

三次元解析による種々の液状化対策効果の検討

福 武 毅 芳
(和泉研究室)
大 槻 明
(技術研究所)

§ 1. はじめに

1995年1月17日に発生したM=7.2の兵庫県南部地震は、阪神臨海部の埋立地などで大規模な液状化が発生し、構造物にも多くの被害をもたらした。特に、ポートアイランドでは広範囲にわたって液状化が見られた。このとき液状化した砂層は「まさ土」といわれる花崗岩起源の風化土である。激しく液状化した場所では杭基礎の被害が報告^{1), 2)}されている。ただし、液状化対策を施してあった場所では被害はあまり無かった^{1), 2)}ようである。

本報告では、表層にまさ土を有する地盤に建つ建物を想定し、その杭基礎や周辺地盤の地震時挙動を解析する。そして種々の液状化対策についてその防止効果の検討を行う。

液状化対策として、1) サンドコンパクションバイル(SCP)などにより締固めて過剰間隙水圧を抑制する工法、2) 地盤や基礎の地震時せん断変形を抑制する工法、3) グラベルドレーンなどにより過剰間隙水圧を速やかに消散させる工法、などが、ここでは、1)と2)の工法に着目した。2)の工法では、深層混合処理による改良体を、基礎の周りに施工した場合と、基礎中心部に施工した場合を想定した。それぞれの対策により、過剰間隙水圧の抑制効果や杭の断面力がどの程度低減できるか検討した。以下、基礎周辺にある壁状の改良体をDM-ring、中心部にあるブロック状の改良体をDM-blockと呼称する。

解析に使用したプログラムは、当社が開発した三次元の液状化解析コード：ハイパー(HiPER)^{3), 4)}である。過剰間隙水圧を考慮した三次元非線形解析(液状化解析)が可能である。

§ 2. 解析手法の概要

非線形解析では解を得るために直接積分法が使われるが、その方法として大きく分けて2つある。1つは初期剛性法や荷重伝達法などに代表される陰解法で、他の1つは中央差分に代表される陽解法である。大規模な自由度の運動方程式を高速に解くうえから、HiPERでは時間軸の直接積分法として陽解法を用いた。また、空間領域については有限要素法により定式化している。

要素の剛性評価や等価節点力を求める場合、通常三次元のソリッド要素では8点のガウス積分点を用いて積分を行うが、計算時間の短縮のため積分点を1点にした低減積分が有効である。この低減積分は、大自由度の衝撃問題を効率よく解く手法として用いられている。しかし、低減積分は積分を厳密に評価しないため、力学的エネルギー変化を伴わない変形モードいわゆるアワーグラスモードが発生しやすく、数値的不安定性の原因となることがある。このモードを抑制するためHiPERではHallquistの方法⁵⁾を用いている。

HiPERでは、過剰間隙水圧や地盤剛性の低下などの液状化現象が解析可能である。ただし、三次元解析では複雑かつ大規模モデルを対象とする上から、基礎式を簡潔なものを考え、土骨格のみに着目した運動方程式を解いている。過剰間隙水圧は非排水条件下で評価している。過剰間隙水圧の消散が少ない場合には、この条件が近似的に適用できる。

§ 3. 土の構成式の概要

土の構成式は、解析結果を左右する重要な式である。ただし、厳密な構成式は、実現象は正確に表現できるものの、定式化が複雑でパラメータも増え、

三次元解析のような大規模な計算にはCPUも莫大にかかり、実用的でなくなる。そこで、三次元液状化解析に実用的に簡便な構成式として、液状化解析を行う上での土の特性を保ちつつ、できるだけ簡略化を行った。具体的には、応力・ひずみ関係として、修正Ramberg-Osgoodモデル(修正R-Oモデル)を三次元に拡張して使用している^{6), 7)}。ひずみ・ダイレイタンス関係は、おわんモデル(Bowl Model)を使用している^{7), 8)}。過剰間隙水圧の影響は、応力・ひずみ関係に反映され、有効応力の減少による軟化現象が表現可能となる。密な砂に特有のサイクリックモビリティも表現可能である。(サイクリックモビリティとは、有効応力が増減を繰返し、水圧上昇後もせん断剛性が極端に小さくならない現象である。密な砂によく見られる一種のねばり強さを表す。)構成式のパラメータは、土質柱状図と一般的な室内要素試験(動的変形試験や液状化試験など)から比較的容易に設定できる。

なお、本報告では過剰間隙水圧比は $(\sigma'_{m0} - \sigma'_m) / \sigma'_{m0}$ と定義し、 σ'_{m0} は初期の平均有効応力で σ'_m は時々刻々の平均有効応力である。

