

軟弱地盤・液状化地盤における免震構造の成立性について

福武 毅芳 菊地 優 竹間 信博 玉置 克之
(技術研究所) (設計本部) (設計本部) (技術研究所)

Effectiveness of an Isolation System on Soft/Liquefiable Ground

by Kiyoshi Fukutake, Masaru Kikuchi, Nobuhiro Chikuma and katsuyuki Tamaoki

Abstract

We compare the seismic responses of two types of soil-pile-structure systems, of which one is base-isolated and the other is not base-isolated. Analytical results show that for a superstructure with a period of approximately 3.5 seconds the seismic response is reduced and, in addition, the stress of piles are also reduced on liquefiable ground. The results indicate that the isolation system is safe for both the superstructure and the pile foundation. The three dimensional program based on effective stress method is effective in evaluating the materialization of the isolation system on liquefiable ground.

概要

軟弱地盤における杭基礎構造物の基礎を免震化した場合としない場合について、その地震時応答を比較・検討した。特に、上部構造物に与える影響ばかりでなく、軟弱地盤との相互作用を考慮して杭基礎に与える影響にも着目した。

解析結果によれば、液状化する地盤においても周期3.5秒程度の免震建物が建物の応答を低減する効果を維持しつつ、杭の応力も小さくなった。よって、軟弱地盤における杭基礎構造物の基礎を免震化すれば、建物と杭の双方にとって安全性が増す結果となった。

§1. はじめに

1994年米国ノースリッジ地震および1995年兵庫県南部地震では実在免震建物において免震効果が実証され、これを契機として免震構造が急速に普及した。免震建物の多くは硬質地盤上に建設されており、軟弱地盤や液状化の可能性のある地盤には免震構造は不向きというのが一般的な認識である。しかし、免震構造の急速な普及に伴い、軟弱地盤や液状化の可能性のある地盤にも数棟の免震建物が既に建設されている¹⁾。このような現状を背景として、本研究では軟弱地盤・液状化地盤における免震建物の地震時挙動に着目し、免震構造の適用限界を明確にすることを目的として掲げた。

軟弱地盤～構造物系において、地盤が強非線形化あるいは液状化すると構造物に以下のような影響を及ぼす。

- ・地盤～基礎系の周期が長周期化する。これは長周期構造物にとって不利な条件となる。
- ・地盤の免震効果(強非線形性)により基礎への入力加速度が小さくなる。これは建物への入力も小さくなるので有利である。

- ・大きな地盤変形が生じる。これは杭にとっては不利である。しかし、地盤を改良することで対処可能である。

免震構造が軟弱地盤や液状化地盤に不向きなのは確かであり、解決しなければならぬ様々な問題がある。例えば、免震装置の共振の回避、大変形にも耐えうる免震装置の制御法、僅かな基礎の傾斜の抑制、などである。

上記の問題点を克服するため、以下のような検討が必要である。

①共振現象の回避

軟弱地盤の固有周期は長周期となり、液状化する場合はなおさらである。このような地盤上に長周期の免震基礎を造ることは、共振状態に陥る可能性があり、従来の免震装置(最長周期は約4秒)の限界に達してしまう可能性がある。例えば免震装置の限界の変位振幅に達し危険な状態となることが考えられる。

その場合、周期帯域を外すためかなりの長周期特性を有した特別な免震装置が必要となる。そこですべり支承と組み合わせた長々周期の免震装置が開発^{2),3)}されつつある。しかし、非常に大きな応答変位が発生するなどの解決すべき問題もある。

②基礎の残留変形や不同沈下の抑制と免震装置の正常機能の維持

共振を防ぐには、免震装置を長周期化する以外に、地盤や杭基礎の固有周期を短くする方法がある。それには地盤改良や杭基礎の剛体化によって、地盤や基礎を硬くすることである。地盤改良は従来の技術で十分対処可能である。このような対処によって、大変位応答の心配のある長々周期の免震装置を用いなくても、従来の免震装置で対処できる可能性がある。

免震建物を地盤改良工法(液状化対策工など)と併用するに当たっては、以下のメリットもある。液状化などによる地盤の大変形により、杭に損傷が生じた場合、基礎に残留変形や不同沈下が生じる。地盤改良は地盤の大変形を抑制し杭の損傷を防止する。免震建物では、基礎に1/500程度の傾斜が生じても積層ゴムの特性に悪影響を与え安全性が損なわれるので、地盤改良との併用も有望である。このため大きな地盤変形が予測される場合には、地盤改良や基礎の強化などの対策が必要となる。

<本研究のポイント>

本研究では、上記のような軟弱地盤における免震構造の問題点をクリアにし、その適用限界を見極める一つの知見を得るため、数例の解析的検討を行った。

従来の免震建物の研究では、上部構造に与える影響(応答低減効果)が中心であり、基礎や地盤との相互作用にも着目した研究⁴⁾は少ない。本研究では、軟弱地盤における杭支持構造物の基礎に、免震装置を設置した場合と設置しない場合について地震時応答を比較・検討した。免震装置は特別

な長周期のものではなく従来の周期特性を有するものを想定した。さらに地盤改良工法を併用した場合についても検討した。特に、下部構造に与える影響にも主眼を置き、軟弱地盤との相互作用や杭の応力低減効果に着目した。

§ 2. 解析手法の概要

本研究ではなるべく実物との乖離を少なくし、真実の現象を見ようという観点から、解析モデルの簡略化はなるべく避け(特に基礎や地盤のモデル化において)、三次元の非線形FEM解析という詳細な解析を行った。

地盤~基礎~構造物を三次元FEMでモデル化しているため、非常に大規模なモデルとなる。また、地盤の非線形性や液状化を考慮しているため周波数領域の解析は不可能で時刻歴解析の計算となる。よって、大規模な自由度の運動方程式を高速に解くため、時間軸の直接積分法として陽解法(中央差分)を用いている。さらに解析の効率化を図るため積分点を1点にした低減積分を行っている。

液状化の評価に当たっては、基礎式として簡潔なものを考え、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。

土の構成式としては、応力・ひずみ関係として、修正Ramberg-Osgoodモデル(修正R-Oモデル)⁵⁾を三次元に拡張して使用している^{6),7)}。ひずみ・ダイレイタンスー関係は、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

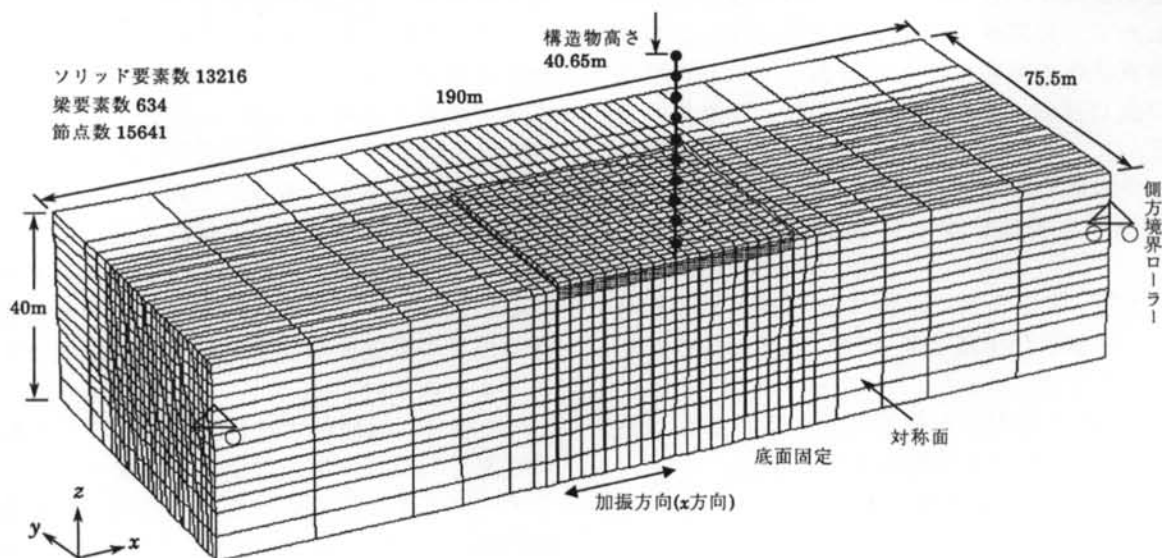


図-1 三次元FEMモデル(1/2モデル)

