

2次元骨組み解析による杭基礎の連成解析と地震時保有耐力法の比較

福山則行¹・荒巻博志¹・中野 聡¹

¹正会員 (株)福山コンサルタント 東日本事業部 設計部 (〒136-0071 東京都 江東区 亀戸 2-25-14 立花アネックスビル 3F)

1. まえがき

兵庫県南部地震以降、L2レベルの大地震対応として既設の橋脚に対する耐震性能照査が行われている。照査の結果、耐震性能を満足しない橋脚に対しては耐震補強が行われ、このうち橋脚躯体に対しては補強が容易であることから、鋼板巻立て補強、コンクリート外巻き補強等が順次行われている。一方、基礎に対しては、フーチング増厚や増し杭等の基礎の補強が必要となるが、これらの補強は大規模となり容易ではない。

また、道路橋の地震時保有耐力法（以下、保耐法と称す）では、厳密な意味での地盤と構造物の動的相互作用効果を考慮した耐震設計は行われておらず、既設構造物の基礎の耐震性能照査に対しては、地盤と構造物を忠実にモデル化して動的非線形解析により、耐震性能照査を行う必要があると考える。

そこで、本稿は地盤を相互ばねで、構造物を杭基礎も含む全体系の梁要素でモデル化した2次元多質点骨組みモデルを用いて動的非線形解析を行うことにより、地盤と構造物の動的相互作用効果を厳密に考慮した場合の構造物の動的性状・振動特性の把握を行い、杭基礎の保耐法と比較した結果について紹介するものである。

