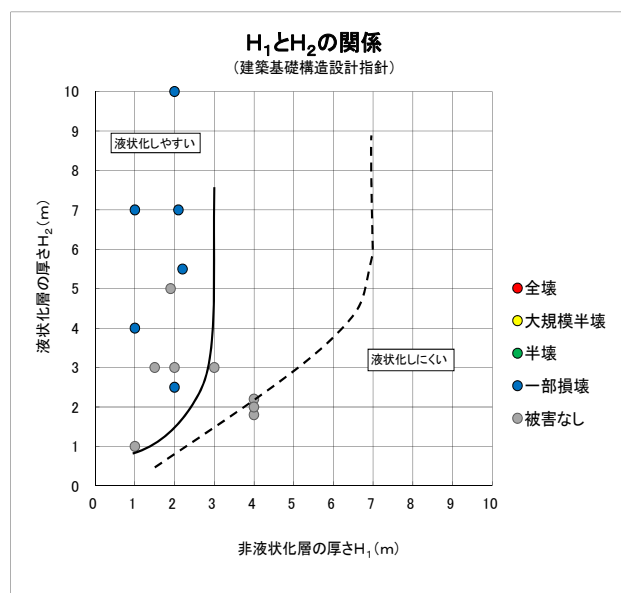


(b) 建築 H_1 - D_{cy} 法による判定

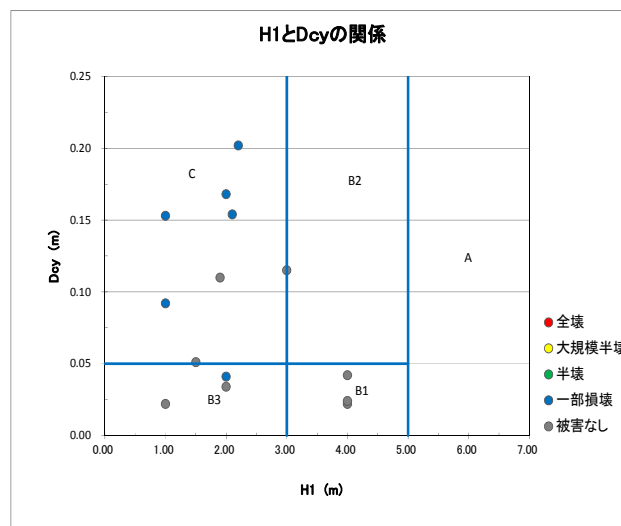


(c) 建築 H_1 - P_L 法による判定

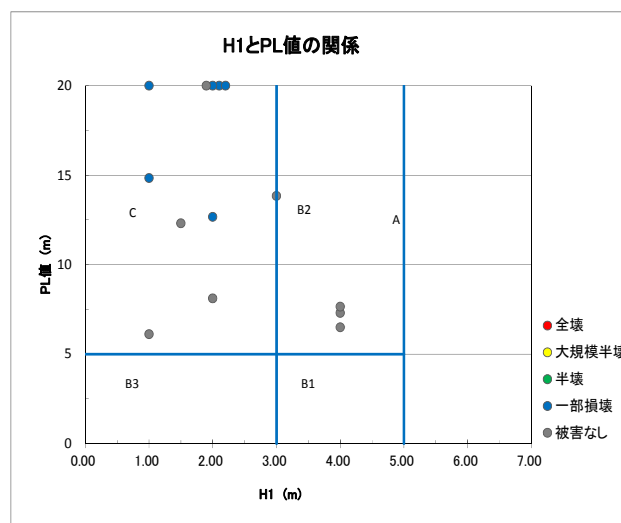
図-23 我孫子市布佐東部地区の液状化被害程度判定結果
(M9.0, 200gal)



