

(12) 既設基礎の耐震補強に関する検討 (その6) -小径ドレーン工法-

銭高組	正会員	原田尚幸
銭高組	正会員	角田晋相
銭高組	正会員	谷野洋一
土木研究所	正会員	大下武志
国土交通省	正会員	市村靖光

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、既設基礎に対する液状化対策、耐震補強の必要性は広く認識されるようになった。しかし、都市部において既設基礎の液状化対策、耐震補強を行う場合、輻輳する近接構造物などにより施工空間に多くの制約を受け工期・工費が増大する傾向にある。そこで著者らは、このような厳しい制約条件下でも適用可能な液状化対策技術として小口径スクリーン管を用いた間隙水圧消散工法（小径ドレーン工法）を提案した¹⁾。

本報告では、小径ドレーン工法の概要と大規模地震時における液状化対策効果について試算・検討した結果について述べる。

2. 工法概要

2.1 工法の特長

小径ドレーン工法の概要を図-1に示す。本工法は、人力運搬可能な施工機械を用いて、既設構造物直下の飽和砂地盤中にφ5～10cm、単位長さL=100～300cm程度のスクリーン管（小径ドレーン）を50～150cm間隔で、所定の深度まで垂直または斜めに打設した間隙水圧消散工法であり、以下のような特長がある。

- ① 施工機械が軽量小型で操作性に優れているため、用地、上空等の制約条件下にある既設基礎直下地盤の液状化対策が可能である
- ② ドレーン材は高い排水性能があり、グラベルドレーン工法と同等以上の対策効果が期待できる
- ③ 施工に伴う周辺環境への影響は小さい

