

特集 巨大地震への対策 —地盤・基礎の技術開発—

Countermeasures against Next Mega Earthquakes (Large-scale Earthquakes) —Development of Geotechnical & Foundation Engineering Technology—

1 巨大地震に備える地盤・基礎の技術開発の取り組み

Development of Geotechnical & Foundation Engineering Technology for Next Mega Earthquakes (Large-scale Earthquakes)

青木 雅路 Masamichi Aoki*1

東北地方太平洋沖地震（2011年3月11日、マグニチュード9.0）の被害を受け、巨大地震に対する対策の重要性が指摘されている。また、想定すべき震源モデルの見直しも進んでいる。今後予想される東海・東南海・南海地震とその運動型地震や首都圏直下型地震を踏まえて、新築建物、既存建物に対する巨大地震への備えが望まれている。

地震に対する対策としては、免震・制震構造等の構造体の研究がまず挙げられ、非構造部材の耐震化の重要性も指摘されている。地盤・基礎に対する対策は見過ごされがちであるが、建物に過大な沈下・傾斜が生じれば、上部構造体が健全であっても建物として機能せず、基礎の沈下・傾斜の修正や状況によっては建て替えの必要性が生じる。また、基礎構造に重大な被害があれば、長期的な沈下・傾斜の可能性や次の地震時の安全性の担保ができなくなる。そのため、基礎構造の安全性は、上部構造に劣らず重要といえる。

今回の特集では、「巨大地震への対策—地盤・基礎の技術開発—」と題して、建物の基礎構造として考えておくべき事項を示すとともに、巨大地震に対する当社の地盤・基礎に関する技術開発の取り組み状況を紹介する。

(1) 巨大地震に備える地盤・基礎の限界状態と要求性能の考え方

建築物の基礎構造計画では、建築計画・設備計画および上部構造に対する構造上の要求性能を満たす基礎の各限界状態を考慮して目標性能を設定する必要がある（Table 1参照）。一般的な上部構造の要求性能として、安全性・修復性・使用性の3項目が挙げられ、それらを満たす基礎構造の限界状態（終局限界、損傷限界、使用限界）を考慮して、基礎構造の目標性能を設定する必要がある¹⁾。当然、巨大地震時の扱いも上部構造の目標性能に準じた基礎の目標性能が求められる。上部構造の性能レベルに応じた基礎構造の限界状態と荷重の組み合わせをTable 2に示す。巨大地震時の対応として、地震後の防災拠点等を考慮する場合、その機能を満足する上部構造の目標性能が設定され、それに対応する地震荷重、基礎構造の限界状態を前提として、敷地地盤の安全性を把握し、各限界状態を考慮した荷重の組み合わせに対して、安全となる基礎構造を選定・設計することになる。そのため、基礎構造の設計法や解析法の開発のみでは対応できない場合もあり、より適切な新しい基礎構造の開発も重要となる。

(2) 地盤・基礎分野の検討項目と開発技術の概要

巨大地震を想定した基礎の検討項目と開発技術を新築建物と既存建物に分けて、Table 3に示す。

敷地地盤の安全性では、斜面地における敷地地

Table 1 基礎構造の各限界状態に対応する要求性能¹⁾
Performance Requirement for Limit states of Building Foundations

限界状態	性能内容		
	基礎構造全体の性能 (上部構造への影響に関する性能)	個々の基礎に関する性能 基礎部材に関する性能	地盤の強度・変形に関する性能
終局限界状態	基礎の破壊または変位によって、建物が破壊または転倒しない	基礎部材が脆性的に破壊しない。変形性能の限界に達して耐力の低下を生じない	地盤の極限抵抗力を超過しない。
損傷限界状態	基礎の変位によって、建物に損傷を生じない。基礎の残留変形によって、建物の使用性や機能性、耐久性に支障を生じない	基礎部材に構造上の補修・補強を必要とするような損傷が生じない	上部構造や基礎の耐久性に有害な残留変形を生じない
使用限界状態	基礎の変形によって、建物の使用性や機能性、耐久性に支障を生じない	基礎部材の耐久性に支障が生じない	上部構造の使用性、機能性や耐久性に障害を生じるような過大な沈下・変形を生じない

Table 2 性能レベルに応じた限界状態と荷重レベルの組み合わせ¹⁾
Combination of the load level and limit state according to the performance level

	日常的に作用する荷重	耐用年限内に1～数回遭遇する荷重		最大級の荷重	想定外の極大荷重	
		基準値	左の値を割増し		最大級の荷重1.25倍	最大級の荷重1.50倍
終局限界状態の要求性能				●	○	☆
損傷限界状態の要求性能				●	○	☆
使用限界状態の要求性能				●	○	☆

[注] ●-●：本指針で採用している（標準）の組み合わせ
●-○、●-☆：性能を高めた組み合わせ例

*1 技術研究所 地盤・基礎部長 General Manager, Research & Development Institute

盤を含む斜面の安定や変状の可能性も考慮すべき事項であるが、平地に限定すると巨大地震時における液状化の可能性評価が重要となる。液状化の評価(判定)は、巨大地震であっても基礎指針¹⁾の液状化判定法が用いられており、兵庫県南部地震や東北地方太平洋沖地震でも検証されている²⁾。液状化発生の危険性が高いと判定された場合、液状化対策や液状化を考慮した基礎の設計が必要となる。液状化対策としては、格子状地盤改良(TOFT)工法の開発が行われており、適用実績も豊富である(2.1参照)。ただし、狭小地等では施工機械の関係で従来は適用できなかった。そこで、狭小地用の施工法を開発した(2.2参照)。既存建物では、さらに液状化対策が難しくなるが、建屋下での格子状地盤改良工法の開発を行っている(3.1参照)。

新しい基礎工法としては、パイルド・ラフト基礎に液状化対策を兼ねた格子状地盤改良を併用し、剛性の高い格子状地盤改良に水平力の多くを負担させる合理的な基礎構造を構成する高耐力パイルド・ラフト基礎の開発を行っている(2.3参照)。また、パイルド・ラフト基礎の杭として、杭頭半剛接合工法を用いた場合の合理的な設計法の開発も行っている(2.4参照)。

大径となる杭の鉛直や引抜き力に抵抗できる杭工法として、多段径杭工法を開発している(2.5参照)。地下階がある建物では地下階構築のための山留め壁が構築される。深い山留め工事ではソイルセメント壁を用いる場合が多い。ソイルセメント壁の応力材として用いられるH型鋼を地下外壁・杭に使う工法も開発している。狭小地では、地下外壁を薄くでき、地下階の有効面積を広く取れる。また、1スパン構造物の場合、外壁際に杭を配置することで合理的な引抜き抵抗要素となる(2.6参照)。

一般的な建物基礎での開発技術としては、液状化層が部分的に深い場合は液状化を防止する対策ではなく液状化を考慮した杭基礎とした方が合理的な場合もある。そのための解析技術として、液状化を考慮した有効応力解析や液状化後の地盤沈下解析の開発も行っている(2.7, 2.8参照)。液状化を防止する対策をしても敷地周辺では液状化している状況を考慮した解析が必要な場合もある。液状化を考慮した有効応力解析は、建物下を液状化対策した場合の建物周辺の液状化発生を考慮した入力時震動の作成にも用いられる。

既存建物基礎では、まず耐震診断を実施し、安全性の確認が必要となる。耐震診断法は上部構造では確立されているが基礎構造では確立されていないため、兵庫県南部地震の被災状況から診断法を提案した(3.2参照)。耐震診断の結果、基礎の補強が必要となった場合は、3.1に示した方法等での基礎下の補強が可能となっている。

地盤・基礎分野では、液状化対策の格子状地盤改良工法をはじめとして、セメント系の固化材を用いる深層混合処理工法が用いられる場合が多い。深層混合処理工法としては、DCM工法が開発が行われており技術審査証明も取得している³⁾。新しい技術開発の方向性として、環境負荷低減を図るべくECM(エネルギー・CO₂・ミニマム)セメントを用いた地盤改良工法の開発も行っている(2.9参照)。

Table 3 新築・既存建物別の地盤・基礎での検討項目と開発技術
Development of Geotechnical & Foundation Engineering Technology for new and existing building

検討項目	開発技術	
	新築建物	既存建物
巨大地震を考慮した地盤の液状化の評価、および液状化対策	液状化の評価 →(建築学会基礎構造設計指針) 液状化対策 →2.1 格子状地盤改良工法(TOFT工法) 狭小地での格子状地盤改良工法 →2.2 スマートコラム工法	液状化の評価 →(建築学会基礎構造設計指針) 既存建屋下での液状化対策 →3.1 コンパクト・ジオラティス工法
巨大地震の外力に耐える新しい基礎工法(構成と設計法・施工法)	巨大地震の水平力に耐える基礎工法 →2.3 格子状地盤改良を併用した高耐力パイルド・ラフト基礎 →2.4 パイルド・ラフト基礎での杭頭半剛接合工法の評価 巨大地震による押し・引抜き力に抵抗する基礎工法 →2.5 地震時の引抜きに抵抗する多段径杭工法(TMB杭工法) →2.6 TSP合成地下壁・壁杭工法	
巨大地震を考慮した建物基礎の設計・解析技術	液状化を考慮した地震応答解析 →2.7 土・水連成解析(有効応力解析)による液状化解析 地震中/地震後の沈下量の評価 →2.8 沈下を考慮した土・水連成解析(有効応力解析)	既存建物基礎の耐震診断 →3.2 既存建物基礎の耐震診断
同施工品質の確保	地盤改良工法の品質確保・環境負荷低減技術の活用 →(DCM工法:技術審査証明) →2.9 ECMセメントを用いた地盤改良	

参考文献

- 1) 日本建築学会編：建築基礎構造設計指針，pp.47～52，2001.
- 2) 内田明彦：地盤の液状化評価の現状，日本建築学会大会(北海道)，パネルディスカッション資料，2013.
- 3) 日本建築総合試験所 建築技術性能証明「DCM-L工法-スラリー系機械式深層混合処理工法-」GBRC性能証明第03-12号，2004.1 およびGBRC性能証明第03-12号改，2011.8.

2 新築建物での地盤・基礎技術

Geotechnical & Foundation Engineering Technologies for New Buildings

2.1 格子状地盤改良工法 (TOFT工法)

Grid-form Deep Mixing Walls Method (TOFT Method)

本多 剛 Tsuyoshi Honda*2

格子状地盤改良工法 (TOFT工法) は、液状化対策工法の1つとして1980年代に開発が着手された。この工法を採用したホテルが1995年兵庫県南部地震による液状化被害を受けなかったことから、大地震に対する安全・安心な工法として一躍注目された。2011年東北地方太平洋地震においてもTOFT工法の液状化抑止効果が確認された事例があり、改めてTOFT工法の有効性が再認識された。

(1) 工法の概要

TOFT工法は主に深層混合処理工法によって地盤中に作成される改良杭をラップさせながら連続的な壁として設け、それを平面的に格子配置しFig. 1のような地盤改良体を作成する工法である。一般的には2軸または4軸タイプの施工機械 (Photo 1参照) を利用して地盤改良体を作成する工法をDCM-L工法と呼び、その工法によって作成された格子状改良体をTOFTと呼んでいる。Photo 2は改良地盤の例である。

4軸タイプの施工機械を用いて作成する改良壁の施工手順をFig. 2に示す。処理機を所定の位置に移動し、固化材スラリーを吐出しながら攪拌翼を貫入させる。攪拌翼は所定の羽根切り回数を確保するために貫入時と引抜き時の速度を調節する。

本工法は2004年と2011年に (財) 日本建築総合試験所より建築技術性能証明を受けており、改良体の設計基準強度は3N/mm²までとすることができる。

(2) 格子間隔の設定

TOFT工法の設計においては、格子間隔の設定が重要な項目の1つである。そこでTOFT工法をモデル化した地盤を用いたパラメトリックスタディを行い、改良壁に囲まれた地盤の地震時せん断応力の評価法として、建築基礎構造設計指針の液状化判定式に改良地盤の影響を考慮した (1) 式を考案した。

$$\tau_d/\sigma'_z = \gamma_n \cdot \alpha_{\max} / g \cdot \sigma'_z / \sigma'_z \cdot r_d \cdot F(L) \cdot F(G) \cdot F(H) \quad (1)$$

ここに、 $r_d = 1 - 0.033z$ z : 深さ (m)

また、 $F(L)$ 、 $F(G)$ 、 $F(H)$ はそれぞれ格子間隔 L 、改良体の剛性 G 、改良深さ H に関する補正係数であり、Fig. 3の値を用いる。(1) 式を用いると簡易に格子内部地盤の地震時せん断応力を算出できるので、標準貫入試験の N 値を用いた液状化強度と比較することで液状化に対する安全率 FL が求められる。つまり、この手順を逆行すれば、格子内部地盤が $FL > 1$ となるような格子間隔 L を求めることが可能となる。

(3) 適用事例

神戸市内の港湾地区に建設されたフェリーターミナル兼ホテル (Photo 3参照) の液状化対策としてTOFT工法が採用された。この建物の建設中に1995年兵庫県南部地震が発生した。地震により埠頭の南側岸壁はPhoto 4に示すように海側に約2m水平移動し、50~70cm沈下した。しかし、TOFT工法によって液状化対策を実施した建物基礎では液状化が発生せず、建物にもほとんど被害がなかった。地震直後に格子内地盤の目視調査を実施したが、噴砂などの液状化の形跡は確認されていない。また、2011年東北地方太平洋沖地震で液状化が発生した千葉県浦安市や東京都内においても、TOFT工法が採用された建物に液状化の被害は確認されなかった。

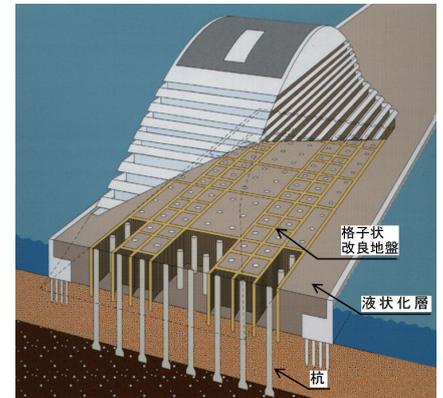


Fig. 1 TOFT工法の概要
Grid-form deep mixing walls



Photo 1 4軸施工機械
Mixer (four-axe)



Photo 2 TOFT工法の施工例
Deep mixing walls by TOFT method

*2 技術研究所 主任研究員 博士(工学) Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.

(4) 適用実績

兵庫県南部地震でTOFT工法の液状化抑止効果が実際の地震で確認されたことを受けて、数多くの建物基礎の液状化対策として採用されるようになった。1993年から2012年までの建築工事における当社の適用実績をFig. 4に示す。2012年では50件を超えており、近年はパイルド・ラフト基礎との併用例が増えている (Photo 5)。

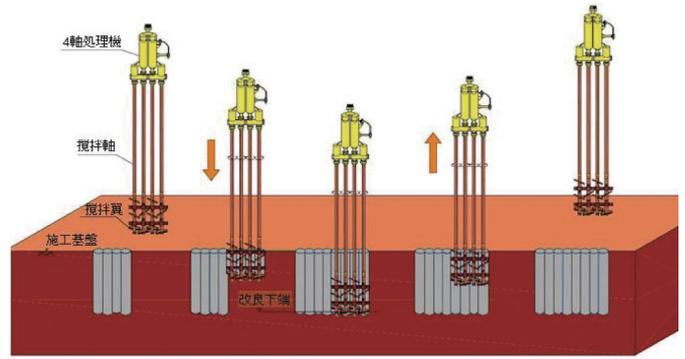


Fig. 2 改良壁の施工手順
Typical construction procedure for cement mixing wall

参考文献

- 1) 内田：格子状地盤改良工法の展開と進化，建築技術，No.747，pp.70-77，2012.