§ 4. 解析モデルと解析条件

解析の対象としたのは、図-1に示すような円筒形構造物の基礎である。対称性を考慮してFEMにより1/2モデルとした。モデル全体の有限要素分割と、円筒形構造物の水平面内の要素分割ならびに杭配置を図-2に示す。杭中心間隔は2~3m程度である。杭はBelytschkoの線形梁要素でモデル化した。基礎底面と地盤は密着とせず、二重節点にして滑動を許した。(基礎底面と地盤が節点共有の場合(密着させた場合)の挙動や、地盤改良を施工しない杭のみの群杭挙動については既に検討している^{9), 10)}。)

地盤条件としては、表層20mをN値が8程度の沖積砂層(まさ土)とし、その下にN値50以上の洪積砂層を想定した。地下水位はGL±0mに設定した。初期応力は静止土圧係数 $K_0=0.5$ として成層地盤の値を使用した。

地震動は、兵庫県南部地震において神戸大学で観測された速度波形(NS成分)を微分して加速度に変換した波を用いた。この速度波形のデータは、関西

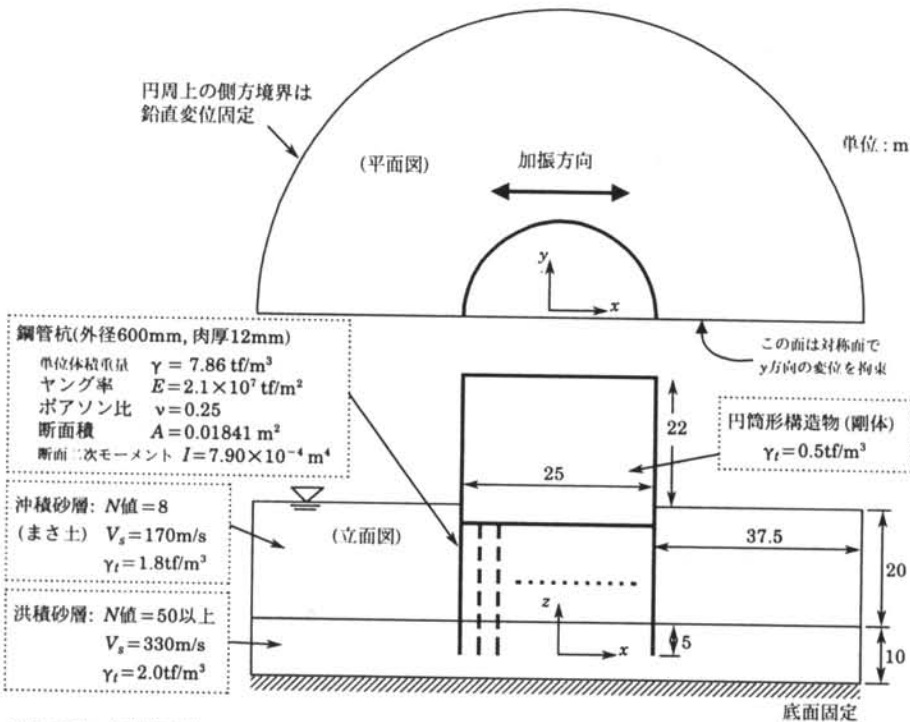


図-1 解析モデルと地盤定数

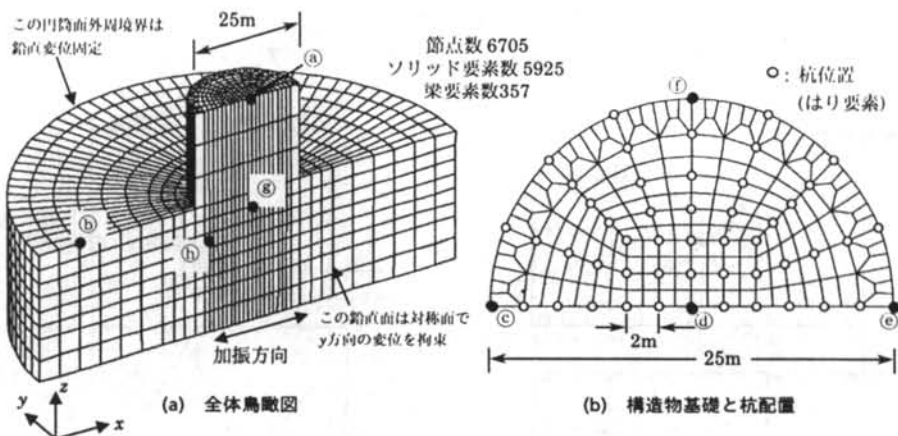


図-2 有限要素分割 ($\frac{1}{2}$ モデル)

	① 未改良	② SCP	③ DM-ring	④ DM-block
改良パターンの平面図 (x-y平面)				
改良面積 (m ²)	0	1320	276	64
基礎面積に対する改良率	0%	269%	56%	13%

表-1 改良パターンと解析ケース (■は改良域)

地震観測研究協議会の提供によるものであり、微分は当社技研にて実施¹⁾した。加速度振幅は100Galとし、10秒間入力した(図-15参照)。入力方向はx方向で、一方向加振とした。

