

23. 東京低地における既設橋梁杭基礎の液状化対策に関する検討

Retrofit Research of Bridge Foundation against Liquefaction in Tokyo Lowland

技術調査課 廣島実、小川好

1. はじめに

軟弱な沖積層が厚く堆積している東京の東部低地では、橋梁など構造物の杭基礎は支持層となる数十メートル深い洪積層まで打設される。このような地盤条件下に構築された杭基礎について現行耐震基準¹⁾のレベル 2 地震動を用い耐震性照査をおこなった場合、地表近くの浅層部に広く分布する飽和した砂質土層に対して液状化対策が必要となる場合がある。一方、液状化層の下位にはN値=0~5 程度の軟弱な

粘性土がある場合が多く、液状化層付近の杭頭部に地盤改良等の補強をおこなっても、下位の軟弱な粘性土層の部分で杭体の負担が増加したり、杭体の段落とし部などが弱点となる可能性がある。

本報では、このような地盤条件下に構築された既設橋梁の杭基礎を対象として、二次元有限要素法(FEM)によるレベル 2 地震動の動的解析をおこない、杭体の挙動特性と各種液状化対策工法の有効性を比較検討した。

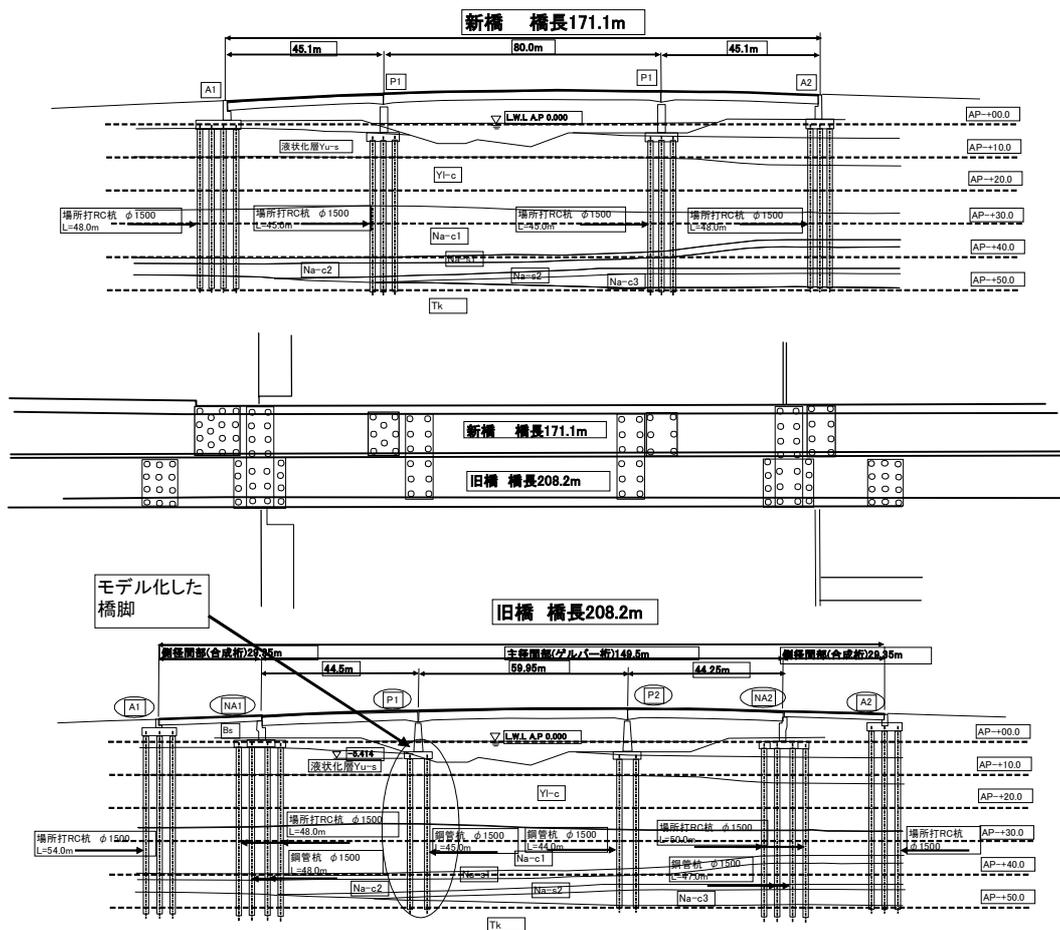


図-1 検討対象の既設橋梁

2. 検討対象とした既設橋梁

2.1 橋梁の概要

図-1 に検討対象とした既設橋梁の概要図を示す。この橋梁は新旧 2 橋からなる。旧橋（橋長約 170m）の下部工は昭和 41 年 3 月に完成したが、昭和 53 年 11 月の改修工事で、適用基準「S47 道示」により補強工事が実施されている。また新橋（橋長約 208m）の下部工は適用基準「S47 道示」により昭和 48 年 9 月に完成している。新旧橋とも基礎形式は AP-50m 付近の東京層を支持層とした場所打ち RC 杭（φ 1500、L=45.0~54.0m、ただし旧橋の一部は鋼管杭）である。

2.2 地盤概要

地盤概要は、上位約 5m は N 値=5 程度の砂質土層（液状化層）となる上部有楽町層（Yus 層）であり、その下位に N 値=2 程度の軟弱な粘性土層の下部有楽町層（Ylc 層）が約 15m 続く。その下位は、N 値=5~15 程度の比較的硬質な粘性土層主体の 7 号地層（Nac1）が約 15m 続き、AP-45.0m 付近から杭基礎の支持層となる砂礫主体の東京層群となる。