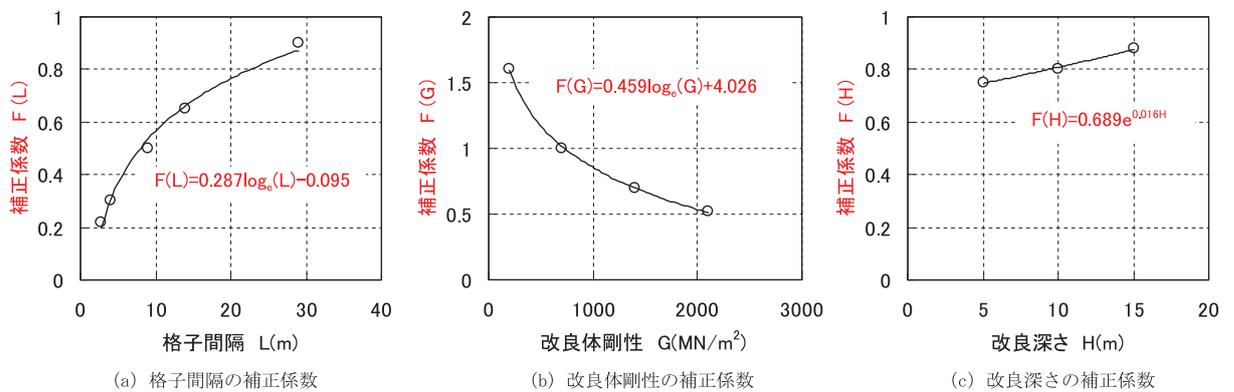


Fig. 3 改良体に関する補正係数
Correlation factors for improved wall



Photo 3 建物全景
View of building



Photo 4 埠頭南側岸壁の被害
Liquefaction damage of quay wall

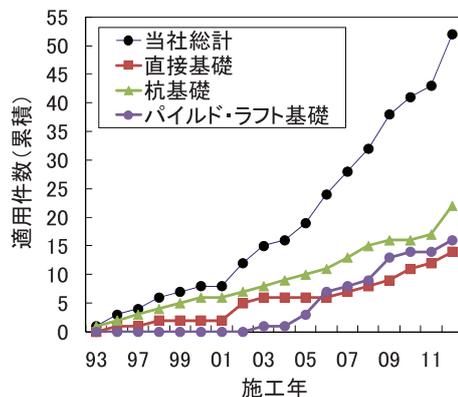


Fig. 4 TOFT工法の採用実績
Number of buildings adopted TOFT method



Photo 5 TOFT併用パイルド・ラフト基礎を採用した建物の例
View of building adopted TOFT & piled raft foundation

2.2 スマートコラム工法 Smart Column Method

小西 一生 Kazuo Konishi*3

東日本大震災以降、戸建住宅地に対する液状化対策のニーズが高まっている。代表的な液状化対策工法の一つとしてあげられる格子状地盤改良工法（TOFT工法）は、液状化抑止性能という点では実績も多く信頼も高い¹⁾。しかしその施工機械の大きさゆえに、狭小地が多い戸建住宅地の液状化対策への適用が困難な場合があった。

このような状況をうけ、新築住宅地や、既設住宅地の道路部など、狭小地でのTOFT工法の施工を主目的とした小型地盤改良機（＝スマートコラム工法、Fig.1参照）を開発し、戸建て住宅地において液状化対策を実施した。本報では小型単軸地盤改良機の開発の詳細を説明し、その後戸建住宅地に対しスマートコラム工法を適用した工事概要、施工品質結果について報告する。

(1) 小型単軸地盤改良機の開発

TOFT工法では通常φ1000mm×2軸の改良柱により連続壁を構築し、壁の一体性を確保している。一方、宅地において柱状改良を目的として使われてきた小型単軸機は、主にφ500～600mm程度の小径単軸の改良を目的としており、多軸の大型機に比べて掘削ロッドの剛性や削孔能力が低い。そのため、そのまま適用すると連続壁の一体性を左右する鉛直精度の確保が困難になることが予想された。そこで小型単軸機において、鉛直精度を確保するために、掘削翼および共回り防止翼に改良を施した。Fig.2に開発した機械を、またFig.3には共回り防止翼の詳細を示す。まず掘削翼をスパイラル型に変更することで掘削力を向上させ、また共回り防止翼にスタビライザー機構を追加することで未改良地盤から受ける抵抗を鉛直変位抑制力に変え、鉛直精度向上を試みた。施工管理においても、TOFT工法やDCM-L工法で実績のあるCDM管理装置を搭載することで、大型機施工と同等の施工プロセスの管理を実現している。以上の機能を付加することで施工精度を確保し、TOFT工法の施工に不可欠な改良壁の一体性を確保することを可能とした。

以下に、施工試験の内容を示す。

(2) 実証施工試験

施工試験は市街地の一角における、敷地面積約230m²程度の戸建住宅の建て替え工事で実施した。Fig.4に土質柱状図を示す。GL-3m～-10mの砂層において液状化対策が必要であると判断されたため、スマートコラム工法による地盤改良を実施した。Fig.5に改良体の配置図を、Table1に改良体仕様を示す。本工法における地盤改良機（Fig.2）は、0.45m³級バックホウと同クラスの小型汎用地盤改良機を



Fig. 1 スマートコラム工法の適用例
The situation of the smart column method of construction

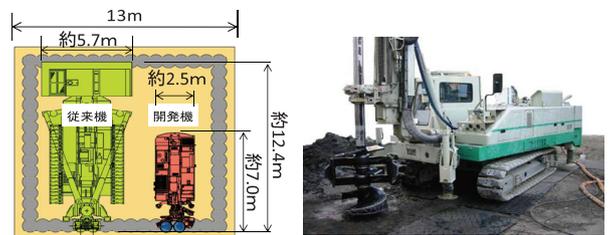


Fig. 2 開発した小型地盤改良機
Small ground improvement machine of the new development

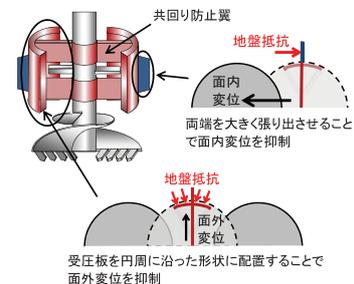


Fig. 3 共回り防止翼への追加機能
Function addition to blades for prevention of corotation

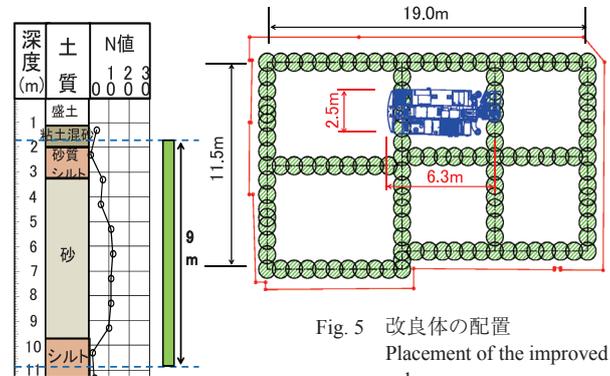


Fig. 4 土質柱状図
Geologic columnar section

Fig. 5 改良体の配置
Placement of the improved columns

*3 技術研究所（竹中土木技術・生産本部 課長） Research & Development Institute (Takenaka Civil Engineering & Construction Co., Ltd.)

ベースに開発され、最大改良径 Φ 1.6m、改良深度20mの掘削性能を有する単軸機である。

(3) 施工品質の確認

改良杭の鉛直性を確認するために、貫入終了後の掘削ロッドの建込精度を、特殊な挿入式傾斜計で測定した。

掘削深度1m毎の変位量を上から見た軌跡図をFig. 6に示す。最終深度での改良体の変位量は、片押し施工の場合、通常のTOFT工法での目標変位量である1/200 (55mm) 以下を満足することは難しい結果となったが、千鳥施工の場合、打設列に対して平行方向1/478 (23mm)、垂直方向1/647 (17mm) と、目標変位量以下となり、先に述べた掘削翼と共回り防止翼の改良により、本施工試験では壁の一体性を確認した。

次に地盤改良施工28日後に一軸圧縮強度試験を行った。強度確認は、1本の改良体に対し杭の中心とD/4 (Dは改良直径) の位置でボーリングを実施、改良長全深度に対し3個/m (計27個/本) の割合で採取したコアで行った。結果をFig. 7に示す。すべてのコアで合格判定値を上回る結果となり、所定の改良壁の強度が満足されていることを確認した。加えて掘削翼および共回り防止翼の変更による攪拌性の悪化も懸念されたため、バラツキを判定する変動係数を算定した。その結果、改良杭中心で17.0%、D/4の位置では17.4%となり、通常のDCM-L工法の平均変動係数25~30%より小さく、バラツキの少ない良好な攪拌性を確認した。

以上により、本施工条件下において、本工法は通常のTOFT工法と同等以上の施工品質を確保可能な工法であることを実証した。

(4) 今後の展望

今回の施工事例は、掘削および改良地盤の大半が砂地盤での施工によるものであった。地盤条件は現場によって様々であり、今後は他の地盤条件での確認を行う予定である。例えばシルト層およびN値が大きい層等が介在する地盤に対しても同等の施工品質を満足できるよう、更なる施工実績の蓄積を行う。また今回は掘削速度を0.5m/minで実施しているが、将来的には所定の品質を満足しつつ、かつ通常のDCM-L工法での一般的な掘削速度である1.0m/minまで施工効率を高める必要がある。

加えて現在、施工の更なる効率化と、ロッド剛性増強による鉛直精度の向上に期待し、機械の多軸化 (2軸) も進めており、基本的な性能は確認済みである。今後、実証試験および実プロジェクトへの適用が待たれるところである (Fig. 8)。

東日本大震災の影響から、液状化対策を住宅性能評価項目に追加する動きもあり、今後は、新築のみならず既設の戸建住宅地においても本工法のニーズが高まるものと思われる。

参考文献

- 1) 例えば 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.46~48，1996。

Table 1 改良体仕様
Specifications of the ground improved construction

項目	仕様
改良径	$\Phi = 1000\text{mm}$
改良長	$L=9.0\text{m}$
改良強度	設計基準強度 $F_c = 1.5\text{N/mm}^2$
固化材種類	ジオセツト200
固化材添加量	160kg/m^3
水セメント比	W/C = 100%
改良本数	127本

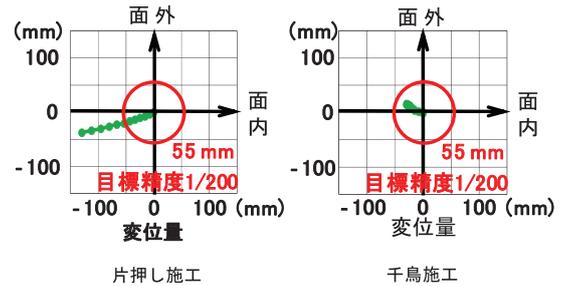


Fig. 6 鉛直精度の軌跡図
Figure of trace of vertical digging precision

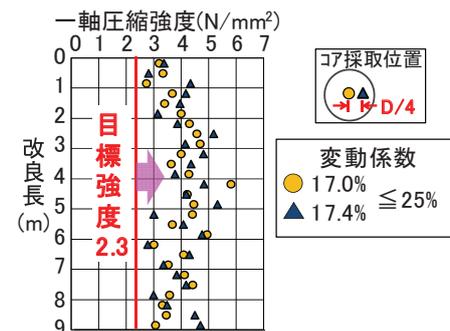


Fig. 7 一軸圧縮強さと変動係数
Unconfined compressive strength and variation index



Fig. 8 新開発の2軸機と試験施工による改良体
Construction equipment having twin mixing shafts and blades of the new development and Improved columns by the examination construction

2.3 格子状地盤改良を併用した高耐力パイルド・ラフト基礎 Piled Raft Foundation with Grid-form Deep Mixing Walls

濱田 純次 Junji Hamada*4

(1) 高耐力パイルド・ラフト基礎

パイルド・ラフト基礎は、直接基礎（ラフト）と杭基礎（パイル）の両方で建物の荷重を支持する基礎形式であり、建物の要求性能を満足する範囲で基礎の沈下を許容して基礎底面の地盤抵抗を利用することにより、杭基礎に比べて杭の本数や径を削減することができる（Fig. 1 (c)）。その合理性から、近年わが国でも超高層建物を含む多くの建物に採用されている。パイルド・ラフト基礎は、本来、基礎底面下の地盤抵抗が十分に得られる比較的硬質な粘土や密な砂地盤に適したものであり、基礎底面の地盤抵抗を長期にわたって確保することが困難な軟弱地盤（非常に軟弱な粘性土や液状化のおそれのある緩い砂）には適用し難い。そこで、軟弱地盤上の高層建物に対してもパイルド・ラフト基礎が適用できるように、比較的良好的な地盤まで施した地盤改良（深層混合処理工法（TOFT工法）による格子状地盤改良）を併用した高耐力パイルド・ラフト基礎を開発した（Fig. 1 (d)）。

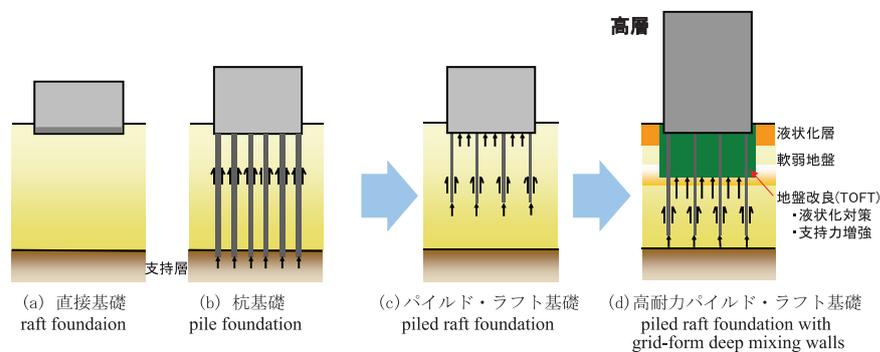


Fig. 1 パイルド・ラフト基礎と高耐力パイルド・ラフト基礎
Piled raft foundation and advanced type of piled raft

(2) 軟弱地盤上の高層建物への適用

Fig. 2は、高耐力パイルド・ラフト基礎を高層建物へ適用して合理化を図った事例（延床面積8,037m²、地上12階、軒高37.75m、RC造（基礎免震構造））である。軟弱地盤上に立地するこの建物の重量は200kN/m²で、原地盤では支持力を満足できないため、従来技術では大径の場所打ち杭を用いた杭基礎を採用せざるをえなかった。そこで、直接基礎としての支持力増強と液状化防止のために、直接基礎の底面下、深層混合処理工法による格子状地盤改良体（φ1000、L=11.2m）を配置し、先端をGL-16.0mの過圧密で安定した粘性土層に定着させた。杭は、建物荷重による圧密沈下を防ぐために用いており、既製コンクリート杭（φ800～1200、L=45.0m）を採用し、GL-48m以深のN値60以上の砂礫層に先端を定着させた。

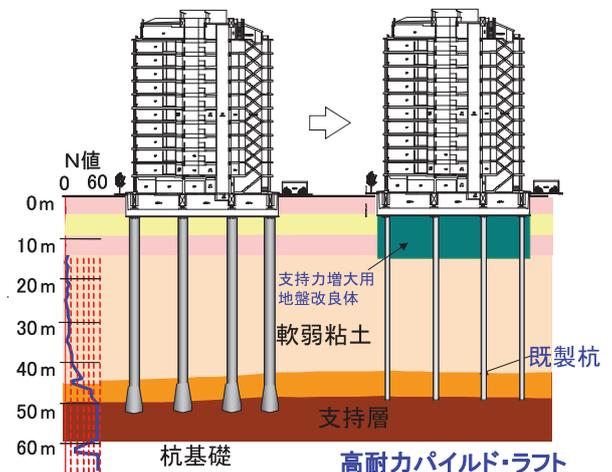


Fig. 2 高耐力パイルド・ラフト基礎の適用例
Application of piled raft with grid-form deep mixing walls

(3) 建物・基礎の挙動観測

杭と地盤改良体（TOFT）および原地盤で鉛直荷重を支持する高耐力パイルド・ラフト基礎の挙動を確認し、設計の妥当性を検証するために、常時における静的挙動と地震時における地盤・基礎・建物系の動的挙動観測を実施した。

① 常時の沈下および荷重分担

高耐力パイルド・ラフト基礎の施工開始から竣工後にわたる沈下の経時変化をFig. 3に示す。竣工後約5年における沈下量は17mmであり、また2011年3月11日東北地方太平洋沖地震の前後においてほとんど変化はなく安定している。Fig. 4に、杭と地盤の鉛直荷重分担の経時変化を示す。全荷重から水圧を除いた有効鉛直荷重に対し、杭が

*4 技術研究所 主任研究員 博士(工学) Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.

