

表層改良による液状化変状抑制効果の一評価法

佐原 守 西山 高士 樋口 俊一
山本 彰 石井 雄輔

Simplified Evaluation Method for Structure Settlement due to Liquefaction on Shallow Ground Improvement

Mamoru Sahara Takashi Nishiyama Shunichi Higuchi
Akira Yamamoto Yusuke Ishii

Abstract

Severe damage was reported for many infrastructures and detached houses caused by ground liquefaction due to the Great East Japan Earthquake, in 2011. Although ground improvement methods, such as soil-cement mixing are typical liquefaction countermeasure, the whole depth of soil deposits predicted to have potential liquefaction is treated. Damage investigations and laboratory studies have shown that settlement of lightweight structures due to liquefaction is reduced according to the depth of the ground improvement underneath. Therefore, a prediction method for settlement is desired for reasonable and practical design. This paper describes a simplified evaluation method for structure settlement due to liquefaction. This method is based on the results of parametric studies using two-dimensional effective stress analysis, which can consider the effect of shallow ground improvement on the displacement of a structure due to liquefaction.

概要

小規模建築物を対象として、液状化層の上部にある程度非液状化層が堆積している場合、地表面への影響が大幅に軽減されることが、定性的に示されている。非液状化層を表層改良とし、表層改良による液状化変状抑制効果を定量的に評価できると、軽微な構造物や軽量構造物を対象とした合理的な液状化対策法となる。2011年の東北地方太平洋沖地震により、浦安地区で液状化が発生し住宅の被害事例が報告されている。まず、この事例を対象として、大林組開発の動的有効応力解析プログラムO-EFFECTTMによるシミュレーション解析を実施し、その有効性を確認した内容を示す。つぎに、この解析プログラムを用い、代表的な諸条件を組合せて実施した数値解析結果を、複数のノモグラムとしてまとめ、これらを利用した対策効果の評価法を提示する。

1. はじめに

液状化対策を施す深度範囲は、液状化層の全深度を対象とする事が基本とされている。重要構造物や重量構造物を対象とする場合、適用可能であるが、軽微な構造物や軽量構造物を対象とする場合、経済的な制約から、全深度に対策を施すことは困難である場合が多い。2011年の東北地方太平洋沖地震では、震源から約400km離れた東京湾岸の埋立て地盤においても大規模な液状化が発生し、液状化対策の施されていない地盤に直接支持されていた軽微な構造物や軽量構造物に液状化変状被害が集中した。

1969年の新潟地震発生後、住宅を対象に行われた液状化変状被害調査結果を踏まえ、液状化層の上部にある程度の厚さの非液状化層が堆積していた場合、液状化による地表面の影響が軽微であることが指摘¹⁾されている。この指摘内容は、後に種々のマニュアル・手引き・指針類^{2) - 5)}に引用されている。非液状化層を、積極的に表層改良層と見なすことによって、軽微な構造物や軽量構

造物を対象とした合理的な液状化変状抑制対策となり得る。ただし、引用成果は、影響を「小・中・大」と定性的な評価に留めているため、これを積極的に利用した設計・施工の報告例は非常に少ない。表層改良による液状化変状抑制効果を有効活用する対策法として、道路を対象とした対策法⁶⁾もあるが、本報では軽微な構造物や軽量構造物を対象とする対策法を扱う。具体的には、接地圧20kN/m²程度以下の小規模倉庫・設備基礎・配管架台・外構・駐車場等を対象とする。

本報では、まず大林組開発の動的有効応力解析プログラムO-EFFECT⁷⁾を用い、浦安地区の住宅の液状化変状調査結果を対象としたシミュレーション解析を行い、その有効性を確認した内容を示す。つぎに、この解析プログラムを用い、代表的な諸条件「地震波、地表面沈下量、構造物寸法、液状化層厚、表層改良厚、接地圧」を組合せて実施した数値解析結果を複数のノモグラムとしてとりまとめ、これらを利用した液状化変状抑制効果の評価法を提示する。

