東北地方太平洋沖地震における 格子状地盤改良を施した建物基礎 の挙動

PERFORMANCE OF BUILDING FOUNDATION WITH GRID-FORM GROUND IMPROVEMENT DURING THE 2011 TOHOKU PACIFIC EARTHQUAKE

内田明彦 — * 1 小田島暢之 — * 2
山下 清 — * 3

Akihiko UCHIDA — * 1 Nobuyuki ODAJIMA — * 2
Kiyoshi YAMASHITA — * 3

キーワード：
液状化, 格子状地盤改良, パイル・ラフト基礎, 杭基礎

Keywords:
Liquefaction, Grid-form ground improvement, Piled raft foundation,
Pile foundation

In this paper, two building foundations improved by the grid-form ground improvement method are introduced. The field investigation results of the ground around the building after the 2011 earthquake are presented. The effect of the liquefaction prevention of the grid-form ground improvement ground is discussed based on the dynamic nonlinear analysis for foundation soil layers with an actual acceleration record. Comparing the field investigation result with the simulation analysis, it is concluded that the grid-form ground improvement prevented the liquefaction of the original soil surrounded by the grid-form walls during the 2011 earthquake.

1. はじめに

深層混合処理工法による格子状地盤改良は、改良壁による拘束効果で地震時の地盤のせん断変形を低減させ、液状化の発生を防止する液状化対策工法の1つである。神戸市の埠頭の先端に建設された建物の液状化対策として適用された格子状地盤改良が、1995年の阪神・淡路大震災において液状化を防止した事例¹⁾が報告され、近年建築物の液状化対策としての利用が増加している。

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、広範囲な地域で液状化が確認された。特に震源から遠く離れた東京湾岸の埋立て地において戸建て住宅の沈下や傾斜などの甚大な液状化被害が発生し、液状化対策の重要性が改めて認識された。

本報では、液状化対策として格子状地盤改良を採用した千葉県浦安市内にある2つの建物基礎の概要と地震後に実施した現地調査について述べる。さらに、東北地方太平洋沖地震による観測波を用い

た地震応答解析を実施し、格子状地盤改良の液状化防止効果について確認した結果を報告する。なお、この報告は文献²⁾に加筆を行い、追加検討を実施した結果を反映したものである。

2. 建物及び地盤概要

2.1 A建物

建物はSRC造4階建て、地下なしの立体駐車場で、平均接地圧は45kN/m²である。図1に示すように、地盤は地表からGL-14mまで埋土層および沖積砂層が分布し、その下部に沖積粘土層が分布している。沖積粘土(七号層)の下端深度が敷地内で大きく変化しており、N値50以上の安定した支持層は建物①通り側でGL-39m、②通り側でGL-72mで出現する。また、対象地盤の地下水位はGL-1.8mである。地表から深度14m程度までの埋土層および沖積砂層はN値が10程度であり、液状化の可能性が高いため、格子状地盤改良を採用して液状化防止を図った。さらに杭先端を過圧密粘土である七号層に定着

図1 基礎構造と地盤の概要(A建物)

*1 榊竹中工務店技術研究所 主任研究員・博士(工学)
(〒270-1395 千葉県印西市大塚1-5-1)

*2 榊竹中工務店東京本店設計部 主任

*3 榊竹中工務店技術研究所 専門役・博士(工学)

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

*2 Chief, Tokyo Head Office, Takenaka Corporation

*3 Principal Researcher, R&D Institute, Takenaka Corporation, Dr. Eng.

図2 地盤改良と計測器の配置 (A 建物)

させた沈下低減杭からなるパイルド・ラフト基礎とした。杭長および改良体長については敷地内で実施した 13 本のボーリング調査結果に基づいて決定した。格子状改良の仕様については文献³⁾に基づき設定した。基本の格子間隔は 15.6m×16.5m、改良深さは GL-13～15m までとし、図 2 に示すように改良体を配置した。改良体の設計基準強度は 1.8N/mm²である。

2.2 B 建物

建物は S+RC7 階建て、地下なしの劇場施設であり、杭基礎が採用されている。A 建物とは平面的に 900m 程度離れている。地盤概要を図 3 に示す。基本的な地盤構成は A 建物と同じであり、深度 15m 程度までは液状化の可能性が高い。そこで、液状化防止を目的として格子状地盤改良を採用した。地盤改良の仕様は A 建物と同様に文献³⁾に基づいて設定した。格子間隔は 15.5m×14.3 m (最大)、改良深さは GL-16m までとし、図 4 に示すように改良体を配置した。改良体の設計基準強度は 1.5N/mm²である。

図3 地盤概要
(B 建物ボーリング No. 1)

写真1 A 建物の地震直後の状況 (2011. 3. 13 撮影)

写真2 B 建物の全景 (2011. 5. 18 撮影)