67%を分担しており、地盤改良体が27%、原地盤は6%で、地盤改良体が原地盤に比べて多くの荷重を分担している。

②地震時の挙動観測

2011年3月11日14:46に発生した東北地方太平洋沖地震において、関東地方でも震度5強の揺れが観測され、上部、基礎および地盤の10分間の連続した地震動を記録した。Fig. 5に観測されたEW方向の加速度時刻歴波形（地表面近傍GL-1.5m、ピット部、1Fおよび12F）を示す。100~150秒に主要動があり、最大加速度は、地表面で 1.75m/s^2 であった。免震装置による1Fでの応答低減（約50%に低減）とともにピット部において大きな入力損失（約60%に低減）が見られ、軟弱地盤においても良好な免震効果が確認できた。Fig. 6に地震前および地震時の軸力と曲げモーメントから求めた中央部の杭（杭径1.2m）の杭頭部（SC杭）の曲げモーメントMと軸力Nの関係を示す。同図には、短期および終局時のMN相関曲線を示している。軸力変動が小さく、また、短期許容応力度に対して発生曲げモーメントが十分に小さいことが判明した。（4）地震時挙動のシミュレーション解析

詳細な3次元地盤・建物連成系FEMモデル（Fig. 7）による東北地方太平洋沖地震時のシミュレーション解析を行った。Fig. 8に、実測値と解析結果の比較（建物および地盤の最大応答値分布）を示す。本解析は、免震効果や入力損失効果を含め、実測値を精度よく再現できている。

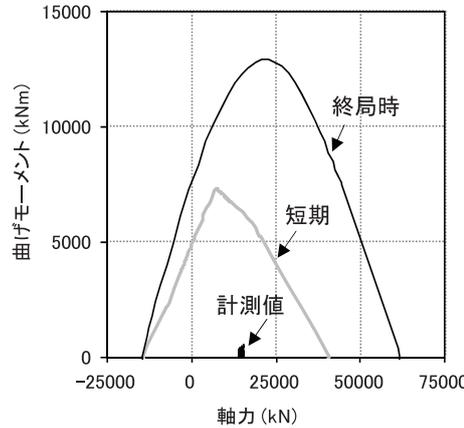


Fig. 6 杭のMN相関（径1.2m）
Interaction curves for axial load and bending moment

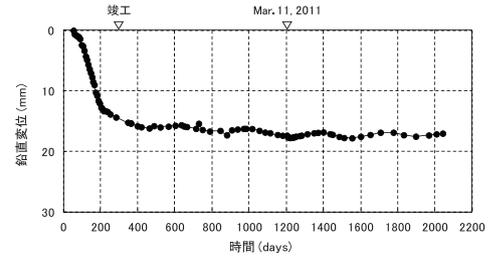


Fig. 3 沈下量の経時変化
Monitoring of foundation settlement

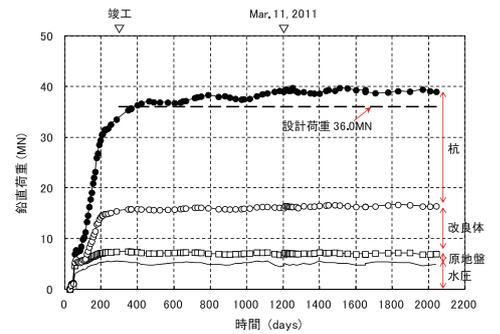


Fig. 4 鉛直荷重分担の経時変化
Monitoring of load sharing among piles, deep mixing walls and soil

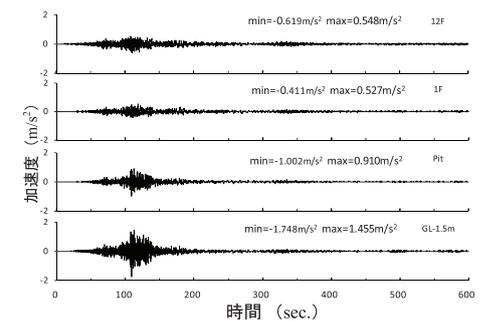


Fig. 5 加速度時刻歴波形（EW方向）
Time histories of accelerations (EW-direction)

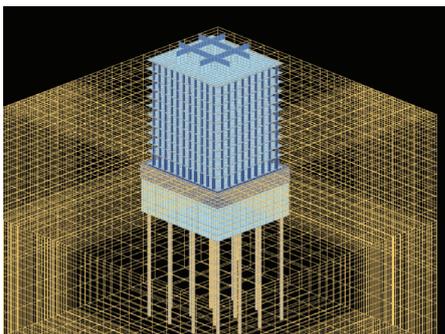


Fig. 7 解析モデル
Analytical model

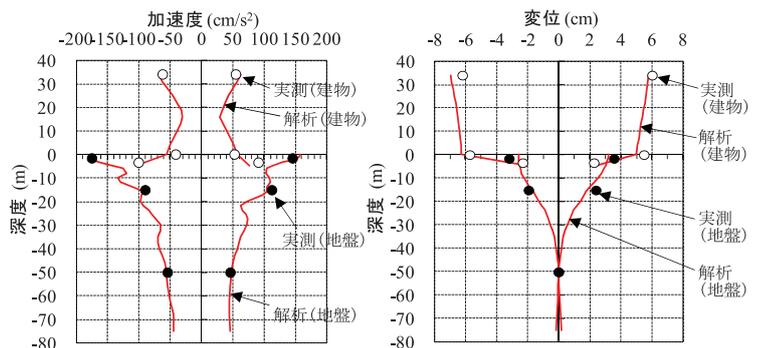


Fig. 8 最大応答値分布（EW方向）
Peak accelerations and relative displacements (EW-direction)

参考文献

- 1) Yamashita, K., Hamada, J., Wakai, S. and Tanikawa, T.: Long-term monitoring of piled raft foundations with grid-form deep mixing walls on soft ground, Takenaka Technical Research Report, No.69, 2013.
- 2) Hamada, J., Shigeno, Y., Onimaru, S., Tanikawa, T., Nakamura, N. and Yamashita, K.: Numerical analysis on seismic response of piled raft foundation with grid-form deep mixing walls supporting a base isolated building, Takenaka Technical Research Report, No.69, 2013.

2.4 パイルド・ラフト基礎での杭頭半剛接合工法の評価

Evaluation of Lateral Loaded Piled Raft Foundations Considering Effect of Rotational Stiffness of Pile Head

谷川 友浩 Tomohiro Tanikawa*5

地震時に杭頭、基礎梁および基礎スラブに発生する曲げモーメントを低減できる杭頭半剛接合工法を、パイルド・ラフト基礎と併用する場合のメリットを有限要素法による解析結果により検討した。さらに、実プロジェクトに適用した事例を紹介する。

(1) 工法概要

Fig. 1に杭頭半剛接合工法の原理を、Fig. 2に杭頭半剛接合工法を採用した杭の繰り返し水平載荷実験の一例を示す。杭の主筋がパイルキャップに定着されていないため、杭頭部の端部とパイルキャップが離間することにより発生する曲げモーメントが頭打ちとなり杭には大きな損傷無く変形角が増加している¹⁾。

パイルド・ラフト基礎では杭の水平抵抗のみではなく基礎底面の摩擦抵抗などでも抵抗するため、杭とその他の抵抗要素の水平剛性比によって水平荷重分担が変化する。基礎底面摩擦などの抵抗が十分に期待できれば、杭の水平荷重分担を小さくできるメリットがある。この基礎形式で杭頭半剛接合工法を併用した場合には、杭頭を剛とした場合よりも杭の水平剛性が小さくなるため、杭の水平荷重分担が小さくなる効果が期待できる。

(2) 数値解析による効果の確認

3次元弾塑性有限要素法解析²⁾を行い、杭基礎およびパイルド・ラフト基礎の杭頭回転拘束度（以下、固定度）の影響を確認する。Fig. 3に解析モデルを、Table 1に解析に用いた物性値などを示す。帯基礎のラフトに杭が4列配置されたもので、杭は弾性で径1m、長さ20m、杭間隔は杭径の5倍とした。杭頭の固定度は ∞ （杭頭剛接合）と0（杭頭ピン接合）とした。地盤は8節点ソリッド要素でモデル化し、静止土圧係数 $K_0=1.0$ として自重による初期応力を考慮した。これは、後述する平均応力に関する条件を構成則に入れているためである。地盤は深度に関わらず一様とし、初期せん断剛性 G_0 は非排水せん断強度 c_u に比例させ、 $G_0=400c_u$ とした。地盤の構成則は、破壊条件としてTrescaの基準に加え、破壊基準に到る前は、双曲線モデルにより、歪による剛性低下を考慮し、破壊条件で設定した最大せん断応力の1.05倍の値に漸近するものとした。Fig. 4に $G/G_0-\bar{\varepsilon}_{eq}$ （相当ひずみ）関係を示す。また、平均応力が引張にならない条件を付加した。

Fig. 5に水平荷重と水平変位の関係を示す。全体の水平剛性は、パイルド・ラフト基礎の剛接合が最も大きく、杭基礎の杭頭ピン接合が最も小さい。水平変位が大きくなると、地盤の剛性低下に伴って水平剛性も低下する。点線で示すパイルド・ラフト基礎のラフト分担は、水平変位が大きくなるにつれ、杭頭固定度にかかわらず一定値に近づいて行く。これは底面の摩擦が地盤のせん断強度に達しているからであり、ラフト部はこれ以上の抵抗ができない。

また、パイルド・ラフト基礎ではラフトの寄与があるため、杭頭固定度の違いによる水平剛性の違いが杭基礎ほど大きくはな

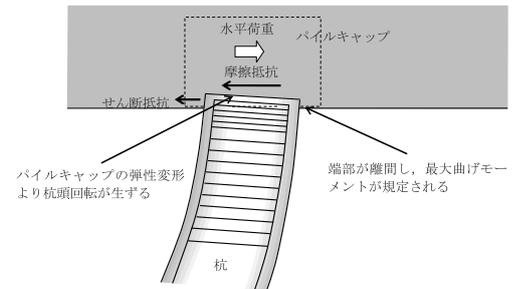


Fig. 1 杭頭半剛接合工法の原理
Mechanism of half rigid pile head

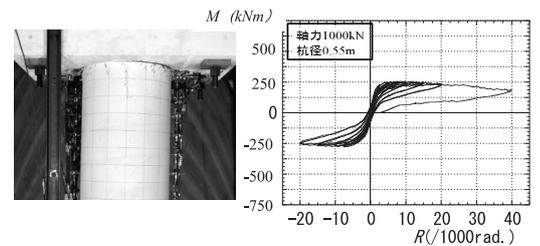


Fig. 2 杭頭半剛接合工法の効果
Feature of half rigid pile head connection

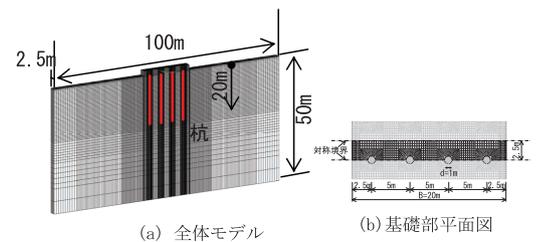


Fig. 3 解析モデル
Numerical analysis model

Table 1 解析物性値
Material properties

地盤	
単位体積重量	16.5kN/m ³
非排水せん断強度	50kPa
初期せん断剛性	20000kPa
ポアソン比	0.49
杭	
ヤング係数	25GPa
直径	1m
杭長	20m
杭間隔	5m
ラフト	
剛性	∞
幅	20m

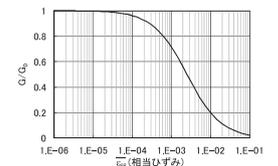


Fig. 4 $G/G_0-\bar{\varepsilon}_{eq}$ 関係
Relationship between G/G_0 and equivalent strain

*5 技術研究所 研究員 Researcher, Research & Development Institute

い。例えば水平荷重度が40kPa（建物荷重度100kPaとすると水平震度0.4）とすると、パイルド・ラフト基礎は、固定で16mm、ピンで21mmとなり、固定度によらず同程度の変位である一方、杭基礎では固定で20mm、ピンで43mmと固定度によって2倍以上大きな変位が生じることになる。

Fig. 6に杭荷重分担率と水平変位の関係を示す。杭荷重分担率は杭の位置によって杭頭せん断力が違うため、ここでは全体の平均値を用いた。水平変位10mmの時、パイルド・ラフト基礎の杭の水平荷重分担率が、杭頭固定の場合0.5に対して杭頭ピンの場合0.14となり、杭頭の固定度を小さくするメリットが大きい。しかし、水平変位が大きくなるに従って、杭の荷重分担は大きくなり、その増加率は杭頭ピンの場合の方が大きい。これはFig. 5で示した様にラフトの底面の最大抵抗力が頭打ちとなり、徐々に杭への負担が大きくなるためである。この点は、杭の荷重分担を算定する上で、非常に重要な要因である。

上記の有限要素法解析結果は固定とピンと言う極端な例であり、半剛接合はその中間的な挙動を示す。この様な杭頭の固定度を考慮したパイルド・ラフト基礎の杭断面力の簡易算定式についても研究を行っている³⁾⁻⁵⁾。

(3) 適用事例

パイルド・ラフト基礎に杭頭半剛接合法を適用した事例を紹介する。適用した建物の概要をTable 2に示す。

基礎形式は、液状化を防止する格子状地盤改良体と既製コンクリート杭（杭径700~1200mm）を併用したパイルド・ラフト基礎とし、杭頭部は半剛接合法（BCJ-評定FD0342-01）としている。設計地震力に対して、基礎底面の摩擦抵抗で十分抵抗できることを確認し、杭の断面力を基礎底面の摩擦抵抗と地盤変形を考慮して安全側に杭頭固定として評価している。

杭頭接合部の配筋状況をPhoto 1に示す。パイルキャップへの埋込み深さを150mmとし、杭の主筋をパイルキャップに接合していない。

(4) まとめ

パイルド・ラフト基礎は、基礎底面の摩擦抵抗が期待できるために、杭頭の固定度によらず水平変位はあまり変わらない。そのため、杭頭部をピン接合に近づけると、杭頭曲げモーメントのみならず杭頭せん断力も小さくなる。パイルド・ラフト基礎では、杭頭の固定度を下げた杭の水平剛性を小さくすることにより、杭に作用する水平荷重（杭頭せん断力）を低下させる効果がある。

参考文献

- 濱田純次, 土屋富男, 宇佐美徹, 宮内靖昌: 杭主筋を基礎に定着しない構真台柱の杭頭接合部の耐震性能 (その1, その2), 日本建築学会大会学術講演梗概集B-1構造I, pp.471-474, 2006.
- 谷川友浩, 濱田純次, 重野喜政, 山下清: パイルド・ラフト基礎の水平抵抗力に関するFEM解析例, 第43回地盤工学研究発表会, pp.1213-1214, 2008.
- 濱田純次, 土屋富男, 山下清: パイルド・ラフト基礎の地震時杭断面力の算定式, 日本建築学会構造系論文集, 第74巻, 第644号, pp.1759-1767, 2009.10.
- 濱田純次, 土屋富男, 山下清: 杭頭回転拘束度を考慮したパイルド・ラフト基礎の地震時の杭応力算定式, 日本建築学会大会学術講演梗概集B-1構造I, pp.695-696, 2007.
- 濱田純次, 谷川友浩, 土屋富男: 杭頭半剛接合法のパイルド・ラフト基礎への適用, 基礎工 Vol.40, No.6, pp.69-71, 2012.