2. 解析対象橋脚および解析条件の設定

本解析対象とした橋りょうの全体図を図-1に示し、解析対象橋脚の正面図および側面図を図-2、図-3に示す。

以降に対象橋りょうの概略について説明する。
なお、本解析では橋軸方向を対象とした。

(1) 上部構造

構造形式：2径間連続鋼箱桁橋
支間割：30m+30m
桁総重量：1450 tf
支承条件：固定（橋軸・橋軸直角方向共）

(2) 対象橋脚

構造形式：鋼製橋脚
基 礎：杭基礎（場所打ち杭φ1200, L=23m）

(3) 地盤種別、重要度の区分および地域区分の設定

地盤種別、重要度の区分、地域区分は次のように設定した。

地 盤 種 別：Ⅱ種地盤
重要度の区分：B種の橋（特に重要度の高い橋）
地 域 区 分：A地域

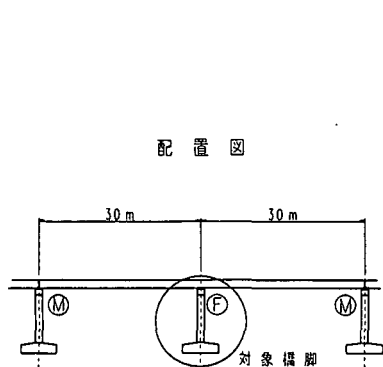


図-1 橋りょう全体図

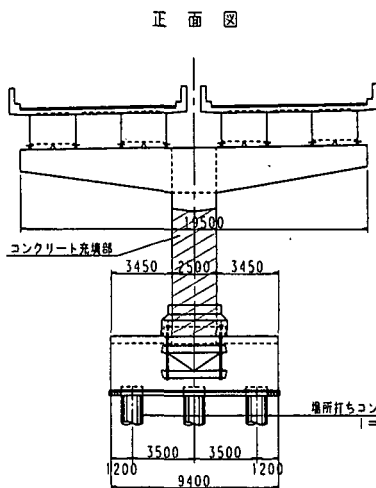


図-2 対象橋脚正面図

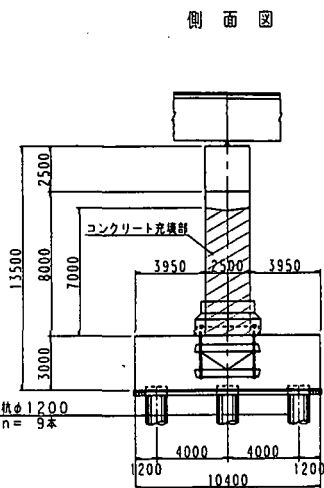


図-3 対象橋脚側面図

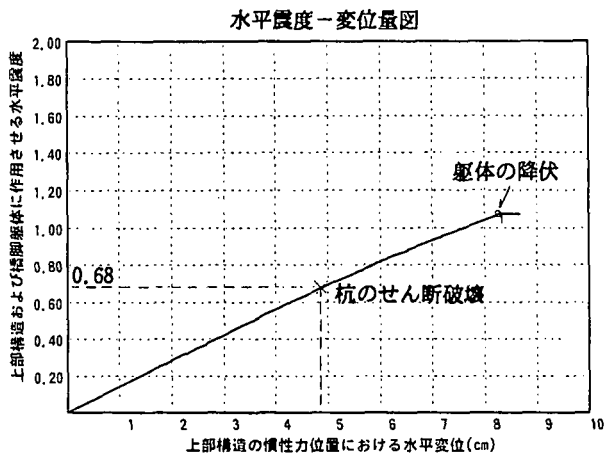


図-4 $k h - \delta$ 曲線

3. 杭基礎の保耐法による照査結果

解析対象とした橋脚に対して、道路橋示方書V（耐震設計編）に準拠して杭基礎の保耐法による耐震設計を行った。この結果を以下に示すが、図-4の $k h - \delta$ 曲線（水平震度と水平変位量の関係）に示すように、杭体のせん断破壊が橋脚躯体の降伏よりも早く発生することがわかり、杭のせん断耐力の照査においても耐力オーバーとなることがわかった。

(1) 設計水平震度

- a) 保耐法に用いる設計水平震度 $k h c = 1.75$
- b) 基礎の設計に用いる設計水平震度 $k h p = 1.07$
- c) フーチングに作用させる設計水平震度 $k h G = 0.70$

(2) 杭基礎照査結果

a) 変位の照査

杭頭水平変位 $\delta F0 = 0.025 \text{ m} < \delta F0a = 0.400 \text{ m} (\text{OK})$
 フーチング回転角 $\alpha F0 = 0.005 \text{ rad} < \alpha F0a = 0.025 \text{ rad} (\text{OK})$

b) 押込み支持力

杭頭反力 $P_N = 1241 \text{ tf} < P_{NU} = 1617 \text{ tf} (\text{OK})$

c) 曲げ耐力

- 1 列目: $M_{\max} = 196 \text{ tfm/本} < M_y = 277 \text{ tfm/本} (\text{OK})$
- 2 列目: $M_{\max} = 195 \text{ tfm/本} < M_y = 277 \text{ tfm/本} (\text{OK})$
- 3 列目: $M_{\max} = 199 \text{ tfm/本} < M_y = 339 \text{ tfm/本} (\text{OK})$

