

各論 締固め工法編のポイントと課題

真島 正人*

1. はじめに

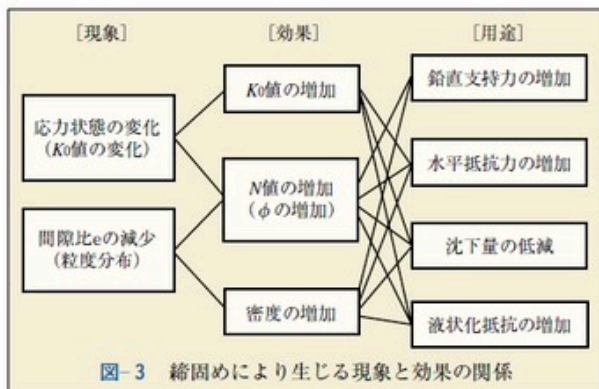
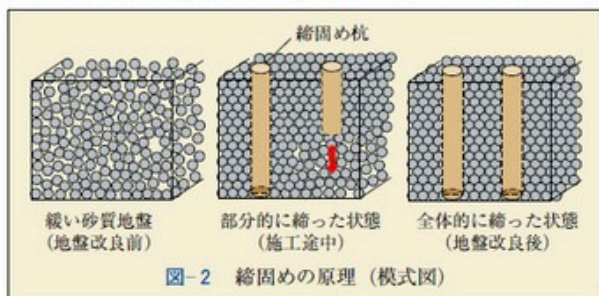
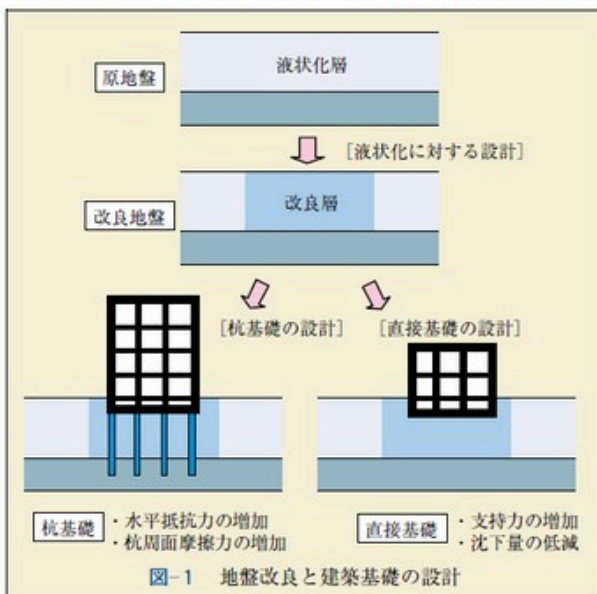
締固め地盤改良工法は、当初、石油タンクや盛土堤体を対象とした地盤の地耐力増加対策として開発されたが、新潟地震の際に締固め工法を採用した構造物が液状化の被害を免れて以来、構造物の液状化対策として急速に普及した。同時に、新潟地震以降の精力的な研究により液状化防止対策としての設計法も整備されてきた¹⁾。建築分野でも、主に杭基礎建物を対象とした液状化防止対策として急速に実績を伸ばしてきており、兵庫県南部地震においても改良効果が確認されたことから地盤改良が補助的なものから基礎工法の1つとして改めて位置づけられたと思われる。ただし、液状化対策としての実績を伸ばしつつも、直接基礎の地耐力増加対策としての実績は土木構造物や港湾構造物に比べるときわめて少ない。また、セメント系固化材を用いた地盤改良工法と異なって、建築物を対象とした地盤改良の設計から基礎設計までの一連の設計方法をまとめた技術資料や指針類が整備されているわけではなく、2001年に改定された建築基礎構造設計指針²⁾においても締固め工法の設計法の詳細には言及されていない。そのため、構造設計者がそのつど過去の事例を紐解きながら独自の判断で設計するか、地盤改良専門業者に設計から施工までを一括委託しているのが