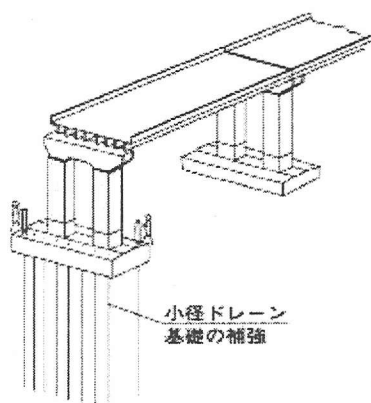


図-1 小径ドレーン工法概要

2.2 対策原理と適用分野

小径ドレーン工法の基本的な考え方は、既設基礎に新たに杭等を増し打ちするものではなく、ドレーンの排水効果で基礎周辺地盤の安定化を図ることに

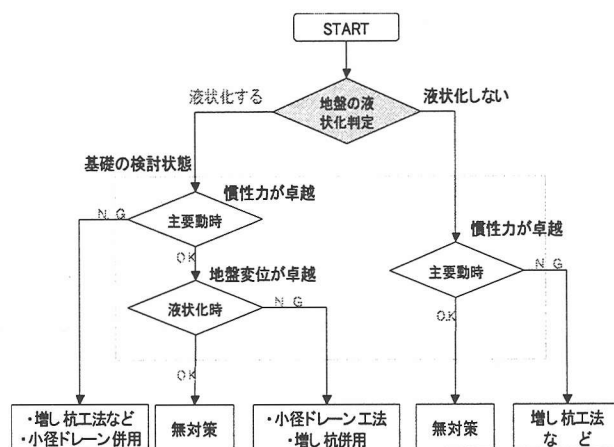


図-2 小径ドレーン工法の適用性

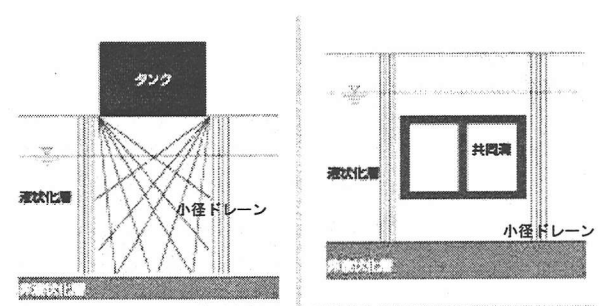


図-3 適用事例

keywords : 既設基礎、耐震補強、液状化対策、小径ドレーン工法、試設計

連絡先: 〒163-1011 東京都新宿区西新宿3-7-1 新宿パークタワー11F TEL:03-5323-3861 FAX:03-5323-3860

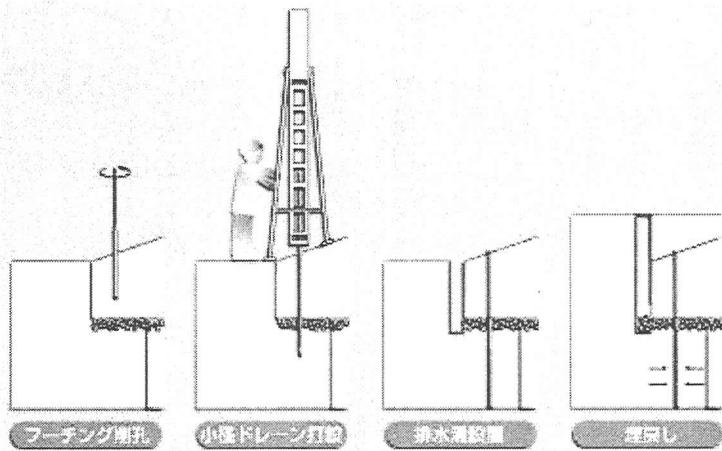


図-4 施工手順（橋脚基礎）

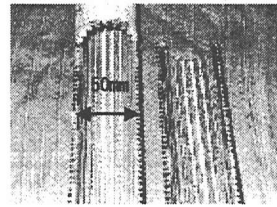


写真-1 スクリーン部

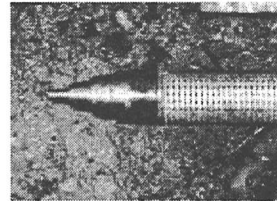


写真-2 ロッド先端

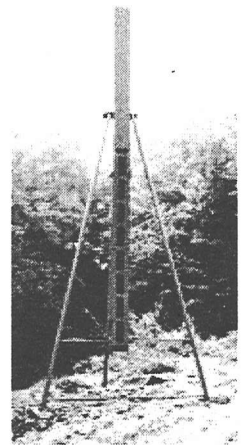


写真-3 打設治具

よって耐震性能を向上させるものである。したがって、図-2に示すように既設基礎の耐震性能が液状化によって大きく損なわれる場合に、その効果が大きく発揮されると考えられる。一方、地震時に液状化が生じない地盤に対しては適用範囲外となる。

また、兵庫県南部地震のように主要動の到来と同時に液状化が起こる場合は、小径ドレーン工法にマイクロパイル等の増し杭工法を併用することでより合理的な液状化対策が可能になると考えている。

適用対象物としては、既設橋脚・建築物などの杭基礎構造物、旧法タンク基礎、共同溝等の地中構造物、土構造物、護岸構造物などがある（図-3参照）。

2.3 橋脚基礎を対象とした施工手順

小径ドレーン工法を既設橋脚基礎に適用した場合の施工手順を図-4に示す。

- ①調査：設計図面、現地調査情報からフーチング配筋位置を割出す
- ②削孔：フーチング上面から配筋位置を避けコアッターで削孔する
- ③打設：この孔をガイドとして小径ドレーンを小型打設機で地中に直接打設する
- ④排水溝設置：全ドレーン打設後、構造物基礎の周辺部に排水溝を設置する
- ⑤埋戻し：フーチング上部に掘削土砂を埋戻す

使用材料（小径ドレーン）、打設治具を写真-1～3に示す。小径ドレーンは、水平連続Vスロット構造のスクリーン部とロッド先端のドライブポイントで

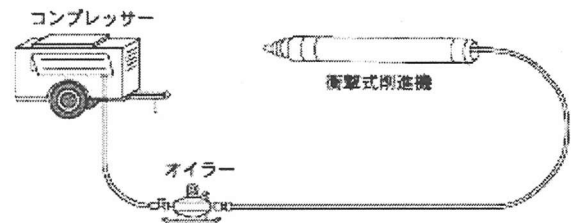


図-5 施工機械概要

表-1 施工機械仕様

Type		IPM55	IPM70	IPM95
直径	cm	5.1	7.5	10
長さ	cm	112	130	154
重さ	kg	11	29	62
打撃エネルギー	J	58	106	240
作動空気圧	kPa	690	690	690
空気消費量	m ³ /min	0.6	0.9	1.9

構成されており、スクリーン部は打設時の砂粒子の流入を防止するため打設方向にウェッジ型ワイヤーを6°傾斜させている。

また、地震時、スクリーン部には間隙水のスクリーン管内への流入を妨げない、と同時に細粒分や砂分を極力流入させないといった機能が要求されるが、既往の実験¹⁾より、スクリーンのスロットサイズ(Dスロットサイズ：ワイヤーの巻線間隔)に対する砂地盤の85%粒径(D_{85%})の比を $D_{85}/D_{\text{スロットサイズ}} > 2$ と選定することで、この要求性能は満たされる。なお、ドレーン材には、腐食防止のため亜鉛メッキ500g/m²を施し、腐食しろを1.0mm見込んでいます。

一方、施工機械は、操作性にすぐれたエア式地中貫孔機（例えば、インパクトモール）を選定し、施工性、安全性の確保を容易にした。インパクトモールの概要および仕様を図-5、表-1に示す。