2.3 検討の経緯

当該橋梁下部工について、現行基準（「H14 道路橋示方書」¹⁾）を用いてレベル 2 地震動による静的耐震照査をおこなったところ、Yus 層の液状化により、ほとんどの杭体でせん断強度が許容値内に入らず、耐震補強が必要となる結果となった。ここで有効な工法として図-2 に示す In-Cap 工法が提案された。この工法は、フーチング周りに鋼管矢板を打設し、その内部を深層混合処理（CDM）で改良するという工法で、増し杭工法等に較べ過大な断面力が発生する杭頭部のみを補強する合理的な工法である。しかし、当該地盤は①地震時に液状化層の受働土圧が期待できないことに加えて杭頭部の補強によって地震時慣性力が増加すること②補強した下部にも受働土圧が期待できない軟弱な粘性土層（Ylc 層）があり、その部分で杭の損傷の恐れがあること③杭の段落とし部（断面変化部）が地盤特性の異なる Ylc 層と Nac1 層との層境付近にあり、ここが弱点となる恐れがあることが懸念された。

このため、当該地盤条件下で二次元有限要素法（F

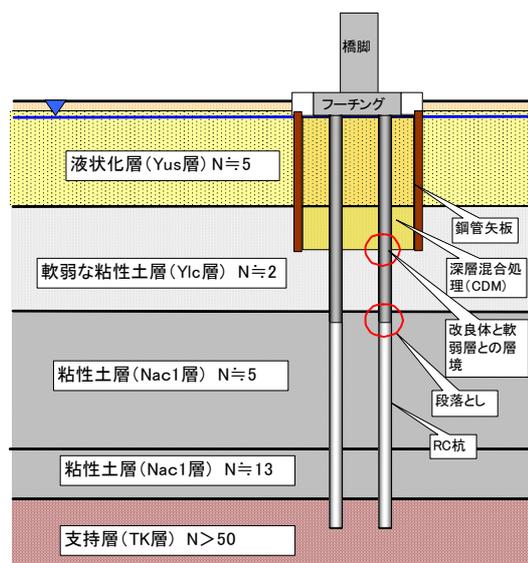


図-2 補強対策 (In-Cap 工法) のイメージ図

表-1 杭の仕様

No	区間長(m)	主鉄筋 ※かぶり(cm)						構造要筋				
		1段目		2段目		3段目		断面積 (cm ²)	間隔 (cm)	有効長 (cm)		
1	3.000	D51	60	15.0	D51	60	25.0	0	35.0	1.267	15.0	120.0
2	17.500	D51	60	15.0	D51	60	25.0	0	35.0	1.267	30.0	120.0
3	24.500	D25	32	15.0		0	25.0	0	35.0	1.267	30.0	120.0

コンクリート設計基準強度	$\sigma_{ck} =$	24.0 (N/mm ²)
鉄筋の降伏応力度	主鉄筋 $\sigma_y =$	295.0 (N/mm ²)
	帯鉄筋 $\sigma_y =$	295.0 (N/mm ²)
鉄筋のヤング係数	$E_s =$	2.000×10^5 (N/mm ²)
杭の単位長さ当たりの重量	$w =$	43.30 (kN/m)