(a) H_1 - H_2 法による判定

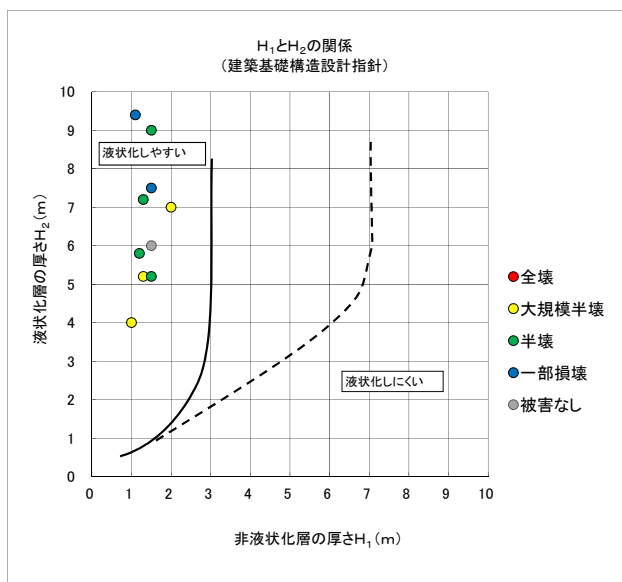


(b) 建築 H_1 - D_{cy} 法による判定

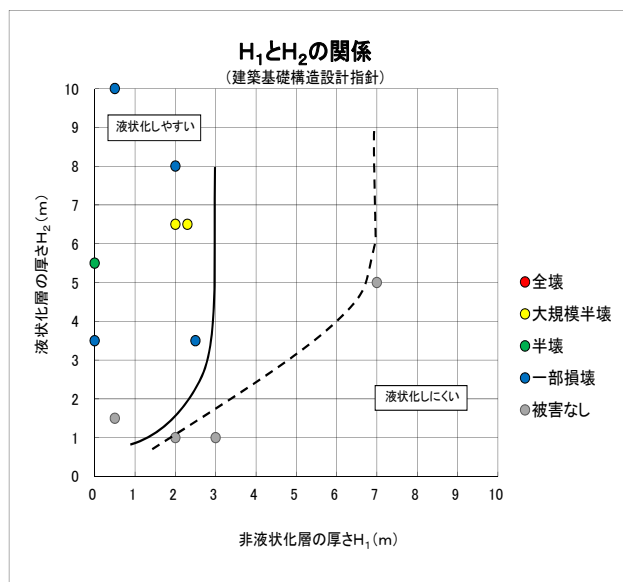


(c) 建築 H_1 - P_L 法による判定

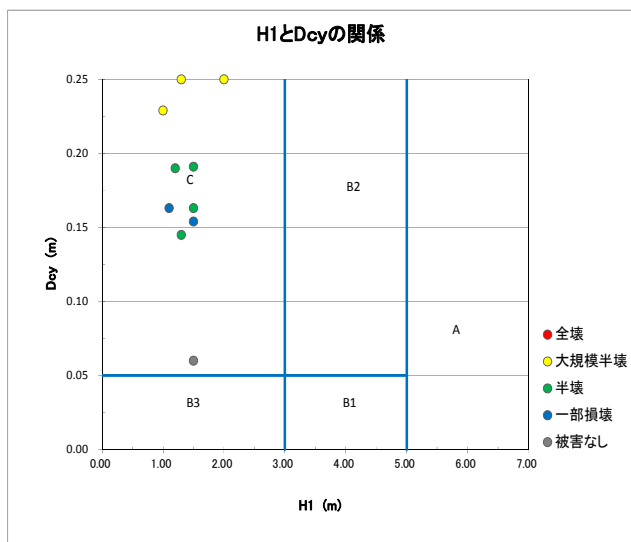
図-24 潮来市日の出地区の液状化被害程度判定結果
(M9.0, 460gal)



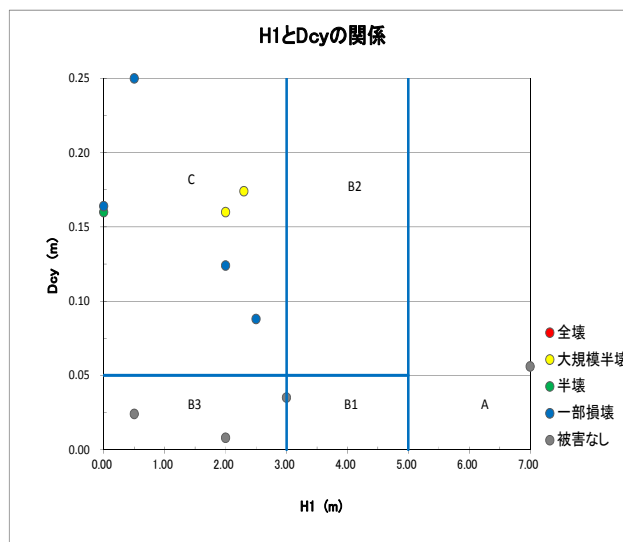
(a) H_1 - H_2 法による判定



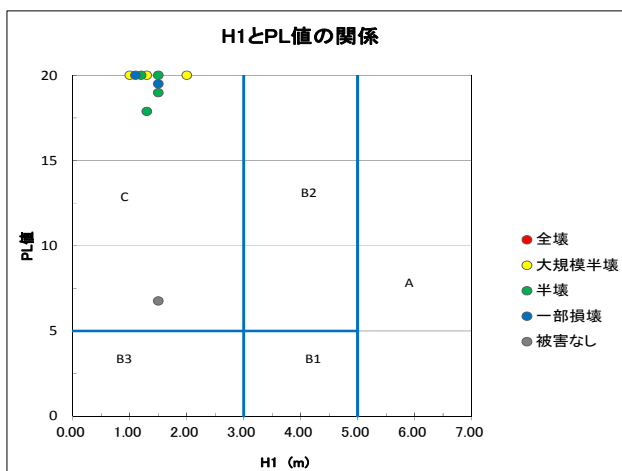
(a) H_1 - H_2 法による判定



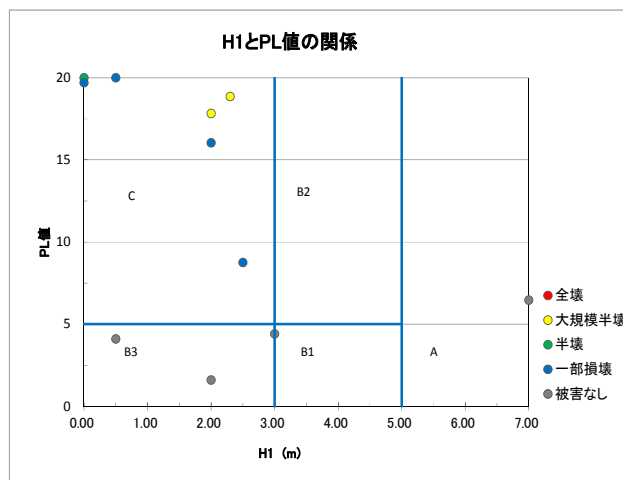
(b) 建築 H_1 - D_{cy} 法による判定



(b) 建築 H_1 - D_{cy} 法による判定



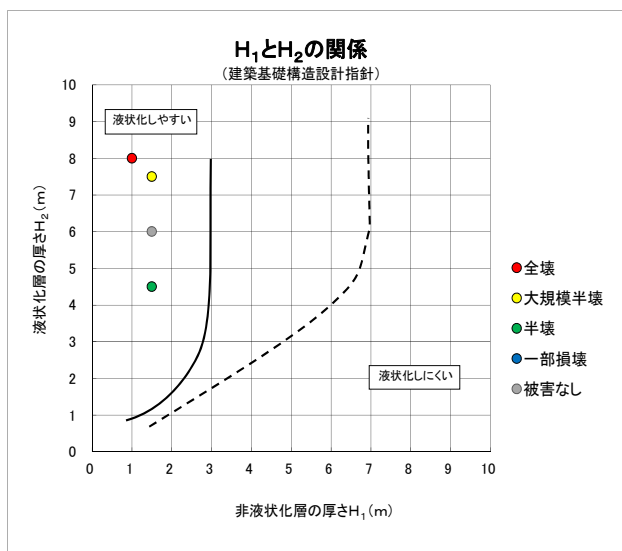
(c) 建築 H_1 - P_L 法による判定



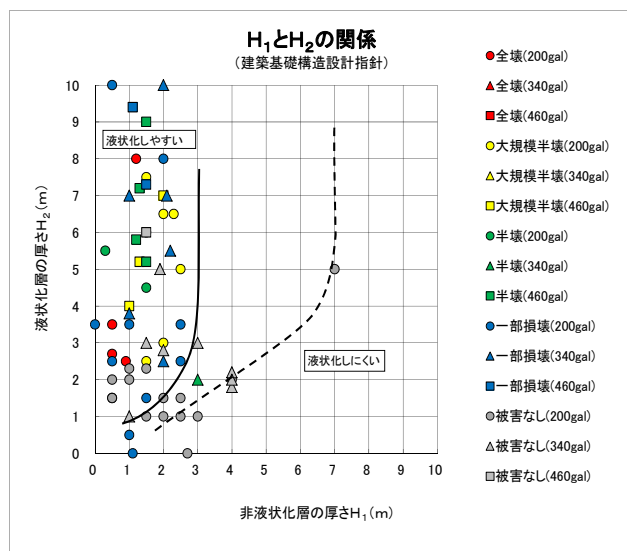
(c) 建築 H_1 - P_L 法による判定

図-25 神栖市堀割地区の液状化被害程度判定結果
(M9.0, 340gal)