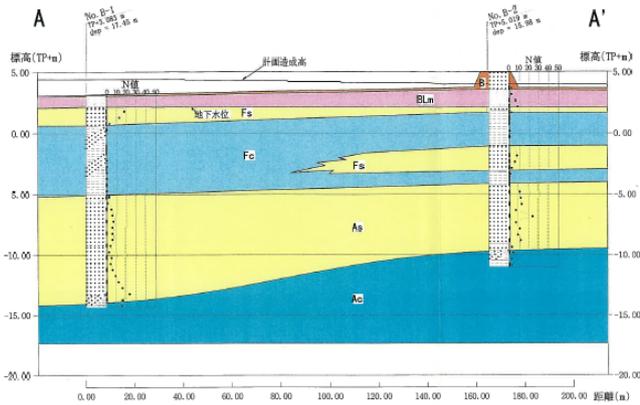


Fig. 1 地層想定断面図
Stratum Section

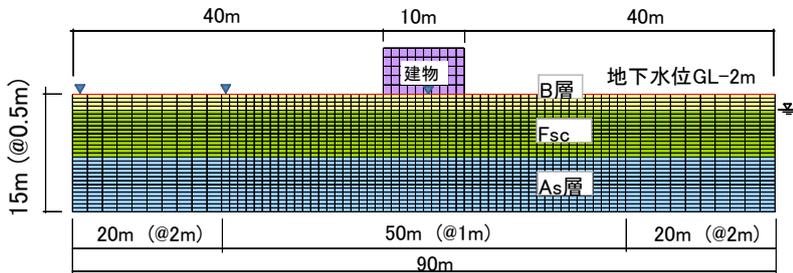


Fig. 2 解析モデル
Analysis Model

Table 1 主な解析地盤定数
Soil Properties for Analysis

地層	①B	②Fsc	③As
標高(m)	GL0.0~ GL-2.0	GL-2.0~ GL-8.0	GL-8.0~ GL-15.0
Vs(m/s)	75	100	160
単位体積重量(kN/m ³)	16(湿潤)	18(飽和)	18(飽和)
内部摩擦角φ(°)	35		37
液状化強度RL	—	0.16	0.22
透水係数(m/s)	—	5.0×10 ⁻⁵	1.4×10 ⁻⁴

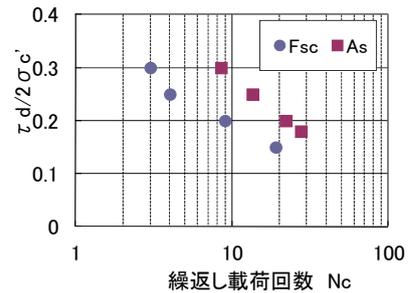


Fig. 3 要素シミュレーション
による液状化強度曲線
Liquefaction Resistance Curve

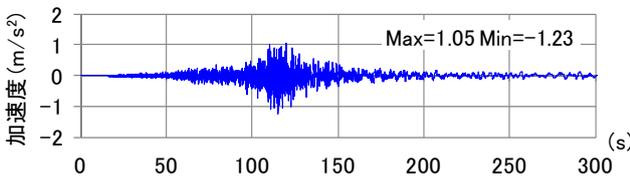


Fig. 4 入力地震動時刻歴(CHB0008EW引き戻し波)
Time History of Input Motion

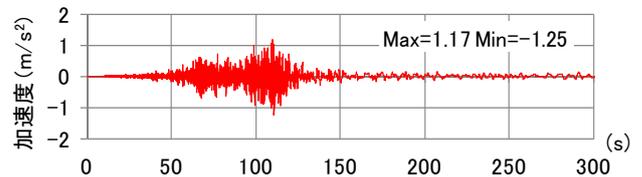


Fig. 5 地表面加速度時刻歴(モデル左端部)
Time History of Surface Acceleration

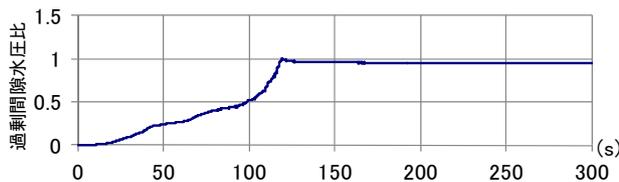
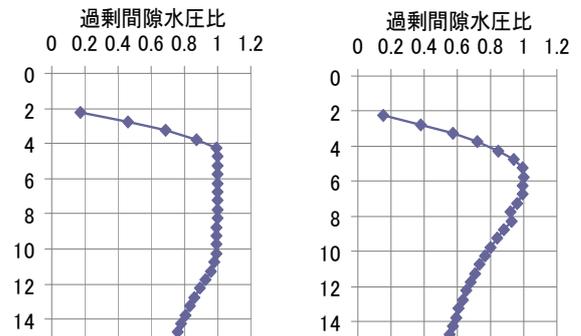


