

# 等価線形解析に基づく RC 造建物-杭-地盤連成系を対象とした 耐震診断法に関する研究

## STUDY ON SEISMIC EVALUATION OF SOIL-PILE-RC STRUCTURE SYSTEM BASED ON EQUIVALENT LINEAR ANALYSIS

山添 正稔\*, 前田 匡樹\*\*, 岡野 創\*

*Masatoshi YAMAZOE, Masaki MAEDA and Hajime OKANO*

This study examines the equivalent linearization analysis by a sway model which expresses a superstructure on pile foundations considering of the nonlinearity of a soil-pile system, and we propose the seismic evaluation method based on the above analysis. This seismic evaluation method consists of the decision of the failure mode of a superstructure and a pile foundation using the curve of relation of the ductility factor between a superstructure and a pile head, the evaluation of the ductility factor of a superstructure and a pile head by the equivalent linearization analysis, and the decision of the necessity of seismic reinforcement based on the result. In addition to this method, we propose another method consisting of the individual evaluation of the ductility factor without using the sway model. The proposed method is applied to a building which was damaged to pile foundations during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake, and the validity of the method is confirmed by this examination.

**Keywords :** *Seismic evaluation, Soil-pile-RC Structure system, Equivalent linearization analysis, Nonlinear interaction, Sway model,*

*The 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake*

耐震診断法, RC 造建物-杭-地盤連成系, 等価線形解析, 非線形相互作用, Sway モデル, 2011 年東北地方太平洋沖地震

### 1. はじめに

既存の中低層 RC 造建物では、1995 年兵庫県南部地震の被害を契機に、主に学校建物などの公共性の高い建物を対象として、耐震診断基準<sup>1)</sup>に沿った耐震診断、耐震補強が行われるようになってきている。ただし、現行の耐震診断は、検討対象が杭基礎建物であっても杭基礎の耐震性は評価対象とされずに、上部構造のみを対象とした方法となっている。

しかしながら、2011 年東北地方太平洋沖地震では、上部構造の耐震診断を行い、その結果に基づいて耐震補強が予定されていた建物が、上部構造の被害は小破から中破程度に留まったが、杭基礎の被害による建物の沈下や傾斜によって被災度区分は大破と判定され、結果的には取り壊しとなった事例も見られている<sup>2)</sup>。この事例は、上部構造と杭基礎の両方の耐震性を評価していれば、杭基礎の補強が必要と判定される場合でも、現行の方法では補強の要否の判定対象が上部構造のみであるため、建物全体に対しては合理的な補強としない場合もあることを示している。

以上のことから、今後、杭基礎建物を対象に、建物の地震後の継続使用性や、合理的な耐震補強の要否判定も含めた耐震性を評価することを考えた場合、杭基礎の耐震性評価を含む耐震診断法が必要になるものと考えられる。

杭基礎の耐震診断法については、文献<sup>3),4),5)</sup>などにおいて検討が行われて、文献<sup>3),4)</sup>の研究の考え方をまとめた形で基礎構造の耐震診断指針(案)<sup>6)</sup>も提案されている。しかしながら、これらの既往の研

究による耐震診断法は、杭基礎の耐震性の評価を主な目的としたものであり、基本的には上部構造は評価対象外となっている。文献<sup>3)</sup>では上部構造と基礎の一体モデルを用いる方法も提案されているが、時刻歴解析を含む方法であり、従来の耐震診断法の考え方とは性質をやや異にするものであると考えられる。

以上に示した既往研究、および先に述べた地震被害と耐震診断の関係を踏まえると、杭基礎建物の耐震診断法として、上部構造と杭基礎の応答バランスを適切に評価した上で、両者の耐震性を合わせて評価する方法が必要になると考えられる。この場合、上部構造と杭基礎のどちらが破壊するか、あるいは両方破壊するかを判別する方法、すなわち上部構造と杭基礎の破壊モードを判別する方法があれば、杭基礎を含めた耐震診断法の構築に有用であると考えられる。

そこで本研究では、上部構造と杭基礎の破壊モードの判別法と、それを用いた耐震診断法の提案を目的として検討を行う。まず、杭基礎建物の地震時応答を時刻歴解析によらずに評価することを目的として、杭基礎-地盤系の非線形性を考慮した 2 質点系の Sway モデルによる等価線形化法について検討を行う。次に、上部構造と杭基礎-地盤系の耐震診断法を提案する。ここでは、上記の Sway モデルの等価線形化法に基づく詳細法と、上部構造と杭基礎の個別評価に基づく簡便法の 2 種類の手法を提案する。最後に、以上で検討した等価線形化法および耐震診断法を、2011 年東北地方太平洋沖地震で被災した杭基礎の学校建物<sup>2)</sup>に適用して、上部構造と杭基礎の耐震性について検討する。

\* (株)小堀鐸二研究所 博士(工学)

\*\* 東北大学大学院工学研究科 教授・博士(工学)

Kobori Research Complex Inc., Dr. Eng

Prof., Graduate School of Engineering, Tohoku University, Dr. Eng.

## 2. 地盤ばねの非線形性を考慮した Sway モデルの等価線形化法

本章では、上部構造と杭基礎-地盤系の耐震診断法に用いることを目的として、非線形の Sway ばねを考慮した上部構造と基礎の 2 質点系の Sway モデルによる等価線形化法について検討する。

### 2.1 Sway モデルの設定方法

本検討での等価線形化法による地震時応答評価では、図 1 に示すように、上部構造-杭基礎一体モデルを、非線形の Sway ばねを考慮した上部構造と基礎の 2 質点系の Sway モデルに置換する。このように、杭基礎建物を 2 質点系の Sway モデルまで簡略化するが、これは、ここで目的としている杭基礎を含む耐震診断法の構築には、杭基礎-地盤系の簡略なモデルが必要であると考えたためである。

本検討での Sway ばねの復元力特性の設定方法を図 2 に示す。ここでは、上部構造-杭基礎一体モデルから上部構造を取り除いた杭基礎-地盤系のみモデルを設定し、これを用いた静的解析によって評価される杭頭水平力と杭頭変形の関係を、Sway ばねの復元力特性として設定する。その際、上部構造-杭基礎一体モデルの解析方法と同等とするために、図 2 に示すように、地盤応答解析によって評価される地盤変形(杭先端位置に対する地盤の相対変形)の最大値分布を作用させてから杭頭を加力して、杭頭水平力と杭頭変形の関係を評価する。これによって、地盤変形による杭基礎と杭周ばねの塑性化の影響が含まれた Sway ばねの復元力特性が評価される。

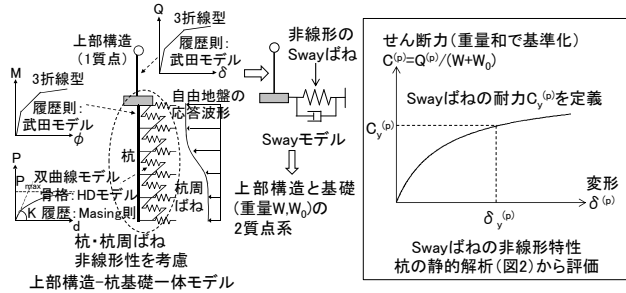


図 1 本検討で設定する解析モデル

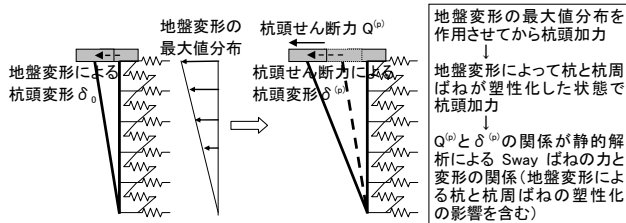


図 2 Sway ばねの非線形性の設定方法

### 2.2 解析モデルの設定

等価線形化法による応答評価に用いる検討用解析モデルを以下のように設定する。

#### (1) 解析対象建物と解析モデルの設定

建物階数は、耐震診断で一般的に対象とする中低層程度の RC 造建物を想定して、3,5,7 階建ての 3 種類とした。3 階建ての場合の上部構造の階高と重量を表 1 に示す。5,7 階建てについても、最上階とそれ以外の階、および基礎の単位面積当たりの重量を 3 階建てと同様に設定し、階高を 4m とした。

建物の平面規模を図 3 に示す。建物は一般的な板状建物を想定し、長辺方向を柱梁のみからなるラーメン架構、短辺方向を耐震壁付きと仮定した。検討対象は、本検討の目的が上部構造と杭基礎の破壊

モードの評価であることを踏まえて、地震時に上部構造と杭基礎のいずれにも被害が生じる可能性のある長辺方向とした。杭配置を図 3 に合わせて示す。杭は中低層 RC 造建物で一般に用いられる PHC 杭とした。杭径は、既往の建物例を参照して、3,5,7 階建てそれぞれで 400,450,500φ を基本とし、比較のためにそれより 1 サイズ大きい場合と小さい場合を合わせて設定した。

解析では、上部構造を表 1 に示す係数を用いて 1 質点系に縮約し、杭は質点を有する 1 本の曲げせん断棒に集約して、図 1 に示す上部構造-杭基礎一体モデルを設定した。上部構造は 3 折線型の復元力特性を有するせん断型モデルとし、杭の曲げ変形には、長期軸力時の曲げ解析による  $M-\phi$  関係に基づいて 3 折線型の復元力特性を設定した。終局点はコンクリートの圧縮縁ひずみが 0.3% となり、圧壊に至る点とした。杭の各質点には地盤との相互作用を表わす杭周ばねを取り付け、その初期ばね値は、後述の地盤応答解析で求めた等価地盤定数を用いて 3 次元薄層法によるリング加振解から評価し、水平ばね、せん断ばねとしてモデル化した<sup>7)</sup>。杭周ばねには、杭と地盤の相対変位により生じる非線形性を HD モデルにより考慮した。