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やサイクリックモビリティも表現可能である。

上記の三次元FEMプログラムは当社の大槻ら⁹⁾が開発したもので“HiPER”と呼んでおり、地盤～基礎～構造物系の液状化問題には多くの実績がある。

§ 3. 解析条件

3.1 地盤・構造物系モデル

FEMモデルの概略を図-1に示す。モデルは、図に示すように対称性を考慮して1/2モデルとした。加振は一方向(x方向)加振とした。地盤側方境界を水平ローラで表現し、底面境界は固定とし

た。地下水位はGL±0mに設定した。基礎近傍のFEMメッシュと地盤条件を図-2に示す。

初期応力は成層地盤の値を使用した。静止土圧係数は $K_0=0.5$ とした。基礎底面と地盤との接触部分は二重節点とし、上下方向の動きのみを一致させた(基礎底面と地盤とはスライド条件とした)。また免震装置を挟んだ上下の基礎は常に平行条件を保つようにした。積分時間間隔 Δt は、杭に対するクーラン条件から決定され、 $\Delta t=0.00043$ 秒である。

なお本論文では、単位系として従来の $1\text{tf}/\text{m}^2$ などを使用しているのので、SI単位系との換算式： $1\text{tf}/\text{m}=9.81\text{kN}/\text{m}$ 、 $1\text{tf}/\text{m}^2=9.81\text{kN}/\text{m}^2$ 、 $1\text{tf}/\text{m}^3=9.81\text{kN}/\text{m}^3$ を示しておく。

地盤構成は、表-1に示す3ケースを想定した。同表に示す地盤周期 T_g からすると、[ケース①]は

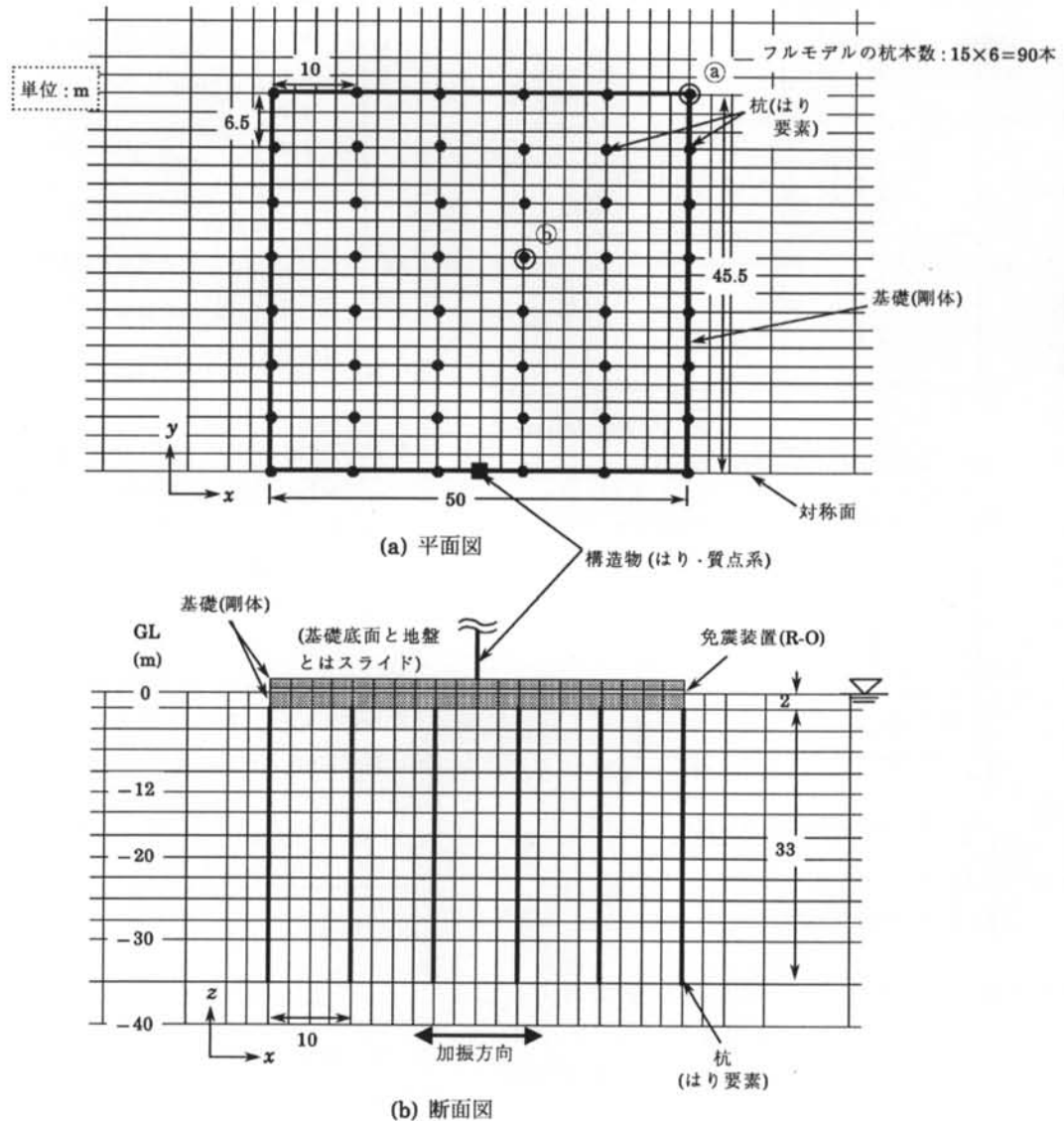
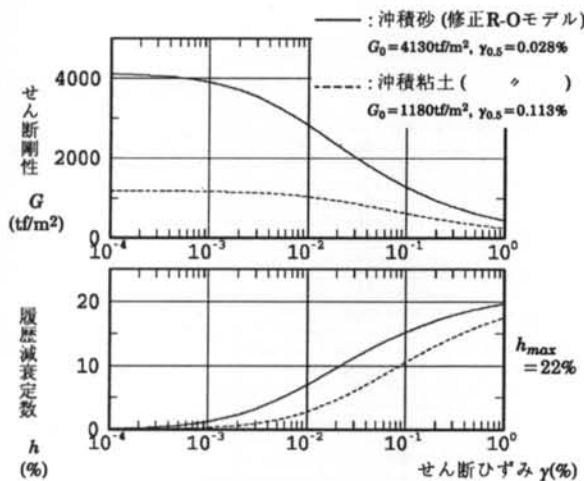