EM) によるレベル 2 地震動の動的解析をおこない、杭体の挙動特性と各種液状化対策工法の有効性について各種検討をおこなった。

3. FEM地震応答解析

3.1 杭本体及び地層のモデル化

解析に用いるプログラムは液状化地盤で実績の多い旧港湾技術研究所開発の FLIP²⁾とした。以下に杭本体と地盤物性のモデル化について示す。

3.1.1 杭本体のモデル化

図-3 に杭体と地層の解析モデルを、図-4 に杭の非線形特性を示す。この図から杭体の断面は 3 種類となっており、上部 3 m の杭頭部と中部 17.5 m（杭頭から 3~20.5 m）の非線形特性は、降伏点（ M_y 、 ϕ_y ）以降若干異なるもののほとんど同じである。一方、下部 24.5 m（杭頭から 20.5~45 m）は極端に断面変化しており、上部の杭の 1/8 程度の剛性となっている。表-1 に杭の仕様を示す。

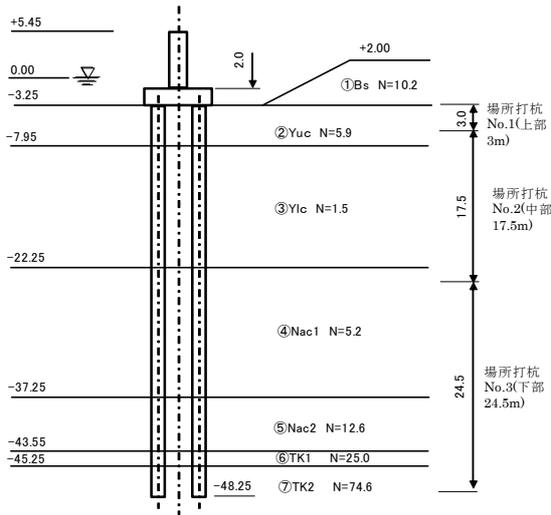


図-3 既設橋梁杭基礎のモデル化

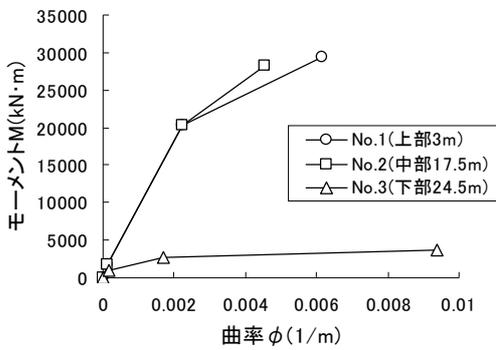


図-4 杭の非線形特性(M-φ曲線)

表-2 周辺地盤の物性値

	N値	γ_{sat} (kN/m ³)	γ' (kN/m ³)	Fc(%)	qu(kN/m ²)	Pc(kN/m ²)	Vs(m/s)
①Bs(地下水以上)	10.2	19.3		15.4			81
①Bs	10.2	19.3	9.3	15.4			81
②Yuc	5.9	18.9	8.9	26.6			
③Ylc	1.5	15.6	5.6	96.6	95.4	181.4	109
④Nac1	5.2	17.6	7.6	73.3	89.0	309.8	203
⑤Nac2	12.6	18.2	8.2	90.0	79.4	284.9	245
⑥TK1 (N=25)	25.0	19.0	9.0	28.3			299
⑦TK2	74.6	20.4	10.4	28.3			299

3.1.2 地盤物性のモデル化

表-2は周辺地盤の土質調査結果から物性値の整理を行いまとめたものである。これに基づいて解析に用いる液状化プログラム FLIP のパラメータを文献³⁾を参考にして設定した。

なお、平均値として求めた表-2の液状化対象層(②Yuc層)の細粒分含有率 $F_c=26.6\%$ については、細粒分含有率が比較的高い部分と低い部分があり必ずしも平均値 ($F_c=26.6\%$) が代表しているとは限らないこと、液状化層の物性は細粒分含有率の低い①Bs層と比較的似ていることなどを勘案し、①Bs層と平均して得られた値 ($F_c=18\%$) とした。図-5に液状化強度曲線を示す。