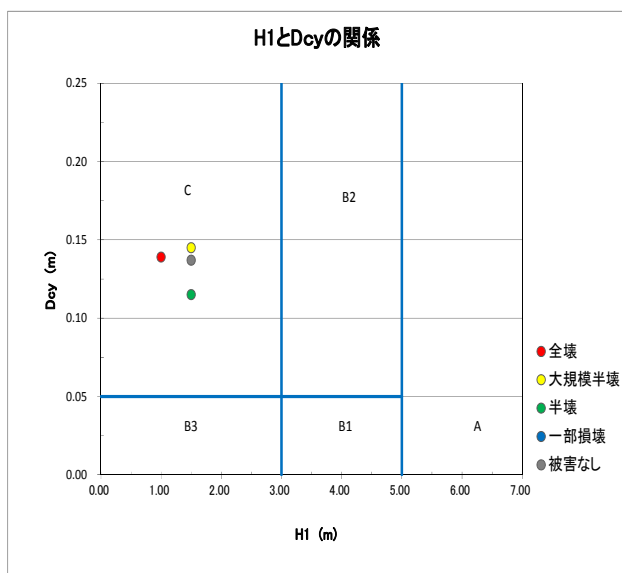
図-26 千葉県美浜地区の液状化被害程度判定結果
(M9.0, 200gal)



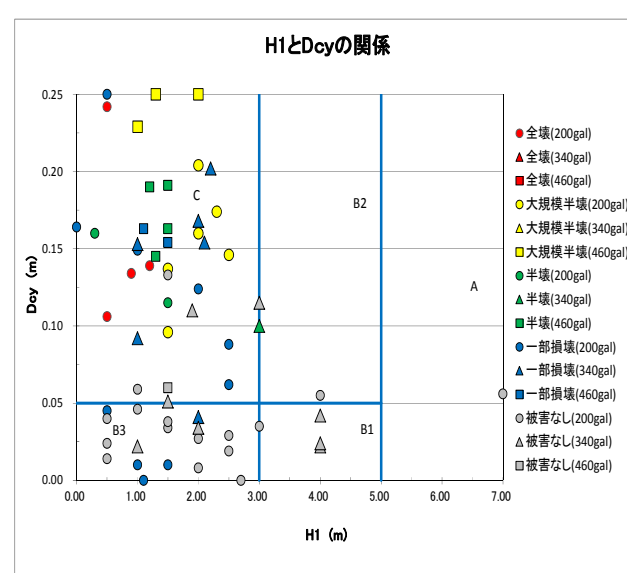
(a) H₁-H₂法による判定



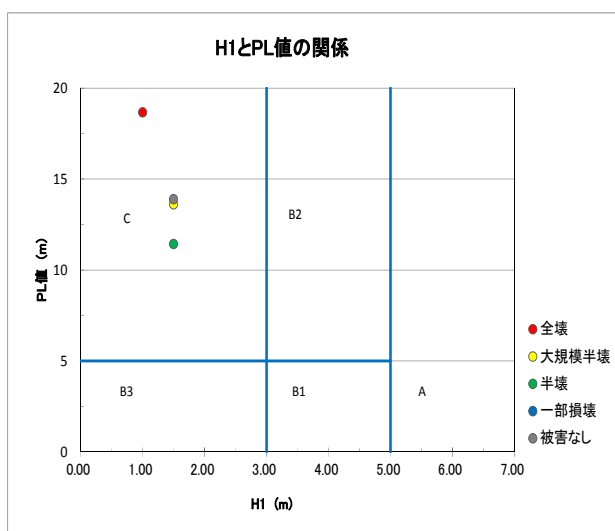
(a) H₁-H₂法による判定



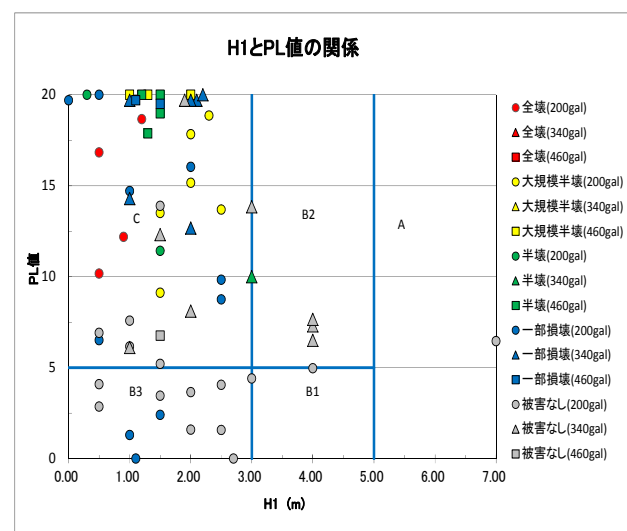
(b) 建築H₁-D_{cy}法による判定



(b) 建築H₁-D_{cy}法による判定



(c) 建築H₁-P_L法による判定



(c) 建築H₁-P_L法による判定

図-27 習志野市香澄地区の液状化被害程度判定結果
(M9.0, 200gal)

図-28 5地区総合の液状化被害程度判定結果
(今次災害)

4.3 軟弱粘性土層の変状及び液状化強度に対する地盤生成年代の影響を考慮した判定手法による液状化被害程度の判定結果

東北地方太平洋沖地震での今次災害では、各判定法の図-29(a)H₁-H₂法、図-30(a)建築H₁-D_{cy}法、図-31(a)建築H₁-P_L法を用いて液状化の可能性の判定を行った。その結果、いずれの手法を用いた場合も液状化被害が確認された地点は液状化の影響や程度が相対的にやや大きいと評価される傾向はあるが、液状化被害の程度を区分するほどの明確な差は確認されなかった。

その理由としては、以下の2つが課題として挙げられた。

①軟弱粘性土層の変状の影響

盛土・埋土層内の軟弱な粘性土は、それ自体は液状化しないものの、地震動によって地表面に変状を及ぼした可能性が考えられる。

②液状化強度に対する地盤生成年代の影響

田口・東畑ら²⁾は、東北地方太平洋沖地震の液状化被害において、F_L値による液状化の有無を判定する際、その境界はF_L=1ではなく、地盤生成年代が古くなるほどF_L値が大きくなることが明らかとなり、液状化しにくくなる可能性が考えられる。