d) せん断耐力

杭体せん断力 $\Sigma S = 1679 \text{ tf} > P_s = 1074 \text{ tf} (\text{OUT})$

4. 解析手法

(1) 解析概要

前記で述べたとおり、基礎の保耐法の照査を行った結果、杭のせん断に対してのみ耐力オーバーとなった。

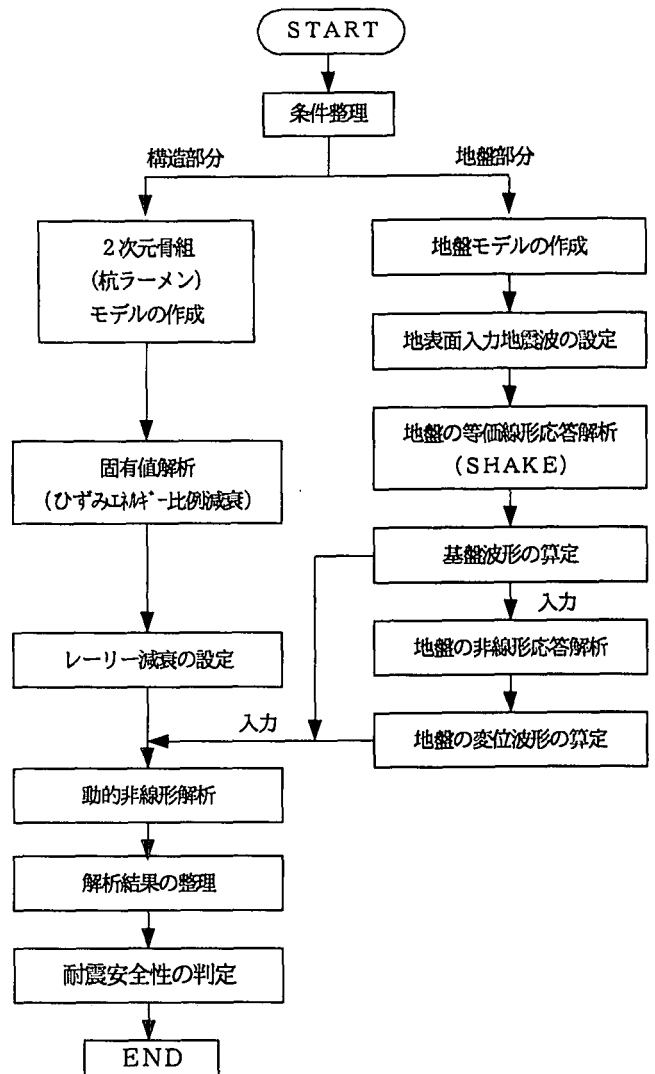


図-5 解析フロー

そこで、動的解析を行い、想定した地震動において杭のせん断破壊が発生するかどうかを照査することとした。

動的解析の手法は、杭に作用する地盤の動土圧が考慮できる基礎と地盤の連成解析を行うこととした。

連成解析の手法は、以下の2通りが考えられるが、本稿では、②の解析手法を採用することとした。なお、地盤ばね・基礎の梁要素はともに非線形要素として設定した。

- ① 地盤-平面ひずみ、基礎-梁要素
- ② 地盤-ばね要素、基礎-梁要素

(2) 連成解析の手法について

連成解析の手法としては、図-5に示す解析フローにあるように、自然地盤の地震応答解析と連成モデルでの地震応答解析の2通りを行っている。具体的には、自然地盤の解析で算定した杭各部の応答変位波形を連成モデルの杭位置に基礎波形と同時に入力するという手法である。

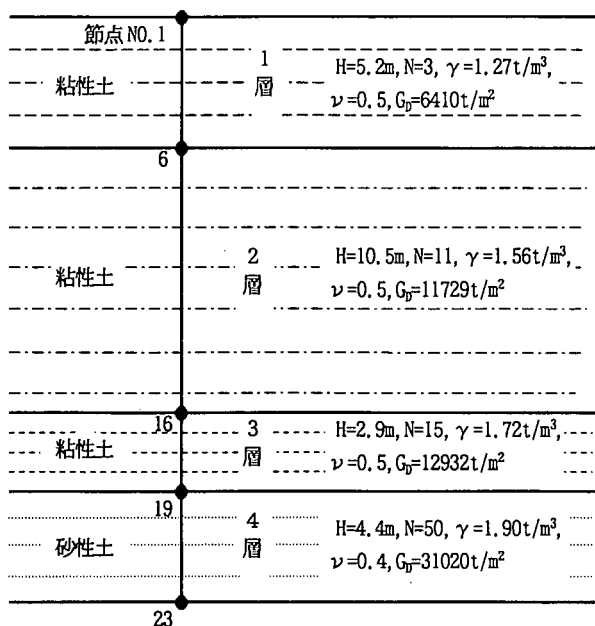


図-6 地盤モデル

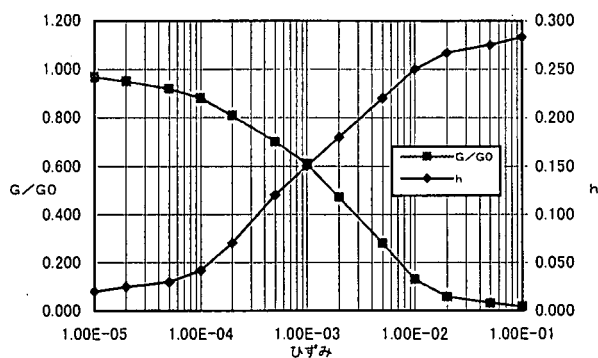


図-7 G/G_0 - γ ・ h - γ の関係(洪積粘性土)