等価線形化法では、この上部構造-杭基礎一体モデルから上部構造を取り除いた杭基礎-地盤系のみモデルを用いて、2.1 節に示したように静的解析により杭基礎-地盤系の復元力特性を評価した。これを Sway ばねの復元力特性として、非線形の Sway ばねを考慮した 2 質点系の Sway モデルを設定した。

#### (2) 解析パラメータの設定

解析パラメータは上部構造と杭基礎-地盤系の耐力とする。3 階建てについて、耐力に応じて設定した両者の復元力特性を図 4 に示す。

図 4(a)の上部構造の復元力特性の耐力は、検討対象とした柱梁のみからなる図 3 の長辺方向の一般的な耐力の範囲として、上部構造の重量で無次元化したせん断力係数  $C_y^{(a)}$  で表わした 0.3~1.0 とした。上部構造の第二折点における降伏変形角  $R_y$  は、耐震診断<sup>1)</sup>での靱性指標  $F$  値=1 のせん断破壊型の建物を想定して  $R_y=1/250$  とした。

表 1 上部構造の階高と重量

階	階高(m)	単位面積重量 (kN/m <sup>2</sup> )	重量W <sub>i</sub> (kN)	ΣW <sub>i</sub> (kN)	1質点系への縮約
3	4	10	3600	3600	β <sub>u</sub> =1となる高さ: 建物高さの0.78倍 有効質量: 全質量の0.86倍
2	4	12	4320	7920	
1	4	12	4320	12240	
基礎	-	15	5400	17640	

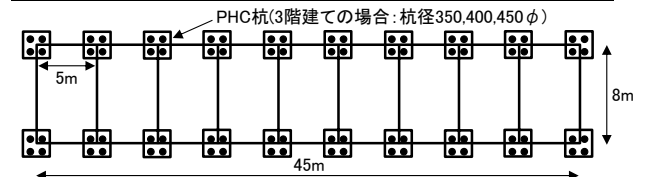


図 3 建物の平面規模と杭配置および杭諸元

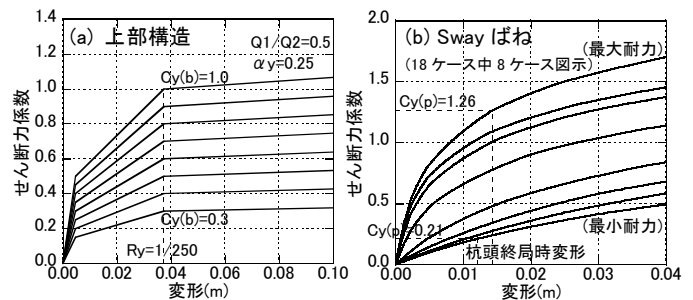


図 4 上部構造と Sway ばねの復元力特性

図 4(b)の杭基礎-地盤系の復元力特性の耐力は、杭基礎-地盤系のみのモデルの静的解析で、杭頭塑性率が終局点の塑性率となった時点での杭頭水平力とした。ここで、塑性率は第二折点の曲率に対する比率とした。さらに、それを上部構造と基礎の重量の和で基準化したものを杭基礎-地盤系の耐力  $C_y^{(p)}$  と定義した。これによって、上部構造の耐力  $C_y^{(b)}$  と直接比較することが可能となるようにした。

このようにして設定した杭基礎-地盤系の耐力  $C_y^{(p)}$  を、3 階建ての場合について図 4(b)に示す。ここでは、地盤の  $V_s$  を後述の表 2 のように、杭基礎地盤で一般的に表れる値として、表層 5m を  $V_s 100 \sim 200\text{m/s}$  の 6 ケースとすることにより、0.21~1.26 の 18 ケース(=杭径:3 ケース×地盤の  $V_s$ :6 ケース)となった。ただし、同図には最大と最小耐力を含む 8 ケースのみ示している。

### 2.3 地盤応答解析

Sway モデルへの入力地震動を評価する際には、表 2 に示した地盤モデルを用いて地盤応答解析を行う。地盤モデルは、工学的基盤以浅の表層は砂質土とし、その非線形特性は、多地点の原位置採取試料による室内試験結果に基づいて提案された、砂質土に対する非線形特性<sup>8)</sup>を用いて HD モデルを設定した。解析に用いる入力地震動は図 5 に示した告示波の乱数位相とし、原波を表 2 に示した地盤モデルの工学的基盤 ( $V_s 400$  層)に入力した。

地盤応答は逐次非線形時刻歴解析により評価した。これは、2.5 節に示す上部構造-杭基礎一体モデルの時刻歴解析で用いる地盤応答の時刻歴波形を求めることと、せん断ひずみの大きさが最大で約 4% となり、SHAKE による等価線形解析の適用範囲外と考えられることが理由である。また、Sway モデルの等価線形化法に用いる地盤応答は、手法の一貫性を保つため、本来であれば限界耐力計算<sup>9)</sup>における表層地盤増幅係数  $G_s$  を用いて評価するのが適切であるとされるが、ここでは一体モデルの入力条件と合わせるため、等価線形化法の場合も逐次非線形時刻歴解析結果を用いるものとする。

解析結果の例として、建物の基礎底面位置 (GL-1.5m) での地盤応答波の加速度応答スペクトルを図 6 に示す。表層地盤の  $V_s 100, 200$  の 2 ケースの結果である。この図より、地盤の卓越周期は、 $V_s 100$  で

表 2 地盤の S 波速度分布

GL(m)	S波速度(m/s)						深さ方向杭配置
	100	110	120	150	180	200	
-5	100	110	120	150	180	200	杭頭GL-1.5m 杭端G-11m
-10	150	160	170	200	230	250	
-	400(工学的基盤)						

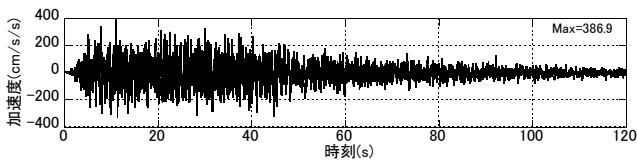


図 5 工学的基盤への入力地震動の加速度波形

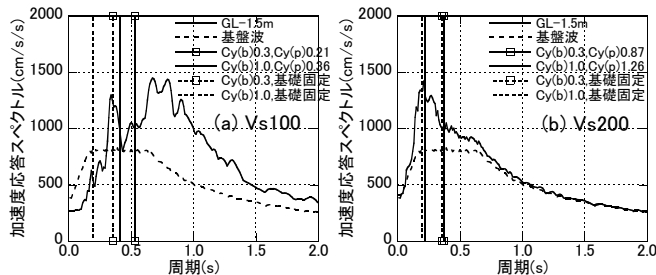


図 6 基礎底面位置での地盤応答波の加速度応答スペクトル

は約 0.7~0.8 秒、 $V_s 200$  では約 0.2 秒である。また、図中には、本検討でのケース設定における建物の基礎固定モデルと Sway モデルの最長と最短周期を縦線で示している。このうち、Sway モデルの周期は、 $V_s 100$  では地盤周期より短周期側、 $V_s 200$  では地盤周期と同程度から長周期側となっている。また、ここでは割愛したが、この間の  $V_s$  では  $V_s 100$  と  $200$  の中間的な関係となっている。これより、建物周期の設定が、地盤の卓越周期に対してある周期帯に偏ったものではなく、ある程度広い周期帯の設定となっていることが分かる。

### 2.4 等価線形化法の解析方法

杭基礎建物を対象とした等価線形化法としては、既往の研究<sup>10)</sup>において、上部構造-杭基礎-地盤一体モデルを静的増分解析によって等価 1 自由度系に縮約し、入力地震動の  $S_a-S_d$  曲線との関係から応答値を評価する方法も示されているが、ここでは文献(11),(12)を参考に、等価剛性によるモーダルアナリシスの考え方をういて、上部構造と Sway ばねの変形を収束計算で評価する方法について検討する。そのフローを図 7 に示し、各ステップで用いる式を以下に示す。

St.4: 上部構造の履歴減衰定数  $h_i^{(p)}$  は、 $i-1$  ステップ  $s$  次の第二折点に対する塑性率  $\mu_{i-1}^{(b)}$  を用いて式(1)により算定した。 $\mu_{i-1}^{(b)}$  が 1 を超える場合の評価式は限界耐力計算<sup>9)</sup>で用いられる式とした。減衰定数の初期値  $h_{mi}$  は 0.03 とした。

$$\left. \begin{aligned} {}_s h_i^{(p)} &= h_{mi} & \mu_{i-1}^{(b)} &\leq 1 \\ {}_s h_i^{(p)} &= 0.25 \cdot \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{\mu_{i-1}^{(b)}}} \right) + h_{mi} & \mu_{i-1}^{(b)} &> 1 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

St.4: Sway ばねの履歴減衰定数  $h_i^{(p)}$  は、Sway ばねの復元力特性を HD モデルと仮定して、その復元力特性の剛性低下率が 0.5 となるときの変位  $\delta_{0.5}^{(p)}$  を求めて式(2)により算定した。

$${}_s h_i^{(p)} = \frac{2}{\pi} \left[ 1 + 2 \frac{\delta_{0.5}^{(p)}}{\delta_{i-1}^{(p)}} \left\{ 1 - \left( 1 + \frac{\delta_{0.5}^{(p)}}{\delta_{i-1}^{(p)}} \right) \ln \left( 1 + \frac{\delta_{i-1}^{(p)}}{\delta_{0.5}^{(p)}} \right) \right\} \right] \quad (2)$$