解析ケースは、表-1に示すように、

- ①：未改良：杭のみの場合
- ②：SCP：杭とSCP締固めを併用した場合
- ③：DM-ring：杭と深層混合による壁状改良体を併用した場合
- ④：DM-block：杭と深層混合によるblock状改良体を併用した場合

の4ケースである。SCPとDM-ringおよびDM-blockの改良深さは20mであり洪積層まで達している。ケース③では、壁で囲まれた中の地盤が、せん断変形が抑制され、液状化防止効果と杭の断面力低減効果が期待できる。ケース④では、基礎の中央に構造物を支持する杭のうちの数本を包含する改良体を想定し、基礎底面と改良体は密着させた。地震時あるいは液状化時には、水平せん断力を改良体と杭

地盤改良体	剛性	物性
沖積砂層 (まさ土)	N値=8 Vs=170m/s G ₀ =5300t/m ² ν=0.33	γ _t =1.8t/m ³ FC=10% X _t =0.18
沖積砂層 (まさ土) [締固め改良]	N値=18 Vs=250m/s G ₀ =11500t/m ² ν=0.33	γ _t =1.8t/m ³ FC=10% X _t =0.24
洪積砂層	N値=50 Vs=330m/s G ₀ =22000t/m ² ν=0.33	γ _t =2.0t/m ³ FC=10% X _t =0.25
深層混合改良体	q _u =200t/m ² E=1.0×10 ⁸ t/m ² ν=0.2	γ _t =2.0t/m ³

注) Vs:せん断波速度、G₀:初期せん断剛性、E:ヤング率、ν:ポアソン比、γ_t:単位体積重量、FC:細粒含有率、X_t:液状化強度の下限値、q_u:一軸圧縮強度

表-2 地盤および改良体の物性

とで分担し、杭断面力を低減することが期待できる。転倒モーメントに対しては杭軸力で抵抗する。表-1には基礎面積に対する改良率も示してあるが、DM-blockが最も小さい。地盤および改良体の物性を表-2に示す。

解析に用いる土の構成式のパラメータは、地盤調

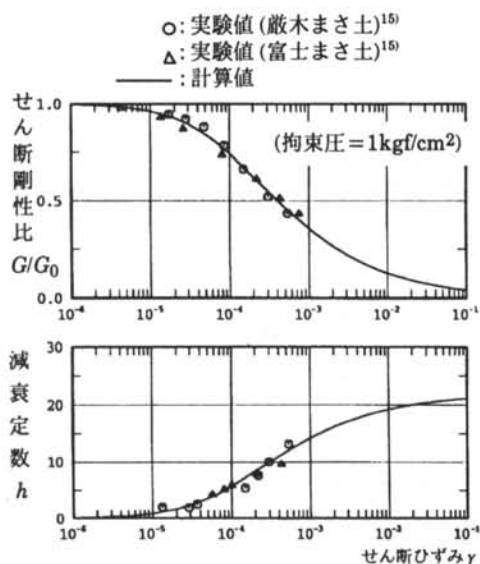


図-3 まさ土の非線形特性 ($G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$)

査結果^{12), 13)}や既往の要素試験結果^{14), 15), 16)}より設定した。パラメータ設定に必要な要素試験結果としては、せん断剛性比 G/G_0 や減衰定数 h のひずみ依存性 ($G/G_0 \sim \gamma$ 関係, $h \sim \gamma$ 関係), 非排水繰返し

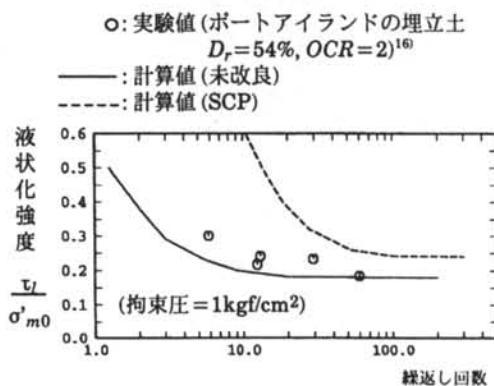


図-4 まさ土の液状化強度-繰返し回数

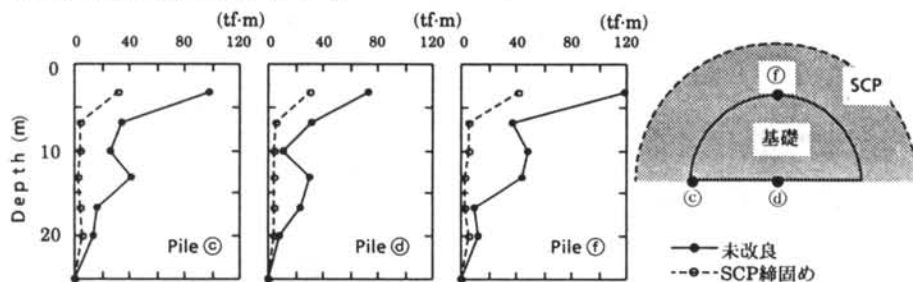


図-5 杭の最大曲げモーメント (未改良とSCP締固め)