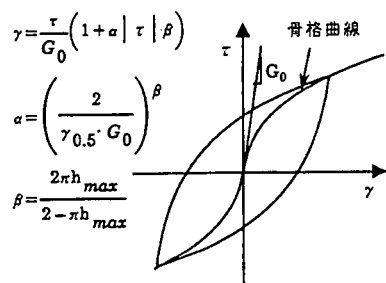


図-8 修正 R-O モデル

5. 解析モデル

(1) 自然地盤のモデルについて

自然地盤の解析に用いた地盤モデルを図-6に示す。地盤の非線形性は1層～3層の洪積粘性土について設定し、そのひずみレベルと剛性低減率・減衰の関係¹⁾を図-7に示す。また、時刻歴の剛性変化を考慮するため、自然地盤の非線形性は図-8に示す修正 R-O モデルで設定した。

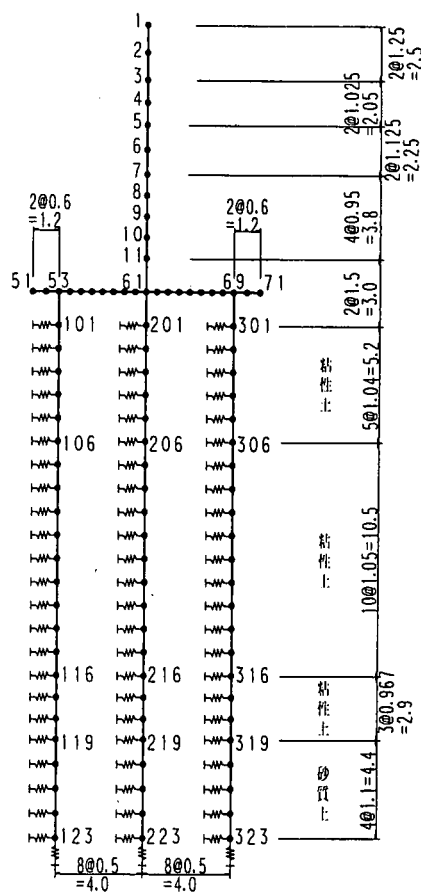


図-9 2次元骨組みモデル

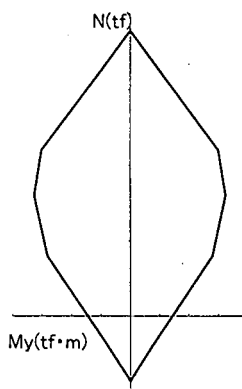


図-10 N-M相関

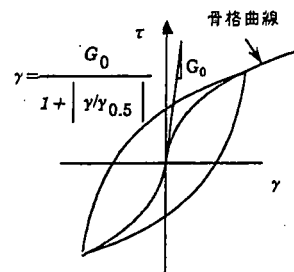


図-11 修正 H-D モデル

(2) 基礎と地盤の連成解析モデルについて

a) モデルの概要

解析に用いた連成解析モデルは、柱、フーチングおよび杭を梁要素、地盤をばね要素でモデル化した。作成した解析モデルを図-9に示す。

b) 杭の非線形特性

杭部材の非線形性は軸力変動を考慮した。杭のN-M相関図を図-10に示す。

c) 地盤ばねの非線形特性

基礎と地盤の連成解析に用いる地盤ばねの非線形特性は、地盤耐力の上限値を明確に考慮できる図-11に示す修正 H-D モデル²⁾を用いた。

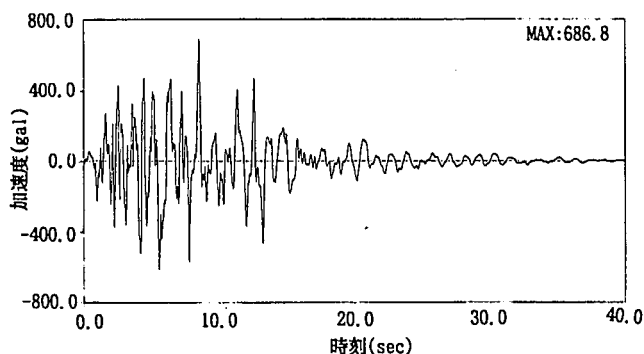


図-12 引き戻し前の地表面波形

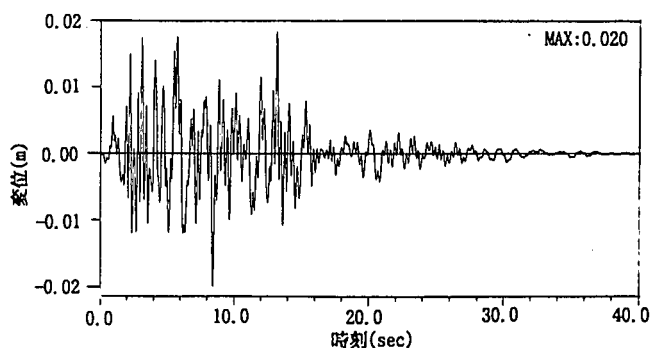