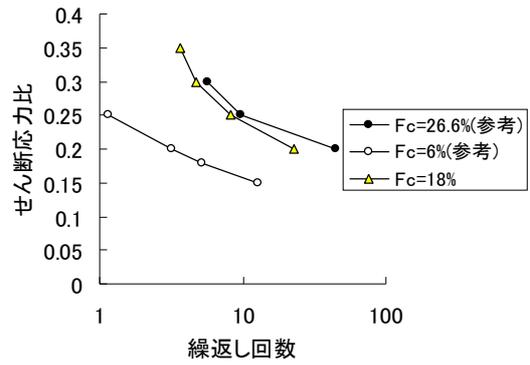


図-5 液状化強度曲線

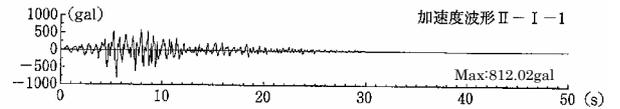


図-6 基盤入力地震波

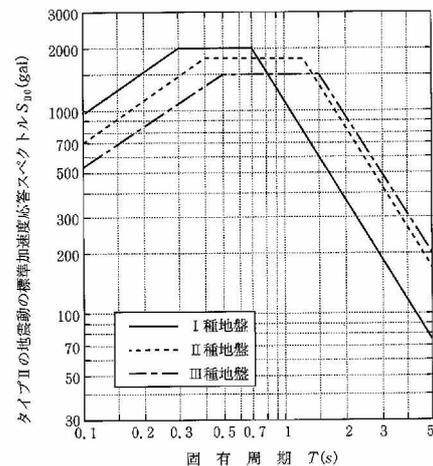


図-解 4.3.2 タイプIIの地震動の標準加速度応答スペクトル S_{II0}

図-7 基盤入力地震波の加速度応答スペクトル (I種地盤)

(3)入力地震動

入力地震動は道路橋示方書におけるレベル2地震のTYPE IIを想定したスペクトル S_{II0} に一致するように振幅調整された波形のうち、I種地盤(良好な洪積地盤及び岩盤)の神戸海洋気象台観測波を基盤の入力波として用いた。図-6に基盤入力地震波形を図-7にI種地盤の加速度応答スペクトル¹⁾を示す。

(4)解析メッシュ

図-8、9に解析メッシュ図を示す。なお解析後の残留変位等への影響を加味するため橋台背面高さと同等の盛土を付加している。杭と地盤の相互作用に

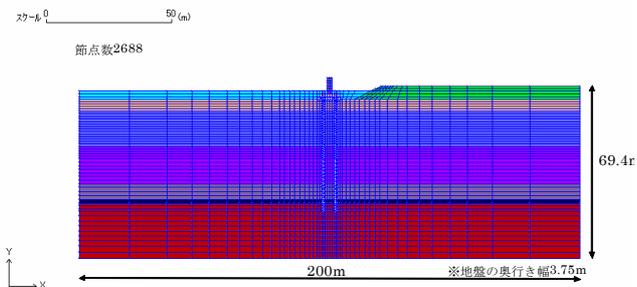


図-8 解析メッシュ図

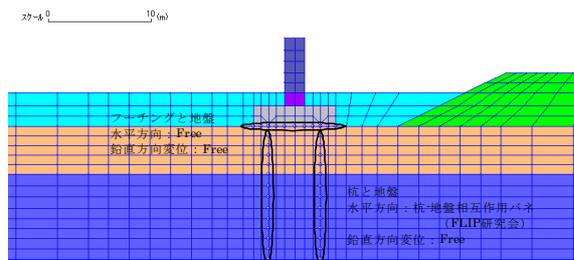


図-9 解析メッシュ図 (躯体付近拡大図)