そこで、液状化判定手法については、この課題の改良を以下のように行った。

③軟弱粘性土層の変状の影響

非液状化層厚H₁の算定は、技術指針により盛土・埋土層内にN値2以下の軟弱な粘性土が含まれる場合に、含めないこととした。すなわち、H₁の定義は「地下水位よりも上にある層」「粘性土層（判定対象外となる層、ただし、盛土、埋立土内のN値が2以下の粘性土はH₁に含まない）」「F_L>1.0となる層」の連続層厚を採用した。

④液状化強度に対する地盤生成年代の影響

400年以上経過した自然地盤の沖積層（以下、地山という。）については、技術指針により地盤生成年代効果を見込み、液状化強度比の値を1.4倍してF_L値を算出した。

各判定法を用いて液状化の可能性の判定を行った結果では、図-29(b)H₁-H₂法、図-30(b)建築H₁-D_{cy}法、図-31(b)建築H₁-P_L法のようにいずれの手法を用いた場合も、東北地方太平洋沖地震の宅地の液状化被害を概ね判断できることが明らかとなった。

4.4 地山を液状化させない場合の液状化被害程度の判定結果

自然地山でN値が小さい場合は、4.3で液状化強度に対する地盤生成年代の影響を考慮して建築基礎構造設計指

針の液状化強度比の値を1.4倍した場合でもあるにもかかわらず、F_L値がF_L<1.0を示し液状化すると判定されるケースがあった。そこで、さらに地山を液状化しないものとして、各判定法を用いて液状化の可能性の判定を行った。その結果では、図-29(c)H₁-H₂法、図-30(c)建築H₁-D_{cy}法、図-31(c)建築H₁-P_L法のようにいずれの手法を用いた場合も、非常に再現性の良く、精度の高い判定ができることが明らかとなった。

4.5 技術指針に基づいた液状化被害程度の判定結果

技術指針では、想定する地震動を震度5程度の中地震を対象としており、液状化に対する安全率（F_L値）の算定には、下記の数値を用いるものとしている。なお、この地震動を上回る地震動を対象とする場合には、計算条件等を慎重に検討する必要があるとしている。

①「建築基礎構造設計指針」を基本とする場合

- ・マグニチュード：7.5
- ・想定最大加速度 α_{max}：200(gal)

②「道路橋示方書・同解説 V耐震設計編」を基本とする場合

- ・想定震度 k_hgal：0.20

そこで、マグニチュードM=7.5、想定最大加速度 α_{max}：200(gal)として、各判定法を用いて液状化の可能性の判定を行った。

その判定結果では、技術指針に用いられている建築H₁-D_{cy}法、建築H₁-P_L法を用いた「A：顕著な被害の可能性が低い」、「B：顕著な被害の可能性が比較的低い」、「C：顕著な被害の可能性が高い」の3ランクで判定する評価方法は、以下のようにいずれの手法を用いた場合も、非常に有効であることが明らかとなった。

①H₁-H₂法（図-32）

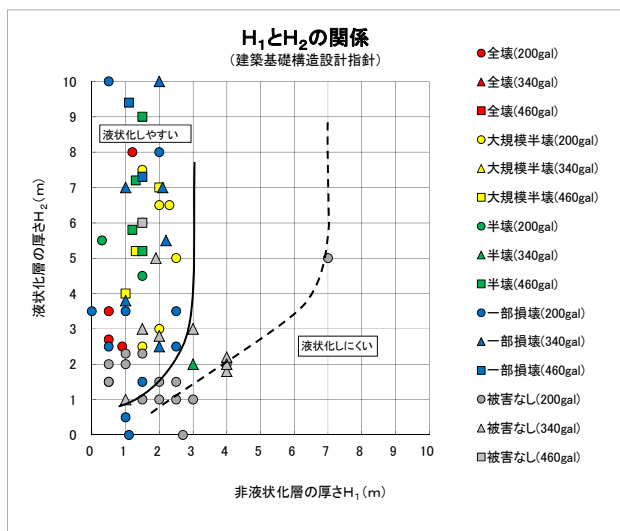
中地震のラインを境に「液状化の影響が地表面に及ぶ」と判定する左側では一部損壊以上の顕著な被害、「液状化の影響が地表面に及ぶ」と判定する右側では一部損壊または被害無しになっている。

②建築H₁-D_{cy}法（図-33）

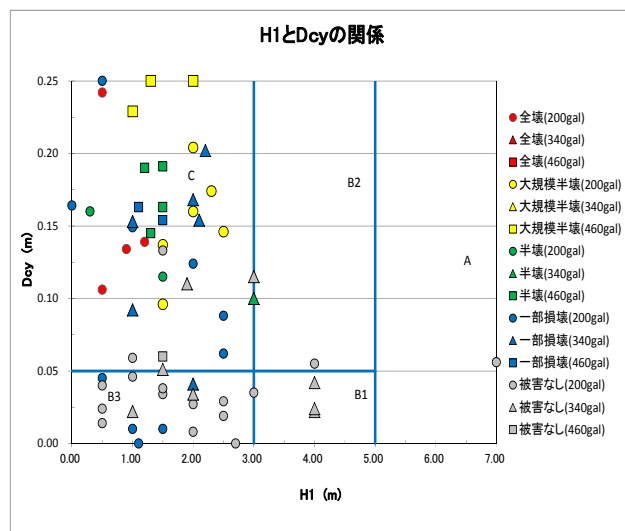
「Cランク：顕著な被害の可能性が高い」のH₁≤3mかつD_{cy}≥5cmでは一部損壊以上の顕著な被害、「Aランク：顕著な被害の可能性が低い」のH₁≥5mで被害なし、その他で一部損壊または被害無しになっている。

③建築H₁-P_L法（図-34）

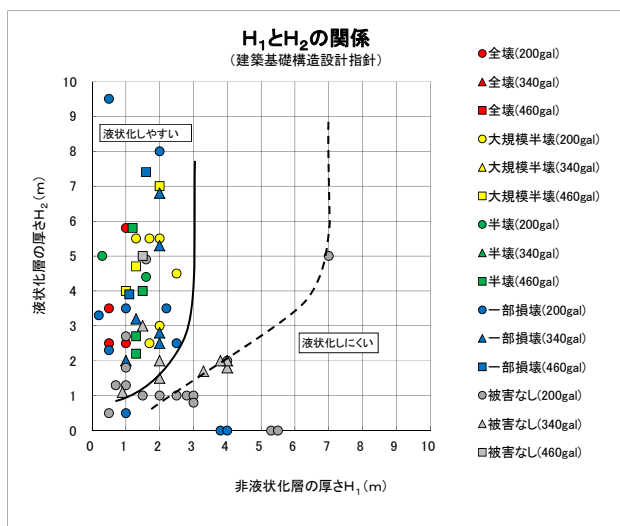
「Cランク：顕著な被害の可能性が高い」のH₁≤3mかつP_L≥5cmでは一部損壊以上の顕著な被害、「Aランク：顕著な被害の可能性が低い」のH₁≥5mで被害なし、その他で一部損壊または被害無しになっている。