図-14 応答変位波形 (層境界：節点 No. 1)

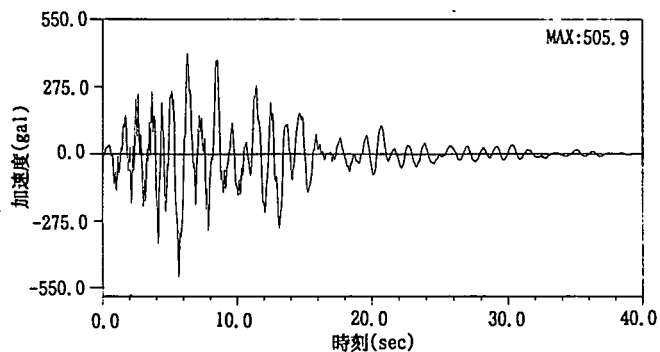


図-13 SHAKE による引き戻し後の基盤波形

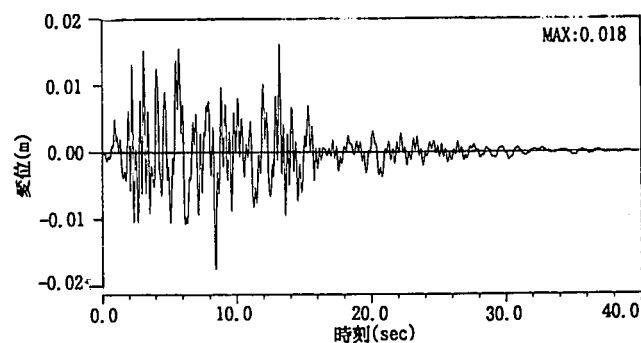


図-15 応答変位波形 (層境界：節点 No. 6)

6. 入力地震動の作成

基礎と地盤の連成解析では、基盤波を入力地震動として用いる必要がある。道路橋では、基盤波の設定はされておらず、入力基盤波としては以下に示す2通りが考えられるが、本稿では②を採用した。

① 鉄道橋で用いられる観測波形

兵庫県南部地震・神戸ポートアイランド (GL-79m) NS 成分

② 道路橋に用いられる振幅調整をした地表面波形を1次元重複反射理論(SHAKE)を用いて基盤波形に引き戻して使用する。

今回、地表面波には、タイプⅡ・Ⅱ種地盤の兵庫県南部地震・JR鷹取駅構内地盤上 (NS成分) の観測波形を振幅調整したものを用いた。引き戻し前のこの地表面波形を図-12に、SHAKEにより引き戻した基盤波形を図-13に示す。

7. 自然地盤の地震応答解析結果

地盤の非線形特性に修正 R-0 モデルを用いて自然地盤の地震応答解析を行った結果、得られた杭部材の各節点の応答変位波形のうち、層境界の応答変位波形を図-14～図-17に示す(節点番号は図-6のモデル図を参照)。これらの図をみてわかるように、地盤の応答変位波形は、全て相似形で地盤から地表面に上がるに連れて最大変位が増幅していくことがわかる。また、