については FLIP 研究会で推奨されている杭-地盤相互作用バネを配置した。

3.3 解析結果

3.3.1 対策前の挙動

液状化対策検討に当たっては、対策前の杭の挙動特性を把握することが重要である。以下に対策前の解析結果について示す。

図-10 に杭の部材応力の最大値を示す。この図から曲げモーメントは杭頭付近で高い値を示すもの

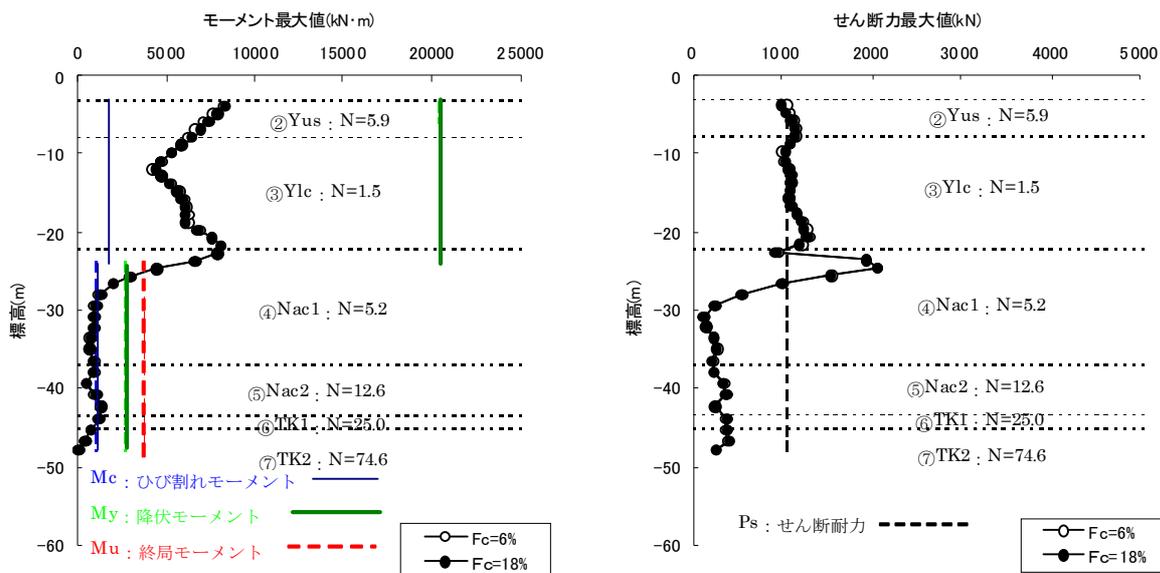


図-10 解析結果 (部材応力の最大値分布) ※左側の杭

降伏には至っていない。一方、せん断力については②③層で全般的に厳しい結果となっており、AP-22m 付近の層境界付近で大きいせん断ひずみが生じている。ここは杭剛性の段落とし箇所であるため曲げモーメントも厳しくなっている。なお、図-10には液状化層の細粒分含有率 $F_c=6\%$ に低減した結果についても示しているが、ほとんど差はなく細粒分含有率の影響は生じていない。

図-11 に自由地盤の最大加速度と最大せん断ひずみ分布を示す。最大せん断ひずみは④と③の層境界付近で急増している。この層境界ではN値が5.2 (④Nac1) から1.5 (③Ylc) へ急変していることが原因と考えられる。図-11では入力地震波を低減させた計算結果も示しており、全体的にひずみは低減される傾向にあるが、④から③の層境界でひずみが急増する傾向は変わらない。

図-12 に杭が最大せん断力を示す時刻 (7.21sec) の杭と地盤の変位分布を示す。この図から④層の上部で非常に大きな曲率を示し、③層から上で変位が急増している。また曲率の大きい④層上部で地盤と杭の変位差が大きく生じており、地盤と杭の拘束度および③④層の地盤挙動特性の違いの影響が示唆されるが、図-13に示した杭と地盤の拘束条件の影響比較から、相互バネなし (杭と地盤の変位を同じ)