なお、Sway ばねの復元力特性に相当する、上部構造-杭基礎一体モデルの時刻歴解析から求めた杭頭せん断力-杭頭変形の履歴減衰分の関係について、①杭と杭周ばねを非線形とした場合と、②杭周ばねのみを非線形とし、杭の曲げ剛性を①の時刻歴解析から求めた最大曲率時の等価剛性として、かつ履歴減衰を考慮しない等価線形とした場合を比較すると、①と②の面積は概ね同程度となり、杭の履歴減衰の考慮の有無の影響は小さいことを別途確認している。これより、Sway ばねの履歴減衰は、杭周ばねに対して設定した HD モデルで概ね表現されると考えて式(2)によって算定した。

St.4: Sway ばねの粘性減衰定数  $h_i^{(p)}$  は、Sway ばねの等価剛性  $k_i^{(p)}$  と減衰係数  $C^{(p)}$  および Sway モデルの等価周期  $T_i$  を用いて式(3)により算定した。Sway ばねの減衰係数  $C^{(p)}$  は、2.2 節で設定した上部構造-杭基礎一体モデルのモード減衰係数を評価し、その減衰係数のうち基礎が変形するモードに対する減衰係数を用いた。

$${}_s h_i^{(p)} = \frac{\pi \cdot C^{(p)}}{k_i^{(p)} \cdot T_i} \quad (3)$$

St.5: St.4 で求めた 3 種類の減衰定数を用いて、歪エネルギー比例型を仮定して  $i$  ステップ  $s$  次の系全体の等価減衰定数  $h_i$  を求める。これを用いて限界耐力計算<sup>9)</sup>で用いられる式(4)によりスペクトル低減係数  $F_{h,i}$  を求めて、これを入力地震動の減衰定数  $h=5\%$  の変位応答

スペクトル  ${}_s S_{D(h=0.05)_i}$  に乗ることにより、系全体の等価減衰定数  ${}_s h_i$  に対する変位応答スペクトル  ${}_s S_{D(h)_i}$  を求める。

$${}_s F_{h,i} = \frac{1.5}{1+10 \cdot {}_s h_i} \quad (4)$$

St.6.7: 以上で求めた刺激関数と変位応答スペクトルから、上部構造と Sway ばねの 1 次と 2 次の変形を式(5)により算定し、式(6)の SRSS 合成により  $i$  ステップでの変形  $\delta_i^{(b)}$  と  $\delta_i^{(p)}$  を求める。

$$\begin{aligned} {}_s \delta_i^{(b)} &= ({}_s \beta_{i,s} u_i^{(b)} - {}_s \beta_{i,s} u_i^{(p)}) \cdot {}_s S_{D(h)_i} \quad (s=1,2) \\ {}_s \delta_i^{(p)} &= {}_s \beta_{i,s} u_i^{(p)} \cdot {}_s S_{D(h)_i} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\delta_i^{(b)} = \sqrt{\sum_{s=1}^2 \{ {}_s \delta_i^{(b)} \}^2}, \delta_i^{(p)} = \sqrt{\sum_{s=1}^2 \{ {}_s \delta_i^{(p)} \}^2} \quad (6)$$

St.8.9.10: この変形と、 $i$  ステップでの初期値として設定した  $i-1$  ステップの変形の誤差を求めて収束判定を行い、1%以下となった場合に計算を終了する。

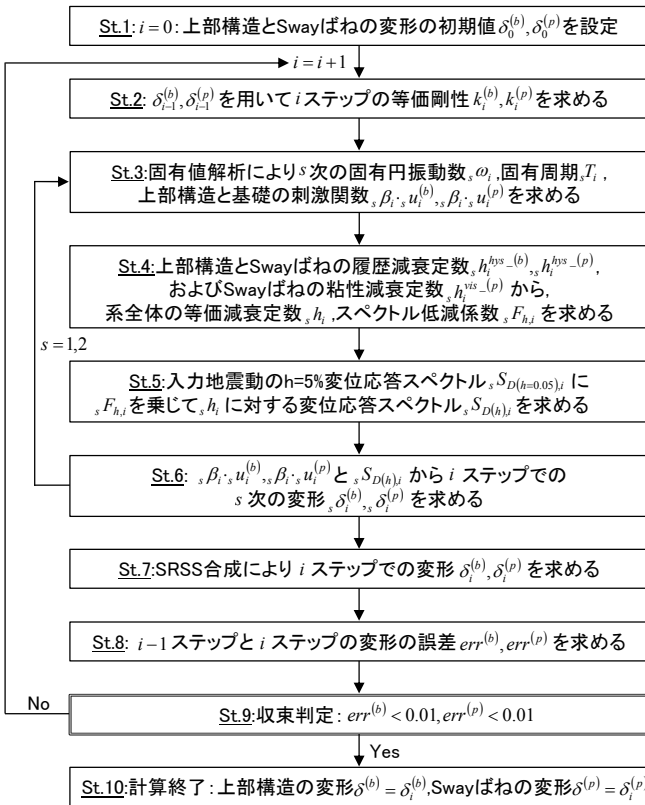


図 7 Sway モデルの等価線形化法の収束計算フロー

## 2.5 等価線形化法による地震時応答評価

以上の解析モデルと解析方法を用いて、等価線形化法による Sway モデルの地震時応答評価を行い、上部構造-杭基礎一体モデルの時刻歴解析結果との比較により等価線形化法の妥当性の検討を行う。

### (1) 解析条件

上部構造-杭基礎一体モデルの時刻歴解析では、2.3 節で求めた地盤応答を、杭の各質点に取り付けた杭周ばねを介して入力した。復元力特性の履歴則は上部構造、杭ともに武田モデルとした。減衰については、連成系の 1 次周期に対して、上部構造は 3%の瞬間剛性比例型とした。杭は、1%の瞬間剛性比例型とした場合、上部構造と杭基礎-地盤系の耐力差が大きくて杭の剛性低下が大きくなるケー

スでは、応答が発散して適切な解が得られなかった。今回のモデルでは、杭頭のみ剛性低下が大きくなり、それより深い位置では概ね第二折点以前に留まるため、杭については 1%の初期剛性比例型とした。なお、応答が発散せずに解が得られるケースは、瞬間剛性比例型と初期剛性比例型で同程度の結果となり、減衰の設定の影響は小さいことを別途確認している。

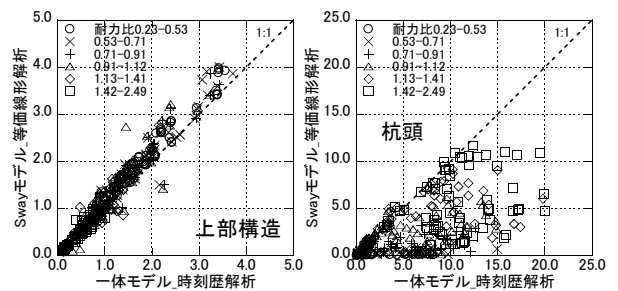
等価線形化法の入力地震動は、一体モデルの入力条件と合わせるために、杭基礎-地盤系のモデルを用いて時刻歴解析により評価した基礎底面位置での基礎入力動とした。その応答スペクトルを設定する際には、等価周期の縮小<sup>11)</sup>を考慮した。ここでは、文献 11)に示されている縮小係数 0.82 を参考に、0.6~1.0 の範囲を 0.02 刻みとして縮小係数を設定し、まず各値に対する上部構造と杭頭塑性率を求めた。次に、それぞれの時刻歴解析結果との誤差の和が最小となる縮小係数をケースごとに求めた。

### (2) 解析結果

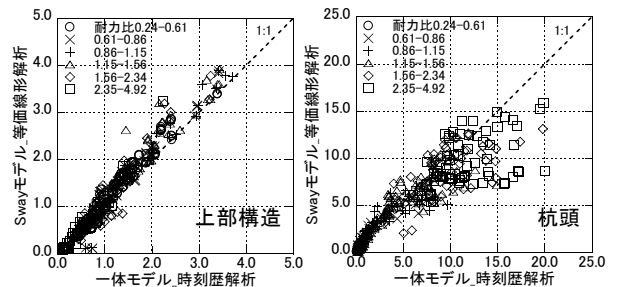
等価線形化法と時刻歴解析による解析結果の比較として、上部構造と杭頭塑性率の比較を図 8 に示す。ここで、等価線形化法による杭頭塑性率は、2.1 節で述べた杭基礎-地盤系のみのモデルを用いた静的解析から得られる、杭頭塑性率と杭基礎-地盤系(Sway ばね)の変形の関係を用いて評価した。

まず、図 8(a)には、Sway ばねの復元力特性の評価の際に、地盤変形の影響を無視した場合の結果を示した。これより、上部構造塑性率は、時刻歴解析の塑性率が 2~3 となる一部のケースで等価線形化法の結果がやや大きめであるが、それ以外の等価線形化法の結果は時刻歴解析結果と概ね対応している。一方、杭頭塑性率は、等価線形化法の結果は時刻歴解析結果よりも小さめの評価である。

次に、地盤変形の影響を考慮した場合の結果を図 8(b)に示す。上部構造塑性率は、図 8(a)に示した結果と概ね同様の傾向であり、上部構造の応答に与える地盤変形の考慮の有無の影響は小さくなっている。一方、杭頭塑性率は、地盤変形を無視した場合と比較して、時刻歴解析に近づく傾向となっている。ただし、時刻歴解析での塑



(a) 地盤変形を無視した場合



(b) 地盤変形を考慮した場合

図 8 等価線形化法と時刻歴解析による塑性率の比較(1)

(3.5.7 階建ての結果のまとめ、耐力比  $C_y^{(b)}/C_y^{(p)}$  によって分けて表示)