現状である。一方、従来の設計法についても、相対密度や間隙比の推定方法、地盤および施工に起因した地盤物性値等のばらつきの評価や品質確認、巨大地震に対する設計法、建物外周の改良範囲、複合地盤としての挙動を含めた改良後の力学特性の評価法など、解決すべき技術的課題も残されていた。2006年に発行された地盤改良指針案³⁾では、一般の建築構造設計者が利用することを念頭に、図-1に示す液状化防止を目的とした地盤改良の設計から基礎設計までの一連の考え方をまとめ、かつ前述の技術課題に関する最新のデータや技術的知見を取入れ、建築物の基礎地盤としての設計指針、標準的な施工管理と品質管理の方法および設計例を示した。

本書では、締固め工法編の内の液状化対策、直接基礎および杭基礎の設計上のポイントと今後の課題について述べる。

2. 改良目的

締固め工法の原理を図-2に、締固めによって地盤に生じる現象、土質力学的な効果およびその用途を図-3に示す。地盤の強度および剛性の増加といった効果を踏



まえ、主な改良目的を基礎形式ごとに大別すると、液状化対策、直接基礎に対する鉛直支持力増加・即時沈下量の低減、杭基礎に対する水平抵抗力、鉛直支持力および引抜き抵抗力の増加に分類される。改良目的としては、各基礎形式や地盤条件により、以下に示すような組合わせが考えられる。

① 直接基礎

- ・非液状化地盤：支持力増加＋沈下低減
- ・液状化地盤：液状化対策のみ
- ・液状化地盤：液状化対策＋支持力増加・沈下低減

② 杭基礎

- ・液状化地盤：液状化対策のみ
- ・液状化地盤：液状化対策＋水平抵抗力増加
- ・液状化地盤：液状化対策＋水平抵抗力増加＋鉛直支持力増加＋引抜き抵抗力増加

3. 設計の考え方

液状化対策の設計、直接基礎および杭基礎の設計では建築基礎構造設計指針に準拠し、限界状態設計法に沿った考え方を取入れている。特に液状化対策の設計については、改良地盤のばらつきの要因を分析し、その評価方法とばらつきを考慮した新たな設計法を示している。限界状態設計法の本来の考え方では、荷重と耐力の変動性を考慮し、応答値と限界値に別々の安全係数（荷重係数、耐力係数）を乗じて設計用の応答値と限界値を求め、それらの大小関係を比較して要求性能あるいは安全性を確認する必要がある。しかしながら、現状では信頼性に基づいて耐力係数を合理的に決定できるデータ数を確保できているとはいえない。そこで当面、考え方のみ限界状態設計法の枠組みに従うことにしている。具体的には、液状化対策の設計では改良地盤における地盤調査結果や過去の被災事例より、複数の評価項目に対して十分安全と見なせる範囲で限界値を直接設定し、直接基礎および杭基礎の設計では従来の許容応力度設計法を逸脱しない範囲で安全係数を設定した。

4. 選択事項

指針には地盤改良効果の評価方法として、最新の研究成果や知見が盛り込まれているものの、研究途上である項目や実績が十分とはいえない項目も含まれている。また、実施する地盤調査の数量や内容あるいは検討手法により、改良地盤や基礎の性能に対する信頼の程度は異なると考えられる。これらの点を考慮して、設計に用いる土質定数、計算式および品質管理の手法を一律に規定するのではなく、従来どおりの調査・検討を採用する標準的な手法（簡便法）以外に、最新の知見を盛り込み積極的な採用を推奨している手法（推奨法）、および今後のデータ蓄積や研究成果の蓄積を前提に現状では提案に留めている手法（詳細法）の3種類から、地盤条件・建物条件・設計条件など各種条件に応じて選択できるものとした。