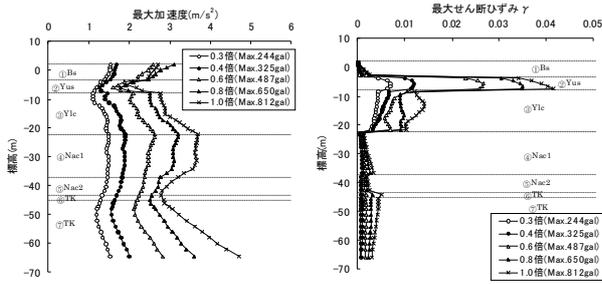


図-11 自由地盤解析における最大せん断ひずみと最大加速度の分布

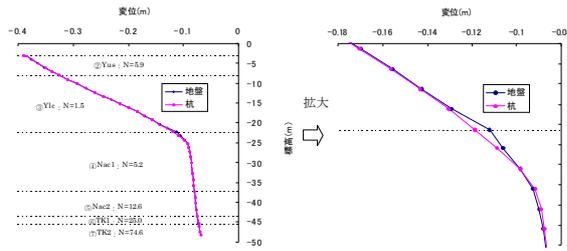


図-12 せん断力が最大値を示す時刻 (7.21sec) の杭と地盤の変位分布

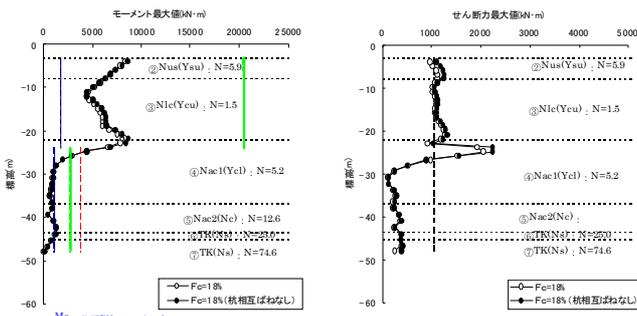


図-13 杭と地盤の拘束条件の影響比較

にしても杭の部材応力に影響がない結果となり、最大せん断応力の発生箇所は地盤の影響より杭体の段落による影響が大きいものと推察できる。

以上より、本検討における対策効果の着目点として、(1)杭頭部の曲げモーメント低減効果、(2)②Yus層と③Ylc層境界付近のせん断力の低減効果、(3)④Nac1層の段落とし付近での局所的なせん断力の低減効果の3点となる。

3.3.2 対策後の挙動

比較した液状化対策工法は①深層混合処理工法(CDM)②In-Cap工法③増し杭工法の3種類である。図14~16に各解析モデルを図-17に解析結果を示す。(1)深層混合処理工法(CDM)による対策検討

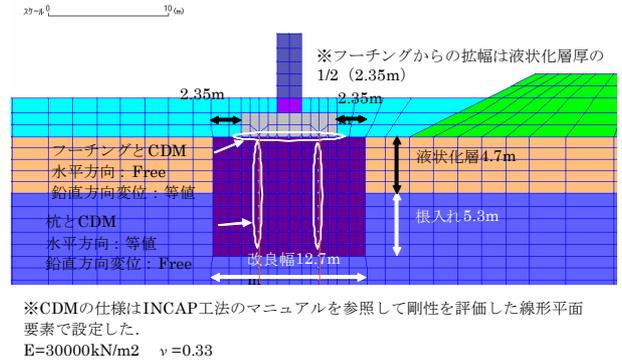


図-14 解析モデル (CDM)

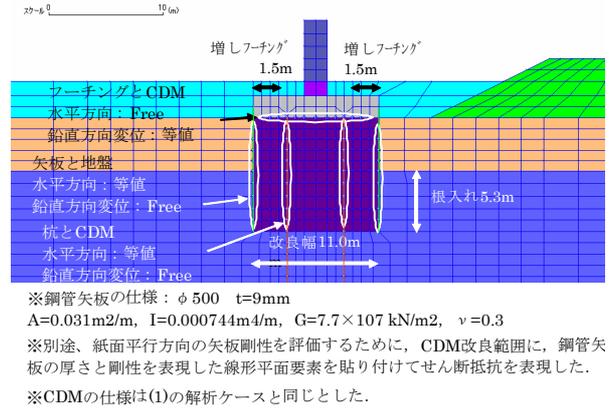


図-15 解析モデル (In-Cap)

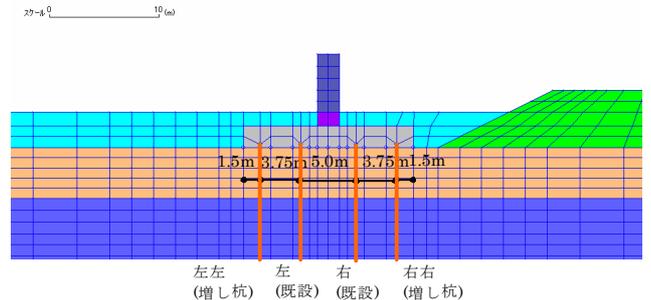


図-16 解析モデル (増し杭)

図-14に CDM の改良範囲と設定条件を示す。図-17の解析結果から、液状化層については発生モーメント、せん断力とも改良効果は見られるが、下層③のせん断力が低減されていないことから、この層の対策が必要と考えられる。

(2)In-Cap 工法による対策検討

解析モデル化にあたっては矢板部分を鋼管矢板とした(図-15)。図-17の解析結果から CDM と同様に液状化層の改良効果は見られるが、下層③のせん断力が低減されていないことから、この層の対策が必要と考えられる。また改良範囲下部で局所的な大きなせん断力が発生している。