図-2 解析モデル(基礎近傍)と地盤条件

| GL (m) | [ケース①] $T_g = 0.70$ 秒 | | [ケース②] $T_g = 0.85$ 秒 | | [ケース③] $T_g = 1.37$ 秒 | |
|--------|-----------------------|-------------|-----------------------|-------------|-----------------------|-------------|
| | 土質 | V_s (m/s) | 土質 | V_s (m/s) | 土質 | V_s (m/s) |
| 0 | 沖積砂 (As1) | 150 | 沖積砂 (As) | 150 | 沖積粘土 (Ac1) | 80 |
| -12 | 沖積砂 (As2) | 250 | 沖積粘土 (Ac) | 150 | 沖積粘土 (Ac2) | 100 |
| -20 | 洪積砂 (Ds1) | 300 | 洪積粘土 (Dc) | 200 | 沖積粘土 (Ac3) | 120 |
| -30 | 洪積砂 (Ds2) | 350 | 洪積砂 (Ds) | 350 | 洪積砂 (Ds) | 350 |
| -40 | 基盤 (剛) | | | | | |

□ : 液状化層

表-1 地盤ケース



(a) 非線形特性 ($G/G_0 \sim \gamma, h \sim \gamma$)

(b) 沖積砂の非排水繰返し強度

図-3 GL0~-12mの土質特性 (拘束圧 = 3.2 tf/m^2)

第2種地盤と第3種地盤の中間的地盤であり、[ケース②]と[ケース③]は第3種地盤である¹⁰⁾。特に[ケース③]ではかなり軟弱な粘土地盤が30m堆積している。ポアソン比は $\nu = 0.33$ とした。土の単位体積重量 γ_t 、履歴減衰定数 h は、簡単のため

に土の種類によらずそれぞれ一様に $\gamma_t = 1.8 \text{ tf/m}^3, h = 0.22$ として設定した。

このように設定した土質特性のうち、表層部分 (GL0~-12m)の非線形特性と液状化特性を図-3に示す。

3.2 杭および上部構造のモデル化

上部構造は、図-4に示すように高さ40.65m(9階)の建物を想定し、はり・質点系でモデル化した。(上部構造の減衰は考慮していない。) 建物全重量は31700tfであり、基礎固定時の固有周期は1次が0.42秒、2次が0.22秒である。

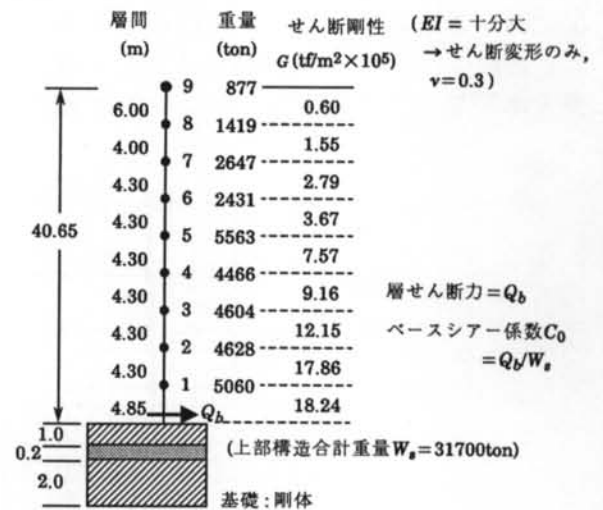


図-4 上部構造のモデル化と物性 (フルモデル)

杭は $\phi 1800$ の場所打ち鋼管コンクリート杭を想定し、Belytschkoの線形はり要素でモデル化した。フルモデルにおける杭本数は $15 \times 6 = 90$ 本である。支持層(Ds)への貫入長は5mとした。基礎の全重量は19000tfで剛体とした。杭の物性を表-2に示す。基礎と上部構造物を合わせた重量は50700tonであるので、杭1本当たりの常時の軸力は約560tonとなる。このときの終局曲げモーメントは約2200t・mである。

| 直径 (m) | 断面積 A (m ²) | ヤング率 E (tf/m ²) | 断面二次モーメント $I_x = I_y$ (m ⁴) | 単位体積重量 γ_t (tf/m ³) | ポアソン比 ν |
|--------------------|---------------------------|-------------------------------|---|--|-------------|
| $\phi 1800$ t14 | 2.54 | 3.24×10^6 | 0.515 | 2.4 | 0.17 |

表-2 鋼管コンクリート杭の梁要素の物性

3.3 免震装置のモデル化

免震装置には文献11)に示されている高減衰積層ゴムを適用するものとし、その非線形特性は三次

元R-Oモデル⁷⁾でモデル化した。R-Oモデルによる実験値へのフィッティング結果と設定されたパラメータの値を図-5に示す。履歴減衰定数は、せん断ひずみ γ_{iso} が50~200%の範囲では実験値と良い対応を示しているが、それ以外の範囲ではフィッティング精度はあまり良くない。後述の解析結果によれば、主要動付近の γ_{iso} は50~200%の範囲に納まっており、あまり問題は無いと考えられる。積層ゴムのせん断ひずみ $\gamma = 100\%$ における周期は $T_{100} = 3.5$ 秒である。

| 初期剛性 G_{0i} (tf/m ²) | 基準ひずみ $\gamma_{0.5i}$ | 最大履歴減衰定数 h_{max} |
|---------------------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 7.0 | 8.0% | 15% |

$T_{100} = 3.5$ sec
(軟弱地盤立地の場合)

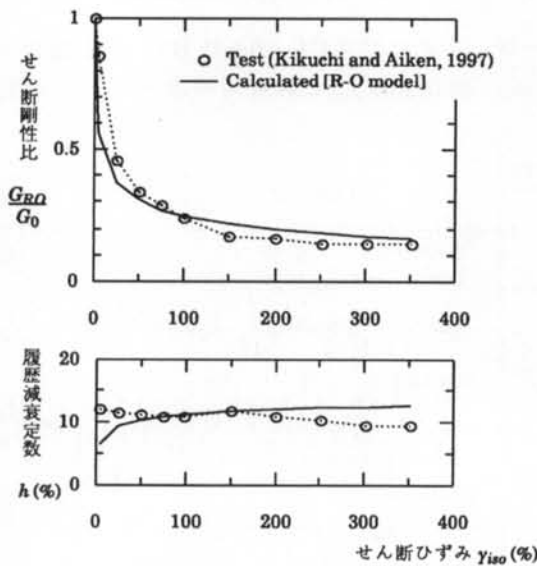


図-5 免震装置(高減衰積層ゴム)のひずみ依存特性とR-Oモデルのパラメータ

3.4 地盤改良体(SCB)のモデル化

地盤改良としては、ブロック状の深層混合処理による改良体(ソイルセメントブロック:SCB)¹²⁾を想定した。本工法は免震構造と併用できる有力な工法の1つと考えられる。SCBは線形材料とし、基礎底面とSCBの接触面とは2重節点とスライド条件とした。図-6にSCBの平面配置形状とその物性を示す。改良深さはGL-14.5mまでとした。基礎面積に対するSCBの改良面積率は38%である。

3.5 入力地震動

入力地震動としては図-7に示す3波を想定した。基礎のGL-40mより入力し(固定境界なのでE+F)、振幅値は応答結果を見ながら調整して決

ソイルセメントの物性

| 一軸圧縮強度 q_u | 変形係数* E_{50} | 単位体積重量 γ_t | ポアソン比 ν |
|-----------------------|--------------------------|----------------------|----------------|
| 200 tf/m ² | 100000 tf/m ² | 原地盤と同じ | 0.2 |