Fig. 6 地中の過剰間隙水圧比時刻歴(住宅直下, GL-6.25m)
Time History of Excess Pore Water Pressure Ratio



(a) CHB0008EW (b) 告示稀波
Fig. 7 地中の最大過剰間隙水圧比分布
Maximum Excess Pore Water Pressure Ratio

2. 住宅の液状化変状事例のシミュレーション解析⁸⁾

2.1 解析概要

利用したO-EFFECTは、2次元動的有効応力解析プログラムであり、土骨格と間隙水の連成効果を評価した飽和多孔質媒体のBiotの多次元圧密方程式を基礎としている。地盤構成モデルは松岡モデルを基礎とし、液状化後の砂の再圧密モデルに、せん断履歴を考慮した体積収縮モデルを導入している。

ルを導入している。

2.2 解析モデル

Fig.1に浦安地区の対象位置の地層想定断面図を示す。

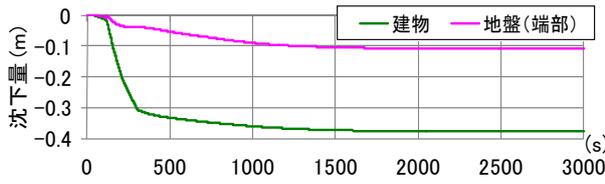


Fig. 8 沈下時刻歴
Time History of Settlement

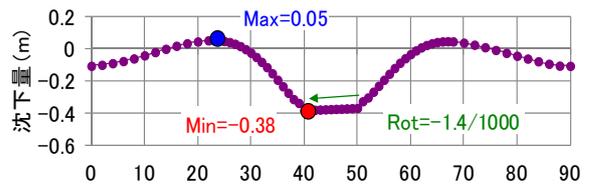


Fig. 9 地表面高さの変化 (CHB008EW)
Change of Surface Height

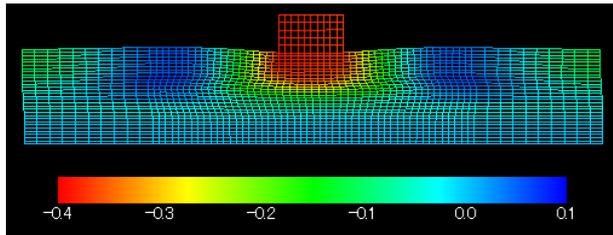


Fig. 10 最終変形図(単位: m)
Residual Deformation

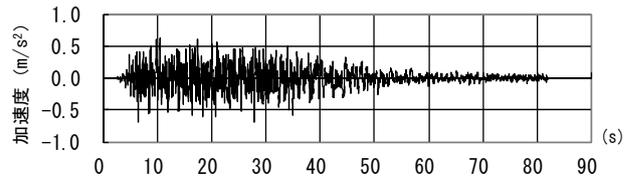


Fig. 11 入力地震動時刻歴(告示稀波)
Time History of Input Motion

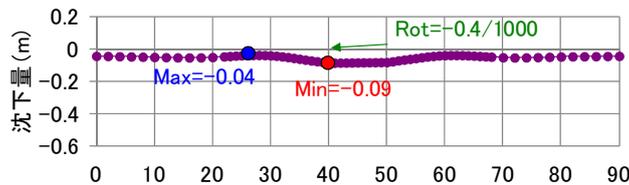


Fig. 12 地表面高さの変化(告示稀波)
Change of Surface Height

上位より「①盛土(B), ②浚渫埋土(Fsc), ③沖積砂層(As), ④沖積粘性土層(Ac)」の順の地層構成であるが、表層部の液状化の影響のみを考慮することから、解析では①～③をモデル化した。Fig.2に解析モデルを示す。地下水位はGL-2mに設定した。深度方向は、単純化のため層厚15mの地層構造を仮定した。水平方向は、90mの範囲をモデル化した。左右両端の境界は、MPC(多自由度間の変位拘束条件: Multi-Point Constrain)機能を利用し、等変位拘束条件を満足する周期境界とした。