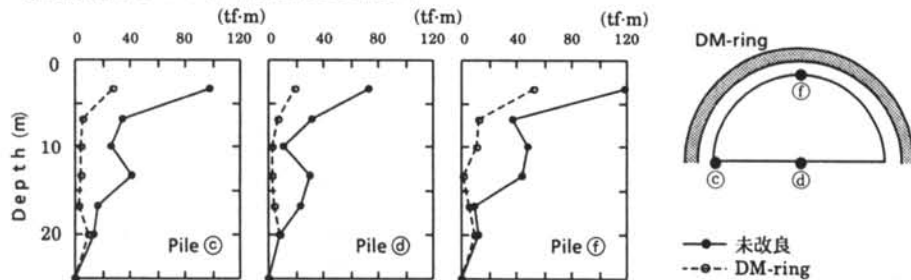


図-6 杭の最大曲げモーメント (未改良とDM-ring)

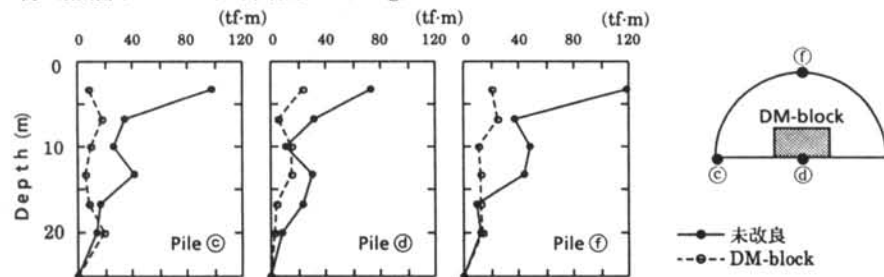


図-7 杭の最大曲げモーメント (未改良とDM-block)

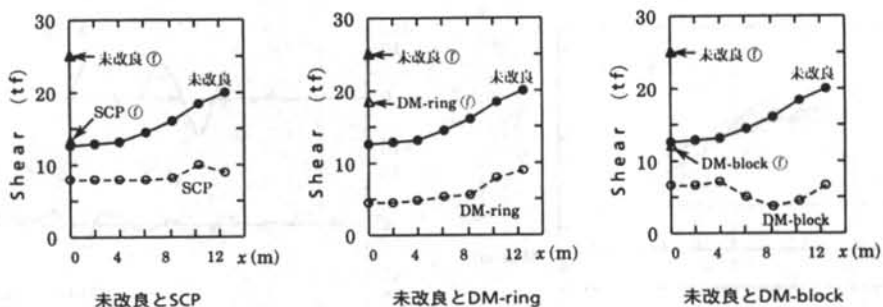


図-8 対称線上の杭と杭①の最大せん断力

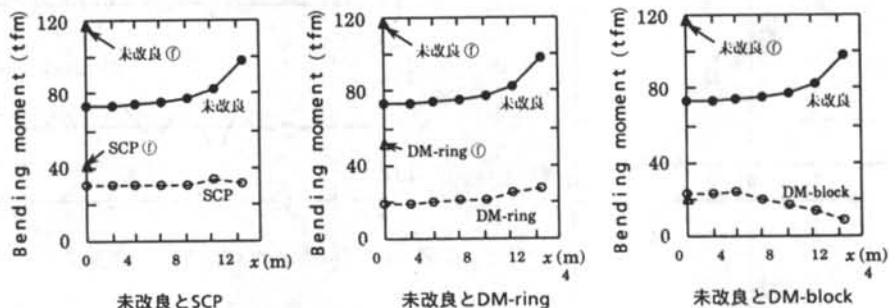


図-9 対称線上の杭と杭①の最大曲げモーメント

強度(液状化強度)と繰返し回数との関係である。 $G/G_0 \sim \gamma$ 関係と $h \sim \gamma$ 関係から修正R-Oモデルのパラメータが設定され、液状化強度(抵抗値)からおわんモデルのパラメータが設定される。図-3, 4には、例としてまさ土の試験結果と計算結果の比較を示す。図-3の $G/G_0 \sim \gamma$ 関係と $h \sim \gamma$ 関係の試験結果を見る限りは標準的な砂の結果¹⁷⁾と類似している。また、まさ土は粒径の大きな粒子も含み粒度配合が良く標準的な砂よりも液状化しにくいと思われていたが、図-4の試験結果を見る限りは標準的な砂の液状化強度¹⁸⁾と差異はないといえる。

§5. 解析結果と考察

図-5~7には3本の杭③, ④, ①の最大曲げモーメントの比較を示す。未改良の場合は、基礎の縁にある杭③, ①の杭頭で大きな値を示し、基礎中心にある杭④の杭頭では小さい値となっている。図には示していないが、せん断力に関しても同様に、縁にある杭の杭頭で大きな値となっている。SCP締固めの場合には、基礎の縁にある杭③, ①の杭頭で約65%の曲げモーメント低減率が見られ、基礎中心にある杭④の杭頭では約60%の低減率が見られる。

