格子状地中壁工法の液状化対策効果に関する簡易評価シート

SIMPLIFIED EVALUATION METHOD ABOUT EFFECT OF LIQUEFACTION COUNTERMEASURE FOR THE GRID-FORM DEEP MIXING WALLS

内田明彦 ——— * 1 津國正一 ——— * 2
明石達生 ——— * 3 大橋征幹 ——— * 4
新井 洋 ——— * 5

Akihiko UCHIDA ——— * 1 Shoichi TSUKUNI ——— * 2
Tatsuo AKASHI ——— * 3 Masamiki OHASHI ——— * 4
Hiroshi ARAI ——— * 5

キーワード：
液状化, 格子状地中壁, 簡易評価

Keywords:
Liquefaction, Grid-form deep mixing walls, Simplified evaluation

The grid-form deep mixing walls method is one of the liquefaction countermeasure methods. In order to design the grid-form deep mixing walls, it is necessary to carry out seismic response analysis with FEM model based on the result of soil investigations. Few geotechnical engineers can design the method because it is difficult to conduct of the analysis.

In this report, the simplified evaluation tool is introduced that the effect of the liquefaction countermeasure can be judged. To confirm the effectiveness of the tool, Dcy values considered the effect of grid-form walls are compared with settlements of centrifuge model tests.

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、東京湾岸地域を中心とする広範囲な軟弱地盤において液状化が発生し、多くの戸建て住宅が沈下や傾斜などの被害を受けた。道路と宅地の一体的な液状化対策として、格子状地中壁工法が有力な工法の一つとして検討され、浦安市の液状化対策実現性検討委員会（以下、検討委員会と略す）では具体的な検討業務も実施されている¹⁾。格子状地中壁工法の適用にあたっては、地中壁を構成する改良体の仕様などを地盤データに応じて設定し、地震応答解析を実施して効果を確認するのが一般的な設計方法である。このため、地盤に関する専門知識を有した技術者でないと格子状地中壁工法の検討ができない状況であった。

本報告では、格子状地中壁工法の液状化対策効果を簡易に判定することを目的とした簡易評価シートを作成したので紹介する。さらに、遠心模型実験結果との比較を行い簡易評価シートの有効性について検討した結果について述べる。

2. 簡易評価シートの作成手順

格子状地中壁工法はセメント系固化材などで地盤を平面的に格子状に改良し、地中壁による地盤の変形抑制によって液状化を抑止する工法である。格子状地中壁工法の一般的な設計法は次の通りである。①地中壁の仕様（格子間隔、深さ、改良強度、壁厚など）を仮定、②地中壁による地盤の拘束効果を表現可能なFEMモデルを用いて未改良地盤部も含めた地盤モデルを作成、③所定の地震動に対して地震応答解析を実施、④格子内地盤（未改良地盤）の液状化可能性を確認、⑤発生応力に対する改良体の健全性の確認、である。従っ

て、地盤に関する専門知識がないと格子状地中壁工法の設計は難しい。そこで、これらの解析をあらかじめ実施して、検討結果をわかりやすく表示することで、専門技術者でなくても格子状地中壁工法の概略検討が可能な簡易評価シートを作成することとした。

簡易評価シートの作成手順を図1に示す。道路・宅地地盤と格子状地中壁をモデル化した2次元FEMモデルによる地震応答解析（等価線形）を様々な条件に対して実施した。解析結果をFL値と地表変位量Dcy値で表すことにより、各条件に対する対策効果を1枚のシートに表示することとした。なお、FL値、Dcy値は建築基礎構造設計指針²⁾（以下、基礎指針と略す）の考え方に基いて算定する。

2.1 道路・宅地地盤モデルの作成

表1に地盤モデルの地層構成、表2に液状化層（砂）の地盤条件を示す。液状化層のパラメータについてはN値を4通り、層厚を4通り、細粒分含有率Fcを4通り、地下水位を2通りとした。地盤モデルは液状化層の下部に層厚20mの粘土層（S波速度、Vs=200m/s）と砂層（Vs=250m/s、非液状化層）を設け、工学的基盤はVs=400m/sとした。

図1 簡易評価シート作成フロー

¹⁾ ㈱竹中工務店技術研究所 主任研究員・博士（工学）
〒270-1395 印西市大塚1-5-1

²⁾ ㈱竹中土木技術・生産本部 部長

³⁾ 東京都市大学都市生活学部 教授・博士（工学）
（元国土交通省国土技術政策総合研究所）

⁴⁾ 国土交通省国土技術政策総合研究所 主任研究官

⁵⁾ 国土交通省国土技術政策総合研究所 主任研究官・博士（工学）

¹⁾ Chief Researcher, R&D Institute, Takenaka Corporation, Dr. Eng.