性率が 10 を超えるようなケースでは、等価線形化法の結果はやや小さめの評価である。これは、2.1 節で述べたように、杭基礎-地盤系については Sway ばねのみによる簡略なモデル化としているため、杭の塑性化が大きくなる場合の評価精度が十分ではないことが要因と考えられる。この点については、今後検討の余地が残されている。

以上の結果は乱数位相の告示波の場合であるため、等価線形化法の精度に対する位相特性の影響検討として、八戸位相と神戸位相の告示波による結果を図 9 に示す。ここでは地盤変形を考慮した場合を示している。図 8(b) に示した乱数位相の場合と比較して概ね同様の傾向であることから、位相特性の影響は小さいものと推測される。

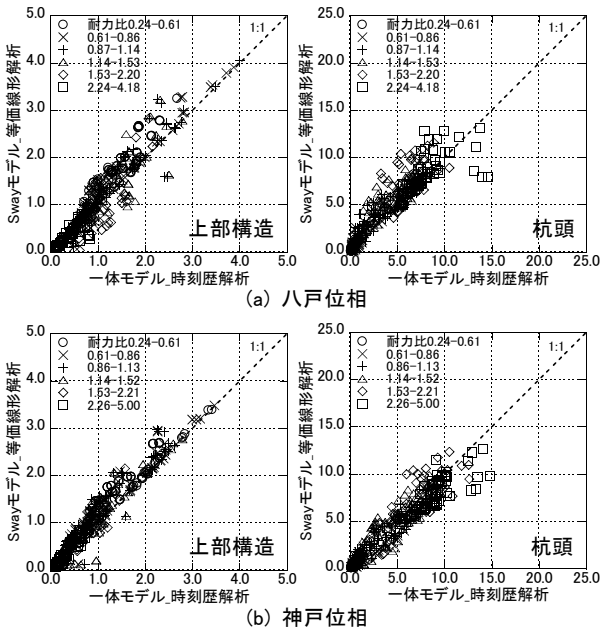


図 9 等価線形化法と時刻歴解析による塑性率の比較(2)

また、等価周期の縮小係数の設定方法について検討するために、縮小係数をケースによらず文献 11) に示される 0.82 とした場合の、乱数位相での塑性率の比較を図 10 に示す。図 8(b) と比較して、上部構造塑性率は等価線形化法の方がやや大きめとなり、杭頭塑性率は、1:1 の線に対するばらつきが大きくなっている。この傾向は、八戸位相と神戸位相の場合も同様であることを別途確認している。

このように、縮小係数をケースによらず一律 0.82 とした場合は、ケースごとに縮小係数を設定した場合よりも等価線形化法の精度はやや低下する結果となっている。このような傾向となる要因としては、文献 13) で考察しているように、等価線形化法の入力地震動は地盤増幅を考慮したものとしているため、その応答スペクトルに山谷があり、これによって応答が決まる等価周期が縮小係数の変化に対

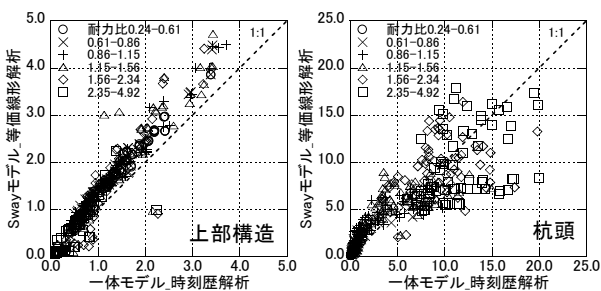


図 10 縮小係数 0.82 の場合の塑性率の比較(乱数位相)

して敏感であることが考えられる。

以上のことから、縮小係数の設定方法としては、精度がやや低くなることを理解した上で 0.82 とすることも考えられるが、より適切な設定方法については今後の課題である。

このような課題はあるものの、地盤変形を考慮して杭基礎-地盤系の復元力特性と杭頭塑性率-杭頭変形関係を評価することにより、等価線形化法と時刻歴解析による上部構造と杭頭塑性率は概ね対応する結果となった。これより、ここで検討した等価線形化法は、杭基礎建物の応答評価手法として概ね妥当な手法であると考えられる。

### 3. 上部構造と杭基礎-地盤系の耐震診断法の検討

本章では、前章の検討を踏まえて、上部構造と杭基礎-地盤系の耐震診断法について検討する。

#### 3.1 上部構造と杭基礎-地盤系の变形推移曲線の評価

##### (1) 上部構造と杭基礎-地盤系の復元力特性と応答値の関係

前章の等価線形化法による検討で評価した、上部構造と杭基礎-地盤系の復元力特性と応答値の関係の例を図 11 に示す。この図は、3 階建て、上部構造の耐力  $C_y^{(b)}$  0.6、杭径  $350\phi$  とした場合の結果であり、この上部構造の復元力特性に対して、杭基礎-地盤系の耐力  $C_y^{(p)}$  を表層  $V_s$  の違いにより凡例の値とした 6 ケースの復元力特性を重ね描いて示している。

この図より、例えば杭基礎-地盤系の復元力特性の耐力を  $C_y^{(p)}$  0.21 とした場合は、等価線形化法の結果は力の釣り合いによって●のシンボルでの応答値となり、上部構造と杭基礎-地盤系の変形はそのシンボルでの  $\delta^{(b)}$ ,  $\delta^{(p)}$  となる。このように、上部構造と杭基礎-地盤系の変形の関係は、両者の復元力特性に基づく力の釣り合いによって決まることが分かる。

これ以外の応答値も含めて、等価線形化法の結果からはシンボルで示したある 1 点での力の釣り合いによる変形の関係が得られるが、この力の釣り合いを、解析で対象としている上部構造のせん断力の範囲内、すなわち図中に  $Q^{(b)}$  とした矢印の範囲内で考えることにより、両者の変形の関係が連続的に評価されることになる。本検討では、この連続的な変形の変形推移曲線と呼ぶこととし、次の(2)でその評価方法について検討する。

##### (2) 上部構造と杭基礎-地盤系の变形推移曲線の評価

###### a. 杭基礎-地盤系のせん断力と変形の評価方法

変形推移曲線の評価にあたり、基礎に作用する慣性力を考慮して、杭基礎-地盤系のせん断力と変形を評価する方法について検討する。ここでは、モーダルアナリシスに基づいて、1 次モードの力の釣り合いを考える。

まず、1 次モードの上部構造のせん断力  ${}_1Q^{(b)}$  は式(7)で表わされる。

$${}_1Q^{(b)} = m^{(b)} \cdot {}_1\beta \cdot {}_1u^{(b)} \cdot {}_1S_a \quad (7)$$

ここで、 $m^{(b)}$  は上部構造の質量、 ${}_1\beta \cdot {}_1u^{(b)}$  と  ${}_1S_a$  は 1 次モードの上部構造の刺激関数と入力地震動の加速度応答スペクトルである。

また、1 次モードの杭基礎-地盤系のせん断力  ${}_1Q^{(p)}$  は式(8)で表わされる。

$${}_1Q^{(p)} = m^{(p)} \cdot {}_1\beta \cdot {}_1u^{(p)} \cdot {}_1S_a + m^{(p)} \cdot {}_1\beta \cdot {}_1u^{(p)} \cdot {}_1S_a \quad (8)$$

ここで、 $m^{(p)}$  は基礎の質量、 ${}_1\beta \cdot {}_1u^{(p)}$  は 1 次モードの杭基礎-地盤系の刺激関数であり、この式に示されるように、 ${}_1Q^{(p)}$  は上部構造のせ

ん断力である右辺第一項に、基礎に作用する慣性力である右辺第二項を足し合わせることによって評価される。

この式(8)より、杭基礎-地盤系のせん断力について、第二項に示される基礎に作用する慣性力を考慮した場合を ${}_1Q^{(p)}$ 、無視した場合を ${}_1Q_0^{(p)}$ として両者の比 $\alpha$ を求めると、 $\alpha$ は式(9)ようになる。

$$\alpha = \frac{{}_1Q^{(p)}}{{}_1Q_0^{(p)}} = \frac{\{m^{(b)} \cdot \beta_1 u^{(b)} + m^{(p)} \cdot \beta_1 u^{(p)}\} \cdot S_a}{m^{(b)} \cdot \beta_1 u^{(b)} \cdot S_a} = 1 + \frac{m^{(p)} \cdot u^{(p)}}{m^{(b)} \cdot u^{(b)}} \quad (9)$$

ところで、この式(9)では ${}_1Q_0^{(p)} = {}_1Q^{(b)}$ であることから、 ${}_1Q^{(b)}$ を上部構造の復元力特性上のある値とし、 ${}_1Q^{(p)}$ の初期値を ${}_1Q^{(b)}$ として、その値での等価剛性を用いた固有値解析により $u^{(b)}, u^{(p)}$ を求める。これを用いて式(9)により $\alpha$ を求めて、 ${}_1Q^{(p)} = \alpha \cdot {}_1Q^{(b)}$ を用いて次ステップの $u^{(b)}, u^{(p)}$ と $\alpha$ を求める。以上の手順を、前ステップに対する $\alpha$ の誤差が0.01以下となるまで繰り返すことによって $\alpha$ を求めて、それを用いて ${}_1Q^{(b)}$ に対する ${}_1Q^{(p)} = \alpha \cdot {}_1Q^{(b)}$ を求める。以上を、上部構造の復元力特性上の任意の ${}_1Q^{(b)}$ に対して繰り返し、検討対象範囲の上部構造の ${}_1Q^{(b)}, \delta^{(b)}$ に対する杭基礎-地盤系の ${}_1Q^{(p)}, \delta^{(p)}$ を求める。

### b. 変形推移曲線の評価

変形推移曲線の評価方法を図12に示す。図11に示したケースのうち、杭基礎-地盤系の復元力特性の耐力を $C_y^{(p)} 0.21$ とした場合を図12(a)に取り上げて、変形推移曲線の評価方法を説明する。