4.1 簡便法

必要最小限の地盤調査と品質管理でも要求性能を確保

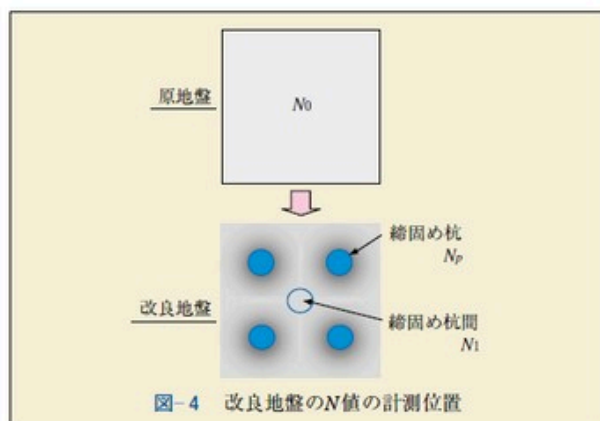


図-4 改良地盤のN値の計測位置

できると見なせる土質定数の設定方法および液状化抵抗、基礎の支持力などの算定方法である。比較的簡便な調査や検討で性能を確認できる。その反面、既往の設計法を逸脱せず、かつ最も安全余裕度を持たせた手法であるため、過剰設計になりやすいという短所もある。

4.2 推奨法

指針で推奨している土質定数の設定方法および液状化抵抗、基礎の支持力などの算定方法である。過去の実測例や地震被災事例、最新の知見から判断して、適切な地盤調査と品質管理を行なうことにより要求性能を確保できると考えられる手法である。

4.3 詳細法

推奨法に加え、地盤改良後の詳細な地盤調査や高度な解析を条件に、設計者の判断で採用できる地盤定数の設定方法および液状化抵抗、基礎の支持力などの算定方法である。現状では十分なデータが揃っていないため、性能を確認するための調査や検討に多くの労力を必要とするが、前提条件を満たした詳細法を採用することによって合理的な地盤改良と基礎の設計が可能となる。

5. 液状化対策の設計

液状化対策の設計では、液状化抵抗の評価手法として①締固め杭間地盤の締固め効果のみを考慮する従来からの手法を簡便法、②改良地盤を締固め杭と杭間地盤で構成される複合地盤として評価する手法を推奨法、③N値や細粒分含有率 F_c のばらつきを考慮して設計する方法を詳細法としている。

5.1 締固め改良地盤の液状化抵抗の評価方法

従来の設計では、図-4に示すように、改良地盤の液状化抵抗を締固め杭から最も離れた点におけるN値（ N_1 ）のみで評価していた。しかし、既往の実測データや地震被害事例の分析結果より、改良地盤がかなりの過負荷についても抵抗できる「ねばり」を有していること⁴⁾や、従来の設計法では改良地盤の液状化抵抗を過小評価していたこと⁵⁾などが指摘されており、これらを反映して、改良地盤を締固め杭と杭間地盤で構成される複合地盤として評価する考え方が提唱されている⁶⁾。

指針ではこれらの研究成果に基づいて、従来の設計で用いられてきた N_1 より求めた液状化抵抗比に、割増係数

表-1 液状化強度の割増係数と液状化判定の考え方

	直接基礎		杭基礎	
	割増係数 C	液状化判定	割増係数 C	液状化判定
			打込み杭 圧入杭	場所打ち杭 埋込み杭
損傷限界	C=1.2	原則 $F_1 > 1.0$	C=1.2	C=1.1
終局限界	C=1.2	D_{cy} , P_f による 総合評価 $D_{cy} \leq 5 \sim 10\text{cm}$ $P_f \leq 5 \sim 10$	C=1.2	C=1.1
				直接基礎に準拠 または 部分液状化許容