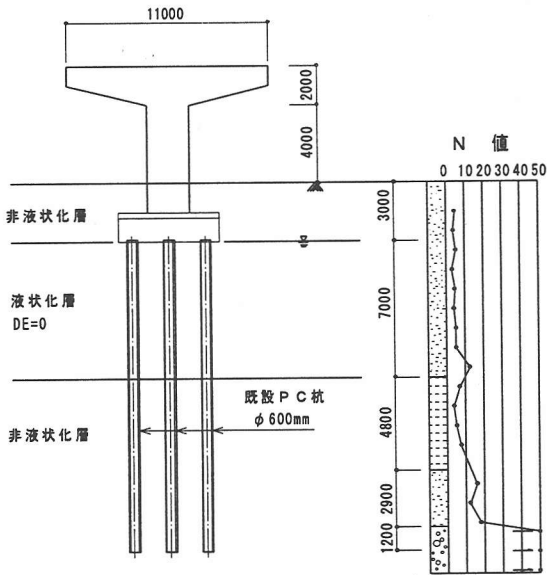


図-6 試設計に用いる構造物条件

表-2 試設計に用いる地盤条件

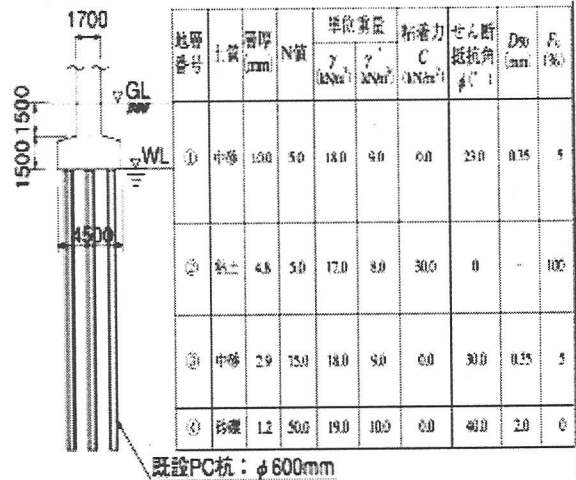


表-3 F_L値と土質定数の低減係数 D_E

	L 1 地震動	L 2 地震動	
		Type I	Type II
F _L 値	0.87	0.39	0.24
低減係数 D _E	2/3	1/3 (=0)	0

3. 保耐法を用いた実構造物への適用性の検討

グラベルドレーン工法に代表されるような間隙水圧消散工法は、L 1 地震動を想定した場合、これまでの研究成果および実績により十分な対策効果が得られることが確認されている。しかし、L 2 地震動を想定した場合、地震動が非常に大きいことから対策効果の確実性に不安が残ることが指摘されている。

そこで、基礎の地震時保有水平耐力法²⁾により試設計を行い、小径ドレーン工法の適用効果について検討した。対象とした既設構造物は、旧設計基準 (s.39) で設計された単柱式 T 形橋脚で、地盤は地下水水面以下の 7.0m 区間で液状化 (土質定数の低減係数 D_E=0) する。杭基礎は杭径 600mm の PC 杭で、降伏時の応答塑性率の制限値は μ_{FL} = 2 とした³⁾。

構造物条件および地盤条件を図-6、表-2 に示す。また、地盤の液状化判定結果より求められた液状化対象土層の F_L 値と土質定数の低減係数 D_E の関係は、表-3 に示すとおりである。

3.1 施工可能な打設間隔

小径ドレーン工法は、高さ 4m、平面形状 2 × 2 m の作業スペースがあれば施工可能である。そこで、試設計に先立ち、地震動レベルとドレーン打設間隔の関係について検討した。改良仕様 (ドレーン径と打設間隔) の設計は、グラベルドレーン工法の設計法⁴⁾ に準じて行った。設計条件を以下に示す。

① 地盤条件

- ・ 透水係数 $k_s = 1.0 \times 10^{-4}$ m/sec

- ・ 体積圧縮係数 $m_v = 5.0 \times 10^{-5}$ m²/kN

② 地震動条件

- ・ 地震動の有効継続時間 $t_d = 12$ sec
- ・ 等価繰返し回数 $N_{e,q} = 20$ 回
- ・ 液状化に至る繰返し回数 $N_L = 20(1/FL)^{-1/0.170}$

③ ドレーン材

- ・ ドレーン材の半径 $a = 25$ mm
- ・ 透水係数 (i=0.25) $k_d = 1.0 \times 10^1$ m/sec

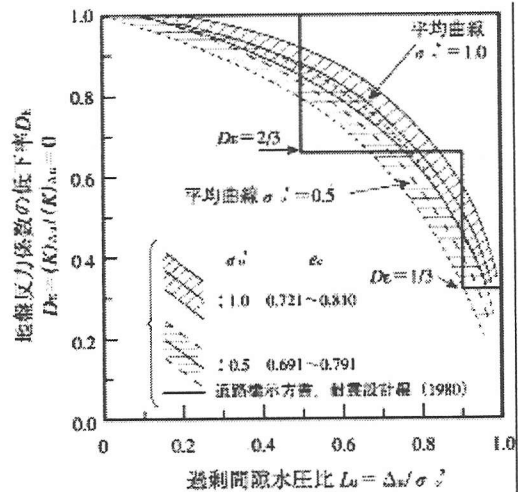


図-7 過剰間隙水圧比と地盤反力係数の低減割合⁵⁾

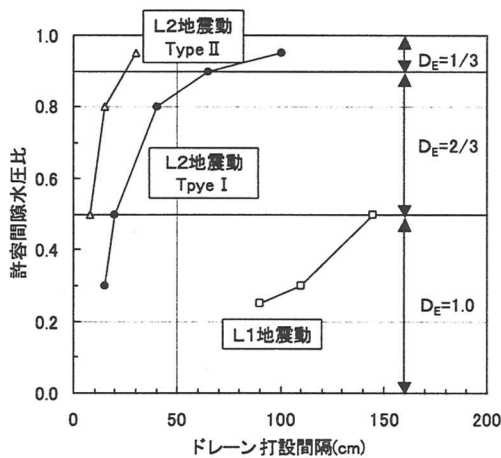


図-8 ドレーン打設間隔の試算結果

ここで、過剰間隙水圧比と耐震設計上土質定数の低減係数 D_E の関係は、図-7に示す常田らの提案⁵⁾を参考にした。同図では、許容過剰間隙水圧比を0.5～0.9とした場合、 D_E は2/3まで評価できる。また、許容過剰間隙水圧比を0.9～0.99とした場合には、 $D_E=1/3$ までとなる。