3. 東北地方太平洋沖地震直後の状況

東北地方太平洋沖地震では、浦安市内の埋立地を中心に液状化現象が確認された。2 つの建物の近くでも未対策の部分では噴砂などが確認されている。

格子状地盤改良による液状化対策を実施した A 建物では、写真 1 (2011. 3. 13 撮影) に示すように建物から 3～4m 離れた地盤面に、地盤沈下に伴うわずかな段差が認められた。建物から離れた所では液状化に伴う噴砂が確認されたが、写真撮影の段階では既に撤去されていた。なお、建物の極近傍では噴砂などの液状化現象は確認されなかった。また、B 建物 (写真 2) では、建物と周辺地盤の間に段差などは認められず、建物近傍では噴砂などの液状化の痕跡は確認されなかった。

4. 長期計測結果に基づく検証 (A 建物)

A 建物では、建物建設時からパイルド・ラフト基礎の沈下挙動に関わる長期計測を実施している。計測器の配置を図 2 に示す。測定

項目は層別沈下計による基礎スラブ直下の地盤の沈下、杭の軸力、基礎スラブ底面下の土圧、水圧である。図 5 に地盤沈下量の経時変化を示す。計測開始から東北地方太平洋沖地震の発生前までの沈下量は 16mm で、建物竣工後の沈下挙動はほぼ落ち着いた状態にあった。地震後約 2 ヶ月経過時の沈下量は 23mm で地震により 7mm 増加したが、その後は再び安定している。図 6 に基礎スラブ底面下の土圧、水圧の計測結果を示す。土圧については地震の前後で特に変化は見られず、基礎スラブと格子内の地盤は地震後も地震前と同様の接地状態にあり、両者の間に地盤沈下に伴う空隙が生じていないことを示している。地震前後の計測結果と建物外周の目視調査結果を総合すると、格子内部の地盤には今回の地震時において液状化が生じていないものと考えられる。

図4 地盤改良配置 (B 建物)

5. 観測地震波による格子状地盤改良の効果検証

東北地方太平洋沖地震で観測された実地震動を用いて、格子状改良の液状化防止効果について検証を行った。解析プログラムは Super-FLUSH を用いた。解析に用いた地震波は図7に示す K-Net 浦安において観測された本震の地表面加速度波形(EW)⁴⁾である(最大加速度 157cm/s^2)。K-Net 浦安の観測点はA, B建物の北東約3kmにある。未改良地盤での地表面最大加速度が観測記録の最大加速度と合うように工学的基盤(GL-67.1m)での入力波を調整した。A建物の検討方法を以下に述べる。

図2に示す短辺方向(A-A'間)を検討断面として図8に示す2次元FEMモデルで未改良地盤を含む改良地盤をモデル化した。地盤定数はPS検層結果に基づいて設定し、工学的基盤までは現地の土質試験結果に基づき地盤の非線形性を考慮した。改良体の地盤定数は、施工後に採取されたコアの一軸圧縮強度 q_u の平均値(5.8N/mm^2)から文献⁵⁾に基づき(1)~(3)式で初期せん断剛性 G_0 を設定し、改良地盤の非線形特性は文献⁶⁾を参照した。

$$E_{50}=130q_u \text{ (砂)} \quad (1)$$

$$E_{50}/E_0=0.2 \quad (2)$$

$$E_0=2(1+\nu)G_0 \quad (3)$$

ここに、 ν = ポアソン比 (=0.5) である。

格子状改良による改良壁は、面外壁(紙面と直行方向の改良壁)と面内壁(紙面と平行方向の改良壁)に分けて、面内壁の左右端を面外壁と接点共有させた。改良体の面外壁は奥行き方向に連続しているものとして表1の定数をそのまま当てはめた。また、格子内地盤と改良体の面内壁は2重要素とし、格子内地盤は未改良地盤の定数を当てはめたが、面内壁は奥行き方向に格子の間隔である16.5mごとに1枚壁があるものとして、改良体の地盤定数を換算した。

なお、B建物については、検討断面を図4に示すB-B'断面としてA建物と同じ方法でFEMによる地震応答解析を実施したが、施工後

図5 地盤沈下量の経時変化 (A-1 地点)

(a) A-1 地点

(b) A-2 地点

図6 基礎スラブ底面下の土水圧の経時変化

図7 K-Net 浦安における観測波形 (本震EW成分)

図8 2次元FEMモデル(A-A' 断面)

の改良強度が不明のため、設計基準強度 F_c から(4)式で改良体の一軸圧縮強度 q_u を推定し、初期せん断剛性を(1)~(3)式で設定した。

$$F_c=(1-1.3V_{qu})q_u \quad (4)$$

ここに、 V_{qu} は q_u の変動係数であり、施工実績に基づき $V_{qu}=0.3$ とした。

液状化の評価は応答によって求めた地盤のせん断応力と N 値に基づく建築基礎構造設計指針⁷⁾による液状化強度の比率(FL値)によって求めた。なお、地盤のせん断応力評価において、今回の地震の

表1 解析用地盤定数 (A 建物)