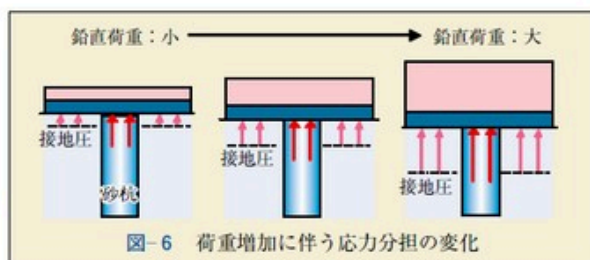


図-6 荷重増加に伴う応力分担の変化

5.2 地盤データのばらつきの考慮

液状化抵抗比の計算では、計算条件となる N 値や細粒分含有率 F_c などのばらつきの評価方法が重要となる。指針では、改良前後における多数の実測データに基づき、人為的要因によるばらつきを極力抑える地盤調査方法と、地盤自体の不均一性を考慮したばらつきの評価方法を推奨法・詳細法として示している。具体的には、自動落下装置による標準貫入試験、 N 値と同数の粒度試験の実施、エリア分けによる地盤特性の評価を推奨法、これらに加えて、最小・最大密度試験や液状化試験の実施、 F_1 に関する不合格率を考慮した設計を詳細法としている。

6. 直接基礎に対する設計

図-5に地盤改良を併用した直接基礎の設計フローを示す。直接基礎の設計では、鉛直支持力と沈下量を締固め効果と締固め杭の存在を考慮した複合地盤として評価する方法を推奨法としている。さらに、地盤改良後に締固め杭間・杭心で標準貫入試験あるいは平板