解析地盤定数については、土質試験等の詳細なデータが得られていないことから、N値等を参考にTable 1に示す値を設定した。②の浚渫埋土については、砂混りシルトとし、比較的小さな透水係数を仮定した。液状化強度は道路橋示方書を参考に設定した。各層に設定した土質パラメーターを用いて実施した繰返し単純せん断試験シミュレーションによる液状化強度曲線をFig.3に示す。

住宅の間口を10mと想定し、接地圧は 8kN/m^2 とした。住宅基礎の変形は考慮せず、基礎に十分大きな剛性を与え、工学的に剛となるように設定した。

解析は、住宅の荷重を考慮した初期自重解析と、その後地震動を入力する動的解析の2ステップで実行した。動的解析は地中の過剰間隙水圧の消散を考慮して3,000secの継続時間とした。入力地震動は、東日本大震災におい

て千葉県浦安市の地表面で観測された地震動(防災科学技術研究所, k-net, CHB008EW)となるように地震動を作成した。具体的には、解析モデルの深度範囲を④の沖積粘性土層(Ac)以浅として扱っているため、④層上面における入力地震動を、地表面で観測された地震動をSHAKEで引き戻して作成し、これを解析用入力地震動とした。Fig.4にその入力地震動時刻歴を示す。

2.3 解析結果

得られた解析結果として、Fig.5に地表面加速度時刻歴を、Fig.6に地中の過剰間隙水圧時刻歴をそれぞれ示す。Fig.6より、時刻 $t=120\text{sec}$ 付近で液状化状態に達していると考えられ、地表面加速度時刻歴においても、それ以降は、時刻 $t=50\sim 100\text{sec}$ に見られるような加速度振幅が増大する傾向がなくなる。Fig.7(a)に地中の最大過剰間隙水圧比分布を示す。同図より、液状化の発生深度範囲は、GL-4 \sim -10mであることが分かる。Fig.8に建物および地表面の沈下時刻歴を示す。地盤の沈下は地震後に生じる割合が大きいが、建物の沈下は主に地震中に生じている。すなわち、住宅直下地盤の沈下は、主に地震時の繰返しせん断応力の作用に伴う沈下であり、遠方地盤のそれは主に地震後の圧密沈下であると考えられる。Fig.9に地表面高さの変化を示す。住宅部分では0.4m程度の沈下が見

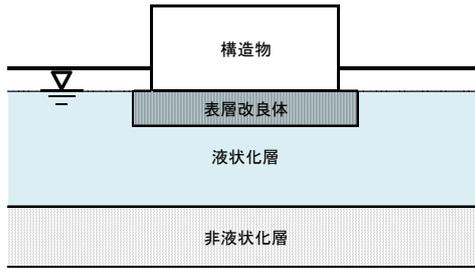


Fig.13 表層改良による液状化対策工
Schematic Diagram of Liquefaction Countermeasure
by Shallow Ground Improvement

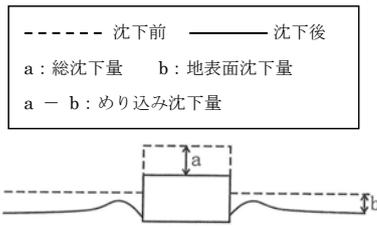


Fig.15 沈下量の説明図
Definition of Settlement

られるが、これは東日本大震災の被害調査における既往の報告^{8, 9)}と整合する。以上、詳細な土質試験データが無かったため、せん断波速度 V_s 等を参考にして、各種の地盤定数を推定して得た数値解析結果ではあるが、実挙動を概ね再現できることを確認した。

Fig.9を見ると、住宅から15m程度離れた場所では、地表面が隆起していることが分かる。これをFig.10の最終変形図から考察すると、住宅直下の地盤が大きくせん断変形し、周辺にせり出すように変形したことにより、表層地盤が押し上げられて隆起したものと推察する。遠方地盤における地表面の沈下量は0.1m程度である。

比較のために、Fig.11に示す告示稀波（最大加速度振幅0.67m/sec²・ランダム位相・継続時間80sec）を入力地震動としたシミュレーション解析も実施した。Fig.7(b)に地中の最大過剰間隙水圧比分布を、Fig.12に地表面高さの変化を示す。告示稀波の場合、地盤の液状化はほぼ限定された範囲のみで発生し、地表面変位や住宅沈下量も小さい。同一地盤であっても、作用する地震動の種類が異なると、発生する液状化変状の程度も大きく異なることが分かる。