地下水位 GL-1.8m									
土層 番号	土質	層厚 m	境界 深度 GL-m	密度 kN/m ³	S波速度 Vs m/s	初期剛性 G ₀ MN/m ²	ポアソン比	備考	
1	埋土	5.90	5.90	18.0	140	35	0.489	地盤 改良層	
2	砂	4.80	10.70	18.5	140	36	0.489		
3	砂	3.30	14.00	18.5	140	36	0.489		
4	シルト	2.75	16.75	17.0	140	33	0.493		
5	シルト	12.15	28.90	15.5	140	30	0.493		
6	シルト	2.90	31.80	17.0	210	75	0.493		
7	シルト	8.95	40.75	16.0	170	46	0.493		
8	砂	4.50	42.25	18.5	230	98	0.493		
9	砂	6.55	51.80	19.0	250	119	0.493	工学的基礎	
10	シルト	2.90	54.70	18.0	230	95	0.493		
11	砂	6.15	60.85	19.0	270	139	0.493		
12	シルト	6.25	67.10	18.0	270	131	0.493		
13	砂			20.0	420	353	0.473		
14	改良土	14.00	14.00	18.0	-	1260	0.260

図9 地震応答解析結果 (A 建物)

マグニチュード (M=9.0) を考慮して、地震応答解析で得られる最大せん断応力 τ_{max} を液状化判定の外力として用いる等価なせん断応力 τ_{eff} に換算する際の補正係数は $\gamma_n = 0.1(M-1) = 0.8$ とした。

A 建物の地震応答解析結果を図9に示す。格子内地盤の最大せん断応力は未改良地盤のせん断応力よりも小さくなっている。これは、改良体に大きな応力が発生し、格子内地盤のせん断応力を負担しているためと考えられる。なお、改良体の発生せん断応力は許容応力度以内であり、改良体の健全性に問題はないと考えられる。図9の最大せん断応力を用いたFL値は図10に示す通りである。未改良地盤ではFL<1と判定される部分があり、液状化が発生した可能性を示している。これに対して格子内地盤は全ての深度についてFL>1となっており、液状化は発生していないと推測される。図11はB建物のFL値分布である。A建物と同様に、未改良地盤ではFL<1となる部分があるものの、格子内地盤は全ての深度についてFL>1となっており、液状化は発生していないと推測される。

これらの解析結果は地震後の目視調査の状況と概ね対応しており、今回の検討方法は格子状地盤改良の液状化防止を評価する方法として有効であると言える。

6. まとめ

液状化対策として格子状地盤改良が採用された2つの建物基礎の概要と東北地方太平洋沖地震後の状況を示すとともに、観測地震波による格子状地盤改良の液状化防止効果について検証解析を実施した。地震後の建物周囲の目視調査や基礎の長期計測結果を総合すると、格子状地盤改良で囲まれた地盤では液状化が発生していない可能性が高いと考えられる。また、観測地震波を用いた解析では、改良範囲の外側の未改良地盤では液状化が生じるが、格子状改良に囲まれた地盤では液状化は生じないという評価となり、実測挙動と整合する結果が得られた。したがって本検討方法は格子状地盤改良の液状化防止を評価する方法として有効であると言える。

謝辞：地震後の現地調査は(株)オリエンタルランドのご協力のもとに行った。ここに深謝致します。また、地盤改良の設計にあたって協力頂いた(株)竹中工務店伊藤利明氏および長期計測や地震後の調査に関して協力を頂いた元(株)竹中工務店山田毅氏に感謝致します。

参考文献

- 鈴木吉夫, 斎藤聡, 鬼丸貞友, 木村玄, 内田明彦, 奥村良介: 深層混合処理工法を用いた格子状地盤改良による液状化対策工, 土と基礎, Vol.44, No.3, pp.46-48, 1995

図10 A建物のFL値の深度分布 (No. 6 ボーリング)

図11 B建物のFL値の深度分布 (No. 1 ボーリング)

- Uchida, A., Yamada, T., Odajima, N. and Yamashita, K.: Piled raft foundation with grid-form ground improvement subjected to the 2011 earthquake, 9th International conference on urban earthquake engineering/4th Asia conference on earthquake engineering, Tokyo Institute of Technology, Tokyo, pp.151-156, 2012
- 田屋裕司, 内田明彦, 吉澤睦博, 鬼丸貞友, 山下清, 津國正一: 格子状地盤改良における格子間隔の簡易設定法, 地盤工学ジャーナル, Vol.3, No.3, pp.203-212, 2008
- 防災科学技術研究所: K-NET, <http://www.k-net.bosai.go.jp/>
- 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, pp.349-355, 2002
- 黒田琢磨, 田中英朗, 富井隆, 鈴木康嗣: 深層混合処理工法による改良体の物性評価 (その3) 改良体の動的変形特性に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp.699-700, 2001
- 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 2001

[2012年6月15日原稿受理 2012年9月3日採用決定]