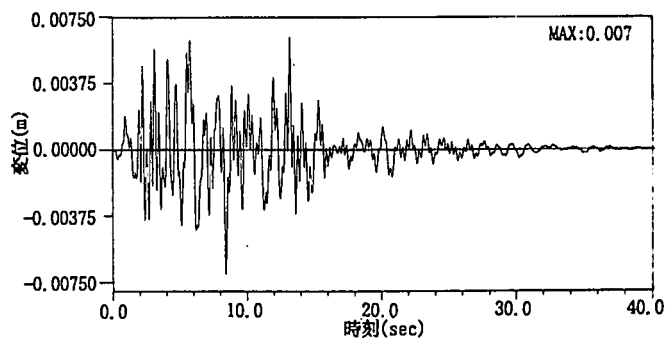


図-16 応答変位波形 (層境界：節点 No. 16)

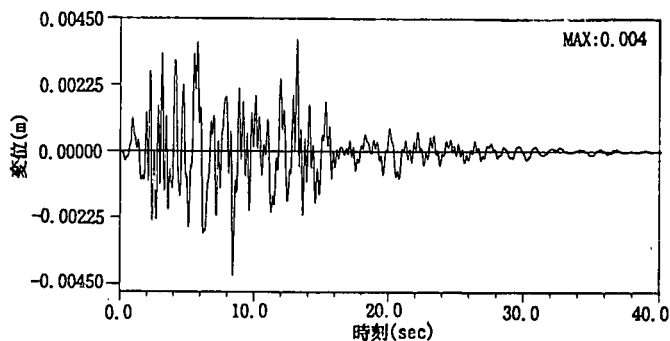


図-17 応答変位波形 (層境界：節点 No. 19)

地盤種別がⅡ種地盤であることから、最大変位は地表面でも2.0cm程度であった。

なお、連成解析では、ここに示した応答変位を地盤からの入力として杭部材に地盤ばねを介して入力している。

表-1 固有値解析の結果

振動 次数	固有振動数 (Hz)	固有周期 (sec)	有効質量比	
			橋軸 方向	鉛直 方向
1次	1.210	0.826	0.664	0.000
2次	6.146	0.163	0.000	0.989
3次	7.295	0.137	0.206	0.000
4次	14.972	0.067	0.027	0.000
5次	25.469	0.039	0.000	0.008

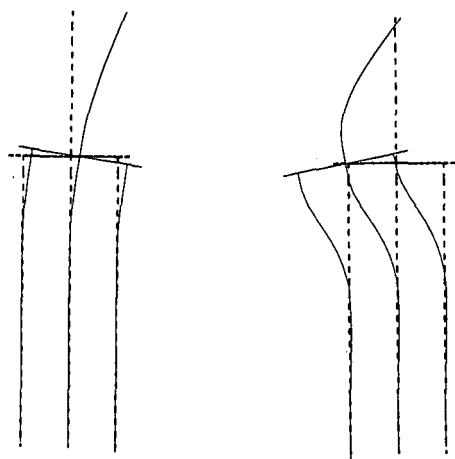


図-18 振動モード図(1次)

図-19 振動モード図(3次)

8. 基礎と地盤の連成モデルの地震応答解析結果

(1)固有値解析結果

基礎と地盤の連成モデルの固有値解析の結果を表-1に示す。この表をみてわかるように、有効質量比の高い1次と3次を主要な2モードとして選定し、これらを用いてレーリー減衰の設定を行った。1次と3次の振動モード図を図-18、図-19に示す。

(2)動的非線形解析結果

連成モデルを用いた動的非線形解析の結果を以下に図示した。橋脚天端の応答加速度波形を図-20に示すが、橋脚天端の最大応答加速度は530gal程度で、保耐法で設定した基礎の設計水平震度1.07（加速度換算：1070gal）の半分程度しか応答しなかった。次に、杭頭の応答変位波形を図-21に、杭頭の応答せん断力波形を図-22に示す。また、杭頭および層境界（節点 No. 106 のみ）の履歴曲線を図-23、図-24に示すが、地表面の方が層境界より明らかに塑性化が進行していることがわかる（節点番号は図-9のモデル図を参照）。