試算結果を図-8に示す。L1地震動を対象とした場合、打設間隔100cmで過剰間隙水圧比は0.3程度に抑えられており、地盤変位が構造物の機能に与える影響度合いは小さいと考えられる。一方、L2地震動 Type I の場合、打設間隔100cmでは過剰間隙水圧の上昇の抑制量は小さいが、液状化しない場合の1/3程度の地盤反力は確保できている。しかし、Type II の場合には、打設間隔が25～30cmとなり極めて密に打設しなければならない結果となった。

したがって、本地盤条件の場合、ドレーン径5cm、打設間隔100cm(L2地震動 Type I を対象)が、現実的な改良仕様であると考えられる。打設間隔100cmとした場合の小径ドレーン配置例を図-9に示す。

3.2 L2地震動 Type I における対策効果⁶⁾

(1) 試設計条件

L2地震動 Type I に対して、 D_E をパラメータに表-4に示す条件にて耐震検討を行った。

(2) 試設計結果および考察

試設計結果を表-5、図-10に示す。 D_E が1/3以上の場合、既設杭基礎の応答塑性率 μ_{FR} は1.32～1.66となり、設定条件($\mu_{FR} \leq \mu_{FL} = 2$)を満足した。また、耐震性能は、 $D_E=1/3$ の場合、無対策時に比べ2倍程度向上することがわかった。しかし、地盤反力を更に2倍、3倍と増加しても耐震性能は15～

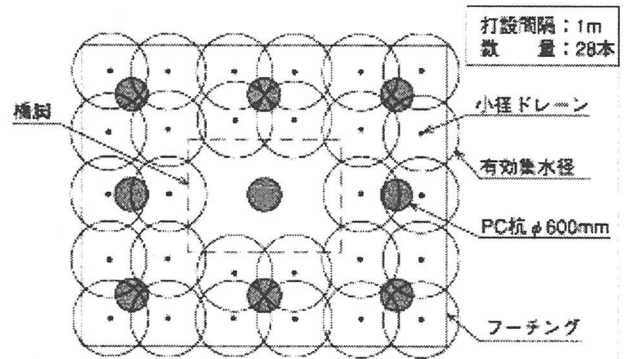


図-9 小径ドレーン配置例(フーチング内)

表-4 試設計条件

検討ケース	低減係数 D_E	小径ドレーン打設間隔
無対策	0	—
$D_E=1/3$	1/3	65～100cm (基本検討)
$D_E=2/3$	2/3	20～65cm (参考検討)
$D_E=1.0$	1.0	20cm 以下 (")

表-5 水平震度と基礎の応答塑性率

検討ケース	設計水平震度 K_{hcF}	降伏水平震度 K_{hyF}	応答塑性率 μ_{FR}
無対策	0.57	0.19	5.04
$D_E=1/3$		0.37	1.66
$D_E=2/3$		0.42	1.43
$D_E=1.0$		0.44	1.32

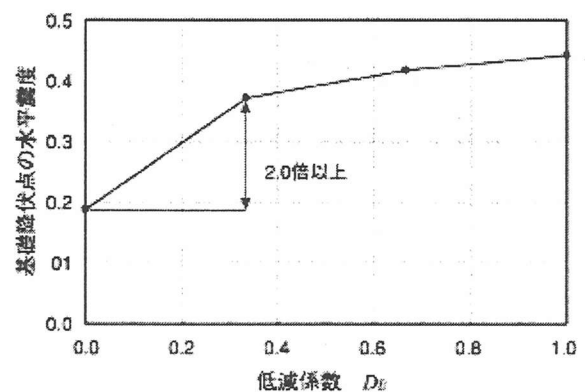


図-10 低減係数 D_E と基礎降伏点の水平震度

20%程度しか向上していない。

したがって、小径ドレーン工法のL2地震動 Type I への適用は、 D_E が0となり支持力が完全に無視される場合に $D_E=1/3$ 以上見込めるように許容過剰間隙水圧比を設定することで有効であると考えられる。

3.3 L2地震動 Type IIにおける対策効果⁷⁾

L2地震動Type IIの場合、地震動がType Iより大きいいため小径ドレーン工法のみでは十分な対策効果が得られない。

一方、既設杭基礎の耐震補強工法として検討されているマイクロパイル等による増し杭工法⁸⁾は、液化化地盤に適用した場合、水平力の負担率が増加し、所定の耐震性能を満足するために必要な杭本数が極めて多くなるため、増し杭するマイクロパイルを斜杭として用いる、あるいは増し杭以外の液化化対策工法と併用するなど補強効果を高める必要がある。