²⁾ Senior Manager, Takenaka Civil Engineering & Construction

³⁾ Prof., Faculty of Urban Life Studies, Tokyo City Univ., Dr. Eng.

⁴⁾ Senior Researcher, National Institute for Land and Infrastructure Management

⁵⁾ Senior Researcher, National Institute for Land and Infrastructure Management, Dr. Eng.

液状化層の V_s は今井の提案式³⁾の沖積砂質土の式に基づいて N 値より算定した。工学的基盤より上の3つの地層については、地盤の非線形性を考慮した。土の非線形特性については文献 4、改良体の非線形特性については文献 5 を参照した。

2.2 格子状地中壁(改良体)モデルの作成

表 3 に住宅敷地(格子形状)の検討ケースを示す。また、図 2 に解析対象とした改良体の平面モデル例を示す。敷地のサイズとして幅 6~20m、奥行き 10, 15m とする 1 住戸/1 格子となるパターンおよび幅 10~40m で奥行き 30m とする 4 住戸/1 格子を前提とした改良パターンを組み合わせて 1 街区を形成した。街区周囲には幅 6m の道路があり、道路の両側にも地中壁を設けた。格子状地中壁の仕様は機械式攪拌工法での実績に基づき、強度は 1.5N/mm^2 を標準として 4 通りとした。また、壁厚は $\phi 1000\text{mm}$ で 200mm ラップの施工を行った場合の有効幅である 850mm とした。

2.3 等価線形解析(2次元 FEM)の実施

格子状地中壁による地盤の液状化抑制効果は周辺地盤(無対策地盤)も含めた 2 次元有限要素解析を実施して、格子内地盤の FL 値の分布を調べることで確認した。解析プログラムには Super-FLUSH(等価線形解析)を用いた。図 2 の A-A'断面を対象とした解析モデルを図 3 に示す。モデルの奥行きは 1m(単位幅)である。なお、住宅はモデル化に含めていない。2 次元解析で地中壁による拘束効果を表現するため、改良壁を平行壁(紙面平行方向)と直交壁(紙面直交方向)に分けてモデル化した。直交壁は奥行き方向に連続しているものとして改良体の材料定数を与えるが、平行壁の密度およびせん断剛性は奥行き方向の格子間隔の影響を考慮した。(図 2 のモデルの場合、道路部①は 32m の奥行きの中に 4 枚の壁があるように密度とせん断剛性を $4 \times 0.85/32$ とした。同様に、宅地部②は 20m の奥行きの中に 3 枚の壁があるように $3 \times 0.85/20$ とした。道路部③は解析上考慮していない。なお、格子内地盤④の密度とせん断剛性も同様の考えで設定した)。さらに、格子内地盤と平行壁を 2 重要要素とし、平行壁は格子内地盤と節点を共有せず、左右端で直交壁と節点を共有することで地中壁による拘束効果を模擬した。なお、改良体の初期せん断剛性 G_0 は設定した強度から文献⁵⁾に基づいて算定した(表 3 参照)。

入力地震動は検討委員会にて採用した地震動(図 4 参照)を用いて、地表面最大加速度で 200cm/s^2 および 350cm/s^2 を目標とした。オリジナル波形に対して地震波 a は 1.4 倍、地震波 b は 1.0 倍とし、地盤モデルごとと同じ波を用いた。解析では長辺方向に加振した。