まず、上部構造の復元力特性上の第二折点での力の釣りを考えると、第1ステップでは ${}_1Q^{(p)} = {}_1Q^{(b)}$ として式(9)により $\alpha$ を求める。これを用いて a で述べた手順によって最終ステップでの

${}_1Q^{(p)} = \alpha \cdot {}_1Q^{(b)}$ を求める。このとき、1次モードでの上部構造のせん断力 ${}_1Q^{(b)}$ と杭基礎-地盤系のせん断力 ${}_1Q^{(p)}$ の釣り合いが成り立つ。これによって得られた両者の変形 $\delta^{(b)}, \delta^{(p)}$ を、図12(b)のように縦軸を上部構造の変形、横軸を杭基礎-地盤系の変形としてプロットすることにより、上部構造の第二折点での変形の関係が得られる。

さらにこの評価を、検討対象とした上部構造のせん断力の範囲内の任意の点で連続的に行うことにより、その範囲内での変形推移曲線が太実線のように得られる。この曲線は、図中に●で示した等価線形化法による変形の関係とほぼ一致している。比較として、図12(b)には、上部構造の復元力特性上の任意の点において ${}_1Q^{(p)} = {}_1Q^{(b)}$ として、基礎に作用する慣性力を無視して評価した変形推移曲線を細実線で示しているが、慣性力を考慮した場合に対して杭基礎-地盤系の変形が小さめに評価され、等価線形化法による変形の関係と対応していないことが分かる。

以上の結果は、その他5ケースの杭基礎-地盤系の復元力特性の場合についても同様となっている。これより、a で述べた変形推移曲線の評価方法が妥当であることが確認される。

## 3.2 塑性率推移曲線の評価

### (1) 塑性率推移曲線の評価方法

3.1節で評価した変形推移曲線に基づいて、上部構造と杭基礎の破壊モードの判別を行う。その判別に用いるために、上部構造と杭基礎-地盤系の変形の関係である変形推移曲線を、上部構造と杭頭塑性率の関係である塑性率推移曲線に変換する。

変形推移曲線の縦軸の上部構造の変形は、復元力特性の第二折点の変形を用いて第二折点に対する塑性率に変換する。横軸の杭基礎-地盤系の変形は、2.1節で述べた杭基礎-地盤系の復元力特性の評価の際に求められる、杭基礎-地盤系の変形と杭頭塑性率の関係を用いて杭頭塑性率に変換する。

### (2) 破壊モード判別のクライテリアの設定

(1)の方法で変形推移曲線を塑性率推移曲線に変換したことにより、塑性率推移曲線の中に破壊モード判別のクライテリアを設定することが可能となる。本検討では、上部構造については、第二折点の塑性率1と終局点の塑性率を設定する。終局点の塑性率は、 $F$ 値=1に対する終局限界変形角を $R_u = 1/250$ とすることにより1とした。

杭頭塑性率についても、第二折点の塑性率1と終局点の塑性率を設定する。終局点の塑性率は、2.2節で述べたように、コンクリートの圧縮ひずみが0.3%となり圧壊に至る点の塑性率とした。

### (3) 塑性率推移曲線の評価結果

(1)の方法で評価した塑性率推移曲線を図13に示す。図12(b)で変形推移曲線を示したケースに対する結果である。図中のシンボルは塑性率の関係に変換した等価線形化法の結果である。

図中には、(2)で破壊モード判別のクライテリアとして設定した上部構造と杭頭塑性率の線を示している。上部構造については、第二折点の塑性率1と、(2)で述べた終局点塑性率(=1)、杭頭塑性率については、塑性率1とコンクリート圧壊点とした終局点の塑性率をクライテリアとして設定している。

## 3.3 上部構造と杭基礎の破壊モードの判別法

3.2節で評価した塑性率推移曲線を用いて、上部構造破壊、杭基礎破壊、あるいは両方破壊からなる杭基礎建物の破壊モードを判別する方法、すなわち破壊モードの判別法について以下に示す。

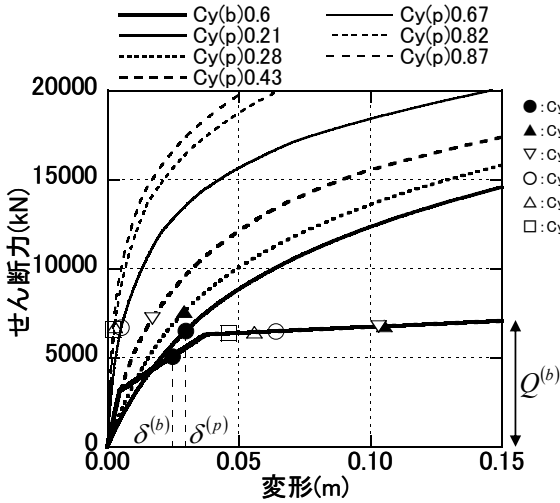


図11 上部構造と杭基礎-地盤系の復元力特性と応答値の関係

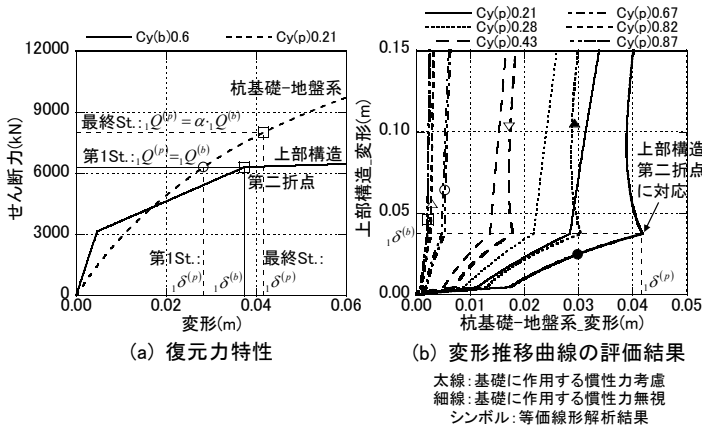


図12 変形推移曲線の評価方法

塑性率推移曲線を示した図 13 を、図中の破壊モード判別のクライテリアに応じて A~F の 6 領域に分割する。分割した図を塑性率推移曲線による破壊モードの判別図と呼び、塑性率推移曲線がこの判別図のどの領域を通るかによって破壊モードを判別する方法を考える。図 13 では通る領域が表 3 に示す 3 ケース想定され、その中の各領域とクライテリアの関係よりそれぞれの破壊モードが判別される。

このように、塑性率推移曲線が、クライテリアに応じて領域分割した破壊モードの判別図のどの領域を通るかによって、上部構造破壊、杭基礎破壊、あるいは両方破壊からなる杭基礎建物の破壊モードを判別するものとする。

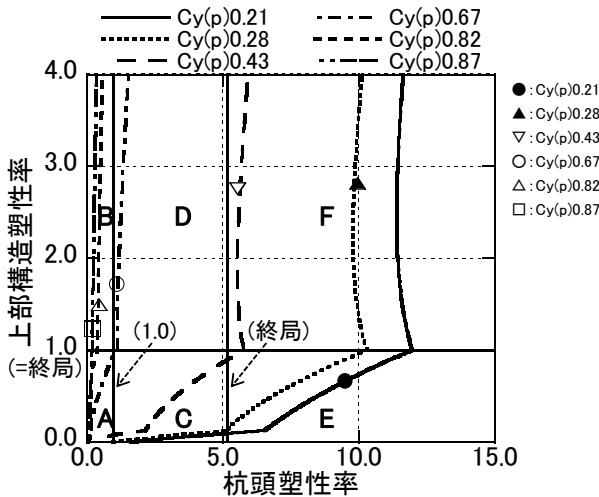


図 13 塑性率推移曲線の評価結果と破壊モード判別のクライテリアの設定

表 3 破壊モードの判別

通る領域	各領域	塑性率		破壊モードの判別	
		上部構造 $\mu(b)$	杭頭 $\mu(p)$	上部構造	杭基礎
A,B	B	$\mu(b) > 1 (=終局)$	$\mu(p) \leq 1$	破壊	無被害
A,C,D	C	$\mu(b) \leq 1 (=終局)$	$1 < \mu(p) \leq 終局$	無被害	終局以下の損傷
	D	$\mu(b) > 1 (=終局)$	$1 < \mu(p) \leq 終局$	破壊	終局以下の損傷
A,C,E,F	C	$\mu(b) \leq 1 (=終局)$	$1 < \mu(p) \leq 終局$	無被害	終局以下の損傷
	E	$\mu(b) \leq 1 (=終局)$	$\mu(p) > 終局$	無被害	破壊
	F	$\mu(b) > 1 (=終局)$	$\mu(p) > 終局$	破壊	破壊

領域Aは  $\mu(b) \leq 1 (=終局)$ ,  $\mu(p) \leq 1$  より上部構造、杭基礎ともに無被害

### 3.4 Sway モデルの等価線形化に基づく耐震診断法 (詳細法)

#### (1) 塑性率の絶対値の評価

3.3 節に示したように、塑性率推移曲線が破壊モードの判別図のどの領域を通るかによって破壊モードを判別する。ただし、この方法では破壊モードが判別されるのみで、上部構造と杭頭塑性率の絶対値がどの程度となるかは評価されない。耐震診断としては、最終的には塑性率の絶対値の評価が必要となるため、破壊モードの判別から塑性率の絶対値の評価までのフローを図 14 に示した。