* $E_{50} = 500 \times q_u$ と仮定

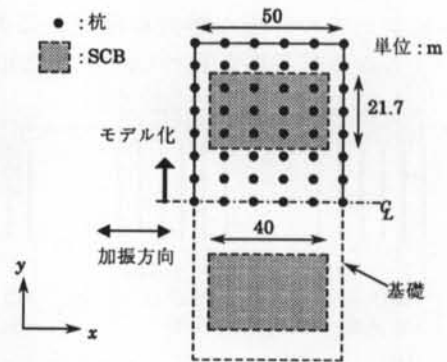


図-6 SCBの物性と改良パターン(平面図)

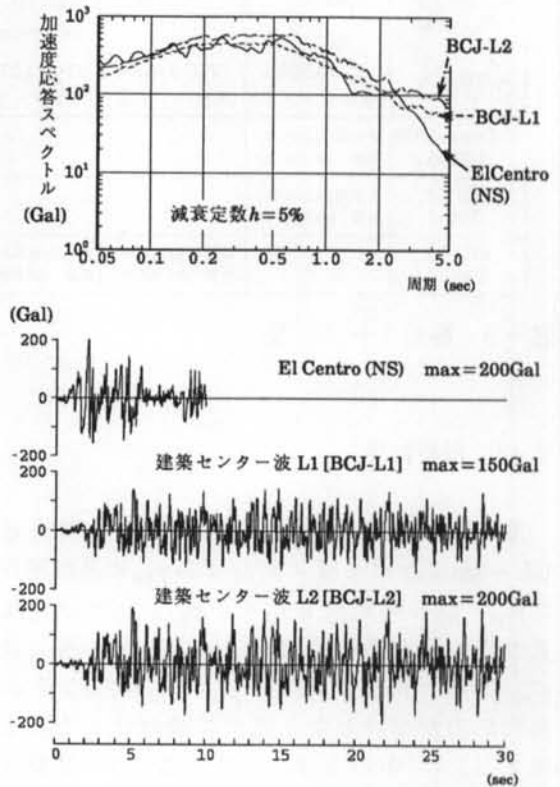


図-7 入力加速度波形と加速度応答スペクトル

めた。建築センター波¹³⁾を採用した理由は、El Centro波に比べて主要動継続時間が長く速度応答スペクトルがかなり長周期までパワーを持っており、免震建物の検討には厳しい入力波となるからである。建築センター波レベル2の速度応答スペクトルは、レベル1のそれに比べてより長周期でもパワーを持っている。レベル1,2と記しているがその値は設計で言うレベル1,2には対応してい

ない。以下では建築センターレベル1,2をBCJ-L1, BCJ-L2と呼称する。

3.6 解析ケース

基礎形式は図-8に示す3ケースを想定した。解析ケース一覧を表-3に示す。紙面の都合上、全ケースについての詳細な検討は避け、この中からポイントとなる結果のみについて以下に示す。

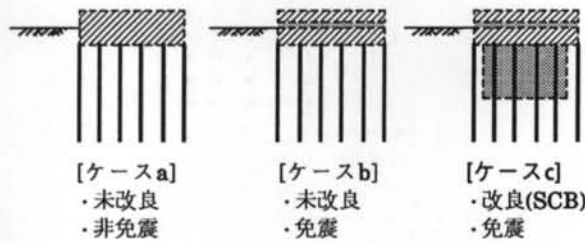


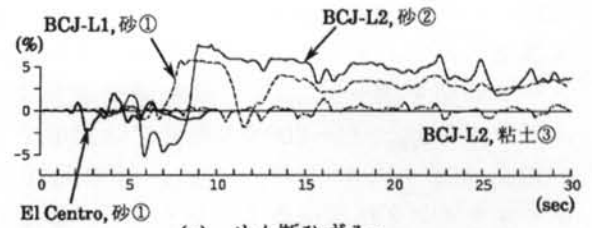
図-8 基礎形式

| 地盤 | 液状化砂 + 硬質砂 ($T_g=0.70$ 秒) [地盤ケース①] | 液状化砂 + 粘土 ($T_g=0.85$ 秒) [地盤ケース②] | 軟弱粘土 (非液状化地盤) ($T_g=1.37$ 秒) [地盤ケース③] |
|-----------------------|---|--|--|
| 入力波 | | | |
| El Centro (NS) 200Gal | 非免震 (SCB有・無) 免震 (SCB有・無) | — | — |
| BCJ-L1 150Gal | 非免震 (SCB有・無) 免震 (SCB有・無) | — | — |
| BCJ-L2 200Gal | — | 非免震 (SCB有・無) 免震 (SCB有・無) | 非免震 (SCB無) 免震 (SCB無) |

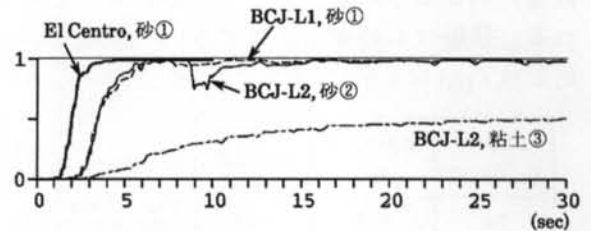
表-3 解析ケース一覧

§ 4. 解析結果

図-9には基礎の端から30m離れた側方地盤のGL-6mにおけるせん断ひずみ γ_{xz} と過剰間隙水圧比 p_w/σ'_m0 の時刻歴を示す。 p_w/σ'_m0 とは、地震により発生した過剰間隙水圧 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。(図中の丸印の数字は表-1の地盤ケースNo.を示す。以下同様) 表-1に示す地盤ケース①, ②では、GL0~-12mの砂層は完全に液状化し、約2~7%のひずみが生じている。 p_w/σ'_m0 を見ると、ElCentro波では3秒で液状化し7秒間液状化が継続しており、BCJ波では6秒で液状化に至り24秒間液状化が継続している。またBCJ-L2入力では、サイクリックモビリティによる波打ちが見られる。(サイクリックモビリティとは、せん断による膨張側の体積ひずみによって負の過剰間隙水圧が繰返し発生する現象) 地盤ケース