ここでは、マイクロパイルによる増し杭工法に対し、液化化対策工として小径ドレーン工法を併用した場合について検討した。

(1) 試設計条件

検討モデルを図-11に示す。増し杭はφ178mmの高強度鋼管を主部材とするマイクロパイルで、M~φ関係はバイリニア型である。検討モデルは既設杭と増し杭の杭基礎を地盤バネで支持したラーメン構造とした。試設計条件を表-6に示す。

試設計は、小径ドレーンの排水効果が増し杭本数にどの程度の影響を与えるか検討したもので、解析コードにはTDAPⅢを用いた。

(2) 試設計結果および考察

試設計結果を表-7に示す。同表によると直杭補強の場合、 D_E が1/3までは増し杭本数が50本以上となり D_E を向上させた効果がみられない。一方、斜杭補強の場合は、 D_E が0~1/3間で D_E の向上に応じて増し杭の必要本数を減少することが可能であった。また、いずれの場合も D_E を1/2以上に向上させても、それ以上増し杭本数は減少せず、非液化化時と同本数で補強可能であった。すなわち、斜杭は荷重の大部分を軸力で負担するため少ない本数で水平荷重を分担できるが、直杭では D_E を向上させてもその数倍の本数が必要となることが示された。

また、既設杭と増し杭の水平荷重の分担率についてみると、 D_E が小さいと既設杭の耐力も小さく水平荷重の大部分を増し杭が負担しなければならないが、 D_E が大きくなると既設杭の耐力も上がり、既設杭も水平荷重を負担できるようになることがわかった。したがって、 D_E が小さな範囲では、 D_E の向上が増し杭本数に大きく影響すると考えられる。

低減係数 D_E と応答塑性率 μ_{FR} の関係を図-12に

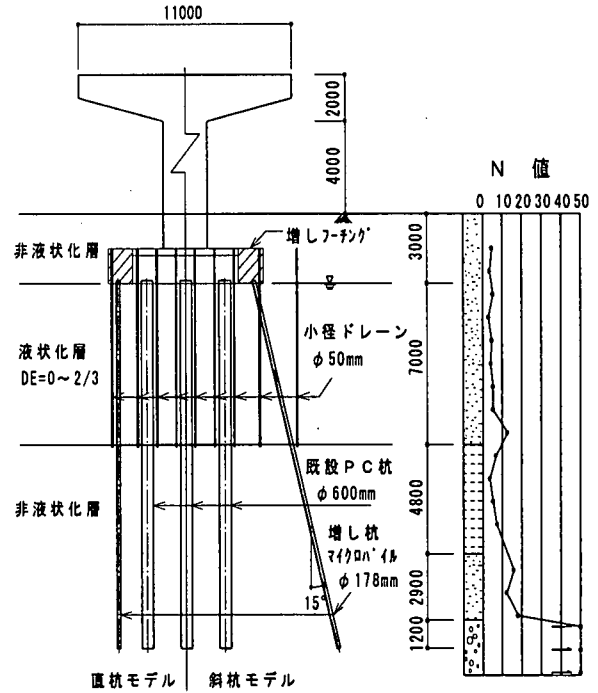


図-11 検討モデル (L2地震動 Type IIの場合)

表-6 増し杭本数の検討

ケース	増し杭角度	D_E	ケース	増し杭角度	D_E
1	0° (直杭)	0	6	15° (斜杭)	0
2		1/3	7		1/10
3		1/2	8		1/6
4		2/3	9		1/3
5		1	10		1/2
			11		2/3
			12		1

表-7 保耐法による試算結果

低減係数 D_E		0	1/10	1/6	1/3	1/2	2/3	1	
直杭補強	増し杭本数(本)	-	-	-	50以上	26	26	26	
	水平荷重 分担率	既設杭	-	-	-	52%	50%	44%	
		マイクロパイル	-	-	-	39%	39%	34%	
		フーチング	-	-	-	9%	11%	22%	
μ_{FR}		-	-	-	2.06	1.37	耐力OK		
斜杭補強	増し杭本数(本)	18	16	14	12	10	10	10	
	水平荷重 分担率	既設杭	23%	24%	29%	35%	48%	51%	39%
		マイクロパイル	77%	75%	69%	61%	44%	37%	39%
		フーチング	-	1%	2%	4%	8%	12%	23%
μ_{FR}		1.78	1.95	2.06	1.84	1.6	1.22	耐力OK	

示す。 D_E が小さい場合、増し杭本数が補強効果に与える影響の度合いは大きいですが、 D_E が大きくなるにしたがいその割合は小さくなっている。今回の検討では D_E が0.8以上の場合には、増し杭本数によらず杭体は降伏に至らないことがわかった。したがって、増し杭本数と D_E (小径ドレーン工法の排水効果)との組み合わせは、応答塑性率の制限値を目標に、状況に