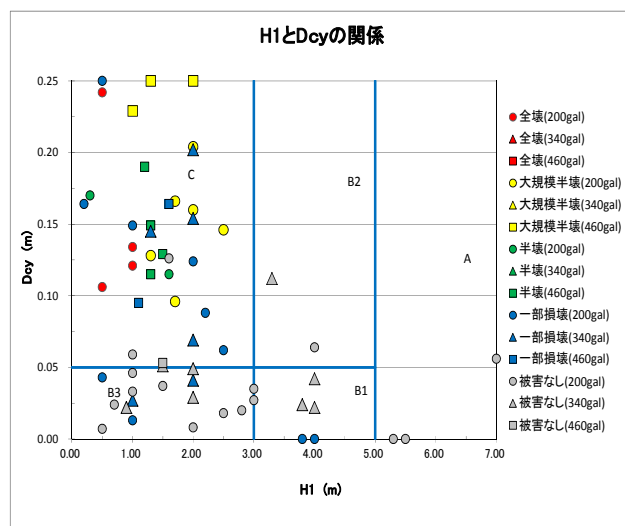
(a) 通常の液状化判定 (地山1.0倍) した場合



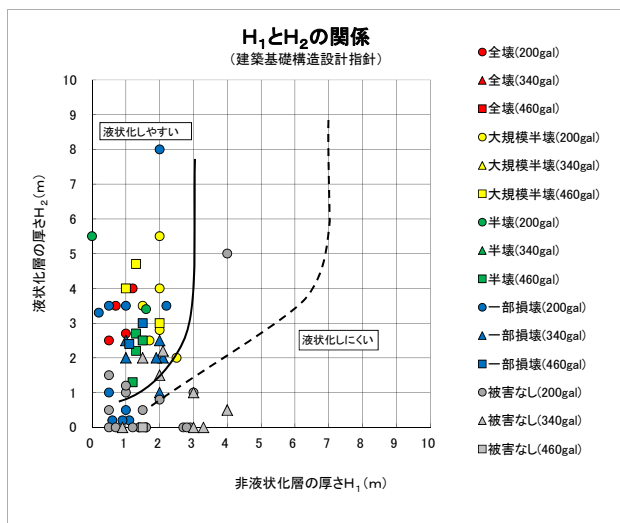
(a) 通常の液状化判定 (地山1.0倍) した場合



(b) 年代効果を考慮 (地山1.4倍) した場合

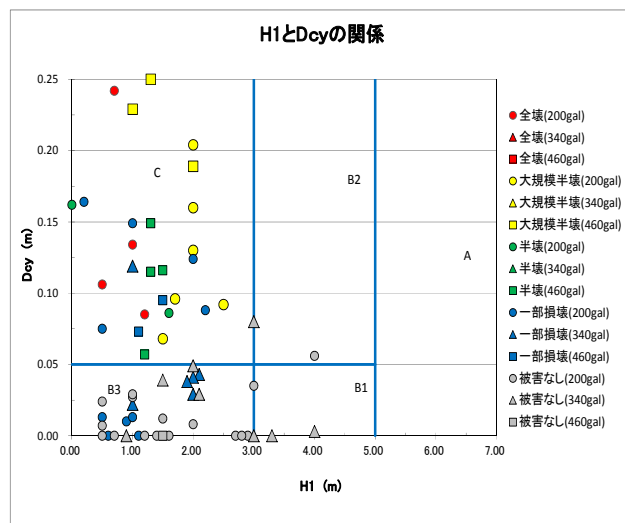


(b) 年代効果を考慮 (地山1.4倍) した場合



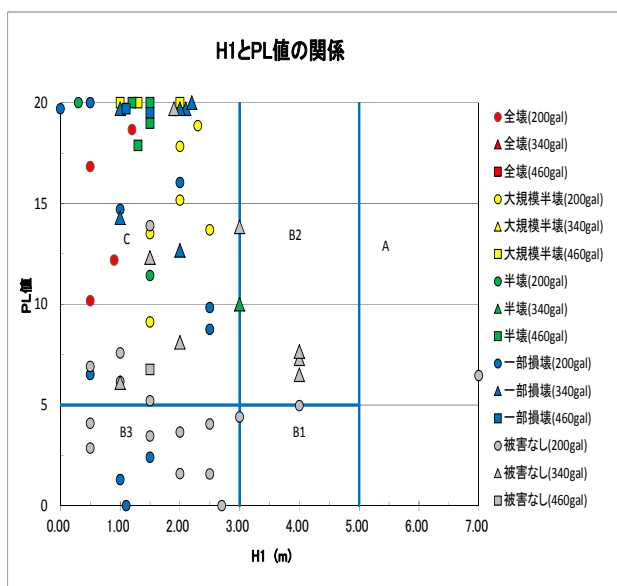
(c) 地山を液状化しないと判定した場合

図-29 H₁-H₂法による判定結果 (今次災害)