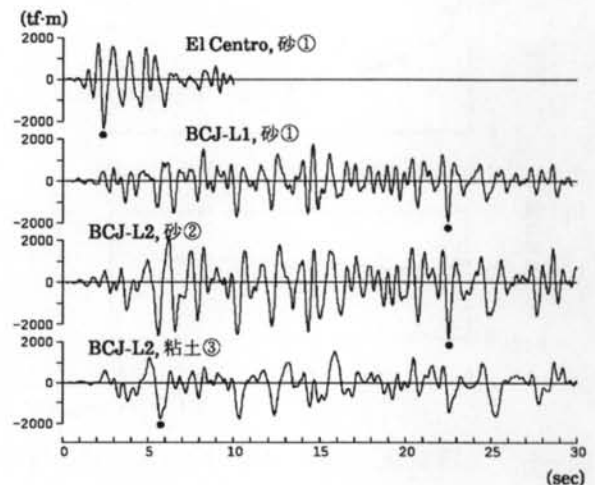


(a) せん断ひずみ γ_{xz}

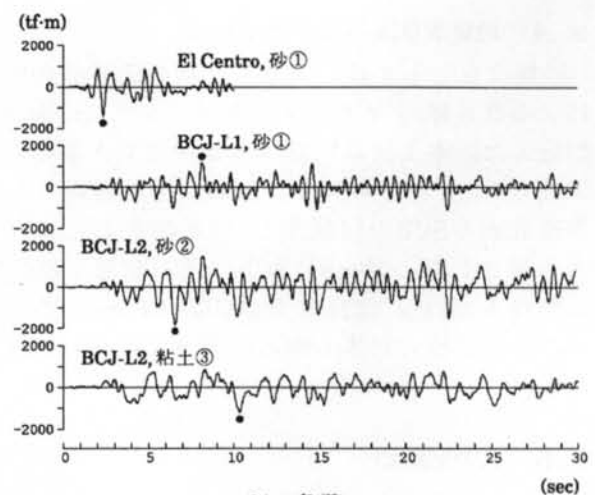


(b) 過剰間隙水圧比 p_w/σ'_m0

図-9 側方地盤のGL-6mにおける地盤のせん断ひずみ γ_{xz} と過剰間隙水圧比の時刻歴



(a) 非免震



(b) 免震

図-10 杭③の杭頭の曲げモーメントの時刻歴

③(粘土)では、 p_w/σ'_{m0} の最大値は0.5程度にしか達しておらず、液状化には至っていない。図-9の傾向は、非免震と免震とでほとんど変わらない。

図-10には、杭②の杭頭の曲げモーメント M の時刻歴を示す。図中の●印は最大値発生時刻を示す。非免震の場合を見ると、主要動が短く液状化継続時間の短いEl Centro波では M の最大値は液状化に至る直前で発生しているのに対し、液状化継続時間の長いBCJ波では液状化に至ってしばらくして M の最大値が発生している。また液状化していない粘土地盤ではBCJ-L2入力でも主要動の初期に最大値が発生している。免震で表層が砂の場合は、BCJ波入力時の M の最大値発生時刻は非免震の場合より早くなっている。

図-11には、地盤ケース②と③にBCJ-L2を入力した場合の加速度時刻歴を示す。地表の応答に着目すると、(a)のケース②では液状化により5秒付近から長周期になっている。一方ケース③では、入力波よりは長周期になっているものの液状化した場合ほどではなく振幅値もかなり大きい。基礎の応答を比較すると、免震化することにより、ケース②では0.43倍に低減し、ケース③では0.70倍に低減している。

以下に杭応力について考察を述べる。なお、杭

の地震時杭応力発生機構は、図-12に示すように上部構造からの慣性力 Q によるもの(M_i)と、地盤からの強制変位 U_g によるもの(M_k)に分けて考えると分かりやすい。前者は特に杭頭応力に影響し、後者は地盤変形分布の変化部分(例えば軟弱地盤と硬質地盤の境界)で影響が大きい。免震構造では Q は小さくなるので杭頭付近の応力は小さくなる。

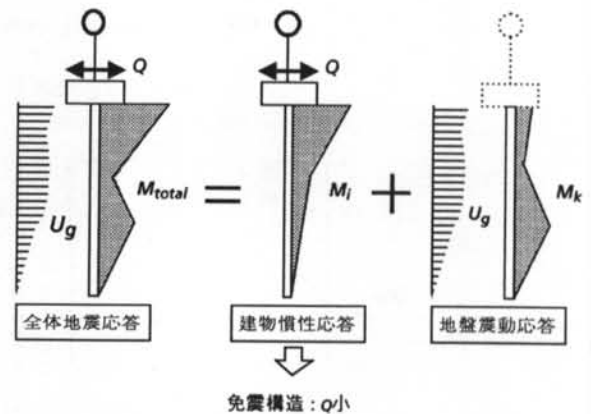


図-12 地震時杭応力の発生メカニズム

図-13には、杭②と杭③の曲げモーメント M の最大値分布を示す。図中の(a)~(c)では表層の砂(A_s 層)が液状化しており、杭頭と液状化層・非液状化層の境界付近で M が大きくなっている。