(3)増し杭工法による対策検討

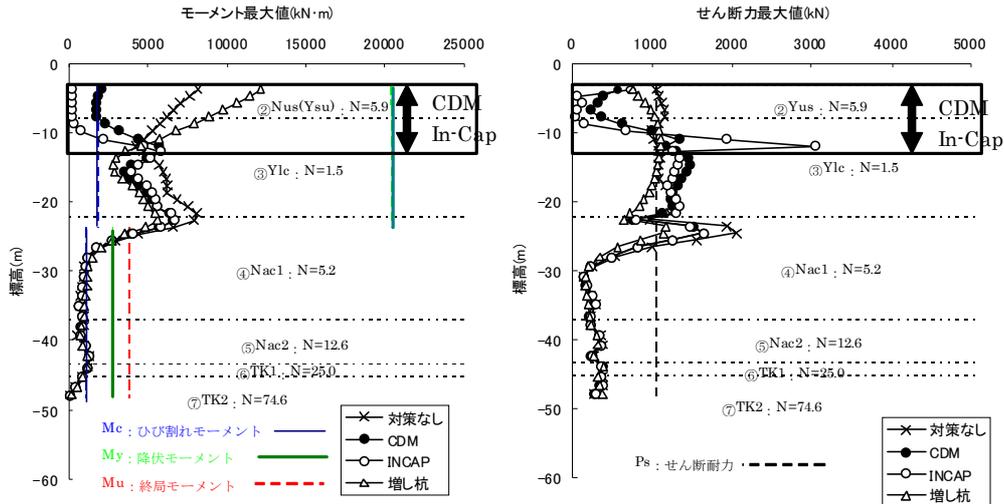


図-17 解析結果

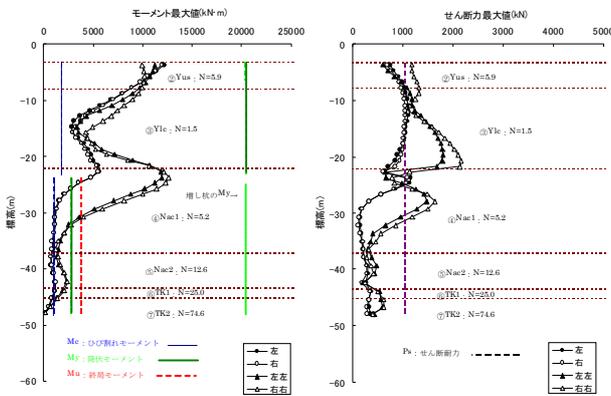


図-18 解析結果 (増し杭)

増し杭の非線形特性を図-3, 4のNo.1(上部3m)と同等で段落とし無しとし、既設杭の左右外側に設置した(図-16)。図-17の解析結果から液状化層の対策効果は認められ局部的な発生せん断力の低減効果も見られる。しかし図-18に示した増し杭の部分でせん断耐力を越える結果となった。

3.3.4. 液状化対策工の比較検討

対策効果をまとめると表-3となる。図-19は、CDMとIn-Cap工法を③の軟弱層下端の深さまで地盤改良した場合の解析結果である(In-Cap工法の鋼管矢板長は変更なし)。この図からどちらの工法も②③層のせん断力を概ね低減することが可能となっている。ただしIn-Cap工法のケースは一部局部的なせん断力の増加が見られており、これが問題になる場合には鋼矢板の打設範囲を広げることで対処できるものと考えられる。また、概ねCDMでも対策効果は得られるが、杭頭部に関しては矢板で確実に剛結して

表-3 対策効果のまとめ

	杭頭モーメント	せん断力	局部せん断力	備考
CDM	効果あり	効果あり	効果なし	改良範囲外ではout
INCAP	効果あり	効果あり	効果なし	改良範囲外ではout
増し杭	効果なし	効果なし	効果あり	増し杭のせん断out

いる In-Cap 工法の方が信頼性は高いものと考えられる。

図-20はCDM改良範囲内において杭の水平方向変位を自由にした場合の解析結果である。この図からCDMで杭周辺の地盤剛性を高くしても、杭の水平変位の拘束度合いが弱いと効果が得られない結果となっている。したがって、CDM、In-Cap工法とも地盤改良による杭の拘束度の評価が課題となる。

3.3.5. まとめ

以上、2次元有効応力解析プログラムFLIPを用いて液状化対策工法の比較検討を行った結果をまとめると次のとおりである。

(1)対策前の挙動解析結果から、対策効果の着目点として、杭頭部の曲げモーメント低減効果、②Yus層と③Ylc層付近のせん断力の低減効果、④Nac1層の段落とし付近での局部的なせん断力の低減効果の3点を挙げてCDM、In-Cap工法、増し杭の3種類の対策効果を検討した。