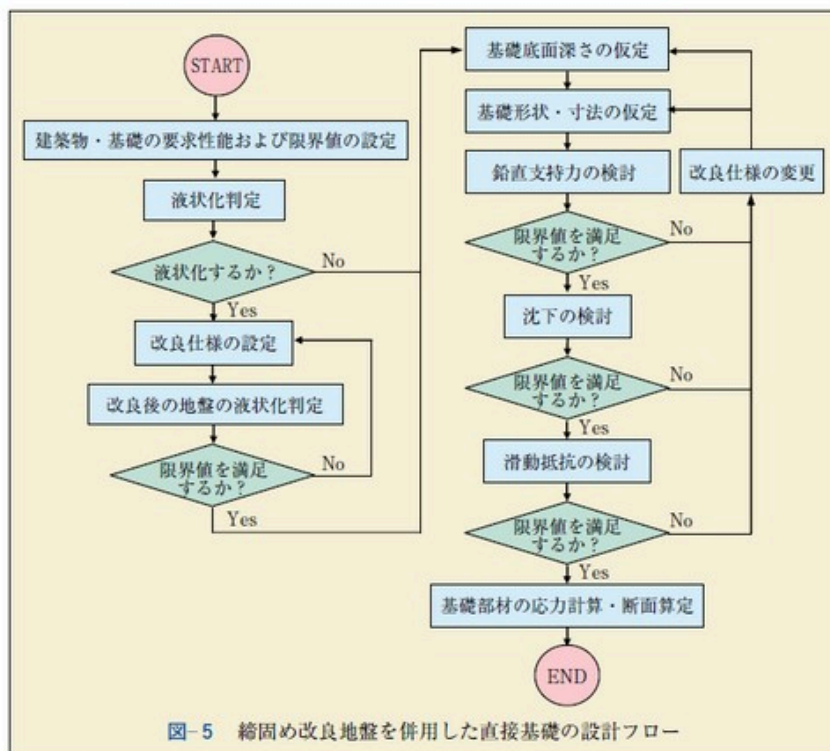


図-5 締固め改良地盤を併用した直接基礎の設計フロー

表-2 支持力計算式

	ϕ の算定に用いる N 値および支持力算定式
使用限界	杭心 N 値→杭心 $\phi_1 \rightarrow N_{1p}$, N_{ϕ} 杭間 N 値→杭間 $\phi_1 \rightarrow N_{11}$, N_{q1} 杭心 $Q_{up} = a_s \times (i_{\gamma} \cdot \beta \cdot \gamma_p \cdot B \cdot \eta \cdot N_{1p} + i_q \cdot \gamma_2 \cdot D_f \cdot N_{\phi})$ 杭間 $Q_{u1} = (1 - a_s) \times (i_{\gamma} \cdot \beta \cdot \gamma_1 \cdot B \cdot \eta \cdot N_{11} + i_q \cdot \gamma_2 \cdot D_f \cdot N_{q1})$
損傷限界	複合地盤 $R_u = Q_{up} + Q_{u1}$ a_s : 改良率を示す。
終局限界	杭間 N 値 $N_{11} \rightarrow \phi_1 \rightarrow N_{11}$, N_{q1} $R_u = i_{\gamma} \cdot \beta \cdot \gamma_1 \cdot B \cdot \eta \cdot N_{11} + i_q \cdot \gamma_2 \cdot D_f \cdot N_{q1}$

Cを乗じて改良地盤全体の液状化抵抗比を評価する式(1)を推奨法としている。

$$R_l(\text{改良地盤}) = C \cdot R_l(\text{改良後杭間}) \dots\dots\dots (1)$$

一方、液状化判定については、表-1に示すように、損傷限界状態では原則として全点 $F_1 > 1.0$ を設計条件とするのに対し、終局限界状態では改良地盤の要求性能と地盤全体の液状化程度を考慮して、液状化時の地表面動的変位 D_{cy} と液状化指数 P_f による総合評価を推奨法として盛り込んでいる。

板載荷試験を実施し、その結果に基づき改良地盤の支持力や変形性能を評価する方法を詳細法としている。ただし、事前・事後に十分な地盤調査を行えない場合の対応策として、締固め杭の存在を考慮せずに鉛直支持力と沈下量を評価する方法を簡便法として残している。

6.1 改良地盤の鉛直支持力

図-6に示すように、改良地盤では荷重の小さい段階は杭心への応力集中度が高いが、荷重が増加し沈下が進むに伴って応力集中度は次第に低下する。指針では、このような現象を考慮し、締固め杭心と杭間のそれぞれの N 値より推定した内部摩擦角 ϕ を用いて支持力を算定し、改良率に応じて各支持力を面積平均することにより、複合地盤の支持力を求める方法を推奨法としている。

6.2 沈下量の計算方法

独立基礎や一部の布基礎などの接地面積が小さく、基礎の沈下の影響範囲が改良層に留まるような基礎形式の場合には、改良地盤で実施した大型平板載荷試験結果や模型土槽による室内実験に基づいて設定された双曲線近

表-3 即時沈下量の計算方法

設計条件	影響深度範囲が改良地盤内		影響深度範囲が多層
基礎形式	独立基礎	布基礎	べた基礎
計算方法	Steinbrennerの近似解		

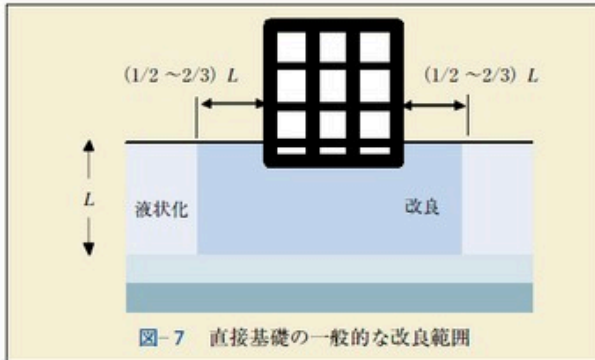


図-7 直接基礎の一般的な改良範囲

似式②を用いて沈下量を計算する方法を推奨法としている。

$$\frac{(S/B)}{q} = \frac{(S/B)}{\beta \cdot q_{\text{ps}}} + \frac{1}{\alpha \cdot K_{\text{ia}}} \quad \text{.....(2)}$$