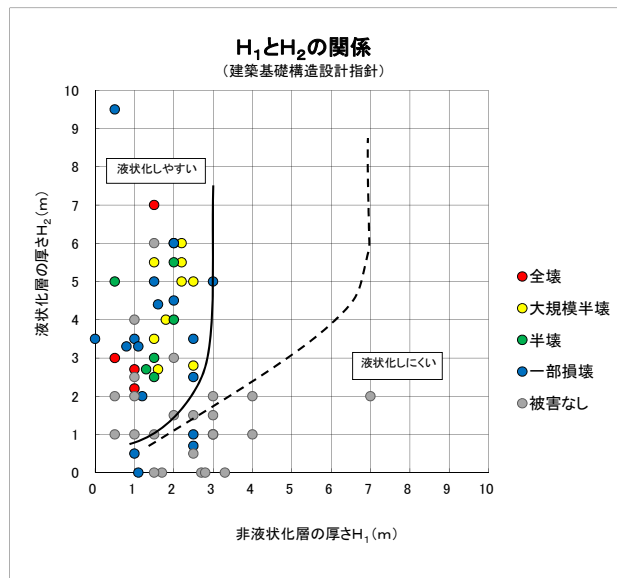


(c) 地山を液状化しないと判定した場合

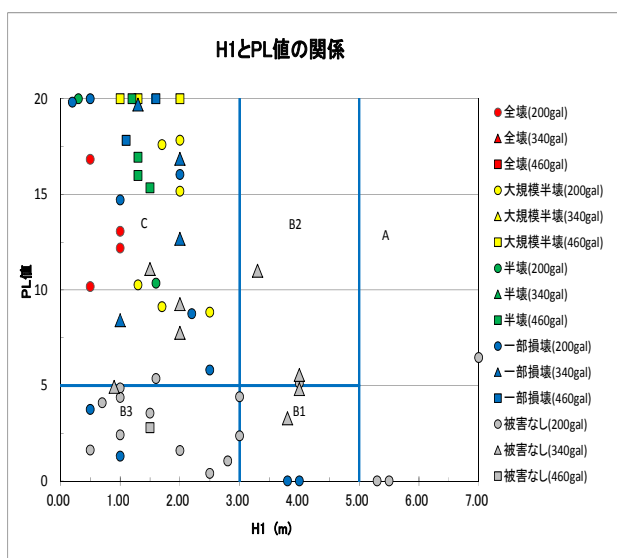
図-30 建築H₁-D_{cy}法による判定結果 (今次災害)