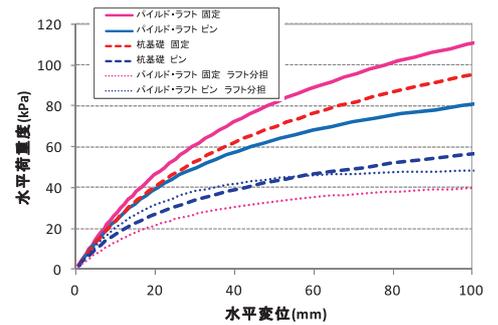


Fig. 5 水平変位と水平荷重の関係
Relationship between lateral displacement and lateral load

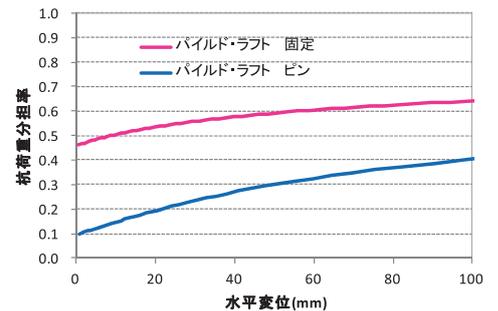


Fig. 6 水平変位と杭荷重分担率の関係
Relationship between lateral displacement and pile load sharing ratio

Table 2 建物概要
Building profile

建設地	東京都
建築用途	総合病院
建物規模	地上9階, 塔屋1層
建物高さ	35.8m
延床面積	28190m ²
構造	S造 (CFT)・一部RC造, 基礎免震
基礎形式	パイルド・ラフト基礎 (PHC杭, TOFT)

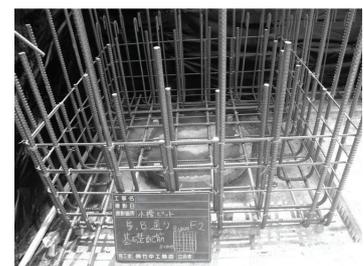


Photo 1 杭頭部 (パイルキャップ配筋例)
Pile head (bar arrangement of pile cap)

2.5 地震時の引抜きに抵抗する多段拡径杭工法 (TMB杭工法) Takenaka Multi-Belled Cast-in-place Concrete Pile

若井 修一 Shuichi Wakai*6

建物に生じる常時および地震時の基礎の浮上り対策として、杭の軸部に節部（以下、中間拡径部と呼ぶ）を設けた多段拡径杭¹⁾の適用が考えられる。本工法は1996年に開発に着手し、原位置施工試験および載荷試験を実施しながら個別評定建物に適用を進めた。その後、2007年に(財)日本建築センターの工法評定、2008年・2010年に(財)ベターリビングの引抜き・押し込み方向の支持力に関する一般評定を取得して、更なる適用の拡大を図っている。

多段拡径杭は押し込み力および引抜き力のいずれに対しても優れた鉛直支持性能を発揮するが、ここでは特に引抜き抵抗性状に限定して、実大規模の原位置施工試験および引抜き試験の概要を示し、試験結果に基づく引抜き支持力の設計式および最近の適用事例を紹介する。

(1) 工法概要

多段拡径杭工法の概要をFig. 1に示す。本工法は軸部を掘削後、専用の掘削バケットを用いて中間拡径部および拡底部（以下、拡径部と呼ぶ）を掘削し、コンクリートを打設する多段拡径の場所打ちコンクリート杭工法である。拡底率（軸部と拡径部の面積比）が最大5.2と大きく、細い軸部で建物を支持できるように設計基準強度 60N/mm^2 までの高強度コンクリートを適用できることが特徴である。従来のアースドリル工法にはない杭を構築するために新たに開発した施工機械の全景をFig. 2に、掘削バケットをFig. 3に示す。Fig. 3 (a) は中間拡径部掘削時、Fig. 3 (b) は拡底部掘削時に用いる掘削バケットを示す。

(2) 実大杭の原位置施工試験

杭の施工性および品質を確認するために実大杭の原位置施工試験を実施した。施工試験の一例をFig. 4に示す。コンクリートを打設した杭を養生後に掘出し、形状・寸法およびコンクリート強度の調査を実施した。地盤は掘削形状の確保が難しいと考えられるN値10程度の細砂を含む砂地盤である。コンクリートは設計基準強度 60N/mm^2 、水セメント比28.8%の高強度コンクリートを用いた。

施工性について、開発した掘削機械により孔壁の崩壊なく掘削が可能であること、高強度コンクリートの打設速度（約 $20\text{m}^3/\text{h}$ ）は通常のコンクリートと同等であることを確認した。品質について、掘出し後に計測した杭径（Fig. 4 (b)）は、超音波孔壁測定結果（Fig. 4 (a)）および設計杭径とほぼ等しく、所定の形状・寸法の杭を構築できることを確認した。コアの圧縮強度（Fig. 4 (c)）は全長で設計基準強度以上であった。以上から、本工法の施工性に問題はなく、所定の施工管理により品質を確保できることを確認した。

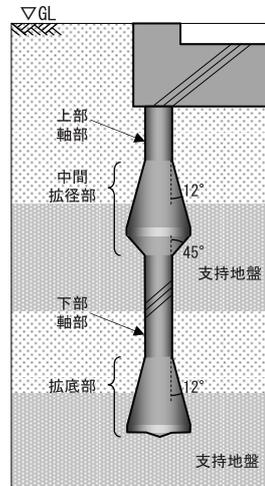


Fig. 1 多段拡径杭の概要
Multi-Belled Concrete Pile



Fig. 2 多段拡径杭の施工機械
Earth drill method boring machine



(a) 中間拡径部掘削時



(b) 拡底部掘削時

Fig. 3 多段拡径杭の掘削バケット
Earth drill method boring machine

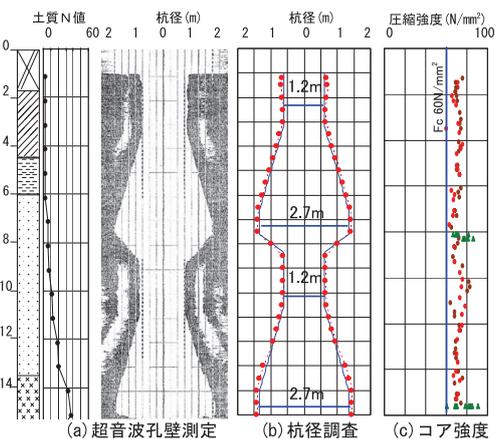


Fig. 4 施工試験杭の杭径およびコンクリート圧縮強度
Diameters and compressive strength of concrete pile

Table 1 受入れ時採取の標準養生供試体の圧縮強度
Compressive strength of concrete test pieces

Fc (N/mm^2)	呼び強度 (N/mm^2)	供試体強度 (N/mm^2)		
		28日	47日	62日
60	68	87.9	96.1	93.3

*6 技術研究所 研究主任 Associate Chief Researcher, Research & Development Institute

(3) 実大規模の原位置引抜き試験

多段拡径杭の拡径部の引抜き抵抗力を把握するために、異なる地盤において、多段拡径杭6本、拡底杭4本の原位置引抜き試験を実施した。引抜き試験の一例をFig. 5に示す。試験杭は長尺のH形鋼を杭先端まで挿入したSRC構造である。計測項目は深度方向の複数断面の鉄骨・鉄筋ひずみおよび杭体コンクリート上端部の引抜き量である。

砂質地盤における試験結果に基づいて整理した拡径部の周面抵抗力度 τ_0 とN値の関係を図. 6に示す。 τ_0 は拡径部の上部傾斜部の上下端の軸方向力の差を上部傾斜部の周面積で除して算定した。Fig. 6より、砂質地盤における拡径部の周面抵抗力度は、既往の荷重試験の軸部における周面抵抗力度²⁾と比較して同等以上の値であると考えられる。

(4) 数値解析

拡径部の引抜き抵抗機構を検討するために数値解析を実施した。数値解析の一例を図. 7に示す。解析モデルは軸対称の有限要素で、杭体は弾性、地盤は弾塑性とした。拡径部で大きな引抜き抵抗力が発揮される (Fig. 7 (a)) 要因として、引抜きに伴い拡径部の上部傾斜部が直上の地盤を上方に押し上げることで抵抗土塊の範囲が拡大するとともに、土塊内に生じたせん断面での地盤内応力が増大 (Fig. 7 (b)) して、せん断抵抗が増大することが考えられる。

(5) 引抜き方向の許容支持力

性能評価機関で一般評定を取得した引抜き方向の許容支持力の設計式を以下に示す。拡径部の支持力係数に引抜き抵抗力の増大効果が考慮されている。

$$\text{長期: } R_a = 1/3 \{ \kappa \cdot N \cdot A_p + (\lambda \cdot N_s \cdot L_s + \mu \cdot q_u \cdot L_c) \cdot \psi \} + W_p$$

$$\text{短期: } R_a = 2/3 \{ \kappa \cdot N \cdot A_p + (\lambda \cdot N_s \cdot L_s + \mu \cdot q_u \cdot L_c) \cdot \psi \} + W_p$$

ここに、 R_a : 許容支持力 (kN), κ, λ, μ : 支持力係数

$\kappa = 0, \lambda = 3.3$ (軸部), $\lambda = 8.0$ (拡径部), $\mu = 0.5,$

N_s : 砂質地盤のN値, $N_s \leq 30$ (軸部), $N_s \leq 60$ (拡径部),

q_u : 粘土質地盤の一軸圧縮強度 (kN/m²), $q_u \leq 200$ (軸部), $q_u \leq 1000$ (拡径部), L_s, L_c : 杭に接する砂質・粘土質地盤の長さ (m), ψ : 杭周長 (m), W_p : 杭の有効重量 (kN)

(6) 適用事例

本工法は引抜き抵抗杭として計20件の実プロジェクトに適用した。水圧により常時の引抜きの作用する建物に適用し、杭の軸方向力を長期計測した事例を図. 8に示す。建物位置は横浜市の沿岸部であり東北地方太平洋沖地震時の最大震度は5強であった。計測結果より軸方向力は地震前後で大きな変動がなく、竣工後7年間にわたりほぼ一定である。本工法の杭は長期にわたり安定した引抜き抵抗力を保持できることを確認した。

参考文献

- 1) 平井・若井・中島・青木: 多段拡径場所打ちコンクリート杭工法の研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集B-1, pp.575-580, 2007.
- 2) 日本建築学会編: 建築基礎構造設計指針, pp.215-216, 2001.

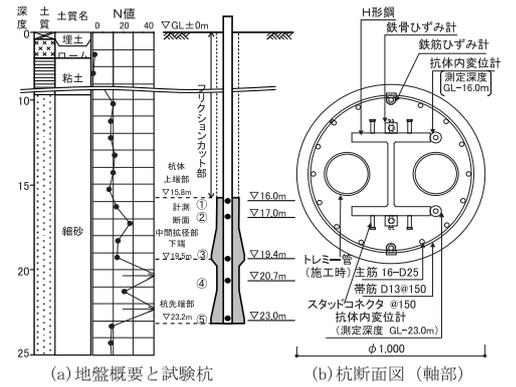


Fig. 5 荷重試験杭と地盤の概要
Schematic view of pile with soil profile

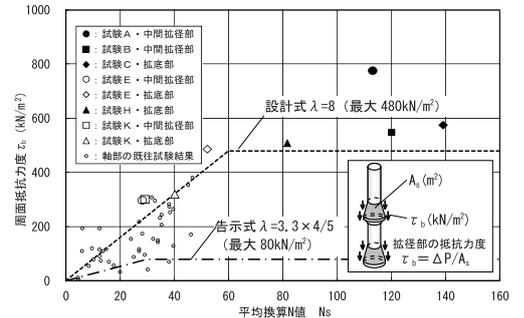


Fig. 6 周面抵抗力度とN値の関係
Relation between surface frictions and N-values

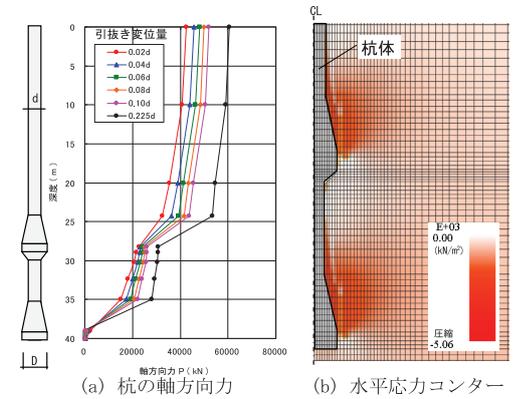


Fig. 7 数値解析結果
Numerical analysis results

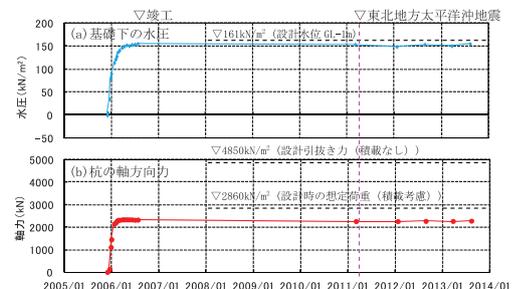


Fig. 8 杭の軸方向力の計測結果
Results of measurements

2.6 TSP合成地下壁・壁杭工法 TAKENAKA Soil-cement Pile Method

近年、資源の有効利用による環境負荷低減およびコスト削減の観点から、仮設山留め壁であるソイルセメント柱列壁の鋼材（H形鋼）を合成構造の地下外壁として活用する工法^{1) 2)}が普及してきている。また、ソイルセメント柱列壁工法は、逆打ち工事における仮設の支持杭としても利用されているが、ソイルセメント品質の安定性に対する問題等から、建物の本設杭へ活用するための工法開発・適用はあまり進んでいないのが現状のようである³⁾。RC連続壁より採用事例の多いソイルセメント柱列壁を地下外壁だけでなく杭としても活用できれば、建物外周部の杭が不要となることで、基礎工事のさらなる環境負荷低減と経済性向上に寄与できる。

ここでは、特に狭小地において地下外壁を薄くできることで地下階の有効面積拡大が図れるとともに、地下外壁外側に配置されているため巨大地震による押込み・引抜き力に対して合理的な抵抗要素となるTSP合成地下壁・壁杭工法の概要について紹介する。

(1) 工法概要

TSP合成地下壁・壁杭工法は、従来の多軸オーガー機を使用し、施工法や品質管理の仕様をより厳密に規定することでソイルセメント品質の安定化を図り、本設杭としての支持性能と山留め壁としての連続性（遮水性）を確保した工法である。工法概念図をFig. 1に示す。仮設のソイルセメント柱列壁との主な相違点は下記の通りである。

- ・ソイルセメント強度は $F_c = 1.0\text{N/mm}^2$ 程度（仮設では一般に $0.3 \sim 0.5\text{N/mm}^2$ ）
- ・施工仕様（攪拌翼形状・段数、攪拌回数等）を規定し、安定したソイルセメント品質を確保
- ・鉛直支持力確保のため、鋼材の杭利用部分にはスタッドを打設（ウェブ面）
- ・建物荷重は合成壁のスタッドまたは鋼材頭部の臥梁により伝達