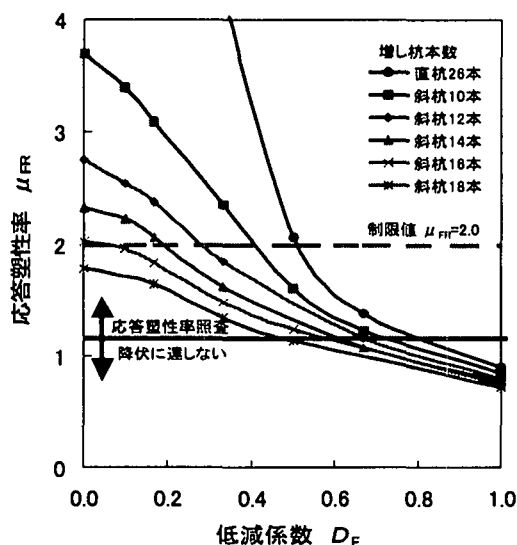


図-12 低減係数と応答塑性率の関係

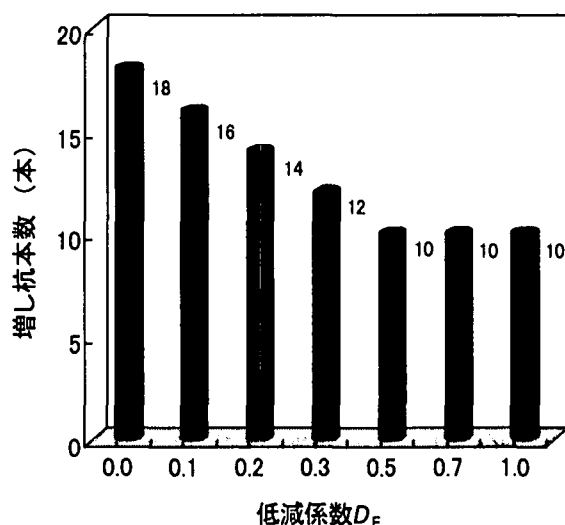


図-13 必要増し杭本数の低減効果 (斜杭補強)

応じて適切に選定できると考えられる。

斜杭補強の場合の低減係数 D_E と必要増し杭本数の関係を図-13に示す。図から増し杭本数を30%程度減少させても(18本→12本)小径ドレーンの排水効果($D_E=0 \rightarrow 1/3$)により、既設杭基礎は十分な耐力を有していることがわかる。

したがって、小径ドレーン工法のL2地震動Type IIへの適用は、マイクロパイルによる増し杭工法と併用し、 D_E を1/3程度見込めるように過剰間隙水圧を消散させることで有効であると考えられる。

4. FEM解析を用いた改良範囲と対策効果⁹⁾

改良範囲に関しては、これまでいくつかの提案はあるものの必ずしも確立されたとは言い難い。そこで、改良範囲、およびその形態が構造物にどのような影響を与えるか2次元FEM解析を用い検討した。

(1) 解析条件と解析ケース

解析モデルを図-14に示す。解析は全応力解析による逐次非線形解析である。液状化の影響は、GL-3~GL-10mの中砂層を液状化層とし、この層のせん断弾性係数を低減させることで表現した。地盤の非線形特性はH-Dモデルを用い、 $G/G_0 \sim \gamma$ 関係、 $h \sim \gamma$ 関係は安田・山口の式¹⁰⁾より導いた。既設PC杭の $M \sim \phi$ 関係はトリリニア型、増し杭マイクロパイルの $M \sim \phi$ 関係はバイリニア型の非線形はり要素とした。フーチングおよび上部構造物は剛体とし、質点は上部構造の作用位置に置いた。境界条件は、側部を水平ローラー、底面を固定とした。入力波形には道路

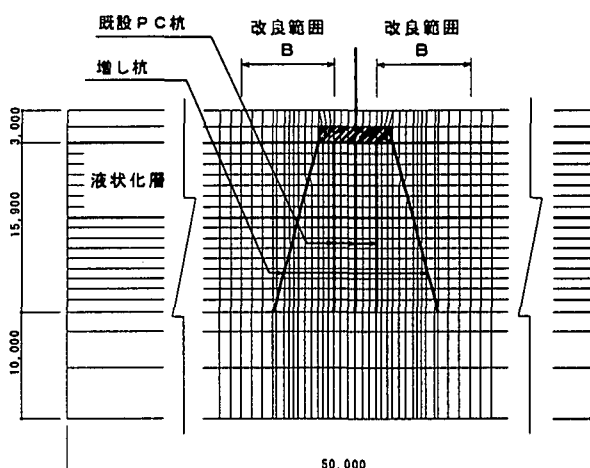


図-14 解析モデル

表-8 改良範囲に関する検討ケース

ケース	改良形態	改良範囲 B	備考	
1	無対策	全範囲 G_0 の低減率 1/100	-	
2	非液状化時	G_0 の低減 なし	-	
3	直下型 	1.0 m	既設杭周辺	
4		3.0 m	既設杭+増し杭周辺	
5		5.0 m	$B = h \tan \alpha_1$	受働土圧部
6		10.0 m	$B = h \tan \alpha_1 + H \tan \alpha_2$	受働+主働土圧部
7	両脇型 	15.0 m	$B = H \tan \alpha_1 + H \tan \alpha_2$	受働+主働土圧部 (液状化層全体)
8		1.0 m	-	既設杭周辺
9		3.0 m	-	既設杭+増し杭周辺
10		5.0 m	$B = h \tan \alpha_1$	受働土圧部
11		10.0 m	$B = h \tan \alpha_1 + H \tan \alpha_2$	受働+主働土圧部
12	15.0 m	$B = H \tan \alpha_1 + H \tan \alpha_2$	受働+主働土圧部 (液状化層全体)	