解析結果から地中壁に囲まれた地盤中央部での最大せん断応力 τ_{max} を求め、その値から算定される等価な地震時せん断応力比と液状化強度を比較することで FL 値を算定した。地盤のせん断応力評価では地震のマグニチュード M を考慮し、等価なせん断応力 τ_{eff} に換算する際の補正係数は $\gamma_n = 0.1(M-1)$ とした。砂層の液状化強度は基礎指針に従って、 N 値と細粒分含有率から算定した。なお、FL 値が 1.0 未満となった地層については、基礎指針の方法により D_{cy} 値を算定した。また、改良体に発生するせん断応力を解析結果から求め、設定した設計基準強度との比較から改良体の健全性をチェックした。改良体のせん断体力に対して地震波 a については 2/3、地震波 b については 3/3 の安全率とした。

2.4 簡易評価シートの作成

解析結果に基づき、各ケースについて深さ方向 0.5m ごとに FL 値

表 1 地盤モデルの地層構成

下端深度(m)	液状化層厚			
	5m	10m	15m	20m
5	砂	砂	砂	砂
10			砂	砂
15	粘土(200)			
20		粘土(200)		
25			粘土(200)	
30				粘土(200)
35	砂(250)			
40		砂(250)		
45			砂(250)	
50				砂(250)
55	工学基盤(400)	工学基盤(400)	工学基盤(400)	工学基盤(400)
60				

()内は V_s 値(m/s)

表 2 液状化層(砂)の地盤条件

地盤条件	検討ケース
層厚(m)	5, 10, 15, 20
N 値	3, 5, 10, 15
細粒分含有率(%)	0, 10, 20, 30
地下水位(m)	-1, -2
S 波速度(m/s)	120, 140, 170, 200

表 3 住宅敷地(格子形状)と地中壁強度の検討ケース

敷地の奥行き	敷地の幅
10 m	6, 8, 10, 12, 14, 16, 20 m
15 m	6, 8, 10, 12, 14, 16, 20 m
30 m	15, 20, 30, 40 m
地中壁の強度(N/mm^2)	0.75, 1.0, 1.5, 3.0
地中壁の剛性 $G_0(\text{N/mm}^2)$	460, 620, 930, 1860

図 2 改良体配置の平面モデル例

図 3 2次元 FEM モデル例(A-A'断面、液状化層厚 10m)

(a) 夢の島観測波 M=9.0 (地震波 a)

(b) 東京湾北部地震波 M=7.3 (地震波 b)

図 4 検討に用いた地震波

格子状地中壁工法の効果の簡易評価シート

入力条件		
地盤	地中壁	
N値	5	改良間隔(幅×奥行) 12×15 m ²
液状化層厚	10 m	強度 1.5(標準) N/mm ²
細粒分含有率Fc	20 %	
地下水位	1 m	

地震波	a	b
マグニチュード	9.0	7.3
想定地表加速度(gal)	200	350

液状化による地表変位Dcy値 (cm)			
地震波 a (M=9.0)	地震波 b (M=7.3)	無対策	対策後
無対策	対策後	14.3	2.9
無対策	対策後	17.9	8.3

地震波 a (M=9.0)				地震波 b (M=7.3)			
深度 (m)	土質	細粒分含有率 Fc (%)	液状化安全率 FL 値	液状化判定 (赤)	液状化安全率 FL 値	液状化判定 (赤)	液状化安全率 FL 値
0.5	表土	20.0	1.01		1.86		0.65
1.0	表土	20.0	0.85	x	1.77		0.55
1.5	砂質土	20.0	0.76	x	1.71		0.48
2.0	砂質土	20.0	0.71	x	1.71		0.44
2.5	砂質土	20.0	0.67	x	1.72		0.42
3.0	砂質土	20.0	0.64	x	1.70		0.40
3.5	砂質土	20.0	0.62	x	1.69		0.38
4.0	砂質土	20.0	0.61	x	1.63		0.37
4.5	砂質土	20.0	0.60	x	1.57		0.36
5.0	砂質土	20.0	0.60	x	1.46		0.36
5.5	砂質土	20.0	0.59	x	1.38		0.35
6.0	砂質土	20.0	0.59	x	1.25		0.35
6.5	砂質土	20.0					0.35
7.0	砂質土	20.0					0.35