(2) 支持力の考え方

設計における鉛直支持力の算定は、TSP壁杭が地盤改良を併用したH鋼杭と考え、Fig. 2に示す3つの想定破壊モードの最小値としている。一般に地盤が軟弱でソイルセメント強度が高い場合、①地盤破壊で支持力が決まり、地盤が硬質でソイルセメント強度が低い場合、③芯材表面すべり破壊が最小値となる。②芯材閉鎖断面破壊は、ソイルコラム径に対してサイズが小さい広幅系の鋼材で最小値となることもあるが、一般に山留めで用いられる鋼材では、鉛直支持力は①または③で決定されることが多い。なお、必要な支持力係数は、①地盤破壊および③芯材表面すべり破壊の原位置載荷試験データを蓄積して、地盤に対する周面摩擦力、先端支持力、鋼材とソイルセメントの付着力（Fig. 3）、スタッド耐力を設定している^{4) 5)}。

田屋 裕司 Yuji Taya*7

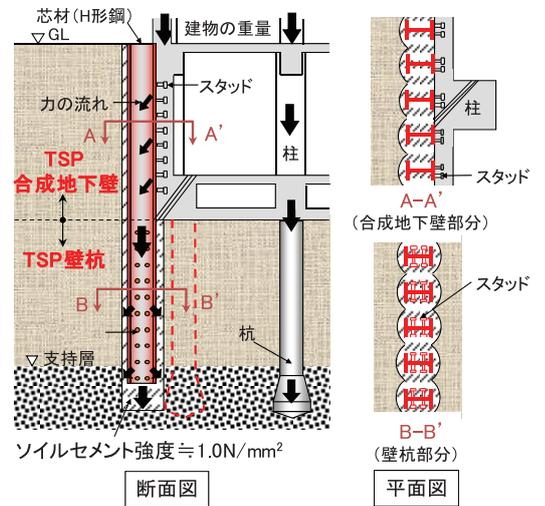


Fig. 1 TSP合成地下壁・壁杭工法概念図
Outline of TSP Method

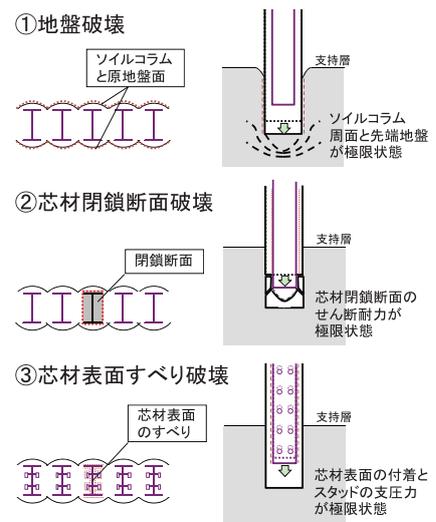


Fig. 2 支持力算定における想定破壊モード
Assumed fracture mode for bearing capacity calculation

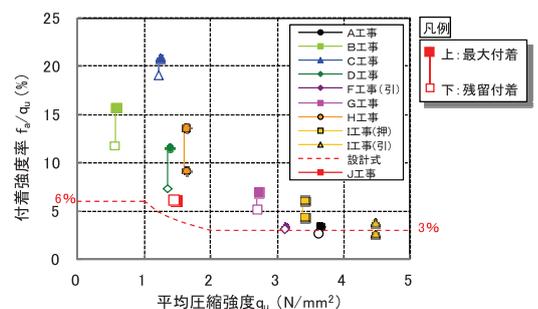


Fig. 3 鋼材とソイルセメントの付着力
Adhesion stress of steel to soil-cement

*7 技術研究所 主任研究員 Chief Researcher, Research & Development Institute

(3) 施工のポイント

TSP壁杭の施工は、ソイルセメント強度・ばらつきの安定化を図るため、深層混合地盤改良に準じた施工機械や施工手順の標準仕様を規定している。攪拌翼の形状・段数をFig. 4に、施工フローをFig. 5に施工法の仕様規定をTable 1に示す。施工管理では、Photo 1に示す自動記録装置を用いることを原則とし、攪拌回数、削孔深度・速度、注入量等を管理する。ソイルセメントの品質確認は日本建築センター「建築物のための改良地盤の設計及び品質管理指針」⁶⁾に準じて、施工後に鉛直コアボーリングによる品質検査を行っている。

Table 1 施工法の仕様規定
Specification code of construction method

項目	攪拌回数 (削孔速度)	ターニング	孔底攪拌	エアブロー	注入量
規定値	貫入時：35回/m以上 (1.0m/分以下) 引上時：17.5回/m以上 (2.0m/分以下)	1回、5m 以上	ターニング後 2分以上	最終 引上げ時 中止	計画値 以上

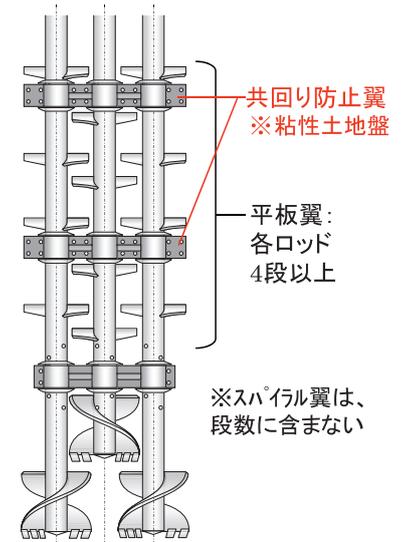


Fig. 4 攪拌翼形状・段数
Shape and number of agitating blade

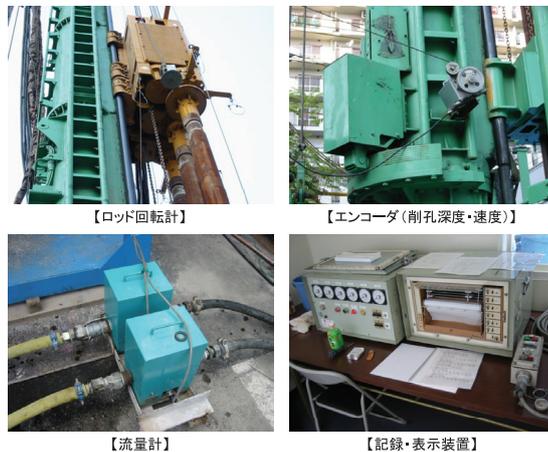


Photo 1 施工管理装置
Construction management unit

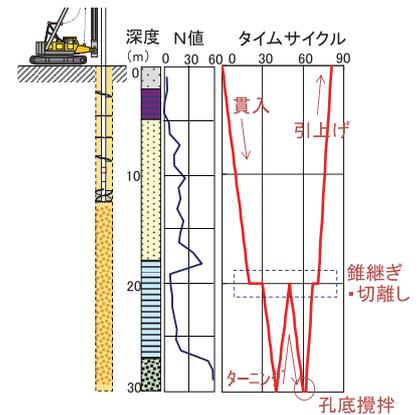


Fig. 5 施工フロー
Flow of construction

(4) おわりに

TSP合成地下壁・壁杭工法は、業界に先駆けた1988年から既に100件近くの適用実績をもつTSP合成地下壁工法を発展させて本設杭としての利用も可能にしたもので、開発した2004年から19件の適用実績がある。2008年5月、構造安全性諸規準の厳格化を目的とした建築基準法改正（2007年6月）などの社会的背景を受けて、(財)ベターリビングによる一般評定を取得した。技術の客観的な妥当性の証明を得たことで、基礎工事の合理化、環境負荷の低減をメリットに、引き続き多くのプロジェクトに適用していく。

参考文献

- 1) 青木雅路ほか：ソイルセメント柱列の鋼材を用いた合成地下壁に関する研究（その1～3），日本建築学会学術講演梗概集，pp.1729-1734，1993.9.
- 2) 金子治：ソイルセメント壁の地下外壁および杭としての利用：設計・施工上の留意点，基礎工，pp.17-20，2005.5.
- 3) 藤嶋泰輔ほか：最近の土留め壁・山留め壁工法，基礎工，pp.27-30，2008.2.
- 4) 田屋裕司ほか：ソイルセメント壁の杭利用に関する研究（その1，2），日本建築学会学術講演梗概集（構造I），pp.667-670，2009.8.
- 5) 田屋裕司ほか：ソイルセメント壁の杭利用に関する研究（その4），日本建築学会学術講演梗概集（構造I），pp.471-472，2011.8.
- 6) 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.

2.7 土・水連成解析（有効応力解析）による液状化解析 Liquefaction Analysis Using Soil-water Coupled Analysis (Effective Stress Analysis)

重野 喜政 Yoshimasa Shigeno*8

近年設計の段階において、液状化による影響を詳細に評価することを求められることが多くなっている。その背景には、液状化解析技術が広まってきたこと、および、先の震災により液状化に対する意識が高まっていることがある。特に巨大地震の場合は、液状化による甚大な被害が予想されるので、精度の高い検討が必要となる。本節では、液状化を詳細に検討するツールである液状化解析プログラムを紹介し、その設計への適用および、液状化対策評価への適用について述べる。

(1) 有効応力解析プログラムMuDIAN

液状化解析には、様々な手法があるが、FEMによる有効応力解析プログラムMuDIANを早くから開発し、液状化問題に適用している¹⁾。MuDIANでは、Biotの混合体理論に基づき定式化した土の運動方程式と水の運動方程式を連成させ、液状化を再現できる構成モデルを用いることにより液状化解析を行う。MuDIANには、液状化に対応した構成モデルが複数導入されているが、現時点では、吉田・時松らの提案モデルを多用している²⁾。このモデルは、累積損傷度法により、地震時の過剰間隙水圧の上昇をモデル化するもので、液状化時のサイクリックモビリティも考慮できる。また、土質試験等で得られたひずみ依存特性（ $G-\gamma$ 曲線、 $h-\gamma$ 曲線）や液状化強度曲線を入力データとして使い、特別なパラメータを設定する必要がない実用的なモデルである。Fig. 1に吉田らによる液状化試験のシミュレーション結果を示す²⁾。液状化に至る過程をよく再現することができている。

(2) 設計での利用

液状化による影響が軽微だと判断される場合は、液状化を防止する特別な対策を施さないことがある。また、液状化防止策を施したとしても、建物周辺の液状化が建物に影響を及ぼすことが懸念される場合がある。このようなケースでは、液状化の発生を考慮した入力地震動を作成し、建物の挙動を評価する必要がある。液状化を考慮した入力地震動の作成には、有効応力解析による液状化解析を用いる。

入力地震動の作成には、通常Fig. 2に示すような柱状地盤モデルを用いる。解析例をFig. 3, Fig. 4に示す。液状化解析の結果は、液状化の発生を考慮しない逐次非線形解析と比較して、一般的に加速度応答スペクトルが全般的に小さくなる。これは、液状化による剛性低下により、加速度が伝播しにくくなるからである。一方、長周期化により、2秒～3秒付近の応答スペクトルが大きくなる場合がある。免震建物の固有周期と一致し、応答の増加が許容できない時は、安全確保のため液状化防止対策を施す計画に変更する。また、液状化層において地盤変位が大きくなる傾向があり、設計時にはこの点にも留意する。

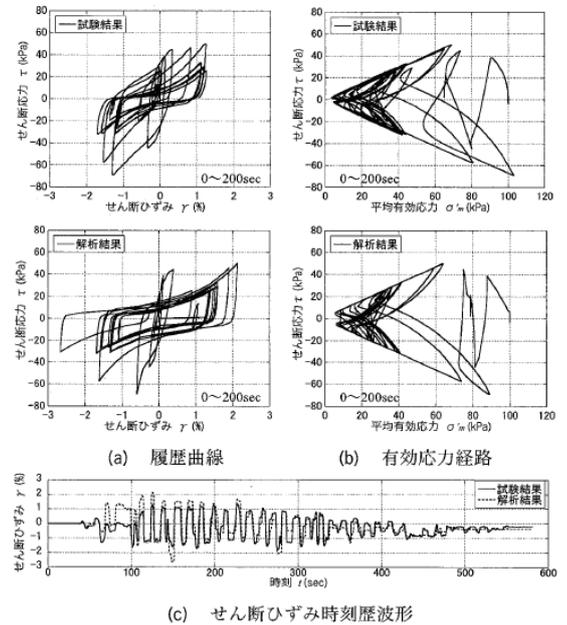


Fig. 1 液状化試験のシミュレーション²⁾
Simulation of the liquefaction test

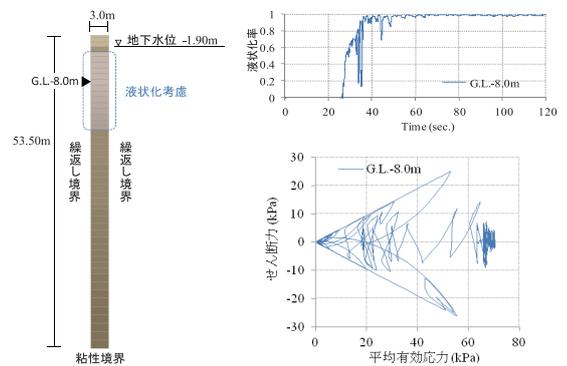


Fig. 2 設計入力地震動作成するための解析モデル FEM mesh to calculate the input motion for design
Fig. 3 液状化を考慮した有効応力解析事例 (告示神戸波L2) Result of soil-water coupled analysis

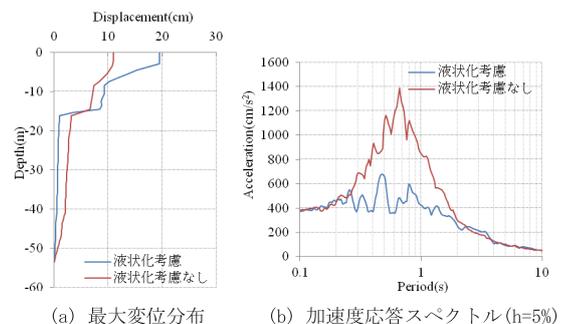


Fig. 4 液状化考慮有無の比較 (告示神戸波L2)
Comparison with or without liquefaction

*8 技術研究所 主任研究員 Chief Researcher, Research & Development Institute

(3) 液状化被害を防止する対策の評価

液状化を考慮した有効応力解析は、液状化被害を防止する対策の評価にも適用できる。既存建物の外周地盤を壁状地盤改良で囲う工法の遠心実験に対する解析を例示する³⁾。遠心加速度は50Gである。遠心载荷実験模型の概略をFig. 5に示す。建物は実物換算で幅26m、奥行き16mである。建物の外周に幅1mの壁状改良地盤を施す。建物荷重は0kPa、10kPa、50kPa、100kPaを想定する。試験ケースを図中に示す。入力波は、1Hzの正弦波20波である。1G場に換算した入力最大加速度は230galであり、不規則波を等価な正弦波に換算するときの補正係数を0.65とすると350gal相当となる。地盤はDr=70%の豊浦砂である。この試験に対する解析モデルをFig. 6に示す。解析モデルは、3次元モデルであり、対称性から1/2モデルとする。Fig. 7に上載圧50kPaと100kPaの場合における過剰間隙水圧比の時刻歴の比較を示す。解析は液状化の過程をよく再現できている。Fig. 8に各上載圧における建物中央部での沈下量を示す。改良なしで上載圧がある場合は、大きな沈下を生じており、上載圧が大きいほど沈下量が多い。一方、改良ありの場合、沈下が大幅に抑制されている。このメカニズムは、Fig. 9に示した改良の有無による地盤変形の状況と液状化の状況を示すコンター図から説明できる。改良なしの場合は、建物下の地盤が側方にはらみ出すことにより大きな沈下が生じていることがわかる。これは、液状化により地盤の剛性と強度が低下し、上載圧を支持することができなくなるためである。一方、改良ありの場合は、液状化は発生しているが、改良体が地盤のはらみ出しを防ぐため、沈下が抑制される様子が見られる。ここで示したように、液状化を考慮した有効応力解析により、液状化による建物の沈下と改良地盤による沈下抑制のメカニズムを捉えることができた。現在、実工事における評価手法の適用を進めている。

尚、解析では上載圧が小さい場合における沈下を過小評価しているが、構成モデルが塑性体積変形を考慮していないためである。液状化時の塑性体積変形による沈下評価については、現在研究を進めている。

参考文献

- 1) 塩見忠彦, 吉澤陸博, 鬼丸貞友, 津國正一: 地盤と構造物の非線形挙動を考慮した構造解析システムの開発, 竹中技術研究報告, No.54, pp.1-8, 1998.
- 2) 吉田洋之, 時松孝次, 土方勝一朗, 杉山達也, 塩見忠彦: サイクリックモビリティを考慮した実用的な土の有効応力-ひずみモデル, 日本建築学会構造系論文集, No. 630, pp.1257-1264, 2008.
- 3) 重野喜政, 内田明彦, 本多剛, 金田一広: 外周地盤改良と上載圧による液状化対策の効果について, 日本建築学会大会学術講演梗概集(東海), pp.497-498, 2012.