橋・標準入力地震波 OGAS FUKIAI N27W を用いた。

検討ケースを表-8に示す。改良形態は、直下型、両脇型の2タイプを考えた。改良範囲は、杭に受働土圧が働く領域、受働・主働の両崩壊領域(1/β区間)、受働・主働の両崩壊領域(液状化層全体)を基本に表に示すとおりとした。

せん断弾性係数 G_0 の低減率は、液状化部で1/100、小径ドレーンによる改良範囲部で1/3と仮定した。

(2) 解析結果および考察

無対策、非液状化時の時刻歴応答加速度を図-15に示す。無対策の場合、応答加速度は非液状化時と比べ小さく、長周期化している。また、図-16に示す最大応答加速度分布をみると、無対策の場合、液状化層を境に急激に応答加速度が減衰している。このときの既設杭の最大曲げモーメント分布を図-17に示す。無対策時には杭頭部および層境界で最大値を示し、既設杭は構造物からの慣性力に加え地盤変形による強制外力の影響を強く受けることがわかった。したがって、せん断剛性を1/100程度に低下させることで全応力解析においても簡易的に液状化現象が表現できていると考えられる。

改良範囲と最大曲げモーメントの関係を図-18(杭頭部)、19(層境界部)に示す。ここで、各ケースのモーメントは無対策時のモーメントで正規化して示した。杭頭部に働くモーメントは改良範囲1mでは無対策時と比べ低減されるが、3m、5mでは逆に増加し、10mで再び低下する傾向がみられた。一方、層境界については改良範囲が大きくなるほどモーメントは小さくなり、直下型(改良範囲1m)では無対策時の20%程度の低減が可能であった。このとき、杭体の塑性化の程度は図-20に示すように大きく抑えられていた。また、改良による低減効果は、いずれの場合も直下型が両脇型より大きいことがわかった。

改良範囲とフーチングの最大水平変位の関係を図-21に示す。直下型の水平変位量は改良範囲1mで無対策時の60%程度に低減され、それ以上改良範囲を拡げても低減効果が少ないことが認められた。

以上の検討結果より、杭基礎の水平変位量は、構造物からの慣性力の他に地盤変位による杭体の塑性化の程度に影響されることが示された。また、構造物への応力低減効果は改良範囲にしたがい大きくなるが、地盤-杭基礎-構造物の固有周期との関係に影響されるため、改良範囲を拡げることが必ずしも構造物

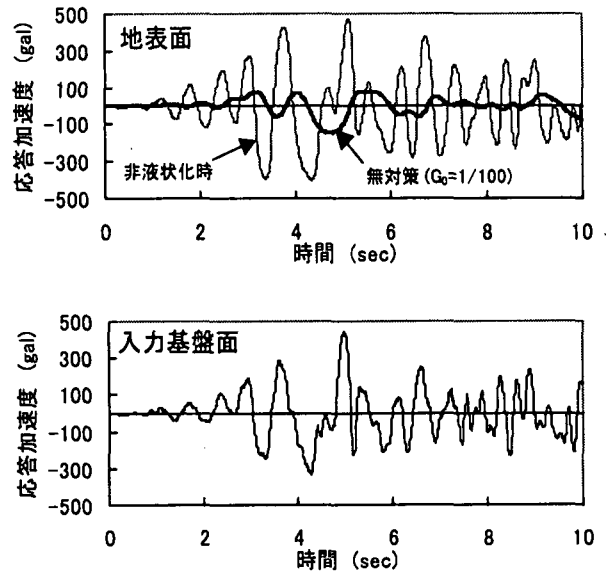


図-15 応答加速度履歴

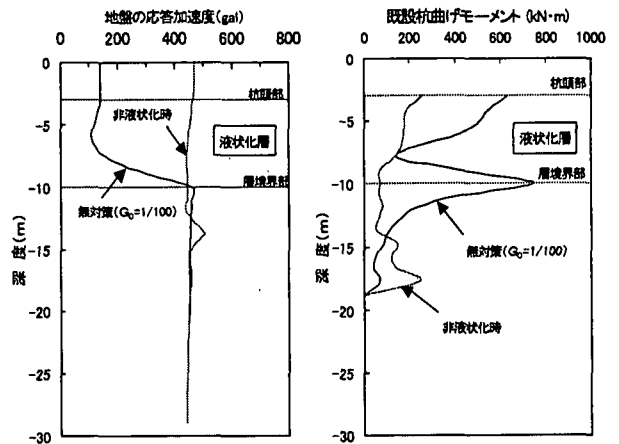


図-16 最大応答加速度分布 図-17 最大モーメント分布

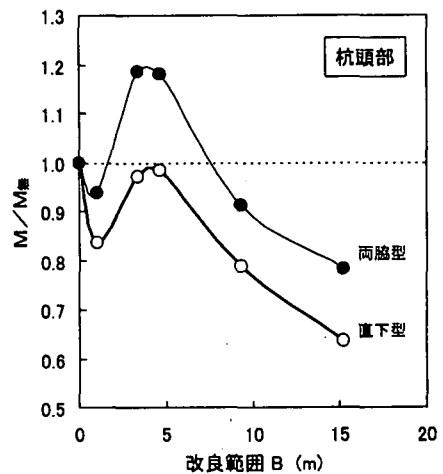


図-18 最大モーメント比(杭頭部)