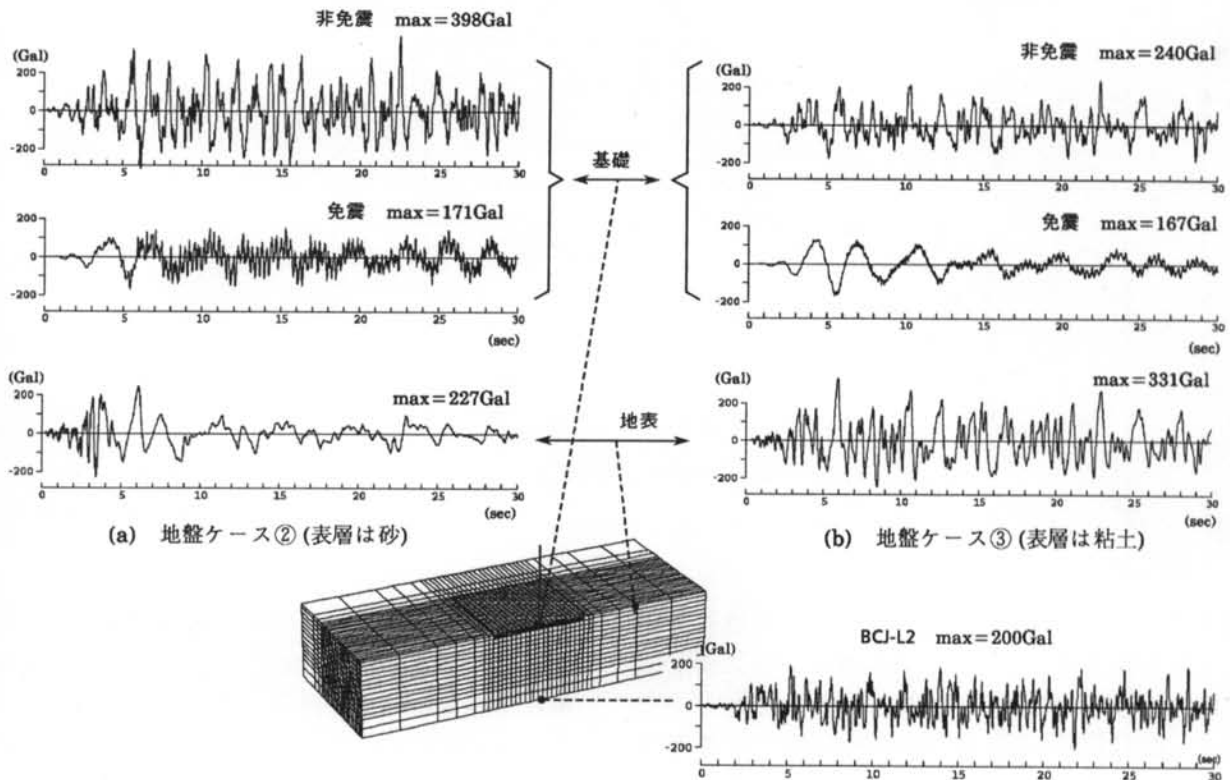


図-11 加速度時刻歴

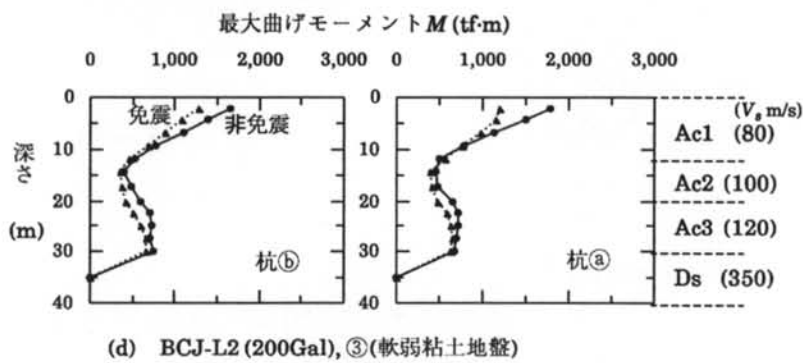
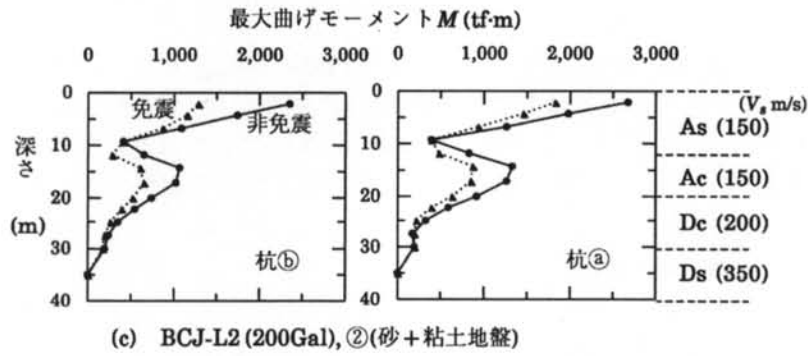
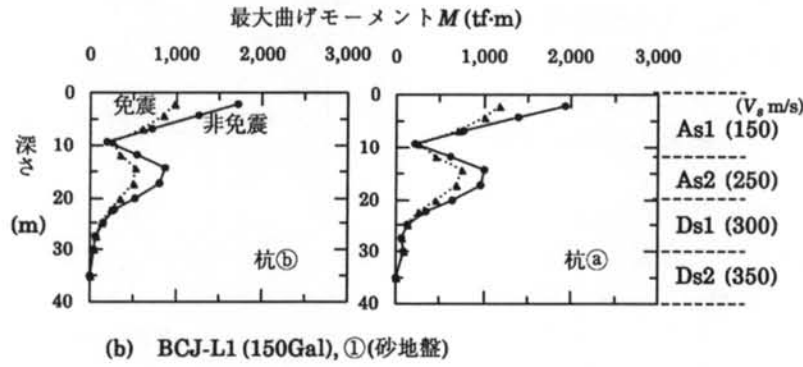
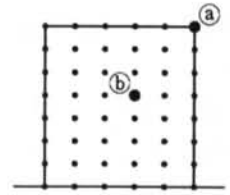
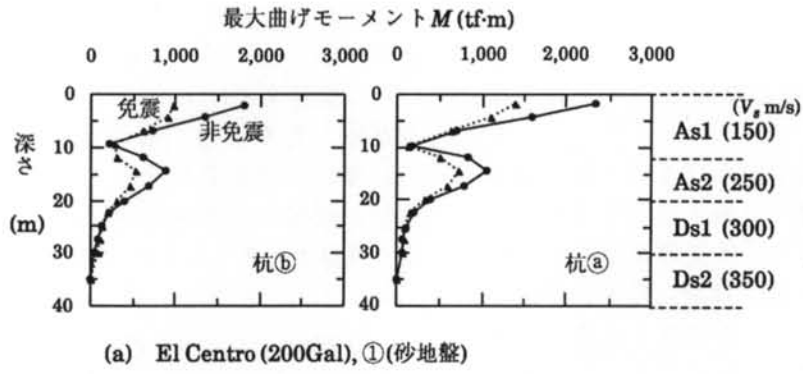


図-13 杭の最大曲げモーメント M (免震の有無の比較)

(c)の地盤ケース②にBCJ-L2を入力した場合が最も大きな値を示している。非免震の場合において地盤ケース①にBCJ-L1を入力した場合(b)と地盤ケース③にBCJ-L2を入力した場合(d)とを比較すると、後者(d)の方が入力が大きいかかわりなく M の値は小さい。これは(d)の場合、全層が粘土地

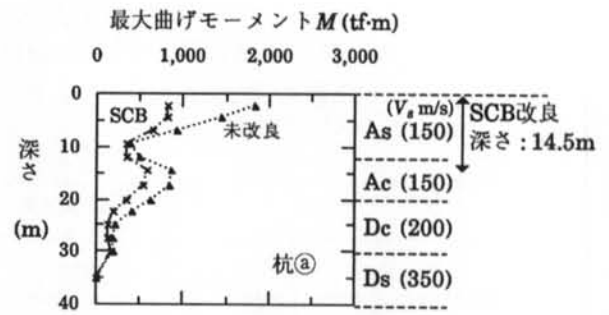
盤であるので、液状化せず、極端に表層の地盤剛性が小さくならなかったことによる。また地盤の剛性がある層を境に極端に変化することも起こっていないためである。

基礎の免震と非免震の差異に着目すると、全ケースにおいて免震化により杭応力は杭頭付近で

低減されている。ただし、(d)の地盤ケース③(粘土)では M の低減効果が他のケースと比べてやや小さい。これは後述するように、このケースでは他のケースに比べて免震化しても層せん断力 Q_b の低減があまり顕著でなかったためである。

図-14には、免震構造に地盤改良(SCB)を併用した場合(図-8のケースc)の効果を見たものである。液状化層をSCBで部分的(図-6参照)に改良することによって、杭の M はかなり小さくなっている。

図-15には、各杭頭の最大曲げモーメント M を示す。(a)の地盤ケース①(液状化層+砂地盤)にElCentro波(200Gal)を入力した場合、免震化による M の低減率は、杭の位置に依らずほぼ一様である。 M の絶対値は、免震・非免震ともに基礎中央部よりも基礎コーナー部の方が大きくなっている。(b)の地盤ケース③(軟弱粘土地盤)にBCJ-L2を入力した場合、 M の低減率は(a)の場合ほど顕著で

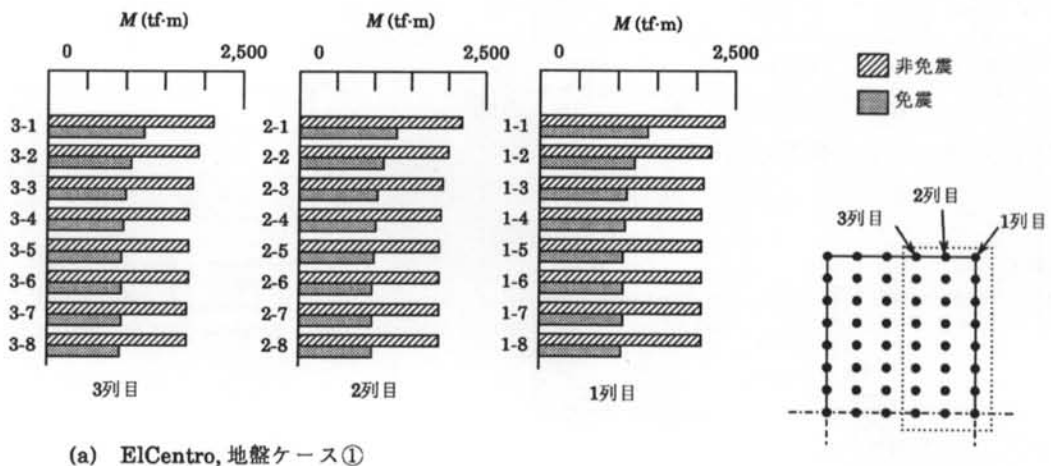


BCJ-L2 (200Gal), 地盤ケース②

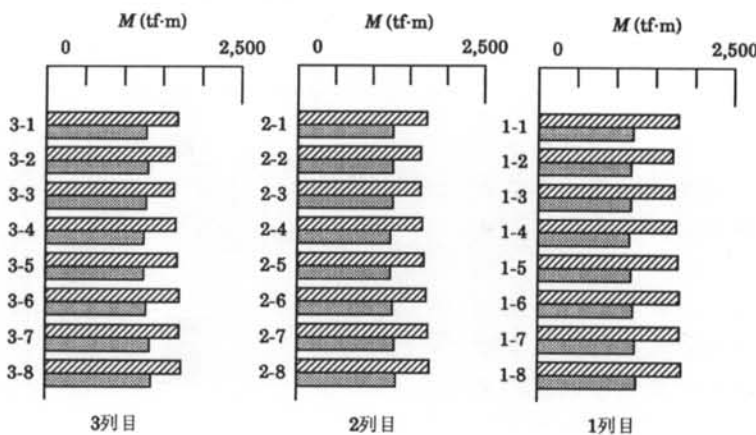
図-14 免震基礎の杭の最大曲げモーメント M 地盤未改良・改良(SCB)の比較