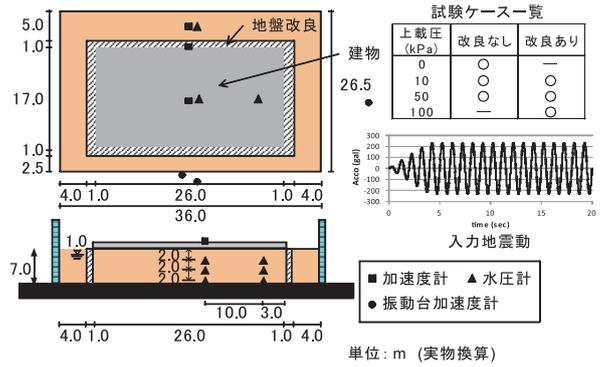


Fig. 5 既存建物の外周に施した壁上改良地盤の遠心実験模型 Centrifuge test model

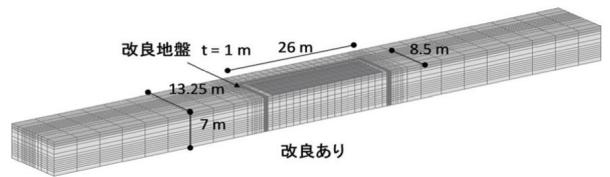


Fig. 6 FEMによる有効応力解析の解析モデル図(改良あり) FEM mesh for the centrifuge test

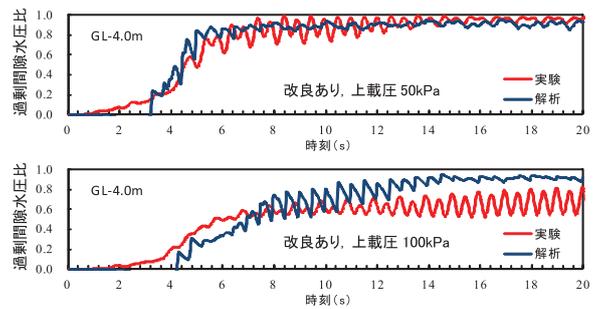


Fig. 7 過剰間隙水圧比の時刻歴 Time history of excess pore pressure ratio

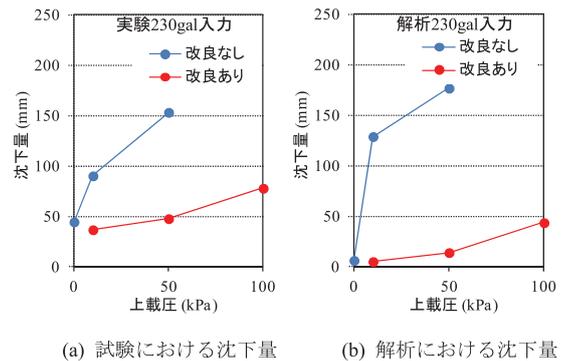


Fig. 8 建物中央の沈下量 Settlement of the building

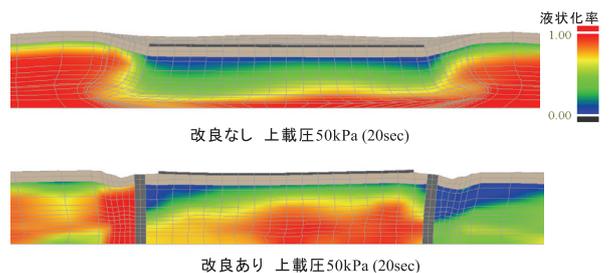


Fig. 9 液状化率のコンター図と地盤の変形図 Liquefaction rate contour with deformation

2.8 沈下を考慮した土・水連成解析 (有効応力解析)

Soil-water Coupled Analysis Considering Settlement (Effective Stress Analysis)

金田 一広 Kazuhiro Kaneda*9

道路、港湾や空港などの社会資本設備において極大地震などを検討する場合は変形を考慮した性能設計が一般化してきている。これには地震時/地震後の地盤の変形予測が不可欠になる。直接基礎やパイルド・ラフト基礎などの建築基礎に対しても今後変形を考慮した新たな設計へ展開する可能性があり、それに向けて最新の地盤変形解析について紹介する。

(1) 地震時の地盤の体積圧縮

通常よく使われている地盤の構成モデルは地震時の応力~ひずみ関係を再現するものが多く沈下は弾性圧縮のみ表現するものが多い。しかし、地盤は圧密沈下などに代表されるように(静的・動的)荷重が作用すると塑性体積圧縮や膨張を伴う変形が生じる。いわゆる土のダイレイタンスーといわれるものである。本節ではあらたに名古屋大学地盤力学研究室が開発したSYSカムクレイモデル¹⁾を導入して地盤解析の高度化をはかっている。Fig. 1に降伏関数を示す。このモデルは3つの降伏関数から構成されている。土を完全に練返した正規圧密状態を示す正規降伏面、骨格のかさばり(例えば砂質土であれば緩い状態、粘性土であれば間隙比が高い状態)を示す上負荷面、さらに除荷されている過圧密状態を示す下負荷面である。これらの降伏関数に関口・太田、橋口にならって堆積環境に起因する土固有の異方性を考慮して

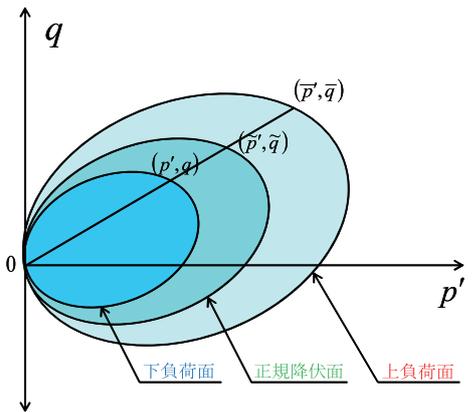


Fig. 1 3つの降伏面
Three yield surfaces

静水圧軸を回転して考案されたものである。現応力は下負荷面に存在し、塑性変形が進展すると回転も含めて3つの降伏面が動くことになる。このモデルは土の骨格構造を弾塑性理論によって記述し、排水が十分あるとき地盤は締めめられ、排水が殆どない場合は地盤が液状化し地震の後に大きな沈下が発生することを再現できる。もちろんこの変形は塑性圧縮を伴うため残留ひずみが発生する。また、このモデルは粘性土、さらには中間土(シルトなど砂と粘土の混ざったものなど)までの力学挙動を表現でき、土木分野では高度な河川盛土や護岸の耐震性評価などに最近適用されている。

(2) 遠心模型実験とそのシミュレーション

独立行政法人港湾空港技術研究所と竹中工務店、竹中土木の三社で空港滑走路の液状化対策として格子状地盤改良の有効性について共同研究を実施している。その解析的成果の一部をここに紹介する。Fig. 2に遠心模型実験の概要を示す(実物換算)^{2), 3)}。空港滑走路を模擬するために7.5mの液状化層の上に1.5mの路盤、さらにその上に舗装としてゴムマットを設定した。100G場の液状化地盤に未対策、格子間隔15m×15m, 15m×30mの3つのケースを想定し、実物換算で加速度140Galの1.5Hz 20波の正弦波を与えた。Fig. 3に解析メッシュを示す。半断面を仮定して、遠心模型実験を忠実に再現するために砂

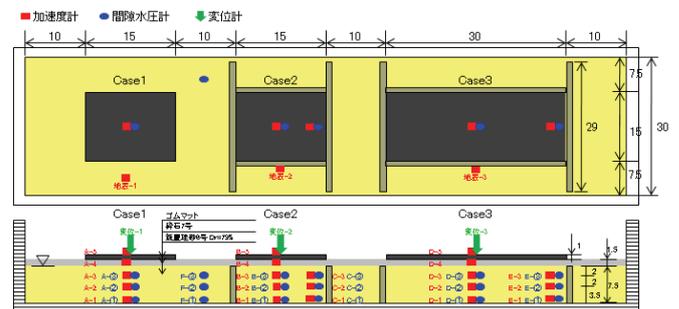


Fig. 2 模型寸法と計測器配置 (数値は実寸 (m))
Model size and measurement arrangement

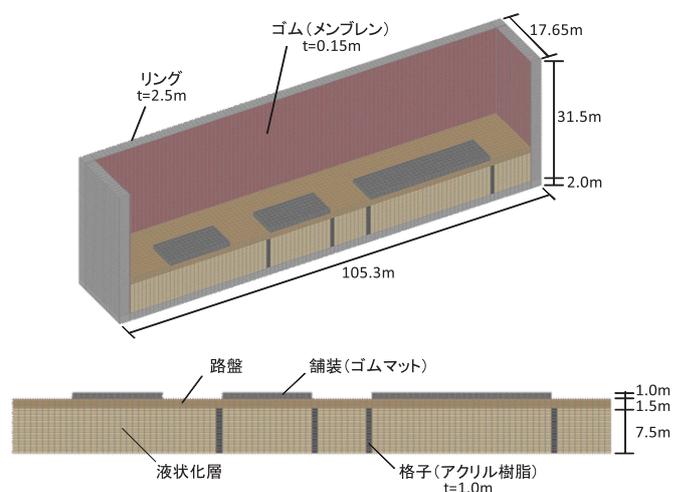


Fig. 3 解析メッシュ
Analysis mesh

*9 技術研究所 主任研究員 博士(工学) Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.

地盤を囲むように土槽とゴムメンブレンをモデル化した。地盤は非線形、その他の格子、路盤、ゴムマットは線形と仮定した。その他詳細は参考文献を参照されたい。Fig. 4に実験結果と解析結果の比較を示す。地表面加速度応答(a)でやや解析の方が大きく出ているが全体的によく再現されていることが分かる。また、間隙水圧応答(b)も初期の増加に多少差異は見られるものの上限値はほぼ再現されている。特に地表面沈下量(c)に着目すると未対策の場合は加振終了時に100mm程度の沈下が発生し、格子間隔が広がるほど沈下量が大きくなり沈下量抑制効果が低下しているが、30mの格子間隔であっても未対策に比べ半分程度の沈下量に抑えられていることが分かる。格子間隔の拡大に伴う正確な地表面沈下の検討に適用できることが分かる。Fig. 5に加振終了時のせん断ひずみの分布を示す。(コンターは砂地盤のみで改良体、路盤、ゴムマットの色は特に意味はない。)未対策部分はゴムマット直下ではせん断ひずみが卓越している。格子間隔30mの場合は未対策までとはいかないまでも格子内ではせん断ひずみが大きく、沈下が進んでいることが分かる。一方、格子間隔15mの場合は他に比べれば少ない。格子状地盤改良を施すことによって地盤のせん断変形を抑止する効果とともに、格子で液状化層を囲むことによって地盤の側方流動による変形抑止効果があることが分かる。

(3) まとめ

従来までの地震動評価は加速度応答と間隙水圧応答が中心であった。今後はこれらに加えて沈下・変形の評価が期待されている。今後はこの手法を用いて地盤の沈下・変形を含めた建物の高度な設計に適用することを考えている。

参考文献

- 1) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, T., Kaneda, K., and Nakano, M. (2002) : An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, 42 (5), pp. 47-57.
- 2) 今井正之ら (2012) : 空港舗装直下地盤を対象とした格子間隔が広い格子状改良の基礎的研究 - 遠心模型実験 -, 第47回 地盤工学研究発表会, 八戸.
- 3) 金田一広他 (2014) : 格子状地盤改良を施した砂地盤の液状化対策に関する数値解析, 地盤工学研究発表会, 富山.

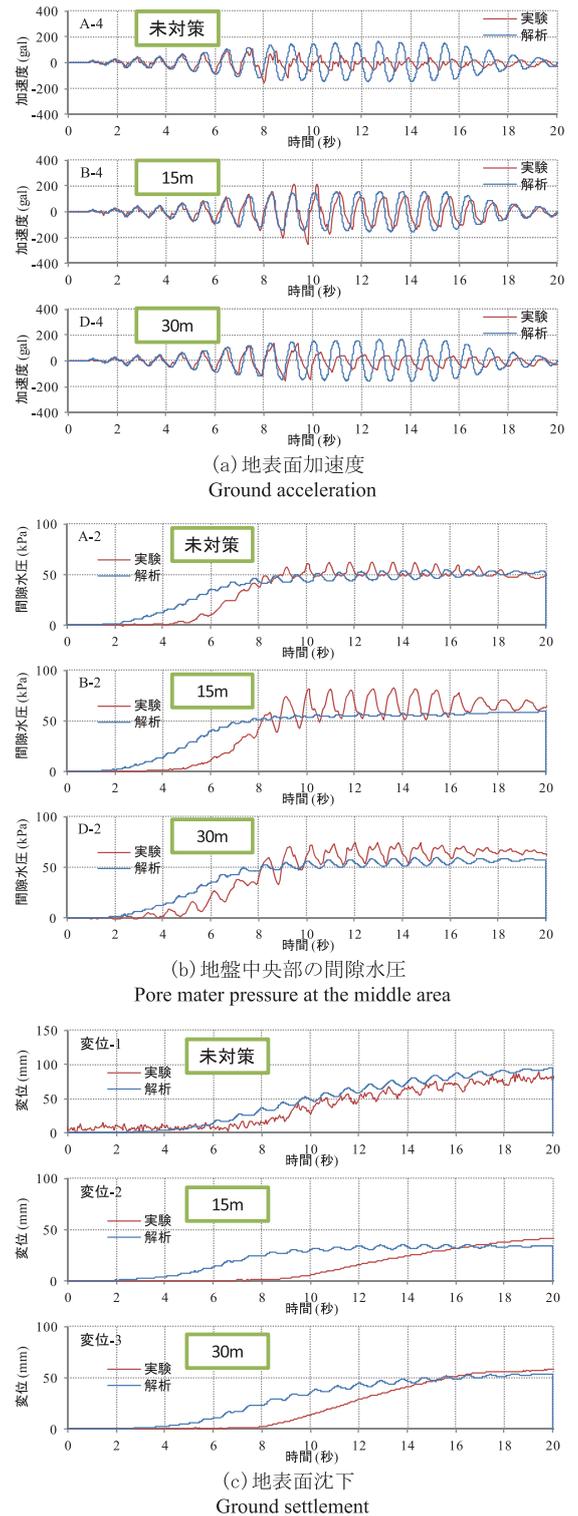


Fig. 4 実験結果と解析結果の比較
The relationship between experiments and simulations

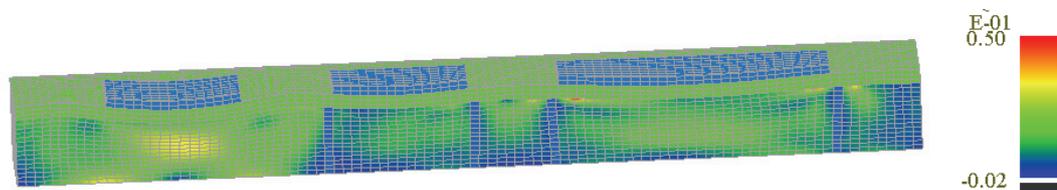


Fig. 5 加振終了時のせん断ひずみコンター図
Shear strain contour after shaking

2.9 ECMセメントを用いた地盤改良 Soil Improvement Using ECM Cement

河野 貴穂 Takao Kono*10

地球温暖化問題に対応するため、CO₂排出量を削減することが国内外における大きな課題となっている。日本国内において、セメントの材料および製造時のエネルギーに由来するCO₂排出量は、国内総排出量の約4%といわれており¹⁾、このほとんどは、セメントの中間製品であるクリンカを製造する過程で、石灰石を焼成することにより発生している。著者らは、高炉スラグの含有割合を極力高くすることにより、セメント製造時のエネルギーおよびCO₂排出量を小さくするセメント（エネルギー・CO₂・ミニマムセメント、以後ECMセメントと呼ぶ）の開発を行っている²⁾。ECMセメントは、超高層RC建物などの地上躯体の高強度コンクリート、場所打ち杭のコンクリートおよび地盤改良などの基礎構造への適用を狙いとしている。地盤改良体を用いるセメントには、JIS規格の制限が無い場合、コンクリートに先行して実用化の検討を行っている。本報告においては、ECMセメントを用いた地盤改良体を実プロジェクトへ展開するために実施した、実施工機械を用いた施工試験の結果について報告する。