ここに、 S ：沈下量（m）

q ：荷重（ kN/m^2 ）

B ：基礎幅（m）

q_{ps} ：複合地盤の極限支持力（ kN/m^2 ）

K_{ia} ：杭心地盤の初期接線勾配（ kN/m^2 ）

α, β ：改良率、改良幅に応じた低減係数

これに対して、沈下の影響範囲が改良層下部の非改良層にまで及ぶ接地面積の大きなべた基礎あるいは基礎間隔の狭い布基礎や独立基礎については、改良層と非改良層より構成された多層地盤として沈下量を評価する必要がある。原則としてSteinbrennerの近似解などの弾性解を用いている。この際、改良層の変形係数を締固め杭と杭間地盤で構成された複合地盤として評価する方法を推奨としている。

6.3 改良範囲の考え方

直接基礎に対して改良範囲を設定する際には、建物外周部に改良深さの1/2から2/3程度の改良範囲を確保することが望ましいと考えられることから、2/3～1倍を簡便法、1/2～2/3倍を推奨法としている。一方で、兵庫県南部地震では1/3から1/4の改良範囲でも無被害であった事例⁸⁾もあり、敷地条件等によりやむを得ず上記の改良範囲を確保できない場合には、特殊な対策や詳細な検討、例えば有効応力解析やすべり計算を行なって安全性を確認することを条件に詳細法としている。

7. 杭基礎に対する設計

図-8に地盤改良を併用した杭基礎の設計フローを示す。杭基礎の設計では、地盤改良による N 値や変形係数の増加を考慮して鉛直支持性能や水平抵抗力を評価する手法を推奨法としている。具体的には、鉛直支持力や引抜き抵抗の算定では杭周面摩擦抵抗の増加を、水平力を受ける杭の応力や変形量の算定では水平地盤反力係数の増加を考慮する。さらに、地盤改良後に特殊な地盤調査や杭の載荷試験を実施し、その結果に基づき杭の支持力や変形性能を評価する方法を詳細法としている。ただし、事前・事後に十分な地盤調査を行なえない場合の対応策として、地盤改良効果を見込まずに杭の性能を評価する従来の方法を簡便法として残している。

7.1 杭の鉛直支持力・引抜き抵抗力・水平抵抗力

杭の鉛直支持力や引抜き抵抗力の算定に用いる周面摩擦抵抗に関しては締固め杭間 N 値の採用を推奨法、水平抵抗力の算定に用いる水平地盤反力係数に関しては既往の実測データが少ない点を考慮し、信頼性の高い順に以下の優先順位で求めた水平地盤反力係数の採用を詳細法・推奨法とする。

- ① 詳細法：地盤改良後の杭の水平載荷試験。
- ② 詳細法：地盤改良後のボーリング孔内水平載荷試験。
- ③ 推奨法： $E_0 = 700 \cdot N_1$ （ N_1 は地盤改良後の締固め杭間 N 値）

通常の建築物では、時間的な制約や経済的な都合から改良目標 N 値と方法③を用いて地盤反力係数を計算し、杭の設計を行なうことが多くと予想される。その場合には、改良後に締固め杭間 N 値を測定し、これが設計時に設定した改良目標 N 値を上回っていることを確認する必要がある。