まず、上部構造と杭基礎-地盤系の復元力特性から塑性率推移曲線の評価し、それによって破壊モードの判別を行う。

その判別において、塑性率推移曲線が領域 A,B を通る場合は、第 2 章で検討した Sway モデルによる等価線形化法によって上部構造と杭頭塑性率を評価することを基本とする。ただし、この場合は領域 B において上部構造破壊となり、一方、杭頭塑性率は 1 以下で、杭基礎の被害は生じないと判別されるため、基礎固定モデルにより上部構造塑性率を評価することも考えられる。または、現行の耐震診断<sup>1)</sup>による  $I_s$  値評価により、上部構造のみを対象として耐震性を

評価することも考えられる。

領域 A,C,D を通る場合、または領域 A,C,E,F を通る場合は、杭頭塑性率が 1 以上となり、杭基礎の被害が生じると判別されるため、Sway モデルの等価線形化法により塑性率を評価する。これにより、上部構造と杭基礎の応答バランスを考慮した上で、両方の耐震性を評価することになる。

#### (2) 補強の要否の判定

このようにして評価した塑性率の絶対値によって、上部構造と杭基礎の補強の要否を判定する。ここでは、塑性率の絶対値が位置する領域と、上部構造および杭頭塑性率の終局塑性率の大小関係により、表 4 のように判定する。

#### (3) 提案手法のまとめ

以上により、破壊モードの判別と塑性率の絶対値の評価、およびその結果に基づく補強の要否の判定までの方法を示した。このうち、塑性率の絶対値の評価においては、第 2 章で検討した Sway モデルによる等価線形化法を用いることを基本とした評価方法としている。

この等価線形化法は、上部構造と杭基礎の応答バランスを評価することから、これを詳細法と位置付けて、以上に示した Sway モデルによる等価線形化法に基づく耐震診断法を詳細法として提案する。

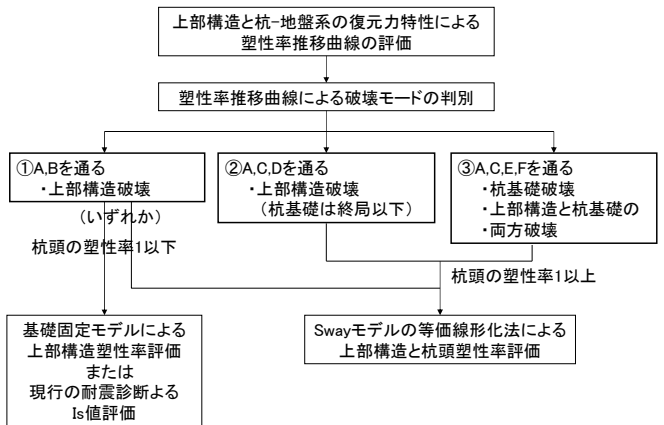


図 14 Sway モデルの等価線形化法に基づく耐震診断法の手順

表 4 補強の要否の判定

領域	塑性率		補強の要否の判定	
	上部構造 $\mu(b)$	杭頭 $\mu(p)$	上部構造	杭基礎
A,C	$\mu(b) \leq 1 (=終局)$	$\mu(p) \leq 終局$	不要	不要
B,D	$\mu(b) > 1 (=終局)$	$\mu(p) \leq 終局$	必要	不要
E	$\mu(b) \leq 1 (=終局)$	$\mu(p) > 終局$	不要	必要
F	$\mu(b) > 1 (=終局)$	$\mu(p) > 終局$	必要	必要

### 3.5 上部構造と杭基礎の個別評価に基づく耐震診断法 (簡便法)

前節までに提案した詳細法は、収束計算による等価線形化法を含むため、実用上はこれよりも簡便な方法が望まれることも考えられる。そこで、上部構造と杭頭塑性率を Sway モデルを用いずに個別に評価し、それに基づいて補強の要否の判定を行う方法を、詳細法との対比で簡便法と呼ぶこととし、その方法を以下に検討する。

#### (1) 塑性率評価方法

3.4 節に示した詳細法では、図 13 に示す塑性率推移曲線が破壊モードの判別図のどの領域を通るかによって破壊モードを判別したが、塑性率推移曲線の特長により、上部構造の第二折点、すなわち上部構造耐力  $Q_y^{(b)}$  時の杭頭塑性率の大きさによって塑性率推移曲線が通る領域が決まり、これにより破壊モードが決まることが分かる。

そこで、まず杭頭塑性率については、3.1節で述べた方法により、基礎に作用する慣性力を考慮して上部構造耐力時の杭基礎-地盤系の変形を求めて、それを用いて杭頭塑性率を求める。なお、この方法では、杭基礎-地盤系の復元力特性が曲線状のため、計算ステップごとの ${}_1u^{(b)}, {}_1u^{(p)}$ の変化が小さい。その影響で、基本的には第一ステップの $\alpha_1 \equiv$  第二ステップの $\alpha_2$ となる。そこで、ここでは繰り返し計算は行わずに、 $\alpha_2$ による $Q^{(p)} = \alpha_2 \cdot Q_y^{(p)}$ とそれに対応する変形 $\delta^{(p)}$ を杭基礎-地盤系のせん断力と変形とする。

また、上部構造塑性率についても簡便に評価するために、杭基礎とは分離して基礎固定モデルの等価線形化法により評価する。ここでは、限界耐力計算法<sup>9)</sup>に従って、入力地震動の要求スペクトル( $S_a - S_d$ 曲線)と上部構造の耐力スペクトル(復元力特性)から遷移曲線を求めて、この遷移曲線と耐力スペクトルの交点から上部構造の変形を求めて塑性率を評価する。ここで、遷移曲線を求める際の上部構造の履歴減衰定数とそれによるスペクトル低減係数は、2.4節のSwayモデルの等価線形化法で用いた式と同じ式(1),(4)を用いた。

(2) 塑性率評価結果

簡便法による塑性率を、3階建て、杭径350φの場合を例として図15(b)に示す。図15では、簡便法の結果と比較するために、Swayモデルの等価線形化法である詳細法の結果を図15(a)に示している。この図では、各ケースに対する詳細法の結果を、上部構造および杭頭塑性率と破壊モード判別のクライテリアの大小関係に応じて領域分割し、領域ごとにシンボルを分けてプロットしている。なお、2.2節で設定した検討パラメータの場合、詳細法による上部構造と杭頭塑性率はいずれか一方あるいは両方が終局を超え、領域A,Cの結果が得られなかった。そこで、ここでは6領域に対応する結果が全て得られるように、上部構造の耐力 $C_y^{(b)}$  1.2,1.4,1.6 と、表層 $V_s$ を180~300m/sまで20m/s刻みとして求めた、杭基礎-地盤系の耐力 $C_y^{(p)}$  0.82~1.03までの7ケースを組み合わせた全21ケース(= $C_y^{(b)}$ :3ケース× $C_y^{(p)}$ :7ケース)を追加している。

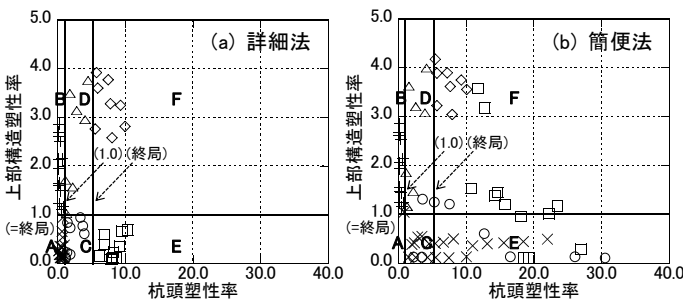


図15 詳細法と簡便法による上部構造と杭頭塑性率の比較

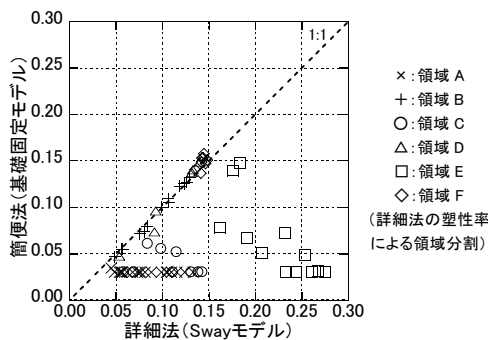


図16 詳細法と簡便法による等価減衰定数

この各ケースに対する簡便法の結果を、破壊モード判別のクライテリアによる領域分割とは無関係に、詳細法のシンボルを用いてプロットしたものが図15(b)である。

両者の結果を比較すると、簡便法の結果が詳細法の結果と同程度となり、同じ領域にプロットされるケースがある一方で、詳細法の結果よりも大きくなって、異なる領域にプロットされるケースもある。すなわち、簡便法の結果は、上部構造と杭頭塑性率ともに、詳細法の結果と同程度か、それよりも大きめの評価となっている。

このうち、まず上部構造塑性率がこのような傾向となる要因について考察するために、詳細法と簡便法の等価減衰定数を比較したものを図16に示す。等価減衰定数は、図15で上部構造塑性率が1以上の領域B,D,Fに位置して、相互作用の影響が比較的小さい+、Δ、◇のケースでは、上部構造の履歴減衰が支配的となるため、詳細法と簡便法は同程度である。一方、図15で上部構造塑性率が1以下の領域A,C,Eに位置して、相互作用の影響が比較的大きい×、○、□のケースでは、簡便法が杭基礎-地盤系の減衰を考慮しない基礎固定モデルによる評価のために、詳細法の方が簡便法よりも大きくなっていて、特に、杭頭塑性率が大きい□のケースでは、詳細法と簡便法の差が他のケースと比較して大きくなっている。

このように、詳細法の等価減衰定数は簡便法と同程度か、または大きくなるため、減衰定数5%の入力地震動の $S_a - S_d$ 曲線から減衰を考慮して求められる建物の全体変形は、詳細法の方が簡便法以下となる。さらに詳細法は、簡便法以下となる全体変形を上部構造と杭基礎-地盤系で負担するために、上部構造の変形から評価される上部構造塑性率については、上記のように簡便法の結果が詳細法とほぼ同じか、それよりも大きくなるものと考えられる。