3. 表層改良による変状抑制効果の一評価法

表層改良による液状化対策工の模式図をFig.13に示す。表層改良体は、ソイルセメントを用いた固化系地盤改良体を想定している。一般的なバックホウを用いて現実に施工可能な厚さを考慮に入れて、表層改良厚は1m, 2mおよび3mの3種類の値を扱う。また、構造物の接地圧 p が20kN/m²程度以下の軽量構造物を対象とする。Fig.14に、表層改良による液状化変状抑制効果の評価の流れを

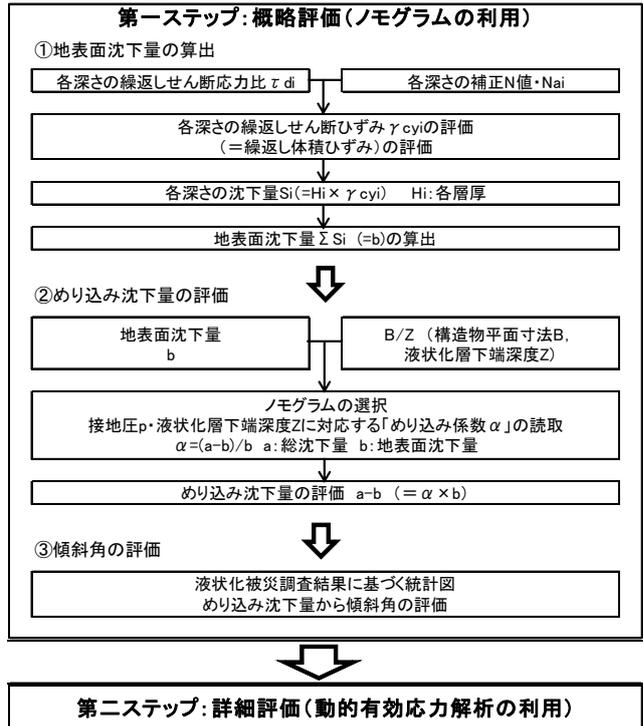


Fig.14 液状化変状抑制効果の評価の流れ
Flow of Evaluation Method
for Structure Settlement due to Liquefaction

示す。第一ステップとして概略評価を行い、その後の第二ステップにおいて動的有効応力解析を直接用いた詳細評価を行う。本報では、ノモグラムを利用した概略評価法を提示する。

構造物の平面寸法は $B \times B$ (m)と、等価面積の正方形に置換して扱い、表層改良厚を H_1 と表す。Fig.15に沈下量の説明図を示す。総沈下量を a 、地表面沈下量を b 、めり込み沈下量を $a-b$ 、めり込み係数 α を $(a-b)/b$ と定義する。概略評価は次の3段階の手順を踏む。「1.地表面沈下量の算出」、「2.めり込み沈下量の評価」、「3.傾斜角の評価」。以下、各手順の詳細内容を示す。

3.1 地表面沈下量の算出

建築基礎構造設計指針では、液状化層で発生するせん断ひずみを体積ひずみと読み換え、各層厚に各体積ひずみを乗じて該当層で発生する沈下量とし、それらの総和を液状化後の地表面沈下量と評価する考え方が示されている。この考え方では、一般に F_L 法と称される液状化判定を行えば、簡易に地表面沈下量を算出できることから、本報で扱う概略評価法に適していると判断した。

Table 2に示す液状化判定結果が得られた場合を例に挙げ、具体的な地表面沈下量の算出手順を説明する。Table 2の右端の欄に示す「繰返しせん断変位 D_{cy} 」を各層で発生する沈下量と読み換えることができるので、液状化後の地表面沈下量として全層の総和である $b=3.6$ cmを得る。