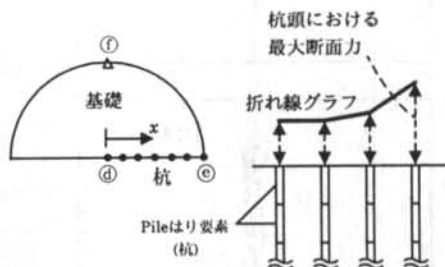


図-10 対称線上の杭と杭①および、図-8, 9のグラフの表現方法

DM-ringの場合には、杭③, ④の杭頭で73%、杭①の杭頭で56%の低減率が見られる。DM-blockの場合には、DM-block改良体の中にある杭④では68%の低減率が見られる。改良体から外れた基礎の縁にある杭③, ④の杭頭で80~90%の低減率が見られる。DM-block改良体から外れた場所に位置する杭で低減効果があった理由は、基礎が剛であるため、全ての杭の杭頭変位が一樣に抑えられたためである。各杭における最大のせん断力および曲げモーメントを図-8, 9に示す。これらの図は、図-10に示すように、各杭における最大断面力とその杭の位置(平面的な配置)から縦軸方向にプロットし、それを折れ線で結んだものである。着目した杭は、杭④から杭③に沿った各杭と奥の杭①である。未改良の場

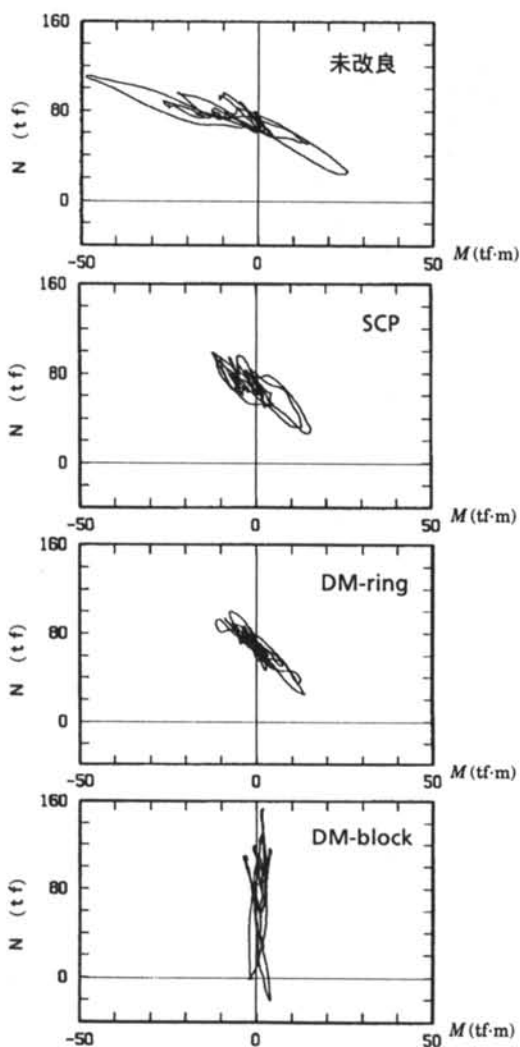


図-11 杭③の杭頭における曲げモーメント M と軸力 N の相関図

合、各杭の断面力の分布形状は、荷重分担の違いにより中心杭④で最小、杭①で最大値となるおわん型となっている。実際の地震では二方向同時加振(x と y 方向の同時加振)となるので、杭③~①~④の基礎線上の杭の断面力はほぼ等しくなると思われる。SCPの場合は杭-で若干値が大きくなっているが、ほぼフラットな分布となっている。DM-ringの場合は、分布形状はやや平らなおわん型となり、杭①でやや大きな値を示している。DM-blockの場合は、逆に基礎線上の杭の断面力が中心部の値より小さくなっている。