7.2 改良範囲の考え方

建物外周部の改良範囲に関しては、条件に応じ以下に示す3種類の方法から選択する。

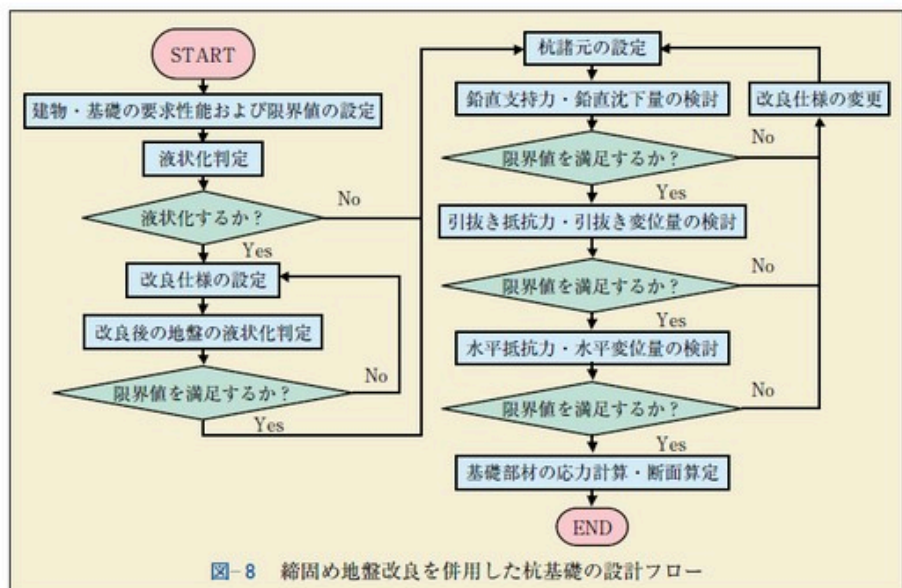
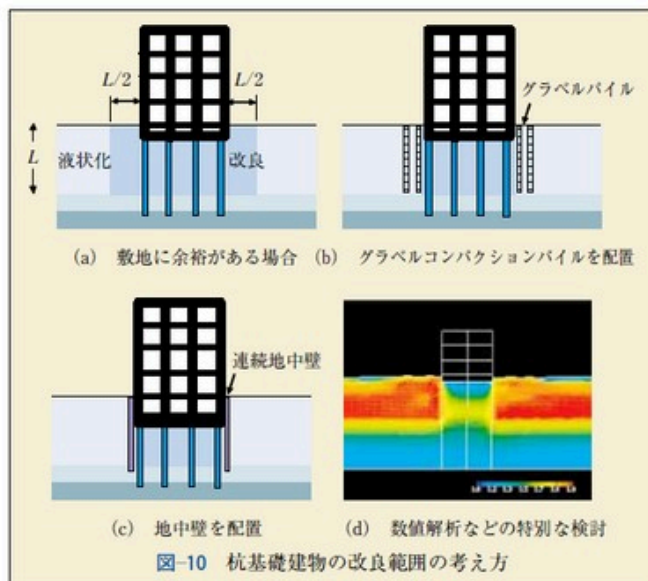
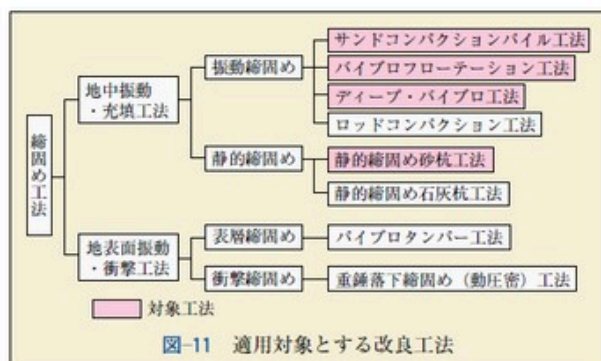
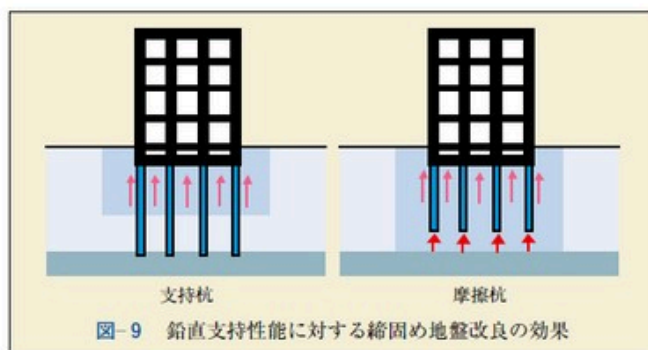