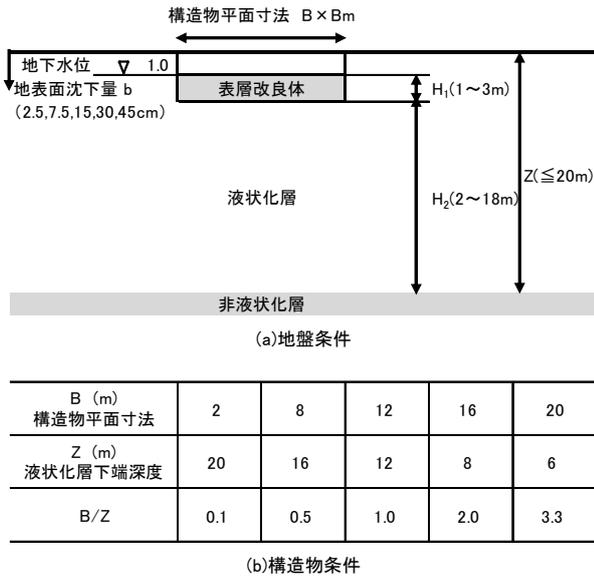


Fig. 16 地盤および構造物の諸条件
The Conditions of Stratum and Structure

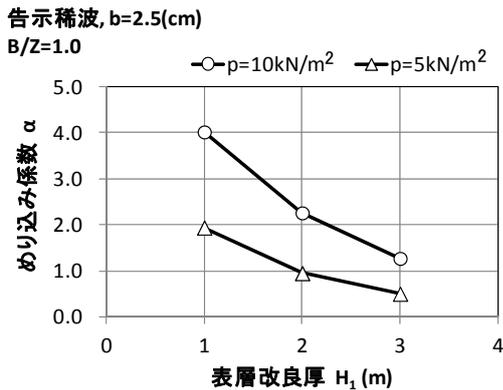


Fig. 17 ノモグラムの一例
(告示稀波, b=2.5(cm), B/Z=1.0)
An Example of Nomogram

3.2 めり込み沈下量の評価

地表面沈下量b, 構造物平面寸法Bと液状化層下端深度Zとの比B/Zおよび改良体下の接地圧pに応じたノモグラムを複数用意して, それらから条件に近いものを選択し, めり込み沈下量を読み取ることを考えた。Table 3は建築基礎構造設計指針で示される地表面沈下量と液状化の程度の関係である。これを参考として, bの代表値として, 2.5,7.5,15,30,45cmの5ケースを考えた。ノモグラム作成のための数値解析に用いた地盤および構造物の諸条件をFig.16にまとめて示す。地下水位深度は1m, B/Zは0.1, 0.5,1.0,2.0,3.3の5ケースを考えた。解析モデルの左右両端の境界は, 2章での解析と同様のMPC境界条件とし, 入力地震動を液状化層下端深度に与えた。逆解析を実施して, 液状化層の全深度において, ほぼ同時に液状化が

Table 2 液状化判定結果の一例
An Example of Liquefaction Judging Result

No	深度 GL- m	N値	修正 N値	全応力	有効 応力	液状化 抵抗比	繰返し せん断 応力比	液状化 安全率	繰返し せん断 変位 ΔDcy cm	
			Na	σ_v kN/m ²	σ'_v kN/m ²	τ/σ'_z	τ_d/σ'_z	F_L		
1	1.3	5	19.2	23.4	23.4	***	***	***	***	
2	2.3	9	23.4	41.4	38.5	0.36	0.17	2.11	0.0	
3	3.3	11	24.9	59.4	46.7	0.46	0.20	2.31	0.0	
4	4.3	15	29.1	77.4	54.8	0.60	0.22	2.78	0.0	
5	5.3	8	19.0	95.4	63.0	0.22	0.23	0.95	0.6	
6	6.3	15	26.6	113.4	71.2	0.60	0.24	2.55	0.0	
7	7.3	20	31.2	131.4	79.4	0.60	0.24	2.49	0.0	
8	8.3	12	21.6	150.9	89.1	0.28	0.24	1.17	0.0	
9	9.3	13	21.9	170.4	98.8	0.30	0.24	1.22	0.0	
10	10.3	8	16.6	189.9	108.5	0.18	0.24	0.75	1.1	
11	11.3	7	15.4	209.4	118.2	0.17	0.24	0.71	1.4	
12	12.3	6	14.3	228.9	127.9	0.16	0.24	0.67	0.5	
									Σ	3.6
										=b cm