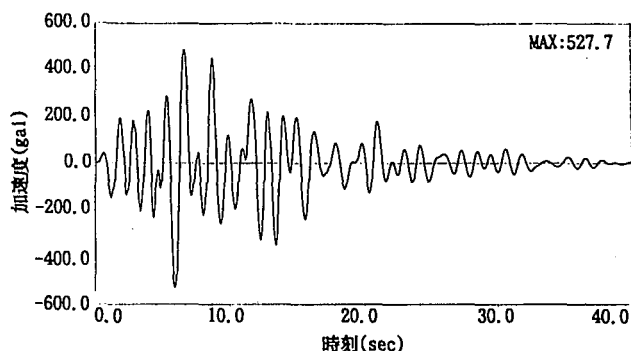


図-20 橋脚天端の応答加速度波形（節点 No. 1）

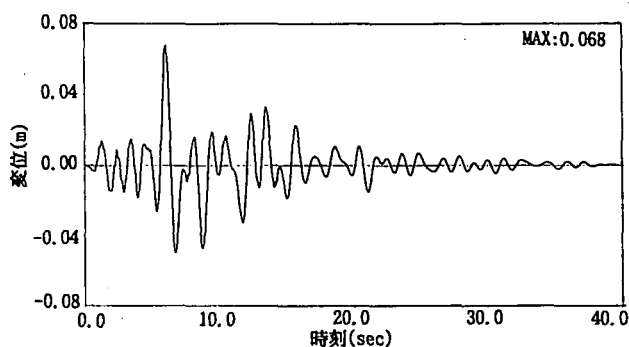


図-21 杭頭の応答変位波形（部材 No. 101）

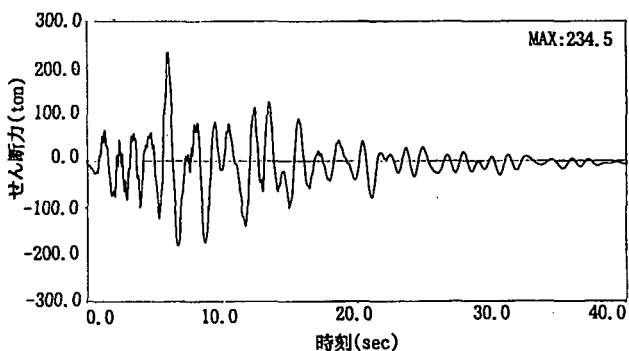


図-22 杭頭の応答せん断力波形（部材 No. 101）

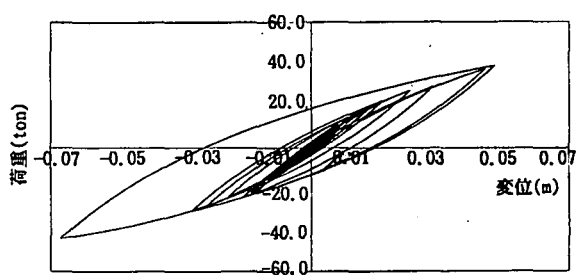


図-23 杭頭の履歴曲線（節点 No. 101）

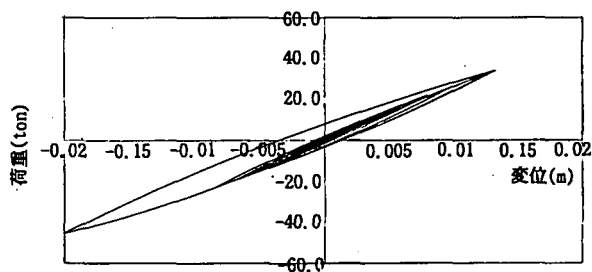


図-24 層境界の履歴曲線（節点 No. 106）

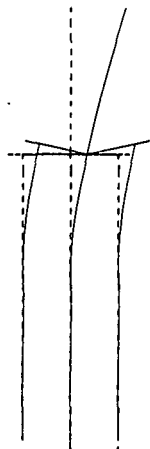


図-25 最大変位図

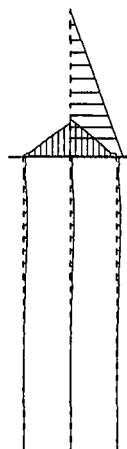


図-26 最大曲げモーメント

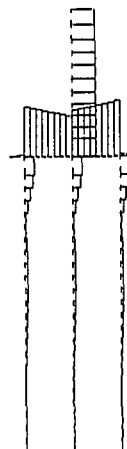


図-27 最大せん断図

表-2 杭体の各部材における最大せん断力

部材 番号 (1列目)	最大 せん 断力 (tf)	部材 番号 (2列目)	最大 せん 断力 (tf)	部材 番号 (3列目)	最大 せん 断力 (tf)	せん断 耐力 (3本分) (tf)	判 定
101	234	201	236	301	245	358	OK
103	86	203	88	303	95	271	OK
110	68	210	68	310	69	237	OK
115	26	215	26	315	26	224	OK

さらに、最大変位図を図-25 に、最大曲げモーメント図を図-26 に、最大せん断力図を図-27 にそれぞれ示す。

(3)安全性の判定

a)変位、押込み支持力および曲げ耐力の照査

安全性照査のうち、変位、押込み支持力、曲げ耐力の結果は割愛するが、いずれも十分制限値内に収まり安全性は確保されている。なお、杭は塑性化しなかった。

b)せん断耐力

最大せん断力の一覧を表-2に示す。ここでは、杭体の配筋は4断面とし、それぞれの断面でせん断力が最大となる部材を抽出した。