図-11に、杭③の杭頭における曲げモーメント M

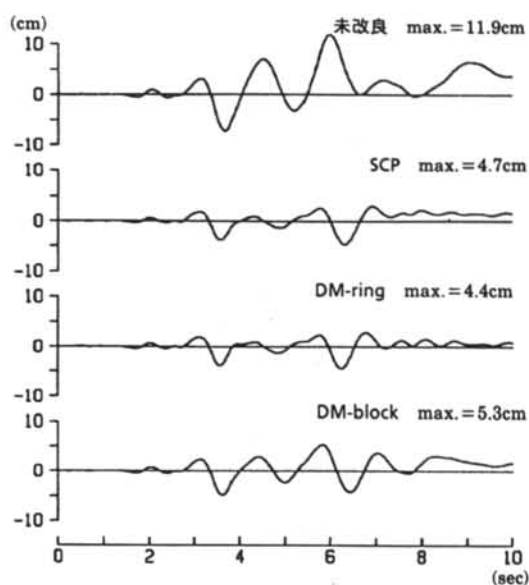
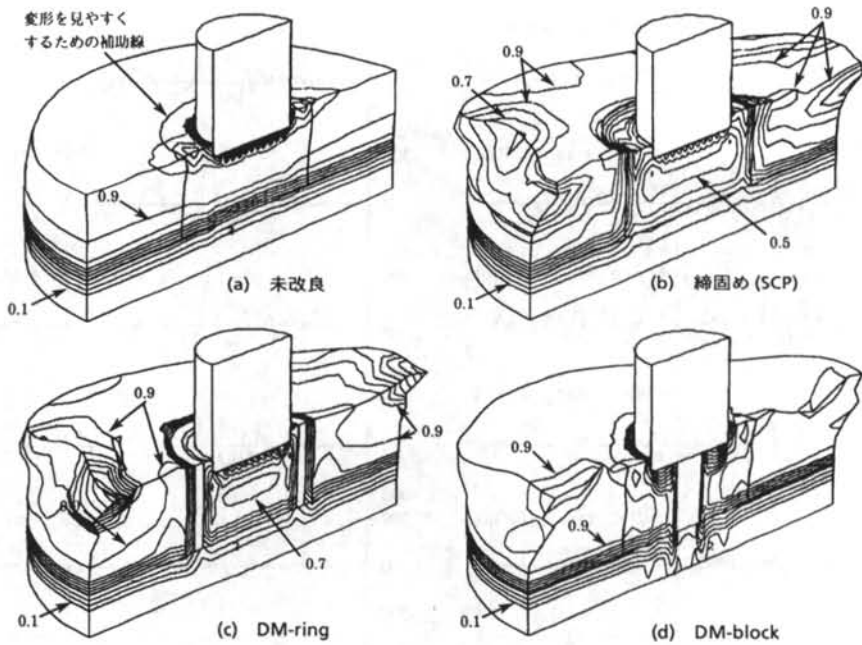


図-12 構造物基礎(節点⑤)の水平変位

と軸力 N の関係(M - N 相関図)を示す。軸力には、初期の自重を含めている。未改良の場合と比較して、SCPやDM-ringがある場合は、曲げモーメントの値は小さくなっているが、軸力の値はさほど変わらない。DM-blockがある場合には、曲げモーメントはかなり小さくなっているが、軸力が増加している。これは剛性の高いDM-block改良体が基礎中心部にあるため、ロッキングが励起されたためである。

図-12には、基礎部⑤における水平変位時刻歴を示す。各液状化対策工を施した場合には、変形が半以下に抑制されていることが分かる。

図-13には、加振終了時(時刻=10秒)における過剰間隙水圧比のコンターを变形と併せて示す。過剰間隙水圧比とは、地震により発生した p_w を初期の有効拘束圧 σ'_{m0} で割った値である。 $p_w/\sigma'_{m0}=1.0$ なら、平均有効応力がゼロとなり完全に液状化したことを意味する。未改良の場合、周辺地盤と杭間の地盤では水圧比の値はほとんど変わらない。既往の研究⁹⁾では、杭の地盤変形拘束効果によって、基礎下の杭間地盤では周辺地盤よりも水圧が10%ほど小さくなった結果もある。今回の解析に用いた入力地震は、パワーが大きかったため、杭間地盤も液状化したと思われる。SCP締固めの場合には、改良体の中央で水圧比は最大でも50%程度に抑えられている。DM-ringの場合には、基礎直下で70%の値が見られる。液状化対策工がある場合は、未改良の場合に比べて



(変形は50倍に拡大、コンター(P_w/σ'_0)は0.1ピッチ、 $P_w/\sigma'_0 > 0.9$ はほぼ液状化)

図-13 変形と過剰間隙水圧比 (P_w/σ'_0) のコンター (時刻=10秒)

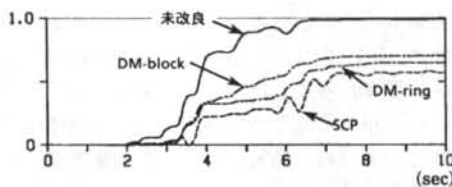


図-14 要素⑤における過剰間隙水圧比の比較 (杭間、GL-8.3m)

遠方地盤の変形が大きくなっている。これは、剛性の高い改良体が、軟化している周辺地盤の変形を励起したためである。また、改良体がある場合に側方境界付近で水圧比の値が一部小さくなっているのは、サイクリックモビリティにより過剰間隙水圧が一時的に減少したためである。

図-14には、基礎下部の杭間地盤⑤における過剰間隙水圧比の時刻歴を示す。未改良の場合には完全な液状化(水圧比の値=1.0)に至っているが、液状化対策を施した場合は水圧比は抑えられている。SCPの場合が最も値が小さく、サイクリックモビリティによる振動成分も見られる。