(1) ECMセメントの概要

地盤改良に用いるECMセメントの構成をTable 1に示す。ECMセメントは、高炉スラグの含有量を65%まで増加させることにより、通常の地盤改良に用いる高炉セメントB種に対して、CO₂排出量を約45%削減することが可能である。

(2) ECMセメントを用いた地盤改良体の特性

ECMセメントを用いた地盤改良体の強度および六価クロム溶出特性を調査するため、実地盤より採取した地盤試料に対して室内配合試験を実施した。試験に用いた材料および試験における調合をTable 2に示す。比較のため、市販の高炉セメントB種を用いた試験も実施した。本研究においては、高強度の地盤改良体（一軸圧縮強度 $q_u=5\text{N/mm}^2$ 程度）を対象としており、注入するセメントミルクの水セメント比は100%、セメント添加量は改良対象土1m³当り200kg~400kgとした。ソイルセメントの練り混ぜは、JIS R 5201に準じたモルタルミキサーを用い、あらかじめ水とセメントを2分間混合攪拌した後、試料土を投入し5分間練り混ぜた。

室内配合試験における一軸圧縮強度（4週）をFig. 1に示す。ECMセメントを用いた地盤改良体の強度は、高炉セメントB種を用いた地盤改良体の強度とほぼ同等もしくは同等以上であることが判る。また、六価クロムの溶出試験結果の一例をFig. 2に示す。ECMセメントを用いた地盤改良体は、高炉セメントB種を用いた地盤改良体に対して同等もしくは同等以下³⁾に抑えることが可能である。なお、六価クロム溶出試験の検出限界値は0.02mg/Lであり、Fig. 2において0.02mg/L未満の場合は検出限界以下であることを示している。

Table 1 セメントの構成成分
Cement composition rate and CO₂ emissions

セメントの種類	OPC (%)	BSF (%)	CS (%)	CO ₂ 排出原単位 ³⁾ (kg/t)
ECMセメント	30	65	5	250
高炉セメントB種	55	45	0	473

Table 2 使用材料
Materials

試料土	横浜粘土：神奈川県横浜市より採取 湿潤密度1.520g/cm ³ 、自然含水比81.4% 砂分8.4%、シルト分44.5%、粘土分47.1% 液性限界91.5%、塑性限界38.0% 大阪粘土：大阪府大阪市より採取 湿潤密度1.629g/cm ³ 、自然含水比60.0% 砂分2.1%、シルト分45.7%、粘土分52.2% 液性限界66.3%、塑性限界28.2%
セメント	ECMセメント 高炉セメントB種
水	水道水

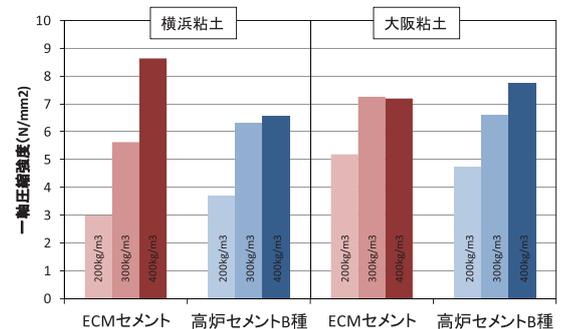


Fig. 1 一軸圧縮強度
Unconfined compression strength

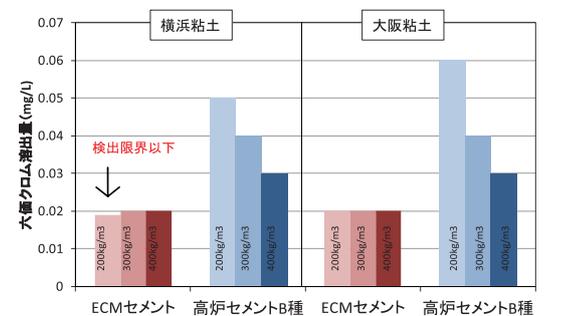


Fig. 2 六価クロムの溶出量
Hexavalent chromium

*10 技術研究所 主任研究員 博士(工学) Chief Researcher, Research & Development Institute, Dr. Eng.

(3) 実施工機を用いた原位置施工試験

ECMセメントを用いた地盤改良体は、従来の高炉セメントB種に比べ、強度発現性、六価クロム溶出抑制力およびCO₂排出量において優れていることを室内試験により確認してきた。実プロジェクトにおける液状化対策のTOFT等へ適用・展開を図るため、実施工機を用いた原位置施工試験を実施した。原位置施工試験の概要をTable 3に示す。原位置施工試験においては、2軸の機械式深層混合処理機(Φ1000mm, 軸間800mm, Photo 1参照)を用い、17mまで改良した。試験の対象は、GL-10m以深のシルト混じり砂地盤(Fig. 3の柱状図参照)とし、目標強度は2.1N/mm²とした。施工試験においても比較のため、高炉セメントB種を用いた。施工試験における調合(Table 4参照)は、現地より採取した試料を用いた室内配合試験に基づき、強度が等しくなる、セメント種類、W/Cおよびセメント添加量とした。施工試験においては、ECMセメントを用いた地盤改良体の施工性を把握するため、排泥量および排泥の流動性の調査を行った。また、施工品質を確認するため、コア抜きを行い、一軸圧縮強度を調査した。

施工品質確認結果の一例として、一軸圧縮強度の深度分布をFig. 3に示す。また、試験の対象地盤であるGL-10.0m~16.0mにおける、実施セメント添加量、強度の平均値および変動係数をTable 5に示す。CASE4においては、試験装置の不具合により、GL-12.0m以深の改良が出来なかったため、Table 5に示す値は参考値とした。一軸圧縮強度の平均値は、目標強度2.1N/mm²以上、一軸圧縮強度の変動係数は25%以下であることを確認した。また、ECMセメントと高炉B種セメントの強度を比較した場合、ECMセメントのセメント添加量が少ない条件においても、強度はほぼ同程度であることを確認した。原位置における施工試験により、ECMセメントを用いた地盤改良体の原位置における強度発現性および施工品質を確認することができた。

(4) まとめ

新たに開発したECMセメントを用いた原位置施工試験を実施した。原位置において、ECMセメントの強度発現性、施工品質を確認した。今後、開発したECMセメントを実プロジェクトの地盤改良体へ適用・展開が可能であると考ええる。

参考文献

- 1) 経済産業省：平成20年度セメント産業における非エネルギー起源二酸化炭素対策に関する調査, pp.12-14, 2009.
- 2) 米澤敏男・坂井悦郎他：エネルギー・CO₂・ミニマム(ECM)セメント・コンクリートシステム, コンクリート工学, Vol.48, No.9, 2010.
- 3) 河野貴穂他：高炉スラグ高含有セメントを用いた地盤改良体の特性(その1)(その2), 第45回地盤工学研究発表会, pp.565-568, 2010.

Table 3 原位置施工試験の概要
Outline of in-situ experiment

対象地盤	砂質地盤
目標強度	Fc = 2.1N/mm ² (GL-10.0m~16.0m)
改良径	Φ1000mm (2軸)
改良長	17m
改良本数	4本
施工機械	2軸の機械式深層混合処理機

Table 4 施工試験における調合
Recipe of in-situ experiment

	セメント	W/C	セメント添加量
CASE1	ECM	80%	150kg/m ³
CASE2	高炉B種		200kg/m ³
CASE3	ECM	60%	125kg/m ³
CASE4	高炉B種		150kg/m ³



Photo 1 施工機械
Outline of mixing machine

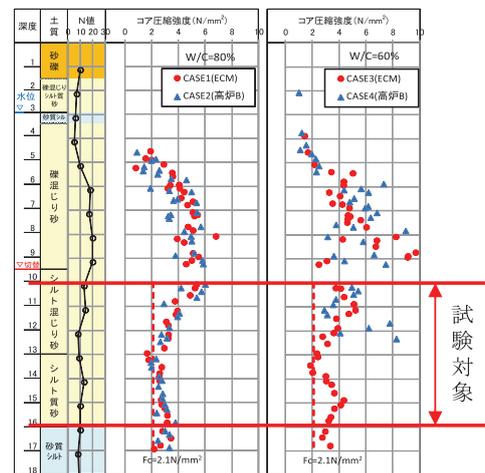


Fig. 3 品質調査結果(一軸圧縮強度の深度分布)
Test results (Distribution of Unconfined compression strength)

Table 5 試験結果のまとめ
Summary of in-situ experiment

	実セメント添加量 (kg/m ³)	平均強度 (N/mm ²)	変動係数 (%)
CASE1	140	3.0	22.6
CASE2	170	3.0	24.2
CASE3	115	3.4	25.1
CASE4	127	(5.0)	(40.6)

3 既存建物での地盤・基礎技術

Geotechnical & Foundation Engineering Technologies for Existent Buildings

3.1 コンパクト・ジオラティス工法

Compact Geo-ratice Method

地盤の液状化対策として有効な格子状地盤改良工法(TOFT工法)は、更地での施工が前提のため、建物がある状態では施工することが不可能であった。しかし、大地震時における事業継続に対するニーズの高まりから、液状化の可能性のある既存建物基礎地盤に対する液状化対策工法の開発が望まれていた。

本節では、既存建物の直下の液状化層に格子状改良地盤を造成可能なコンパクト・ジオラティス工法を紹介する。

(1) 工法の概要

コンパクト・ジオラティス工法は、建物利用者が通常の業務を行いながら、液状化対策工事を可能にする工法である (Fig. 1, 2)。本工法では小型の掘削機を使用するため、建物に影響を与えることなく掘削を進めることができる。本工法の開発により、狭小地や空頭制限の条件下での施工が行えるため、既存建物がある状態で、居ながらできる液状化対策が可能となった。なお、TOFT工法とは改良壁の施工方法が異なるため、「コンパクト・ジオラティス工法」と名称を分けている。

(2) 施工手順

主として建屋内での施工となるため、空頭制限下での施工が可能な小型掘削機を用いて高圧噴射攪拌により地盤を改良する。施工手順を Fig. 3に示す。

①機械設置

工事範囲に仮囲いを設置後、床上に小型掘削機を設置する。

②掘削・固化

床に直径200mm程度の穴をあけ、噴射装置を持ったロッドで地盤を掘削し、セメントを注入し地盤を固化させて直径1~3m程度の柱状改良体を造成する。

③連続壁の作成

柱状改良体をラップさせて連続的な壁とし、平面的に格子状になるよう配置させる。

④施工完了

施工機械を移動させて穴を充填し、現状復旧させて施工完了となる。

本工法による液状化抑止のメカニズムは、TOFT工法と基本的には同じであり、地盤中に構築された格子状の地盤改良壁によって、地震時の地盤のせん断変形を抑止することで液状化を抑止する。なお、改良壁の配置と仕様については、TOFT工法で確立した手法に基づいて決定する。

(3) 適用事例

江東区役所本庁舎は1973年に建設された建物で、Fig. 4に示すように基礎下の地盤には埋土と軟弱な沖積層が厚く堆積しており、表層付

内田 明彦 Akihiko Uchida*11



Fig. 1 居ながらできる工事のイメージ
Image of indoor construction

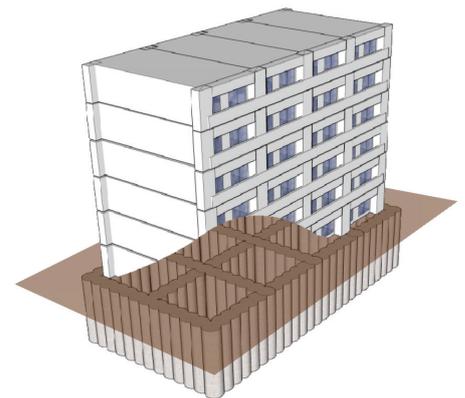


Fig. 2 建物直下に造成する改良壁のイメージ
Improved soil wall under building

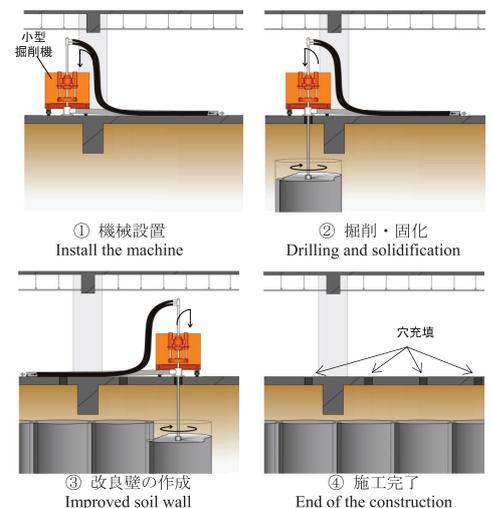


Fig. 3 施工手順
Construction procedure

*11 技術研究所 地盤・基礎部 基礎構造グループ長 博士(工学) Group Leader, Research & Development Institute, Dr. Eng.