図-8 締固め地盤改良を併用した杭基礎の設計フロー



- ① 簡便法：改良深さの1/2に相当する範囲を改良。
- ② 推奨法：建物外周部にグラベルコンパクションパイルや地中壁を配置することを条件に、改良範囲を改良深さの1/2以下とする。
- ③ 詳細法：数値解析や模型実験などによって上部構造物の安定性や杭基礎の安全性を確認することを条件に、改良範囲を改良深さの1/2以下とする。

8. 適用対象とする地盤改良工法

締固め地盤改良工法は、図-11に示すように、振動あるいは静的エネルギーを利用して、砂・砂利・碎石・スラグなどの補給材を地盤中に充填する工法（地中振動・充填工法）と地表面に直接振動あるいは衝撃エネルギーを与える工法（地表面振動・衝撃工法）に大別される。

地中振動・充填工法は振動締固め工法、静的締固め工法に細分され、地表面振動・衝撃工法は表層締固め工法と衝撃締固め工法に細分される。指針では、これらの地盤改良工法のうち、建築基礎への適用実績と設計法が整備されている点を考慮して4工法を適用対象としている。ロッドコンパクション工法は簡便な締固め工法として適用実績は比較的多いが、ロッド形状や施工法が多様であり、すべての工法を網羅できる設計法が整備されていないため対象外とした。また、砂や礫と生石灰などの

混合材料を地中に充填し、圧入エネルギーと生石灰の水和反応による膨張エネルギーを併用して締固め効果をもつ圧入膨張工法も開発されているが、特殊工法であるため対象外とした。ただし、適用対象とした4工法以外でも、適用対象工法と同一の考え方で設計することが可能であり、かつ改良効果が実証されている工法については適用可能としている。

9. 今後の課題

指針の特徴は、①改良地盤の物性のばらつきや複合地盤の効果を設計に反映した点、および②詳細な地盤調査・検討・品質確認を行なうほど合理的な設計を可能としたところにある。その反面、現状では十分なデータが得られていないため、かなり安全側の数値を採用しているものも多い。特に、割増係数 C を乗じて複合地盤の液状化強度を評価する手法については、長期的な耐久性や杭施工時の地盤の緩みなどに配慮してかなり低めな C を採用しており、今後、さらなるデータの蓄積が望まれる。一方、改良範囲については、敷地に余裕がない場合の対策も含め、過去の被災事例や模型実験の結果などに基づいて設定されているが、必ずしも根拠があるわけではない。改良範囲は工事費に大きく影響する問題であり、今後、数値解析の検討事例や模型実験による検討事例の蓄積によって信頼性を高める必要がある。

参考文献

- 1) 地盤工学会編：液状化対策工法，地盤工学・実務シリーズ18，2004，9。
- 2) 日本建築学会編：建築基礎構造設計指針，2001，10。
- 3) 日本建築学会編：建築基礎のための地盤改良設計指針案，2006，11。
- 4) 吉見吉昭：「ねばり強さ」に関する液状化対策の評価基準，土と基礎，Vol. 38，No. 6，pp. 33～38，1990，6。
- 5) 安田進：大地震による液状化と N 値，基礎工，Vol. 31，No. 2，pp. 50～53，2003，2。
- 6) 原田健二，石田英毅：大地震における建築構造物の締固めによる直接基礎改良地盤の評価に関する実証的研究，建築基礎の設計施工に関する研究資料5，実務にみる地盤改良工法の技術的諸問題，日本建築学会構造委員会，1999，10。
- 7) 岩崎敏男，龍岡文夫，常田賢一，安田進：地震時地盤液状化の程度と予測について，土と基礎，No. 1164，pp. 23～29，1980，4。
- 8) 阪口理：浜甲子園団地の液状化防止工法，土と基礎，Vol. 45，No. 3，1997，3。