図-15には、構造物頂部と側方地盤地表面におけ

る水平加速度時刻歴を示す。構造物頂部では、DM-ringとDM-blockの場合がやや大きな値を示している。側方地盤は約5秒で液状化に至っているが、未改良の場合の波形をみると5秒以降の応答が小さくなっている。一方、SCPやDM-ring・DM-blockの改良体がある場合には未改良の場合に比べ、5秒以降の応答はやや大きくなっている。これは、改良体の存在が側方地盤を与えていることを意味する。

§6. おわりに

本報告では、表層にまさ土を有する地盤に建つ円筒形建物を想定し、その杭基礎や周辺地盤の地震時挙動を三次元液状化解析により検討した。そしてSCPによる締固め改良した場合、深層混合処理で基礎の周りを改良した場合(DM-ring)、深層混合処理で基礎中心部を改良した場合(DM-block)についてその対策効果の検討を行った。得られた結論を以下に示す。

(1)未改良の場合(杭のみの場合)は、基礎の縁に位置する杭の杭頭で最も大きなせん断力や曲げモーメ

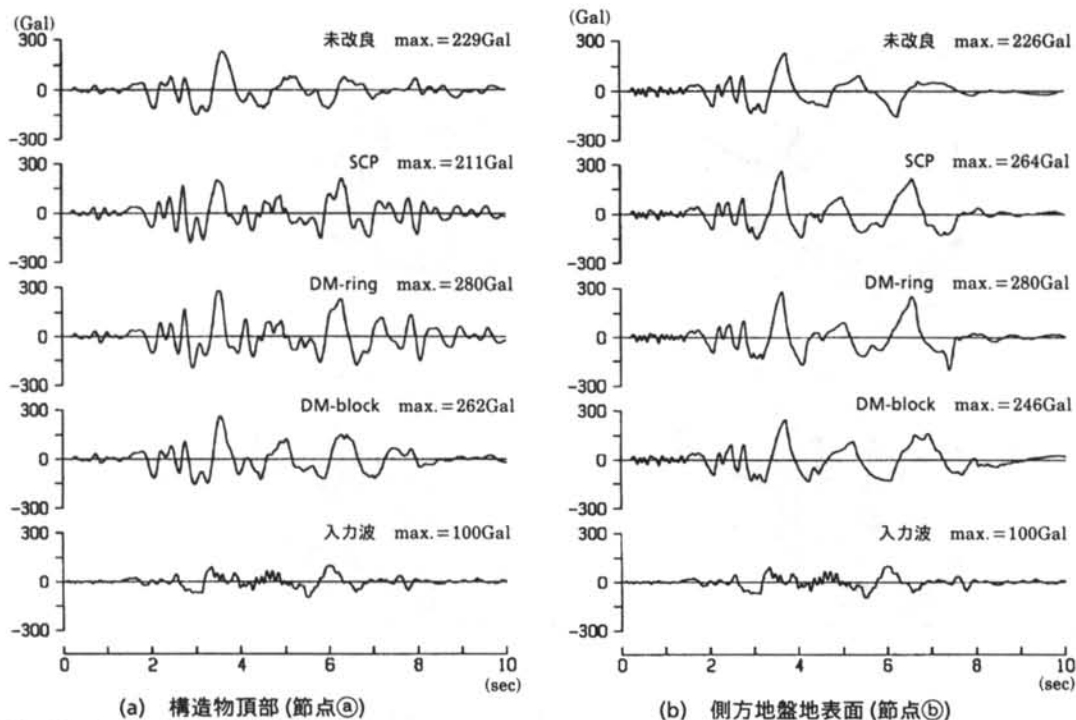


図-15 水平加速度と入力波

ントが生じ、基礎中心部の杭では比較的小きな値を示した。

(2)SCPやDM-ring, DM-blockなどの液状化対策を施した場合、杭のせん断力や曲げモーメントはかなり低減できる。

(3)基礎直下の地盤の過剰間隙水圧の観点から見れば、未改良の場合は水圧比が1.0に達している(完全に液状化している)のに対し、SCPでは0.5程度、DM-ringでは0.6程度であった。

(4)改良領域の観点から見れば、SCPが最も大きく、DM-blockが最も少なくてすむ。

(5)DM-ring液状化対策の長所は、固い壁で囲むことにより中の地盤のせん断変形を抑制できる。その結果、中の杭の断面力が軽減できる。既往の研究¹⁹⁾で高層ビルの基礎周りをソイルセメント壁(SMW)で囲んだ場合の解析も行っており、杭の断面力はかなり低減される結果を得ている。このことから、基礎周りを壁で囲ってせん断変形を抑制することは、杭の断面力低減に役立つものと思われる。

(6)DM-ring液状化対策の検討すべき点は、さらに径の大きな構造物における杭断面力低減効果、過

剰間隙水圧の抑制効果、などが挙げられる。また、基礎の「周り」を改良する場合、改良面積はさほど小さく押さえることはできず、全体としてコスト高につながる可能性がある。また、改良体は薄い壁状となるため、品質のばらつきが強度低下につながる危険性もある。