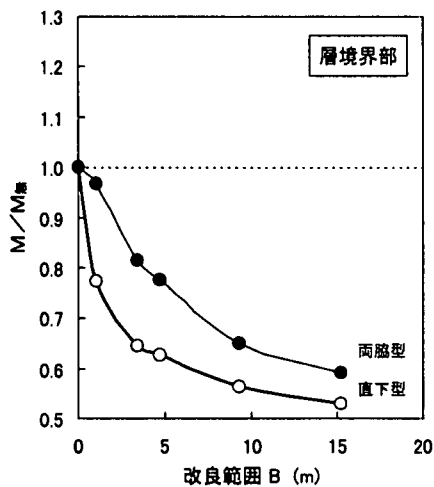


図-19 最大モーメント比 (層境界部)

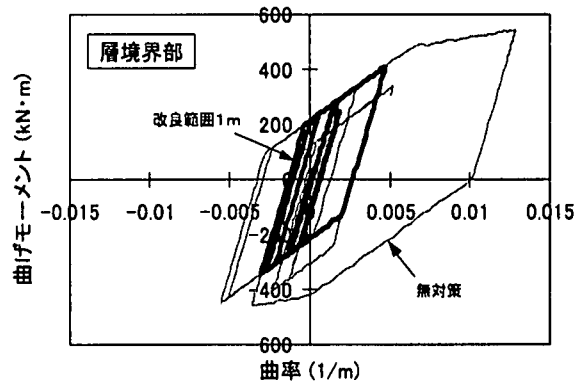


図-20 M~φ応答履歴 (層境界部)

にとって有利にならないことがわかった。

今後は、コスト評価も含めた最適な改良範囲、改良形態について検討したいと考えている。

5. まとめ

小径ドレーン工法を既設杭基礎構造物の液状化対策として用いた場合、杭基礎耐力の向上にどの程度寄与するか試設計を行い検討した。その結果、既設杭基礎の保有耐力は、L2地震動Type I に対しては小径ドレーン工法のみで、Type II に対してはマイクロパイルによる増し杭工法と併用することで大きく向上することがわかった。

今後、現地施工実験を実施し、施工性の向上を図ると共に、小径ドレーンの実地盤での排水性能についても確認する予定である。

なお、本報告は、独立行政法人土木研究所との共同研究「既設基礎の耐震補強技術の開発」平成11、12年度活動報告に基づき取りまとめたものである。

【参考文献】

- 1) 原田, 高津, 坂本: 排水機能付き小径鋼管を用いた既設構造物基礎の液状化対策工法, 第34回地盤工学研究発表会, 1999. 7.
- 2) (社) 日本道路協会: 道路橋示方書V耐震設計編, 平成8年11月
- 3) (社) 日本道路協会: 既設道路基礎の補強に関する参考資料, 平成12年2月
- 4) グラベルドレーン工法研究会: グラベルドレーン工法技術資料, 平成8年4月

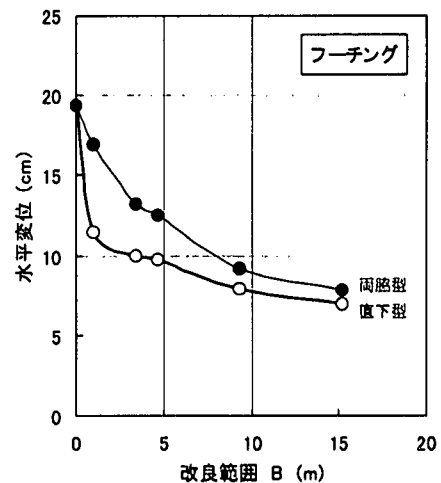


図-21 フーチング最大水平変位

- 5) 常田, 木全, 吉田: 地盤流動特性およびその影響に関する実験的検討, 第16回土質工学研究発表会, 1981.
- 6) 谷野, 渡辺, 大下, 市村, 高津, 原田: 既設基礎の耐震補強に関する検討(その5), 土木学会第55回年次学術講演会, 平成12年9月
- 7) 角田, 原田, 谷野, 高津, 大下, 市村: 既設基礎の耐震補強方法の検討—ドレーン工法の適用効果について—, 第36回地盤工学研究発表会, 2001. 6., 投稿中
- 8) 市村, 大下, 福井, 西谷: 既設基礎の耐震補強に関する検討(その1), 土木学会第55回年次学術講演会, 平成12年9月
- 9) 角田, 原田, 渡辺, 高津, 大下, 市村: 既設基礎の耐震補強に関する検討(その8), 土木学会第56回年次学術講演会, 平成13年10月, 投稿中
- 10) 安田, 山口: 種々の不攪乱土における動的変形特性, 第20回土質工学研究発表会, 1985.