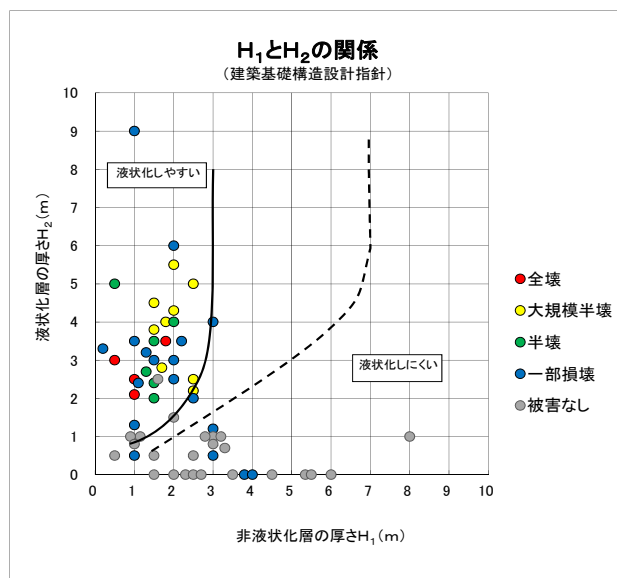
(a) 通常の液状化判定（地山1.0倍）した場合



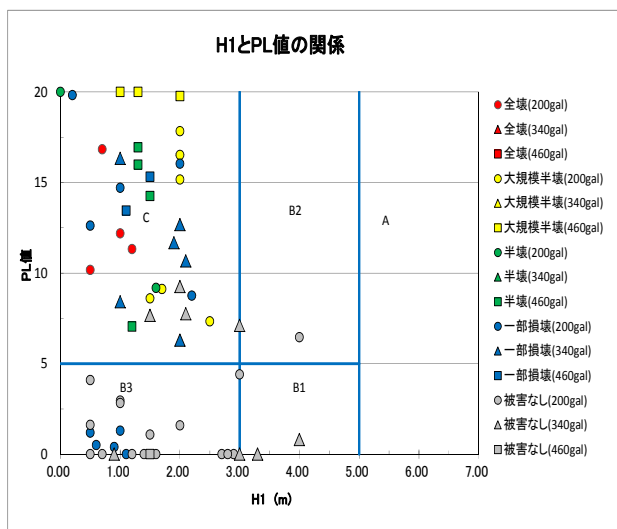
(a) 通常の液状化判定（地山1.0倍）した場合



(b) 年代効果を考慮（地山1.4倍）した場合

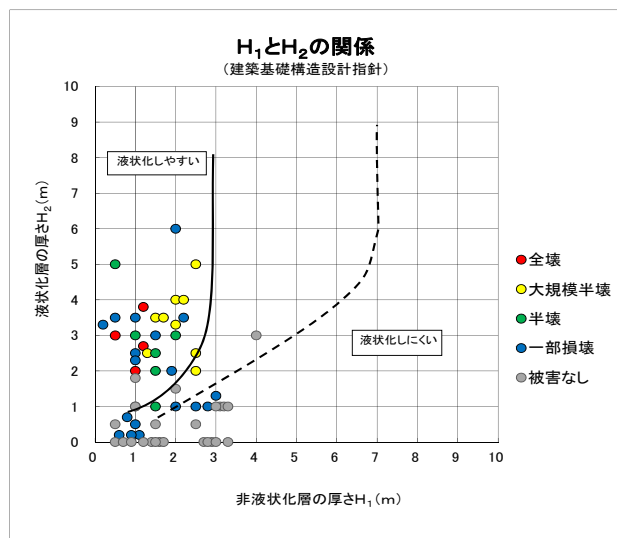


(b) 年代効果を考慮（地山1.4倍）した場合



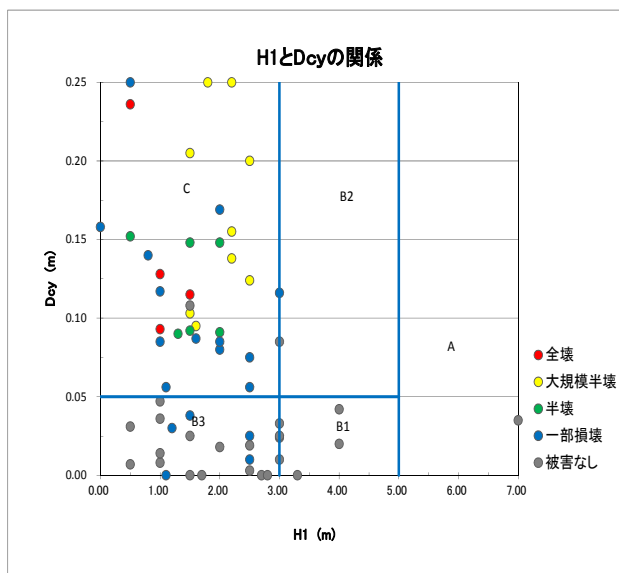
(c) 地山を液状化しないと判定した場合

図-31 建築H₁-P_L法による判定結果（今次災害）

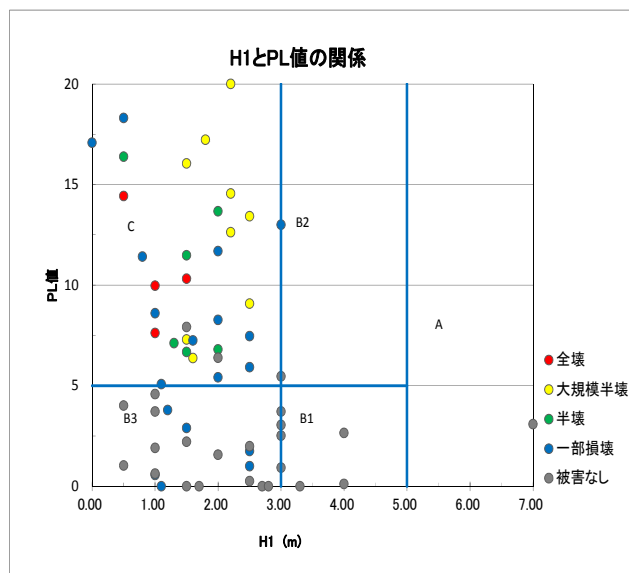


(c) 地山を液状化しないと判定した場合

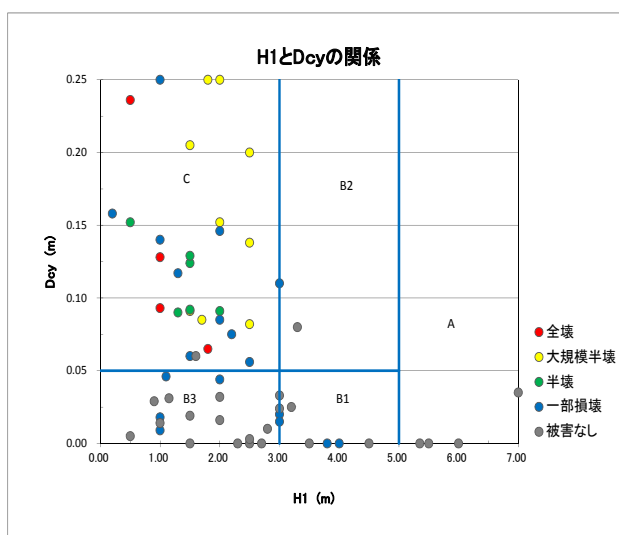
図-32 H₁-H₂法による判定結果(M7.5,200gal)



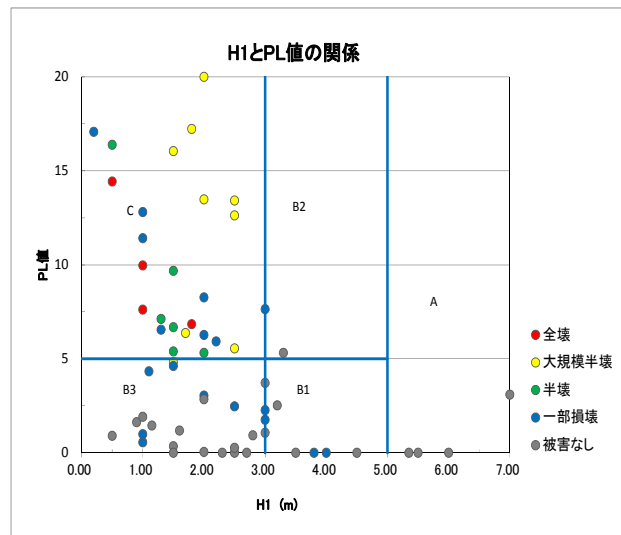
(a) 通常の液状化判定（地山1.0倍）した場合



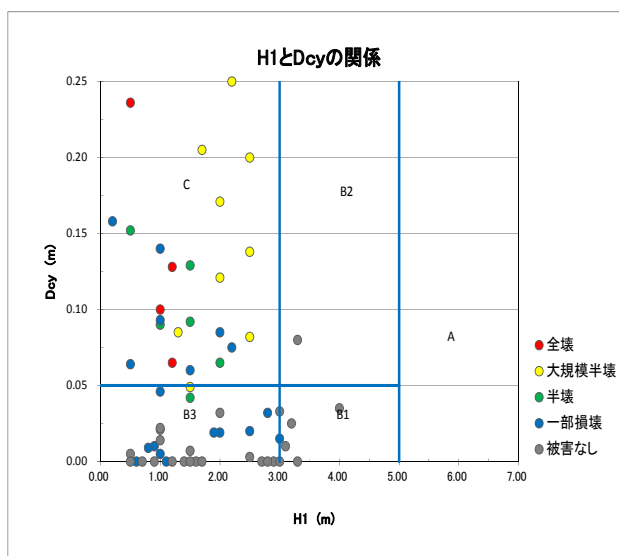
(a) 通常の液状化判定（地山1.0倍）した場合



(b) 年代効果を考慮（地山1.4倍）した場合

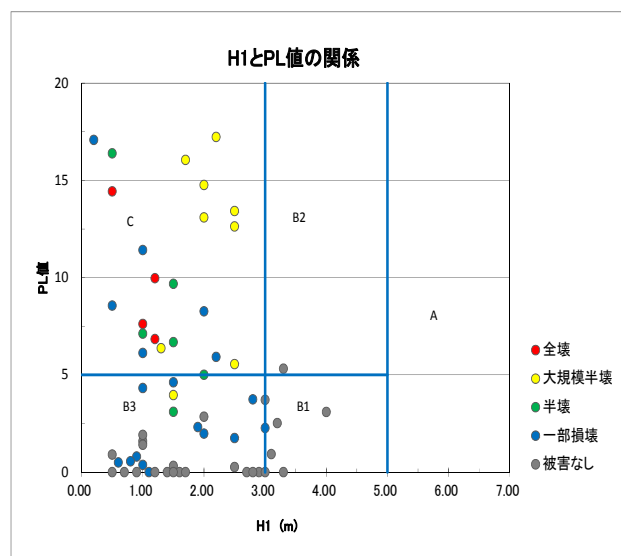


(b) 年代効果を考慮（地山1.4倍）した場合



(c) 地山を液状化しないと判定した場合

図-33 建築H₁-D_{cy}法による判定結果(M7.5,200gal)



(c) 地山を液状化しないと判定した場合

図-34 建築H₁-P_L法による判定結果(M7.5,200gal)