(7)DM-blockの場合、基礎底面に対する改良率は13%である。改良率は13%と小さくても、杭頭でかなりの断面力低減効果が見られた。これは改良体のせん断抵抗により基礎の変形が抑制され、基礎が剛であるため全ての杭の杭頭変位が抑えられたためである。超高層の基礎についてもDM-blockの有無に関して同様の検討²⁰⁾を行ったところ、やはり曲げモーメント低減効果が確認できた。

(8)DM-block液状化対策の特徴としては、a)改良体は基礎の一部でよくローコストとなること、b)改良体がマッシュアップであるため施工しやすく品質のばらつきを押さえることができること、などが挙げられる。

今後の課題としては、対策効果をさらに詳しく検討するため、動的な遠心載荷装置を用いて実験的に検討することが望まれる。すでに一部は実験中²¹⁾

である。

最後に、DM-block工法のアイデアを提案され

有益な助言をいただいた吉見吉昭常任顧問、ならび
に関係者の方々に感謝致します。

<参考文献>

- 1) 清水建設株式会社技術研究所：“1995年兵庫県南部地震調査報告書”(1995年2月)
- 2) 土質工学会阪神大震災特別委員会編：“阪神大震災報告会-地盤震害とその教訓-”，土質工学会(1995年5月)
- 3) 大槻明，福武毅芳，藤川智，佐藤正義：“液状化時群杭挙動の三次元有効応力解析”土木学会論文集，No.495/I-28(1994年)pp.101~110
- 4) 大槻 明，福武毅芳：“三次元液状化シミュレーション”電力土木No.253，(1994年9月) pp.110~116
- 5) Hallquist J. O.：“Theoretical Manual for Dyna3D”Lawrence Livermore National Laboratory (1983年)
- 6) 龍岡文夫，福島伸二：“砂のランダム繰返入力に対する応力~ひずみ関係のモデル化について(1)”生産研究第30巻9号，(1978年) pp.26~29
- 7) 福武毅芳，大槻 明：“三次元液状化解析による部分改良地盤の効果の予測，地盤の液状化対策に関するシンポジウム”土質工学会(1991年1月) pp.205~210
- 8) 福武毅芳，松岡 元：“任意方向単純せん断におけるダイレイタンスの統一的解釈”土木学会論文集，No.412/III-12(1989年) pp.240~248
- 9) 福武毅芳，大槻 明，鈴木 健：“円筒形構造物の杭基礎の液状化挙動(その1，その2)”第49回土木学会年次学術講演会I(1994年) pp.1636~1639
- 10) 福武毅芳，大槻 明：“基礎中心部のみを地盤改良した場合の杭断面力低減効果の解析的検討”第23回地震工学研究発表会(1995年7月) pp.381~384
- 11) 猿田正明，片岡俊一，横田治彦，半澤徹也：“1995年兵庫県南部地震の強震動記録の検討”清水建設研究報告，第62号(1995年10月)
- 12) 渡辺嘉道：“神戸ポートアイランドの開発と基礎工”，基礎工Vol.9，No.1(1981年) pp.83~91
- 13) 小林和好，小堀隆治：“埋立地に建つ高層団地における地盤改良と各種杭試験”基礎工Vol.9，No.1(1981年) pp.100~110
- 14) 土質工学会編，“風化花こう岩とまさ土の工学的性質とその応用”，土質基礎工学ライブラリー16
- 15) 赤司六哉，山本繁登，溝上 健：“乱さないローム，シラス，まさ土の動的変形特性”第21回土質工学研究発表会(1986年6月) pp.675~678
- 16) 永瀬英生，穴道 玲，安田 進，辻野修一，吉田 望：“平成7年兵庫県南部地震におけるポートアイランドでの液状化層推定に関する研究”第50回土木学会年次学術講演会III(1995年9月) pp.530~531
- 17) 土木学会編：“動的解析と耐震設計[第1巻]地震動・動的物性”技報堂出版
- 18) 土質工学会，“土の非排水繰り返し試験に関するシンポジウム”(1988年12月)
- 19) 藤川 智，福武毅芳，大槻 明，吉見 吉昭，中村 康一：“連続地中壁による杭-地盤系の液状化防止に関する三次元解析”第9回日本地震工学シンポジウム，Vol.1(1994年12月) pp.991~996
- 20) 福武毅芳，大槻 明，玉置 克之：“基礎中心部を部分的に地盤改良した杭基礎の曲げモーメント低減効果の解析的検討”日本建築学会大会学術講演概要集，B-1構造-I(1995年8月) pp.1077~1078
- 21) 佐藤正義，大槻 明：“遠心力場における構造物-群杭基礎-地盤系の液状化実験(その2)”第30回土質工学研究発表会(1995年7月) pp.1099~1100