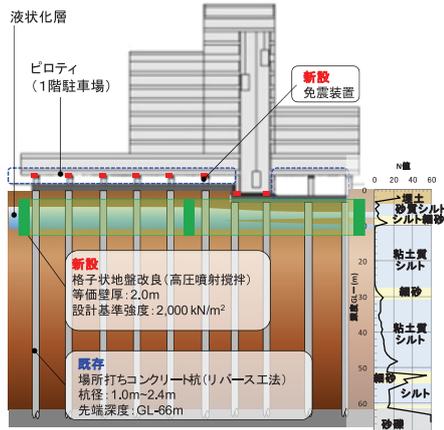


Fig. 4 建物および地盤概要
Building and soil profile

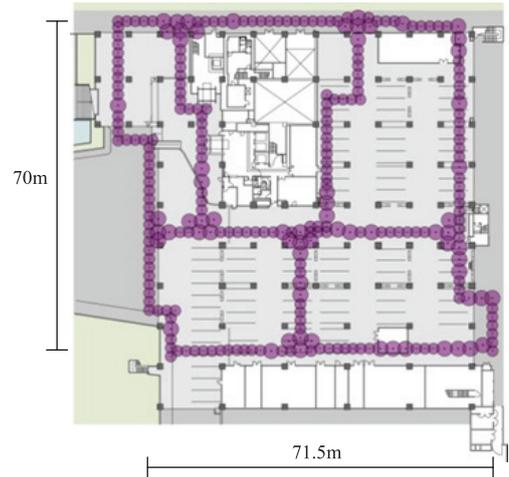


Fig. 5 格子状改良壁の平面配置
Plan of grid-form mixing walls

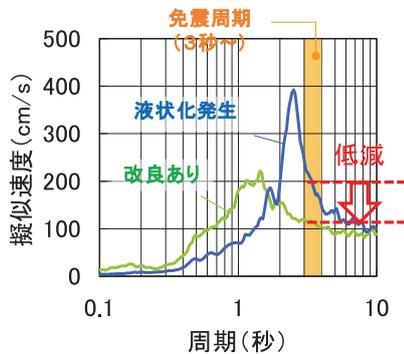


Fig. 6 速度応答スペクトル (告示ランダム位相波)
Velocity Response spectrum



Photo 1 完成時のイメージパース
Image of Koto office after the reinforcement



Photo 2 小型掘削機による施工状況
Improving soil with small machine

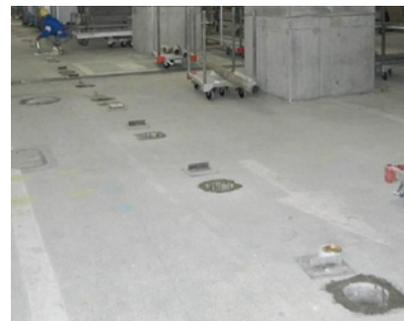


Photo 3 改良壁施工後の様子
Concrete slab after the construction

近の砂質土層はレベル2地震時に液状化の危険性があった。本庁舎は地震発生時に対策本部が設置されるなど防災拠点となる建物であるが、現在の耐震基準を満たさないことから、免震改修と液状化対策を行って耐震性を高めることになった。工事を行うにあたり、1Fの大部分がピロティ形式の駐車場になっていたため、高さ3m以内での施工が可能な小型掘削機を用いて地盤改良を実施した。改良体の平面配置はFig. 5とし、改良径を2.3m（一部3.2m）とすることで最大格子間隔を約40mとした。改良深度はGL-3m～12mとし、液状化対象層の砂層と表層付近のシルト層も含めて改良した。これにより、地震時の過大な地盤変形の発生を抑えるとともに、免震周期帯（3～4秒）の地震力の増幅を抑制し、大地震時の耐震性を確保した（Fig. 6）。実際の施工にあたり、ラップ部の強度や改良体の形状を確認するために試験施工を事前に実施し、本工事での施工管理方法を定めた。駐車場の機能を残しながら免震化工事と液状化対策工事を進めることで、区役所の業務には支障を与えることなく、耐震化工事が実施できた（Photo 1～3）。

参考文献

- 1) 本多, 田屋, 内田: 免震改修建物の格子状地盤改良による液状化対策事例, 基礎工, Vol.41, No.4, pp.52-55, 2013.

3.2 既存建物基礎の耐震診断 Seismic Capacity Evaluation of Existing Building Foundation

内田 明彦 Akihiko Uchida*11

既存建物の耐震診断は、上部構造物および基礎構造物に対して実施すべきであるが、基礎構造および地盤については大地震時の耐震性評価法が確立されておらず、また、いくつかの提案があるものの普及していない。しかし、1995年兵庫県南部地震において、杭基礎の被災事例が数多く報告され、2011年東北地方太平洋沖地震でも、杭基礎の破損により傾斜したと推定される建築物や津波により杭基礎が破損して転倒した建築物が見られた (Photo 1, 2¹⁾)。

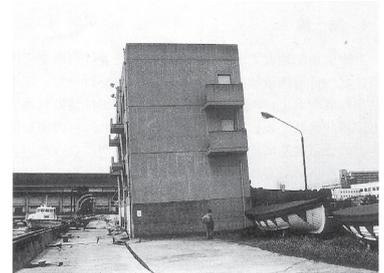


Photo 1 杭の被害により傾斜した建物¹⁾
Inclination of three-story RC building

建物の資産価値の確保や財産の保全を考えると、上部構造だけでなく、基礎構造の耐震性確保も必要と考えられる。当社では兵庫県南部地震の後に基礎の耐震診断法を提案した³⁾。この度、ベターリビングが当社の診断法を含めた「基礎構造の耐震診断指針 (案)」⁴⁾を発行したため、今後、既存建物基礎の耐震診断が進むことが予想される。

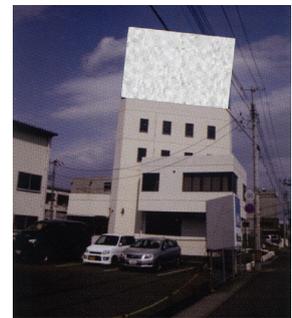


Photo 2 傾斜したRC造4階建てビル²⁾
Inclination of four-story RC building

ここでは、当社が中心となってとりまとめた杭基礎の1次診断について、概要と適用事例を紹介する。

(1) 杭基礎の1次診断の概要

杭基礎の1次診断は杭の耐震性能の大きさを表す杭基礎の耐震指標 I_{sf} と想定する地震動レベルに応じた杭基礎の耐震判定指標 I_{s0f} より耐震性を評価する診断方法であり、RC造建築物の耐震診断の1次診断にかなり近い診断法である。診断フローをFig. 1に示す。この診断によって概略的な杭基礎の耐震安全性が確認でき、継続使用の可否や基礎補強の必要性などを検討する際の参考となる。この診断の妥当性は兵庫県南部地震と1978年宮城県沖地震での被災事例による検証で確認されている。Fig. 2に示すように被害レベルが上がると判断指標である I_{sf}/I_{s0f} が小さくなる傾向が認められ、 I_{sf}/I_{s0f} が杭被害を概ね説明できることがわかる。

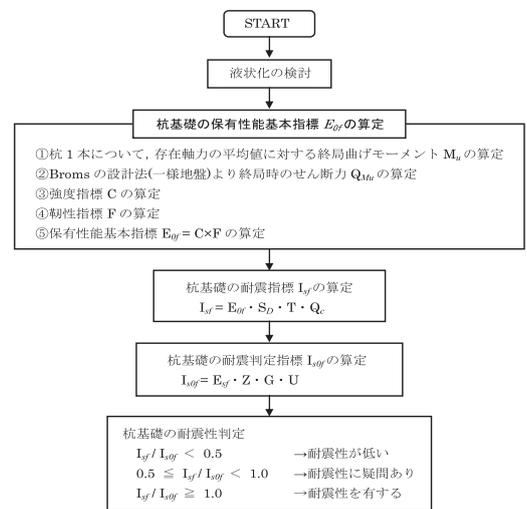


Fig. 1 杭基礎の1次診断フロー⁴⁾
Procedure of Earthquake proof check for pile foundation

a) 杭基礎の耐震指標 I_{sf}

杭基礎の耐震指標 I_{sf} は耐震性能の大きさを表す指標であり、既存RC造建築物における I_s 指標を参考に次式で求める。

$$I_{sf} = E_{of} \cdot S_D \cdot T \cdot Q_c \quad (1)$$

ここで、 E_{of} : 基礎の保有性能基本指標、 S_D : 形状指標、 T : 基礎の経年指標、 Q_c : 基礎の施工指標

E_{of} は杭1本当たりについて、存在軸力に対する曲げ終局時のせん断力と杭の靱性指標などを考慮して算定する。

b) 杭基礎の耐震判定指標 I_{s0f}

杭基礎の耐震判定指標 I_{s0f} は既存RC造建築物における I_{s0} 指標を参考に次式で求める。

$$I_{s0f} = E_{sf} \cdot Z \cdot G \cdot U \quad (2)$$

ここで、 E_{sf} : 基礎の耐震判定基本指標、 Z : 地域指標、 G : 地盤指標、 U : 用途指標

また、想定する地震力を考慮した診断を可能とするため、次式によって E_{sf} を算定する。

$$E_{sf} = 0.8 \cdot \alpha_{max} / 350 \quad (3) \quad (\alpha_{max}: \text{地表面最大加速度 (cm/s}^2))$$

c) 診断結果

杭基礎の1次診断では基礎の耐震指標 I_{sf} と耐震判定指標 I_{s0f}

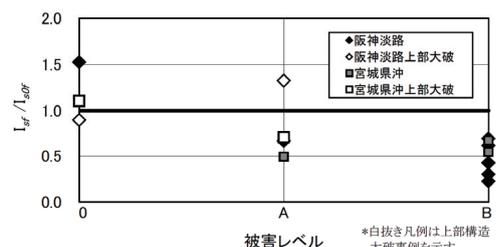


Fig. 2 診断事例における判定結果と被害事例の関係⁴⁾
Correlation between I_{sf}/I_{s0f} and damage of pile foundation

の比より以下のように判定する。

- $I_{sf}/I_{s0f} < 0.5$: 耐震性が低い
- $0.5 \leq I_{sf}/I_{s0f} < 1.0$: 耐震性に疑問あり
- $I_{sf}/I_{s0f} \geq 1.0$: 耐震性を有する

I_{sf}/I_{s0f} が0.5未満の場合は、杭基礎の耐震性が低いと判断し、耐震補強対策を検討するか詳細な診断である2次診断もしくは個別検討法によって耐震性を判断する必要がある。また、 I_{sf}/I_{s0f} が0.5以上1.0未満の場合は杭基礎の耐震性に疑問があると判断するが、1次診断のみで耐震性を判断することは難しいので、2次診断もしくは個別検討法を行う方がよい。 I_{sf}/I_{s0f} が1.0以上の場合には杭基礎が耐震性を有していると判断できる。

(2) 適用事例

兵庫県西宮市にある教育施設に対して実施した杭基礎建物の診断事例を紹介する⁵⁾。Fig. 3に杭配置を示す。

<建物概要>

- 構造種別：RC造地下1階，地上5階，搭屋1階
- 建築年：1984年 延べ面積：4313m²
- 建物高さ：20.0m 建物総重量：72951kN
- 基礎種別：杭基礎（PHC杭φ600mm，L=15m，78本）
- 液状化対策：なし

a) 杭基礎の耐震指標 I_{sf}

東南海・南海地震（M=8.6）が当該サイトにおいて最も大きな応答であったことを踏まえ、その応答値に相当する地表面加速度 $\alpha_{max}=200\text{cm/s}^2$ に対して地盤の液状化を検討した結果をFig. 4に示す。FL<1.0の層に対しては液状化による杭の水平地盤反力係数の低減を考慮した。次に、杭1本あたりの軸力935kNより終局曲げモーメント $M_u=460\text{kNm}$ を算定した。さらにBromsの設計法より曲げ終局時のせん断力 $Q_{Mu}=350\text{kN}$ を算出した。この値から、杭本数、建物重量、靱性指標より保有性能基本指標 $E_{of}=0.37$ を算出した。

$$I_{sf} = E_{of} \cdot S_D \cdot T \cdot Q_c = 0.37 \times 1.0 \times 0.9 \times 1.0 = 0.34$$

ここで、 $S_D=1.0$ 、 $Q_c=1.0$ とし、 $T=0.9$ （築20年以上経過）とした。

b) 杭基礎の耐震判定指標 I_{s0f}

$$I_{s0f} = E_{sf} \cdot Z \cdot G \cdot U = (0.8 \cdot 200/350) \times 1.0 \times 1.0 \times 1.0 = 0.46$$

ここで、 $Z=1.0$ 、 $G=1.0$ 、 $U=1.0$ とした。

c) 診断結果

$I_{sf}/I_{s0f} = 0.34/0.46 = 0.74 < 1.0$ となり、本建物基礎は『耐震性に疑問あり』と判定される。このため、想定地震動を用いた地震応答解析に基づく2次診断を実施して、杭の耐震安全性に問題がないことを確認した。

(3) 今後の展開

軟弱地盤や液状化のおそれのある地盤に建つ既存の公共施設や病院など防災拠点となるような建物の所有者に対して基礎の耐震診断を提案する方針である。

参考文献

- 1) 大岡，飯場，阿部，時松：孔中内視カメラと弾性波非破壊試験を併用した建物杭基礎の震害調査，土と基礎，Vol.44，No.3，pp.28-30，1996.
- 2) 日本建築学会：2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報，2011年7月
- 3) 丸岡，山下，青木，土屋，平井，椿原，藤村，角：既存建物基礎の耐震診断に関する一提案，日本建築学会技術報告集，No.8，pp.85-90，1999.
- 4) 一般財団法人ベターリビング：基礎構造の耐震診断指針（案），2013年5月
- 5) 池田，内田，谷川：既存建物基礎の耐震診断の適用事例，日本建築学会大会学術講演梗概集B-1（構造I），2013年

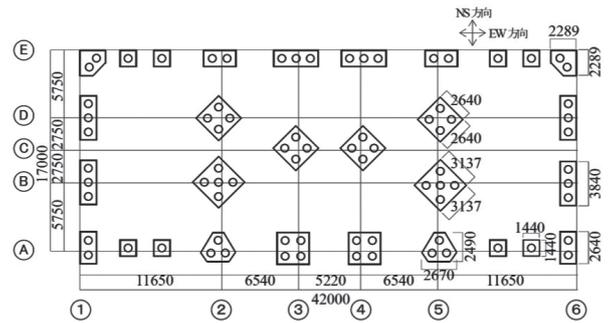


Fig. 3 杭伏図⁵⁾
Plan of piles

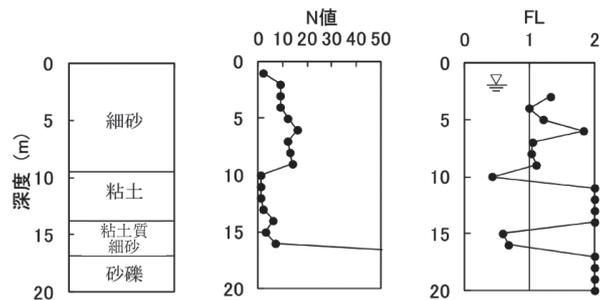


Fig. 4 液状化判定結果⁵⁾
Assessment of liquefaction potential

4. おわりに Concluding Remarks

青木 雅路 Masamichi Aoki*1

当社は、「環境に配慮したサステナブル社会」の実現に貢献すべく、多くの活動を行っている¹⁾。「安全・安心を支える技術開発」もその重要な項目である。地盤・基礎に関する技術は、建物が完成した後見えなくなり、地震等の災害が来なければその技術レベルの違いは判らない可能性もある部分である。さらに、基礎は、地盤中で施工されるため、解析的な研究だけでは実際の基礎構造物の信頼性を保証できないことから、設計法と施工法の組合せでの工法開発が重要となる分野である。巨大地震対応を考えると、建物の重要度を考慮した対応が必要となり、また、新築建物だけではなく既存建物基礎の耐震補強まで考慮する必要がある。本特集で述べた内容を要約すると以下のようになる。本特集が、今後の基礎構造の設計、耐震補強に参考となれば幸いである。

- 1) 巨大地震を考慮した地盤の液状化の評価、および液状化対策
 - ・液状化対策としての格子状地盤改良工法（TOFT工法）の開発状況を示し、狭小地対応や既存建物下での施工も可能となっていることを示した。
- 2) 巨大地震の外力に耐える新しい基礎工法の開発
 - ・TOFT工法や杭頭半剛接合工法を併用したパイルド・ラフト基礎の開発状況と効果を示した。
 - ・高鉛直支持力でかつ大きな引抜き力に抵抗できる多段拡径杭等の基礎工法の開発と適用状況を示した。
- 3) 巨大地震を考慮した一般建物基礎の設計・解析技術
 - ・建物直下を液状化対策工法にて液状化を防止しても、周辺地盤は液状化していることを考慮すると、液状化を考慮できる地震応答解析技術が重要となる。土・水連成の有効応力解析法と地震中／地震後の地盤沈下解析法の開発状況と適用性を示した。
- 4) 環境への貢献
 - ・地盤・基礎関連の工法でも環境配慮型の施工法が望まれる。セメント製造時のエネルギーおよびCO₂排出量を低減したセメント（エネルギー・CO₂・ミニマムセメント、以後ECMセメントと呼ぶ）の開発の一環として行っているECMセメントを用いた地盤改良の開発状況を示した。

参考文献

- 1) 竹中工務店：竹中サステナビリティレポート2013、同2012等。