また、杭頭塑性率については、簡便法の場合、上部構造から作用する上限値である上部構造耐力時の杭基礎-地盤系のせん断力から変形を求めて、それを用いて杭頭塑性率を求めている。そのため、簡便法の結果は、詳細法の結果と同程度か、それよりも大きめの評価となるものと考えられる。

なお、この傾向については、上部構造と杭頭塑性率ともに、図15以外の他のケースについても同様となることを別途確認している。

(3) 補強の要否の判定

以上の検討から、簡便法の結果は、上部構造と杭頭塑性率ともに、詳細法の結果と同程度か、それよりも大きめの評価、すなわち安全側の評価となることを示した。そこで、ここではこの結果に基づく補強の要否の判定法について検討する。

まず、図15(b)の簡便法の結果を、破壊モード判別のクライテリアに応じて改めて領域分割する。ここでは6領域に分割される。

この6領域に分割された結果に対して、上部構造、杭基礎ともに終局塑性率との大小関係によって補強の要否を判定することとし、図17に示すように、①領域A,C、②領域B,D、③領域E、④領域Fの4領域に整理して判定を行う。この各領域に対する補強の要否の判定の考え方を次に述べる。

①領域A,Cの場合を図17(a)に示す。領域A,Cは上部構造、杭基礎ともに終局以下となる場合である。この場合は、簡便法によって塑性率を大きめに評価しても終局以下となることから、この時点で上部構造、杭基礎ともに補強不要と判定する。

②領域B,Dの場合を図17(b)に示す。領域B,Dは上部構造が終局



を超え、杭基礎が終局以下となる場合である。この場合は、簡便法によって塑性率を大きめに評価しても杭基礎は終局以下となるため、杭基礎は補強不要と判定され、上部構造が補強の要否の判定対象となる。上部構造は、簡便法によって塑性率を大きめに評価していることを考慮して、安全側の判断をするか否かを選択する。安全側の判断をするのであれば上部構造補強と判定する。それに対して、簡便法は大きめの評価となっていると考えて、安全側の判断をしないのであれば、詳細法、すなわち Sway モデルの等価線形化法により塑性率を評価して、その結果を元に補強の要否の再判定を行う。

この他に、③領域 E は杭基礎が終局を超える場合、④領域 F は上部構造と杭基礎の両方が終局を超える場合であり、これらは②領域 B,D の場合と同様に判定を行う。

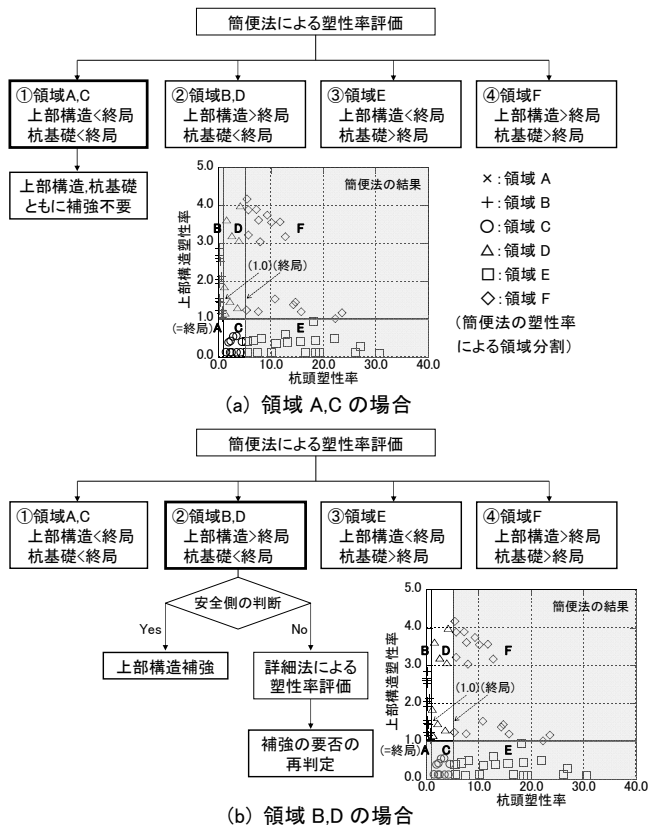


図 17 上部構造と杭基礎の個別評価に基づく耐震診断法の手順

ただし、この簡便法は、図 15 に示したように、特に詳細法で上部構造塑性率が終局以下となるケース (×,○,□で示したケース)、すなわち相互作用の影響が比較的大きいケースでは、簡便法で評価すると過度に安全側となる場合がある。このことから、簡便法の結果によって安全側の判断をする場合でも、詳細法による評価を行い、その結果を踏まえて総合的に補強の要否を判定することが望ましい。

### 3.6 提案手法の適用範囲

本検討では、中低層程度の板状建物の長辺方向を対象とした。この場合、Rocking の影響は小さいと考えて、第一次近似として Sway モデルを用いたため、板状建物の短辺方向や塔状比の高い建物など、Rocking の影響が大きい建物は適用範囲外となる。ただし、Rocking ばねを考慮しても手法の展開は同様可能であると考えられる。

これに関連して、杭応答に対する Rocking による変動軸力の影響は考慮していないため、上述した建物のように、その影響が大き

なる建物も適用範囲外となる。ただし、変動軸力の影響は、実際の杭基礎建物の耐震設計時の時刻歴解析でもまだまだ考慮されていないため、本研究で対象としたような耐震診断手法で変動軸力の影響を考慮するのは、次の段階の課題と考えられる。

また、本検討では PHC 杭を対象としているが、場所打ち杭などのその他の杭でも、復元力特性が評価され、耐震診断時に設定する終局レベルが等価線形化法の精度が維持される範囲内であれば適用可能であると考えられる。

なお、液状化地盤ではその地盤変形を用いること、根入れのある杭基礎では、それを考慮した杭基礎-地盤系の解析モデルを設定することによって、いずれの場合も本手法が適用可能であると考えられるが、今回は検討対象としていないため今後の検討が必要である。

## 4. 実建物への適用

本章では、前章までに検討した等価線形化法および耐震診断法を、2011 年東北地方太平洋沖地震で被災した杭基礎の学校建物<sup>2)</sup>に適用して、上部構造と杭基礎の耐震性について検討する。

### 4.1 建物概要と被害概要

建物は、宮城県大崎市古川に建つ、RC 造 3 階建ての杭基礎の学校建物であり、建設年代は昭和 54 年である。敷地地盤は表層 20m に N 値 10 前後の軟弱なシルト、中砂等が堆積している。杭は、GL-20m に表れる砂礫層を支持層とする、直径 350φ、杭長 20m の PC 杭が用いられている。

被害としては、上部構造には柱に損傷度 I~III 程度のせん断ひび割れが生じた程度であったが、杭頭の大きな損傷により建物の沈下、傾斜が生じて、これにより被災度区分は大破と判定された。

また、この建物は地震前に耐震診断が行われ、 $I_s$  値が判定指標値の 0.7 に満たないため、2012 年に耐震補強される計画であったが、杭基礎の被害による建物の沈下、傾斜のために、2011 年 11 月末時点で解体済みとなっている。

### 4.2 提案手法による耐震性評価

想定する入力レベルを K-NET 古川の観測記録<sup>2)</sup>の入力レベルとした場合について、提案手法による耐震性評価を行う。

等価 1 質点系に縮約した上部構造と杭基礎-地盤系の復元力特性を図 18、それを用いて評価した塑性率推移曲線を図 19 に示す。曲線が領域 A,C,E,F を通ることから、詳細法による塑性率の絶対値の評価では、Sway モデルによる等価線形化法を用いることになる。その結果は領域 E となり、これにより杭基礎破壊と判別され、補強の要否の判定では杭基礎補強と判定される。これに対して、簡便法での塑性率の絶対値は上部構造と杭頭塑性率ともに詳細法より大きくなり、領域 F となって上部構造と杭基礎の両方破壊と判別される。

簡便法の結果から補強の要否を判定する場合は、領域 F にあることから、安全側の判断をするのであれば、上部構造と杭基礎の両方補強と判定する。それに対して、簡便法は大きめの評価となっていると考えて、安全側の判断をしないのであれば、詳細法、すなわち Sway モデルによる等価線形化法により塑性率を評価して、その結果を元に補強の要否の再判定を行うことになる。その場合は、上記のように杭基礎破壊と判別され、杭基礎補強の判定となる。

この結果と実被害の対応について考えると、本建物は 4.1 節で述べたような杭基礎の被害が生じた。それに対して、詳細法では杭基

礎補強、簡便法では上部構造と杭基礎の両方補強と判定されており、実際の被害から考えられる補強の要否の判定と対応している。

ここで、本事例の時刻歴解析結果を図19に併記した。これより、詳細法による杭頭塑性率は時刻歴解析結果よりもやや大きめである。ただし、この事例のPC杭の場合、終局点の塑性率は2程度であり、精度は低いものの詳細法の結果により要補強と判定される。このことから、杭頭塑性率がある程度大きい場合の等価線形化法の精度向上が今後の課題であるが、今回の事例は現状の等価線形化法によって補強の要否が概ね適切に判定されているものと考えられる。

また、この事例以外では、文献14)で被害分析を行った学校建物についても別途検討を行っている。この検討では、杭基礎よりも被害が大きい上部構造については要補強の判定となり、実際の被害から考えられる補強の要否の判定と概ね対応する結果が得られている。

以上の結果から、これまでに検討した被害事例については、本検討で提案した杭基礎を含む耐震診断法によって、上部構造と杭基礎の両方の耐震性が概ね適切に評価されたものと考えられる。ただし、少数の事例検討に留まるため、提案手法の妥当性の確認のためには今後検討事例を蓄積していくことが必要である。