(2)この結果、②Yus層の液状化層に加えて③Ylc層の軟弱粘土層までCDMもしくはIn-Cap工法で改良することで、効果的な対策が得られることがわかつ

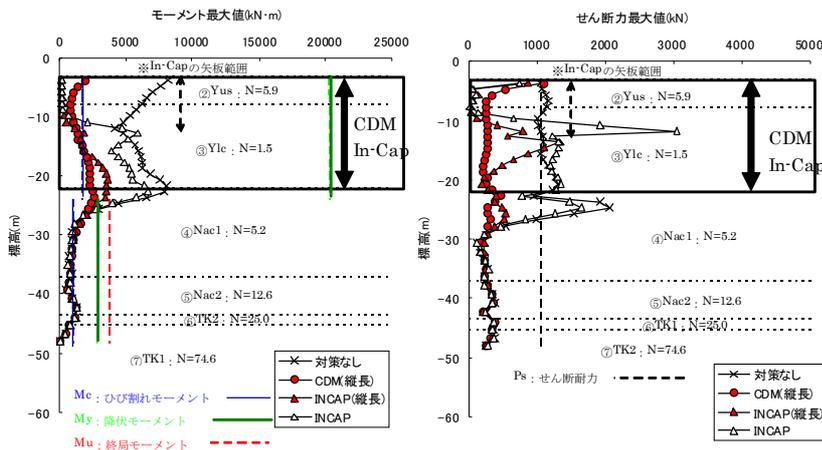


図-19 解析結果（改良深さの変更）

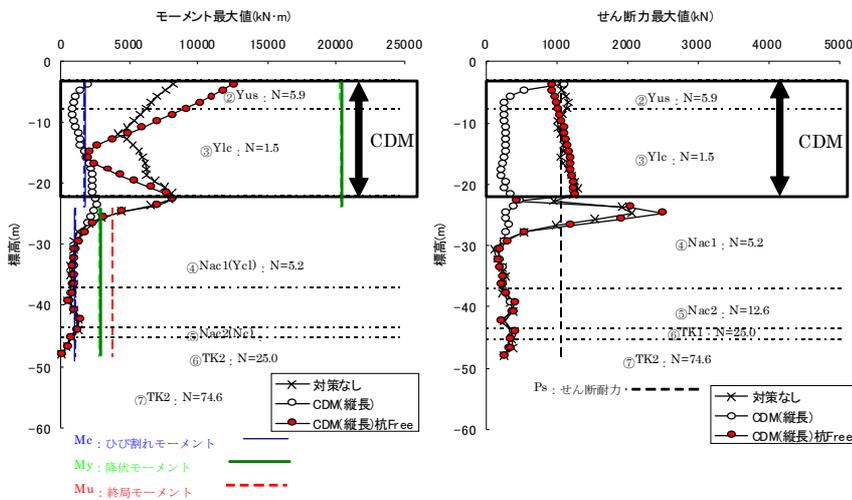


図-20 解析結果（CDMによる杭の拘束度の影響）

た。

(3)ただし CDM もしくは In-Cap 工法の対策効果は地盤改良による杭の拘束度合いに依存し、施工上杭を全面的に拘束するような地盤改良は困難な場合も考えられるため、杭の拘束効果については実験等に

よる確認が重要である。

(4)また増し杭に関しても、今回の仕様では外側の増し杭のせん断耐力が不足する結果となっていたが、杭の仕様を詳細に検討することで、対策効果が得られる可能性がある。

4. おわりに

地表の加速度を杭頭部分に水平力として与える静的照査法では、杭の発生応力は一般に上部ほど大きくなる。一方、動的解析の場合、工学基盤からの入力地震動により、深い部分でも水平力がはたらき、本検討のように軟弱層が厚くかつ地盤特性が極端に異なる層境付近に段落などが存在すれば、その部分が弱点となってしまうケースもある。これは動的解析による耐震照査をおこなう上での留意点のひとつであると考えられる。

本検討では、下部の段落とし部分の補強対策まで含めた検討をおこなったが、深い位置の段落とし部分の補強の必要性については、今後引き続き、過去の被災事例等を勘案し、慎重に検討する必要があるものとする。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会(2002):「道路橋示方書・同解説 IV耐震設計編」,平成14年3月
- 2) 井合進・松永康男・亀岡知弘(1990):ひずみ空間における塑性論に基づくサイクリックモビリティのモデル,港湾技術研究所報告,第29巻,第4号,pp27-56
- 3) 森田年一・井合進・Hanlong Liu・一井康二・佐藤幸博(1997):液状化解析による構造物被害予測プログラムFLIPにおいて必要な各種パラメータの簡易設定法,港研資料No.869,