ない。免震・非免震ともに M の杭位置による差異はあまり無い。

図-16に層せん断力 Q_b を、図-17にベースシア係数 C_0 を示す。非免震の場合、地盤ケース②にBCJ-L2を入力した場合が最も大きな値を示している。免震の場合、地盤ケース③にBCJ-L2を入



(a) ElCentro, 地盤ケース①



(b) BCJ-L2, 地盤ケース③

図-15 杭頭の最大曲げモーメント M

力した場合が最も大きく、免震化による低減効果も小さい。これらのことは、図-13(杭の M)と対応している。非免震の時の C_0 は0.26~0.39である。

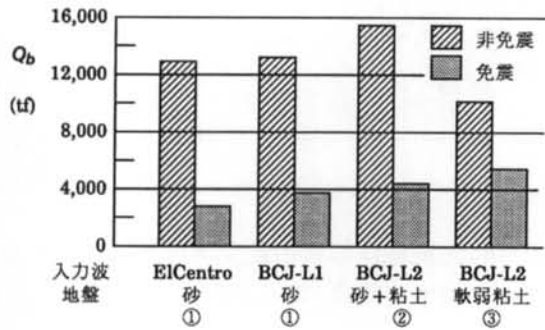


図-16 層せん断力 Q_b

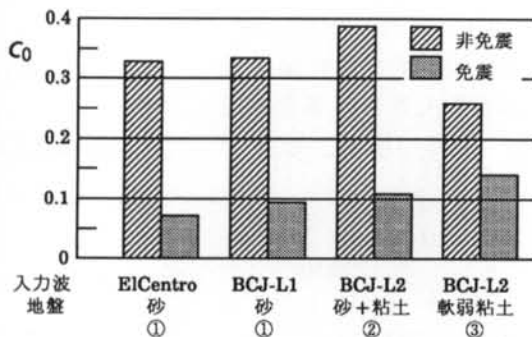


図-17 ベースシア係数 C_0

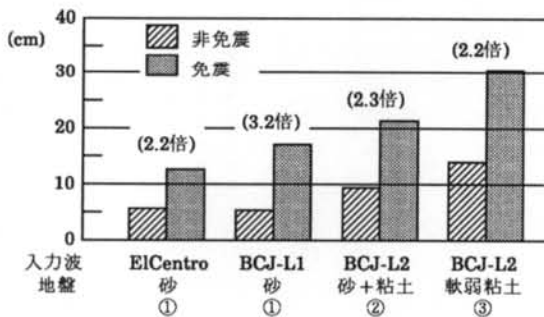
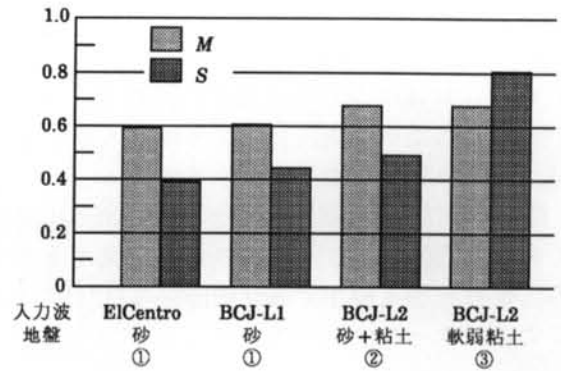


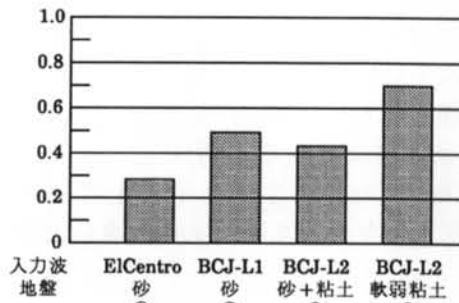
図-18 基礎の変位

図-18に基礎の変位を示す。カッコ内の数字は免震化した場合の基礎変位の倍率を示す。変位の最も大きいのは、非免震・免震ともに地盤ケース③である。

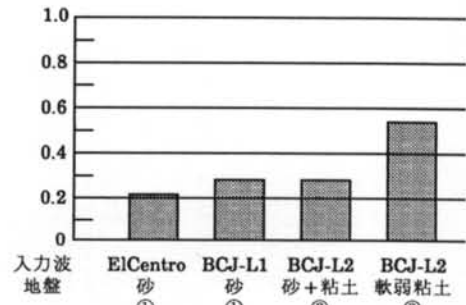
図-19には免震構造としたときの各諸量の割合[非免震のときの値を1.0]を示す。この図からも地盤ケース③(軟弱粘土)の場合が免震化の低減効果が小さいことが分かる。特にせん断力 S は20%しか低減していない。(c)の C_0 の比をみると地盤ケース③(軟弱粘土)の場合が免震化の低減効果が最も



(a) 杭頭③の曲げモーメント M とせん断力 S の比



(b) 基礎の加速度の比



(c) C_0 の比 (=層せん断力 Q_b の比)

図-19 免震化したときの各諸量の割合 [非免震のときの値を1.0]

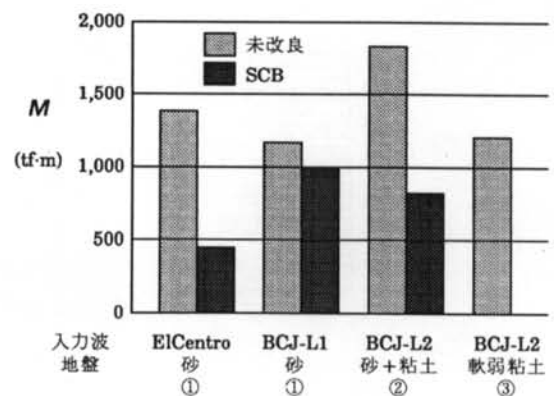


図-20 免震構造物の杭頭③の最大曲げモーメント M

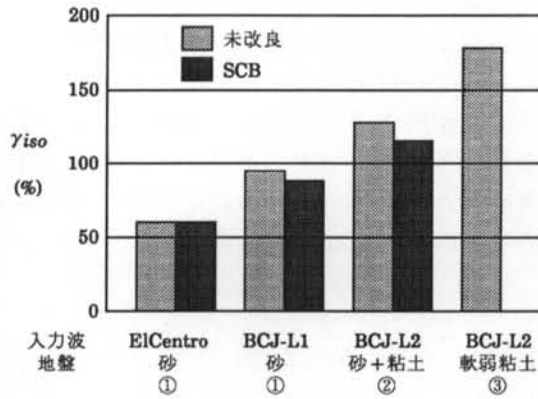


図-21 積層ゴムのせん断ひずみ γ_{iso}

小さい。これは地盤周期 T_g が最も長い地盤に周期の長いBCJ-L2を入力したためと考えられる。

以下に地盤改良(SCB)の効果について検討する。なお地盤ケース③(軟弱粘土)については、SCB併用の解析は行っていない。図-20に免震構造物の杭頭④の最大曲げモーメント M を示す。SCBを併用することにより、 M の低減が見られるが、地盤ケース①にBCJ-L1を入力した場合には低減効果はさほど顕著でない。