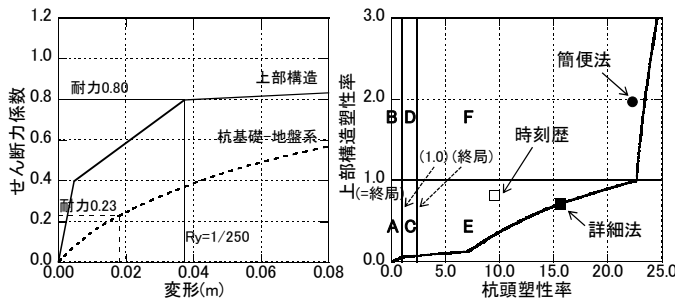


図18 上部構造と杭基礎-地盤系の復元力特性

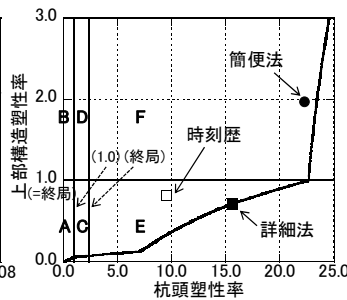


図19 塑性率推移曲線および詳細法と簡便法による評価結果

## 5. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- ① 2質点系のSwayモデルによる等価線形化法として、上部構造と杭基礎-地盤系の等価剛性を用いたモーダルアナリシスにより、両者の応答を評価する方法を示した。
- ② 杭基礎-地盤系の復元力特性を静的解析により評価する際に、地盤変形を作用させてから杭頭を加力した場合、等価線形化法と上部構造-杭基礎一体モデルの時刻歴解析による応答結果は概ね対応した。これより、ここで示した等価線形化法は、杭基礎建物の応答評価手法として概ね妥当な方法であることを確認した。
- ③ Swayモデルの上部構造と杭基礎-地盤系の復元力特性に基づく力の釣り合いから、両者の変形の変換関係を変形推移曲線として評価する方法を示した。
- ④ 変形推移曲線を変換して求めた塑性率推移曲線による上部構造と杭基礎の破壊モードの判別と、Swayモデルの等価線形化法を用いた塑性率の絶対値の評価、およびその結果に基づく補強の要否の判定までの方法を耐震診断法(詳細法)として提案した。
- ⑤ 詳細法よりも簡便な評価方法として、Swayモデルを用いずに上部構造と杭頭塑性率を個別に評価する方法について検討し、詳細法による塑性率評価を組み合わせることで補強の要否を判定する方法を耐震診断法(簡便法)として提案した。

- ⑥ 提案手法を2011年東北地方太平洋沖地震で杭基礎に被害を受けた学校建物に適用した場合、詳細法、簡便法ともに、実際の被害から考えられる補強の要否の判定と対応する結果となった。

本研究で提案した耐震診断法のうち、Swayモデルによる詳細法は、上部構造と杭基礎-地盤系の復元力特性を用いることにより、両者の耐震性を力学的な根拠に基づいて評価する方法である。これより、複数のパラメータ解析結果、あるいは実際の地震時の被害データなどの分析に基づいて評価する経験的な方法のように、建物条件や地盤条件が制限される方法と比較して、それらの条件によらない評価が可能と考えられる。また、簡便法は現在の杭基礎建物の設計に近い考え方であり、より実用的な方法である。以上より、提案手法は杭基礎建物の耐震診断法として有効な方法であると考えられる。

ただし、本手法は、3.6節に示した解析モデルの設定に起因する適用範囲がある。また、(1)Swayモデルの杭基礎-地盤系の復元力特性の評価の際に静的解析が必要であること、(2)等価線形化法の精度については検討の余地があることなど、杭基礎建物への実際の適用を考えた場合は検討課題がいくつか残る。

## 謝辞

本研究の実施にあたり、東北大学大学院源栄正人教授、植松康教授には、貴重な御意見、御議論を頂きました。厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 日本建築防災協会:2001年改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準-同解説、300pp.,2001.10
- 2) 迫田丈志、山添正稔、三辻和弥、前田匡樹:2011年東北地方太平洋沖地震により被災したRC造校舎の被害と沈下要因の検討 その1,2、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-2, pp.17-24,2012.9
- 3) 二木幹夫、杉本三千雄、小林勝巳、大槻明、森弘弘:既存建物における基礎・地盤の耐震性向上技術に関する研究、構造工学論文集、Vol.46B, pp.51-64,2000.3
- 4) 丸岡正夫、山下清、青木雅路、土屋富男、平井芳雄、椿原康則、藤村勝、角彰:既存建物基礎の耐震診断に関する一提案、日本建築学会技術報告集、第8号、pp.85-90,1999.6
- 5) 杉本三千雄、鬼丸貞友、杉本靖夫、大久保浩光:地震被害データに基づく建物基礎の耐震性能指標の提案、日本建築学会技術報告集、第21号、pp.85-90,2005.6
- 6) ベターリビング:基礎構造の耐震診断指針(案)、306pp.,2013.6
- 7) 宮本裕司、酒向裕司、古山田耕司、三浦賢治:1995年兵庫県南部地震の観測記録を用いた液状化地盤における杭基礎構造物の応答に関する解析的検討、日本建築学会構造系論文集、第493号、pp.23-30,1997.3
- 8) 古山田耕司、宮本裕司、三浦賢治:多地点での原位置採取試料から評価した表層地盤の非線形特性、第38回地盤工学会研究発表会、pp.2077-2078,2003.7
- 9) 建築物の構造関係技術基準解説書編集委員会:2007年版 建築物の構造関係技術基準解説書、720pp.,2007.8
- 10) 飯場正紀、梅村美孝、栗本修、井上芳生、秋田知芳、倉本洋、梁川幸盛、井上望:一体モデルの静的増分解析結果を用いた応答スペクトル法による集合住宅建物の地震応答算定 その1~4、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2, pp.99-106,2007.8
- 11) 岡野創、小鹿紀英、吉川和秀:高次モードを考慮した等価線形化法によるせん断型モデルの応答評価、日本建築学会構造系論文集、第591号、pp.113-121,2005.5
- 12) 吉川和秀、小鹿紀英、岡野創:地盤-構造物の相互作用と建物の耐力低下を考慮した等価線形化法、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2, pp.261-262,2006.9
- 13) 山添正稔、岡野創:地盤ばねの非線形性を考慮したSwayモデルによる等価線形化法、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2, pp.65-66,2013.8
- 14) 山添正稔、前田匡樹、三辻和弥、岡野創:2008年岩手・宮城内陸地震で小被害を受けたRC造学校建物の地震時応答に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第660号、pp.263-272,2011.2

# STUDY ON SEISMIC EVALUATION OF SOIL-PILE-RC STRUCTURE SYSTEM BASED ON EQUIVALENT LINEAR ANALYSIS

*Masatoshi YAMAZOE\* Masaki MAEDA\*\* and Hajime OKANO\**

\*Kobori Research Complex Inc., Dr. Eng

\*\*Prof., Graduate School of Engineering, Tohoku University, Dr. Eng.

The earthquake resistance of pile foundations is not evaluated in the current seismic evaluation method for RC buildings. However, a low-rise RC building of which seismic reinforcement of a superstructure had been planned based on a result of seismic evaluation was damaged to pile foundations, on the other hand, a superstructure had from minor to moderate damage, during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake. The building suffered severe settlement and tilting damage from the earthquake, and the building was demolished as a result.

This case means that the necessity of seismic reinforcement for an entire building is not determined rationally when the current seismic evaluation method is applied to a superstructure on pile foundations, and based on this, it is thought that the seismic evaluation method include the evaluation of the earthquake resistance of pile foundations is necessary for a superstructure on pile foundations.

Therefore, in order to apply to seismic evaluation of both a superstructure and a pile foundation, this study examines the equivalent linearization analysis by a sway model of two degree freedom which consists of a superstructure and a foundation considering of the nonlinearity of a soil-pile system, and the seismic evaluation method of a superstructure on pile foundations using it.

In the equivalent linearization analysis, the earthquake response of a superstructure and a soil-pile system is evaluated by the modal analysis using that equivalent stiffness.

In order to evaluate the relation of the response by this equivalent linearization analysis, the curve that shows the relation of deformation between a superstructure and a soil-pile system is evaluated based on the balance of those shear forces of the restoring force characteristics.

This curve of relation of deformation is converted into the curve of relation between the ductility factor of deformation of superstructure and the ductility factor of curvature of pile head. By this conversion, the criteria of decision of the failure mode of a superstructure and a pile foundation are set in the figure that shows the relation of the ductility factor. The figure is divided into some areas using these criteria, and the failure mode of a superstructure and a pile foundation is determined depending on the area that the curve passes.

We propose the seismic evaluation method which consists of the above decision method, the evaluation of the ductility factor of a superstructure and a pile head by the equivalent linearization method using the sway model, and the decision of the necessity of seismic reinforcement based on the result. In addition to this method, we propose another seismic evaluation method which consists of the method to evaluate individually the ductility factor of a superstructure and a pile head without using the sway model, and the decision of the necessity of seismic reinforcement based on the result. Since the latter evaluation method of the ductility factor is safely evaluation in comparison with the equivalent linearization analysis by the sway model, the latter decision of the necessity of seismic reinforcement is the method combined with the equivalent linearization analysis by the sway model.

The proposed method is applied to the above building which was damaged to pile foundations during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake. The necessity of seismic reinforcement by this method is generally in agreement with it which is estimated based on the actual damage mentioned above. The validity of the method is confirmed by this examination.

From the above examination, it is thought that the seismic evaluation method proposed in this study is the method that is effective for a superstructure on pile foundations.