Table 3 地表面沈下量と液状化の程度
Surface Settlement and Liquefaction Grade

地表面沈下量 b cm	液状化の程度
0	なし
~5	軽微
5~10	小
10~20	中
20~40	大
40~	甚大

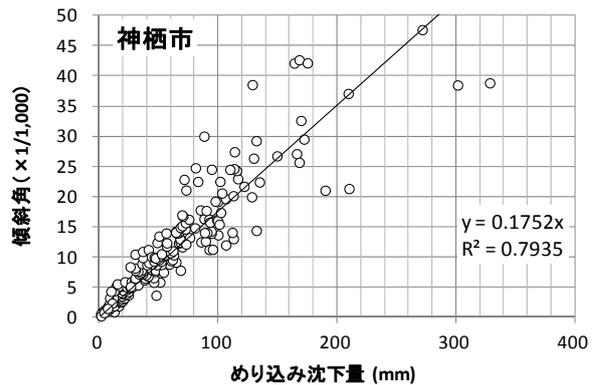


Fig. 18 めり込み沈下量~傾斜角関係の一例¹⁾
An Example Penetrated Settlement and Inclination

発生するように地盤の液状化強度を設定した。

一例として, Fig.11に示す告示稀波を入力地震波として与え, b=2.5cm, B/Z=1.0, p=5,10kN/m²の場合の数値解析結果から得たノモグラムをFig.17に示す。横軸は表層

改良厚 H_1 ，縦軸はめり込み係数 α である。 H_1 に応じた α を，このノモグラムから読み取る。地表面沈下量 b にこの α を乗じて，めり込み沈下量 $a-b$ を評価する。

3.3 傾斜角の評価

本報で扱う軽量構造物の場合，基礎全体が傾斜する場合が多いため，液状化変状は傾斜角で決まると考え，この傾斜角を変状の程度を表す指標とした。Fig.18は東日本大震災後，千葉市の住宅を対象に行われた液状化後のめり込み沈下量と傾斜角の被災調査結果の一例¹⁰⁾である。めり込み沈下量の大きさに応じて，傾斜角も増大していることが分かる。このような被災調査結果図を利用して，めり込み沈下量から傾斜角を評価する。

4. 結論

本報で得られた主要な結論を，以下にまとめて示す。

- 1) 東北地方太平洋沖地震によって浦安地区で発生した液状化による住宅の実測沈下量を対象とし，大林組開発の動的有効応力解析プログラムO-EFFECTを利用した数値解析的検討を行った。その結果，地表面加速度は小さいものの，継続時間の長い海溝型地震動の作用により，大きな液状化変状が発生し，地表面沈下量も定量的にはほぼ実測値と同等の解析値を得ることを確認した。
- 2) 有効性を検証した動的有効応力解析プログラムを利用し，「地震波，地表面沈下量，構造物寸法，液状化層厚，表層改良厚，接地圧」を種々組合せたケースの動的有効応力解析を実施した。得られた解析結果を利用し易いノモグラムの形に整理してまとめた。液状化による地表面の変状を傾斜として捉え，これらのノモグラムを利用して，一般に F_L 法と呼ば

れる液状化判定結果を利用することによって，地表面の傾斜角を評価可能な評価法を提示した。

参考文献

- 1) Ishihara, K.: Stability of natural deposits during earth quakes, 11th Inter. Conf. on Soil Mech. and Foundation Eng., Vol.1, p.321-376,(1985)
- 2) 住宅都市整備公団：宅地耐震設計マニュアル(案)，p.36-38,(2003)
- 3) 液状化対策工法，地盤工学・実務シリーズ18：地盤工学会，p.210,(2004)
- 4) 造成宅地における耐震調査・検討・対策の手引き—地震から既存の住宅を守るために—，地盤工学会関東支部・造成宅地の耐震調査・検討・対策方法に関する検討委員会，p.126,(2007)
- 5) 小規模建築物基礎設計指針，日本建築学会，p.90,(2008)
- 6) 伊藤浩二，他：液状化地盤上の地震時道路変状防止対策「タフロード®」，大林組技術研究所報，No.75,(2011)
- 7) 樋口俊一，他：繰返しせん断履歴を考慮した砂の再圧密モデルを用いた液状化地盤の有効応力解析，第42回地盤工学研究発表会，p.1641-1642,(2007)
- 8) 川崎淳志，他：液状化に伴う戸建住宅の被害と分析(その1：東日本大震災における被害の事例，その2：有効応力解析による沈下分析の概要，その3：被害事例の解析結果)，第47回地盤工学研究発表会，p.1393-1398,(2012)
- 9) 例えば，安田進，他：東日本大震災における東京湾岸の液状化による家屋の傾斜に関する考察，日本地震工学会大会梗概集，p.108-109,(2011)
- 10) 橋本隆雄，他：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，p.1487-1488,(2012)