図5 簡易評価シート例

を算定し、その深度分布を表示するエクセルシートを図5のようにまとめた。表示されるFL値のパターンは18432通りである。また、地震波aおよびbに対する無対策と対策後のDcy値を算定し表示した。ユーザーは地盤及び地中壁の条件をメニューから選択することによって、表示されるFL値やDcy値から格子状地中壁工法の適用の可否を判断できる。なお、設定した条件に対して地中壁の発生応力が設定した安全率を超える場合は、設計が成立していないことが表示(シート画面に「検討対象外」と表示)される。

3 遠心模型実験結果との比較

格子状地中壁工法の液状化抑止効果を確認するため、格子間隔をパラメータとした遠心模型振動実験を行った。基本的な地盤および建物条件は検討委員会の検討条件に合わせた。せん断土槽(幅800mm×奥行き530mm×高さ230mm)内に格子状地中壁を含む模型地盤を作成し、住宅模型を設置した。遠心加速度は60g場とした。以下は実スケール換算で示す。実験結果の詳細は文献^{註1)}を参照されたい。

実験条件を表5に示す。また、CASE-4の建物、改良体、計測器の配置を図6に示す。格子状地中壁の格子間隔は1宅地1格子では13m×16mとした。これは、宅地13m×13mと幅6mの道路のうち3m分を一体で囲む条件に相当する。したがって、2宅地1格子の格子間隔は32m×13m、4宅地1格子の格子間隔は26m×32mとなる。

格子状地中壁の模型は透明アクリル製で改良強度1.5N/mm²に相当する剛性とした。壁厚は90cmである。住宅模型はアクリル製の基礎部(幅8m×奥行き11m×高さ0.5m)に1質点モデルを取り付けたものとし、2階建て住宅を想定して固有振動数6Hz、接地圧8.0kN/m²とした。

地下水位はGL-1m、液状化層をGL-1~12mとした。間隙流体は50CSのシリコンオイルを用いた(60CSの製品が入手できなかったため)。実験に用いた砂は東北地方太平洋沖地震時に浦安市で発生した噴砂を用い(以下浦安砂と呼ぶ)、細粒分含有率を25%となるように粒度調整した(図7参照)。浦安砂は細粒分が多いため模型地盤の作成は締固め試験から求めた最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.451\text{g/cm}^3$ に対するD値で管理し、液状化強度が文献¹⁾の浦安モデル地盤と同等かやや低めになるように設定した(表6参照)。模型地盤の作成方法とD値と液状化強度の関係については文献⁶⁾を参照されたい。なお、4宅地1格子のcase4のみ豊浦砂を用いたため、豊浦砂と浦安砂で同等の液

表5 遠心模型実験ケース一覧

ケース名	平面図	断面図
Case-3 (無対策)		
Case-4 (4戸/1区画)		
Case-5 (1戸/1区画 + 盛土1m, 2戸/1区画)		
Case-6 (1戸/1区画 無対策)

図6 CASE-4の建物、改良体、計測器配置(実スケール換算)

状化強度になるようにした。

加振に用いた地震動は、東北地方太平洋沖地震の際に K-NET 浦安で観測された地震波の EW 成分⁷⁾ (図 8 参照) の 200 秒とし、入力加速度 150cm/s^2 を目標とした。これは、簡易評価シートの地震波 a とほぼ同等である。

一方、簡易評価シートによる Dcy 値の算定条件は下記の通りである。遠心模型実験と近い条件を選定した。

- ・液状化層厚：10m
- ・N 値：5
- ・地下水位：GL-1m
- ・細粒分含有率：20%, 30%
- ・改良強度： 1.5N/mm^2
- ・検討地震動：地震波 a ($M=9.0$, $\alpha_{\text{max}}=200\text{ cm/s}^2$)