このようにせん断力は全てせん断耐力内に収まり、安全性は確保された。

9. 保耐法と動的非線形解析結果の比較

杭頭の最大せん断力について、保耐法と動的非線形解析結果の比較を表-3に示す。このように保耐法では、耐力オーバーとなったせん断力は、非線形解析では半分以下となりせん断耐力内に収まった。これは、保耐法では基礎の設計水平震度を躯体が終局耐力に達する震度の1.1倍相当の荷重に対して行っているためであり、本解析対象とした橋脚では結果的にこれが過大となったと考えられる。

表-3 保耐法と動的非線形解析結果の比較

解析法	杭頭の最大せん断力(tf)			せん断 耐力(tf)	判定
	1列目	2列目	3列目		
保耐法	554	553	572	358	OUT
動的解析	234	236	245	358	OK

10. まとめ

本稿では、地盤を相互ばねで、構造物を杭基礎も含む全体系の梁要素でモデル化した2次元多質点骨組みモデルを用いて動土圧も考慮した動的非線形解析を行い、杭基礎の保耐法による照査結果との比較を行った。その結果、以下のことが判明した。

- ① 変位および押込み支持力に関しては、保耐法、動的非線形解析ともに安全性は確保された。
- ② 曲げについても保耐法、動的非線形解析ともに塑性化せずに安全性は確保された。
- ③ せん断については、保耐法では耐力オーバーとなったが、動的非線形解析では、耐力内に収まり安全性は確保された。

以上のことから、既設構造物の基礎の耐震性能照査に対しては、杭基礎の保耐法による照査の結果、制限値オーバーとなる場合、即基礎の補強というのは合理的ではなく、構造条件・地盤条件にもよるが、地盤と構造物の動的相互作用効果を厳密に考慮した連成解析を行えば、制限値内に収まり安全性が確保される可能性があることがわかった。

しかしながら、設計としての基礎と地盤の連成解析の手法は確立されておらず、今後、非線形性の設定等を含めて確立する必要がある。

参考文献

- 1) 岩崎・常田・吉田：洪積粘性土の動的変形・強度特性について、第15回土質工学会論文集 1980.6
- 2) 岩上憲一・大塚久哲・久納淳司：地盤と構造物の動的相互作用を考慮した杭基礎の耐震設計法に関する研究、第25回地震工学研究発表会講演論文集 1999.7