4. まとめ

東北地方太平洋沖地震で液状化による戸建て住宅の被害のあった地区の中から、地震前のボーリング調査結果を収集し、かつ直上の建物被害を罹災証明により被害程度を分類することができる5区を選定した。この各地区について、 H_1 - H_2 法、建築 H_1 - D_0 法、建築 H_1 - P_L 法を用いて液状化の可能性の判定を行った。

M9.0, 200gal以下では、各地区で H_1 が3m未満の液状化しやすいエリアに被害箇所が分布する傾向はみられる。各判定法では、実際の被害程度との整合性を確認し、いずれの手法を用いた場合も、液状化被害が確認された地点は液状化の影響や程度が相対的にやや大きいと評価される傾向はうかがえたものの、液状化被害の程度を区分するほどの明確な差は確認されなかった。その理由として、①軟弱粘性土層の変状の影響、②液状化強度に対する地盤生成年代の影響が課題として挙げられた。そこで、液状化判定手法について、①軟弱粘性土層の変状の影響、②液状化強度に対する地盤生成年代の影響を考慮し、東北地方太平洋沖地震の宅地の液状化被害を概ね判断できることが明らかとなった。また、さらに地山を液状化させない場合の液状化被害程度の判定を行った結果、精度の高い判定ができることが明らかとなった。

ただし、設計の場合には危険性を過大評価することが安全側の配慮となるため、年代効果は考慮するか否かは十分な土質試験結果から判断する必要があると考えられる。

以上の液状化の可能性の判定を行った検討の結果、建築 H_1 - D_0 法、建築 H_1 - P_L 法を用いた簡易判定手法のいずれの方法もABCの3つのゾーンで区分し、液状化被害の可能性を概ね評価できることが明らかとなった。なお、本提案の目的は、あくまで宅地の性能（液状化被害の可能性）を評価することであり、設計とは異なることに留意頂きたい。

謝辞：本論文は、H24年度国土交通省既成市街地における公共施設と隣接宅地等との一体的な液状化対策等検討業務の検討成果の一部を取りまとめたものである。また、調査に関し我孫子市、潮来市、神栖市、千葉市、習志野市の各市の多くの担当の皆様へ情報提供をいただきました。この場を借りて関係各位様に厚く御礼を申し上げます。ありがとうございました。

参考文献

- 1) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針, 2001.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 2012.
- 3) 国土交通省都市局：宅地の液状化被害可能性判定に

係る技術指針・同解説（案），

<http://www.mlit.go.jp/common/000993757.pdf>. (2013年9月6日閲覧)

- 4) 西丸・佐藤・加藤・吉田・東畑：東北地方太平洋沖地震における宅地の液状化被害の再現性に着目した液状化被害可能性の簡易判定手法の構築（その1），土木学会第68回年次学術講演会, 2013.
- 5) 佐藤・西丸・加藤・吉田・東畑：東日本大震災における宅地の液状化被害の再現性に着目した液状化被害可能性の簡易判定手法の構築（その2），土木学会第68回年次学術講演会, 2013.
- 6) 地盤に係る住家被害認定の調査・判定方法，<http://www.bousai.go.jp/taisaku/pdf/20110502-jimu.pdf> (2013年9月6日閲覧)
- 7) 災害に係る住家の被害認定基準運用指針，<http://www.bousai.go.jp/taisaku/pdf/shishinall.pdf> (2013年9月6日閲覧)
- 8) 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説明報告書，pp.4, 2011.8., http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000043569.pdf (2013年9月6日閲覧)
- 9) <http://www.mapfan.com/> (2013年9月6日閲覧)
- 10) 我孫子市液状化対策検討委員会：第5回検討委員会資料 (2013年8月22日開催)
- 11) 我孫子市：東北地方太平洋沖地震災害対策本部総括報告書 <http://www.city.abiko.chiba.jp/index.cfm/18,73887,c,html/73887/20120224-113923.pdf>, (2013年9月6日閲覧)
- 12) 原田慶子：切所沼と我孫子の治水，我孫子ーみんなのアルバムからー, 2004
- 13) 国土地理院：5万分1地形図，龍ヶ崎（昭和3年修正）
- 14) 我孫子市液状化対策検討委員会：第4回検討委員会資料 (2013年5月28日開催)
- 15) 国土交通省都市局：東日本大震災による液状化被災市街地における復興対策検討調査業務報告書, 2013.
- 16) 神栖市液状化対策検討委員会：第6回検討委員会資料 (2013年8月2日開催)
- 17) 国土交通省：http://www.mlit.go.jp/toshi/toshi_fr1_000010.html (2013年9月6日閲覧)
- 18) 千葉市都市局都市部市街地整備課・株式会社千代田コンサルタント：平成24年度液状化対策検討業務委託報告書 (2013年3月)
- 19) 株式会社千代田コンサルタント：既成市街地における公共施設と隣接宅地等との一体的な液状化対策等検討業務地質調査報告書（習志野地区），2013.
- 20) 国土庁：液状化地域ゾーニングマニュアル, 1999.

- 21) UR 都市機構：宅地耐震設計マニュアル(案), 2018.
22) 国土交通省・国土技術政策総合研究所：宅地の液状化被害可能性判定計算シート,
<http://www.nilim.go.jp/lab/jbg/takuti/takuti.html>.Excel. (2013 年 9 月
6 日閲覧)

- 23) 田口・東畑・青山・大坪：東北地方太平洋沖地震による東京湾周辺地帯の液状化に基づく年代効果の検討, 第47 回地盤工学研究発表会, 2012.

(2013. 9. 12 受付)

VALIDATION OF A SIMPLE DETERMINATION METHOD OF LIQUEFACTION DAMAGE POTENTIAL OF RESIDENTIAL LAND IN 2011-TOHOKU (NORTHEAST) EARTHQUAKE

Takao HASHIMOTO, Kiyoshi SOKAWA, Tatu AKASHI, and Masamiki OHASHI

The East-Japan Earthquake of March 2011 caused severe liquefaction in a wide area of Kanto district in built up areas and river dikes. Many single-unit houses, lifeline facilities, roads, and river dikes were severely damaged due to liquefaction. Based on this in February 2013, the Ministry of Land Infrastructure and Transport compiled technical guidelines on evaluating the probability of liquefaction in residential areas. However, application of the guidelines has not been given detailed considerations so far. Therefore, this paper has attempted to a simple way of determining the liquefaction damage evaluation through combining multiple criteria based on the guidelines and boring data of 5 residential areas where residential damage is similarly evident. This method can be also used for future disasters when the earthquake has different movements.