遠心模型実験に用いた浦安砂の細粒分含有率を 25%としたため、簡易評価シートの F_c は 20%と 30%について算定した。

宅地面積 (= 地中壁で囲まれた面積) と沈下量の関係を図 9 に示す。簡易評価シートは宅地面積 200m^2 以上のみプロットした。実験では、地中壁に囲まれた部分において住宅の沈下しか測定していないため、厳密には Dcy 値と比較できない。しかし、格子状地中壁がある条件では、遠心実験による住宅沈下量と Dcy 値ともに宅地面積が大きくなると両者とも増加傾向にあり、沈下量も概ね対応していることがわかる。また、遠心実験における地中壁なしの更地の沈下量はせん断土槽の境界に近い地点で測定していることもあり、かなりばらつきが大きい。Dcy 値および遠心実験による地中壁なしの住宅沈下量もその幅の中に入っている。したがって、簡易評価シートによる Dcy 値は格子状地中壁の効果を反映した評価が可能と言える。なお、簡易評価シートによる評価では、宅地面積 $200\sim 450\text{m}^2$ において同じ面積でも Dcy 値に差が出ているが、これは宅地の形状比 (長辺と短辺の比率) が異なることによる影響であり、既往の実験結果の知見⁸⁾ と整合している。

4. まとめ

格子状地中壁工法の液状化対策効果を簡易に判定することを目的として、等価線形解析結果に基づく検討結果をエクセルシートとして表示した簡易評価シートを作成した。この簡易評価シートの有効性を確認するため、遠心模型振動実験結果と比較した。本検討により得られた結論は以下の通りである。

1) 簡易評価シートを利用すれば、複雑な地震応答解析を行わなくても格子状地中壁工法の効果を概略的に評価することができる。したがって、専門技術者でなくても工法の適用可否を判断できる。

2) 格子間隔をパラメータとした遠心模型実験結果による住宅の沈下量と簡易評価シートによる Dcy 値を比較した。Dcy 値は住宅がない部分の地表面沈下を表しているため厳密には比較できないが、簡易評価シートによる Dcy 値は格子状地中壁の効果を反映した評価が可能と言える。

なお、簡易評価シートは国総研の下記 HP から無償でダウンロード可能である。

<http://www.nilim.go.jp/lab/jbg/takuti/takuti.html>

・謝辞：本研究の一部は国土交通省国土技術政策総合研究所の検討業務として実施したものである。「東日本大震災による液状化被

図 7 浦安砂の粒度分布

表 6 モデル地盤と模型地盤の液状化強度

深度 (m)	浦安モデル地盤 ¹⁾		遠心模型地盤	
	層区分	ε a=2.5%, 20波の応力比	層区分	ε a=2.5%, 20波の応力比
0~2m	Bs	0.25	豊浦砂	浦安砂
2m~8m	Fs	0.20	Dr=50%	D値=90%
8m~10m	As1	0.36	豊浦砂	浦安砂D値=95%
10m~12m	As2	0.23	Dr=70%

図 8 入力に用いた K-NET 浦安観測波 (EW 成分)

図 9 宅地面積と住宅および地盤沈下量の関係

「災害復興地における復興対策検討会」のメンバーの方には貴重なアドバイスを頂いた。末尾ながら関係各位に深謝いたします。

参考文献

- 1) 浦安市：液状化対策実現可能性技術検討委員会資料、<http://www.city.urayasu.chiba.jp/menu12095.html>
- 2) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針、2001
- 3) Imai, T: P and S-wave velocities of the ground in Japan, Proc., 9th ISSMFE Tokyo, Vol.2, pp257-260, 1977
- 4) 日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計、2006
- 5) 日本建築センター：(改訂版)建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針、2002
- 6) 明石達生他 7 名：既設戸建て住宅の液状化対策としての格子状地中壁工法に関する研究 (その 3 格子間隔の影響)、第 48 回地盤工学研究発表会、pp. 1621-1622, 2013
- 7) 防災科学技術研究所：K-NET, <http://www.k-net.bosai.go.jp/>
- 8) 明石達生他 8 名：既設戸建て住宅の液状化対策としての格子状地中壁工法に関する研究 (その 2 格子形状の影響)、第 48 回地盤工学研究発表会、pp. 1619-1620, 2013

注

注 1) 津國正一他 5 名：既設戸建て住宅の液状化対策としての格子状地中壁工法に関する研究 (その 4 住宅の沈下量)、第 49 回地盤工学研究発表会、pp. 1569-1570, 2014

[2014 年 2 月 14 日原稿受理 2014 年 4 月 3 日採用決定]