図-21に積層ゴムのせん断ひずみ γ_{iso} を示す。地盤ケース③にBCJ-L2を入力した場合が最も大きく、178%の γ_{iso} を示している。これはこのケースで最も Q_b が大きかったことによる。積層ゴムの限界せん断ひずみは400%であり、安全余裕度はまだ十分にある。SCBによる地盤改良を併用した場合は若干の γ_{iso} の低下が見られる。これはSCBにより基礎直下が部分的に硬くなったため、基礎の固有周期がやや短周期に移行したかめと考えられる。

§ 5. まとめ

免震構造は軟弱地盤には不向きとされていた。しかし、今回の結果に限れば、軟弱地盤や液状化地盤においても周期3.5秒程度の免震建物が十分に免震効果を発揮でき、安全性は確保できる結果となった。今回の検討は、3ケースの限られた地盤条件下の検討であり、種々の多様な条件下についても今回の結論が当てはまるとは言えない。しかし、地盤が液状化しても、免震効果が発揮される場合はあるといえる。したがって、全ての軟弱地盤に免震構造が不向きというわけではなく、ある条件下の軟弱地盤では十分適用可能と考えられる。(図-22のシェード部分)

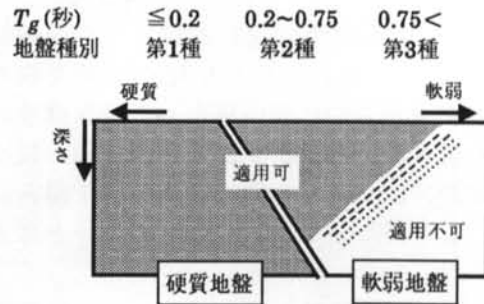


図-22 地盤種別と免震構造の適用範囲

地盤ケース③ではやや免震効果の利きがあまり良くない結果となった。このことは、軟弱地層がさらに深く固有周期 T_g のより長い地盤では注意が必要であることを意味している。また今回は検討しなかったが地層構成が複雑で不整形のある場合などについては今後検討していかなければならない。

液状化する地盤で問題になるのは、杭の損傷である。今回の結果を見ると、建物の応答を低減する効果を維持しつつ、杭の応力も小さくなっている(特に杭頭において)。よって、軟弱地盤における杭基礎構造物の基礎に免震装置を設置すれば、建物と杭の双方にとって安全性が増すことになると言える。さらに、液状化対策工などの地盤改良を併用すれば、地盤の大変形による杭の損傷は防止でき、安全性は十分に確保できると思われる。すなわち、液状化するような地盤であってもその地盤の特性を地盤調査などにより正確に把握し、今回行ったような詳細な解析を各建物ごとに行えば、十分な免震効果を期待できる建物が設計可能となろう。その意味においても今回の解析で用いた地盤~基礎~建屋系の三次元液状化解析技術は有用である。

§ 6. 今後の課題

今後は、諸条件を変えた解析を積み重ねることにより、軟弱地盤における免震構造の適用条件を絞りこみたい(明確化したい)と考えている。すなわち図-22の明確化である。そのうえで応答スペクトルなどに着目した構造物の応答という観点からの一般化の検討をおこなう必要がある。また、解析手法や解析モデルの精度の向上も必要である。(例えば上部構造を三次元フレームモデルとするなど)

具体的には、解析モデル底面にダンパーを設け

たモデルを用いて、1)入射波入力によるレベル1およびレベル2入力時の設計的観点からの検討、2)三方向(水平二方向と上下方向)の同時加振の検討、3)軟弱層がさらに厚い場合や、地層構成が不整形性を有する場合、4)免震周期や建物の規模を変えた場合、5)杭基礎と他の基礎工法を組み合わせた場合、などについて検討していきたいと考えている。

ここでいう他の基礎工法の併用とは、杭基礎を強化(剛体化)し共振や杭の損傷を防止することを目的とする。考えられる基礎工法は、SMW(ソイルセメント柱列壁)で杭基礎周辺を囲む工法¹⁴⁾、

地中連続壁を井桁状に配置する工法^{15),16)}、支持杭と斜杭を併用する工法¹⁷⁾、などが考えられる。これらの工法は解析によって杭のみの基礎に比べて健全性が増すことが確かめられている。このような複合基礎を用いることにより、基礎の健全性を高めるとともに、基礎の周期を短くし軟弱地盤上の免震構造の成立可能性が高まると思われる。

謝辞

最後に、有益な助言を頂いた設計本部構造設計部2部の北村佳久氏ならびに元清水建設(株)の吉見吉昭常任顧問に感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) 大前安和, 北村佳久: “軟弱・液状化地盤と免震構造” 施工, 建築の技術, No.390, 彰国社 (1998年4月), pp.114~119
- 2) 中村庄滋, 北村佳久, 小川雄一郎, 猿田正明, 上田 栄: “積層ゴムとすべり支承による複合免震システムに関する研究 その1 圧縮せん断実験”, 日本建築学会大会学術講演概要集, B-2 構造Ⅱ (1998年9月) pp.501~502
- 3) 猿田正明, 林 章二, 北村佳久, 小川雄一郎: “積層ゴムとすべり支承による複合免震システムに関する研究 その2 振動実験”, 日本建築学会大会学術講演概要集, B-2 構造Ⅱ (1998年9月) pp.503~504
- 4) 例えば, 林 康裕, 高橋郁夫: “連続地中壁の動的応力の負担性状に関する基礎的検討) その2) 免震装置による連続地中壁の応力低減効果”, 日本建築学会大会学術講演概要集 (1994年9月) pp.1077~1078
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 福武毅芳: “土の多方向繰返しせん断特性を考慮した地盤・構造物系の三次元液状化解析に関する研究”, 名古屋工業大学博士論文, (1997年9月)
- 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理解”, 土木学会論文集, No.412/Ⅲ-12 (1989年12月) pp.240~248
- 9) 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
- 10) 建築基礎構造設計指針, 日本建築学会 (1988年1月)
- 11) Kikuchi, M. and Aiken, I.D.: “An Analytical Hysteresis Model for Elastomeric Seismic Isolation Bearings”, EESD, Vol. 26 (1997年) pp.215~231
- 12) 福武毅芳, 大槻 明: “三次元解析による種々の液状化対策効果の検討”, 清水建設研究報告, 第62号 (1995年10月) pp.105~113
- 13) 設計用入力地震動研究委員会: “設計用入力地震動作成手法技術指針(案) 本文解説編”, 建設省建築研究所, (財)日本建築センター (1992年3月)
- 14) 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) pp.991-996
- 15) 福武毅芳: “井桁壁基礎の三次元非線形解析による耐震性の検討 - 液状化抑制効果の検討 -”, 第32回地盤工学研究発表会 (1997年7月) pp.1635-1636
- 16) 福武毅芳: “井桁壁基礎の三次元非線形解析による耐震性の検討 - 杭の応力低減効果の検討 -”, 第24回地震工学研究発表会 (1997年7月) pp.629-632
- 17) 藤川 智, 福武毅芳: “短尺な斜杭の併用による杭基礎の液状化対策の解析的検討”, 第10回日本地震工学シンポジウム, STS1-7, Vol.1 (1998年11月) pp.55~60