

鉄道構造物の新しい杭基礎の耐震設計法

高瀬直輝¹・池亀真樹¹・棚村史郎¹・西村昭彦²

¹正会員 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部(〒185-8540東京都国分寺市光町2-8-38)

²フェロー会員 工博 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部(〒185-8540東京都国分寺市光町2-8-38)

新しく制定された「鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)」では、性能照査型の耐震設計法となり構造物が地震力を受けたときの応答値の算定は動的解析によることが基本となる。精度よく応答値を算定するためには、多自由度系の非線形時刻歴応答解析を実施することになるが、一般には時間と労力がかかる。そこで、合理的かつ簡便に応答値を算定する手法として所要降伏震度スペクトルを用いることとしている。新しい耐震設計法では、その所要降伏震度スペクトルを用いて応答値を算定する手法を非線形スペクトル法と呼ぶ。

本論文では、非線形スペクトル法による杭基礎の耐震設計の考え方や照査例を紹介する。

Key Words : Foundation, Seismic Design, Pile Foundation, Strength Demanded Spectra

1. はじめに

「鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)」(以下、耐震標準)による鉄道構造物の新しい耐震設計法では、構造物に必要なとされる耐震性能を設定し、想定する地震動に対して構造物がその性能を満足することを確認する性能照査型の設計法となることが特徴である。

従来と比較して設計で考慮する地震動が大きくなるため、杭基礎に損傷を許容する場合もあり、大きな変形領域での杭基礎の挙動を正確に把握することが重要となる。そのため、耐震標準では、地震時における構造物の応答値の算定を動的解析により行うことを基本としている。精度よく応答値を算定するためには、多自由度系の非線形時刻歴応答解析を実施することになるが、一般には時間と労力がかかる。そこで、耐震標準では、所要降伏震度スペクトルを用いた応答値の算定手法を非線形スペクトル法と呼ぶ。

本論文では、その非線形スペクトル法による杭基礎の耐震設計の考え方や照査例を紹介する。

2. 非線形スペクトル法による耐震設計の概要

(1)非線形スペクトル法による耐震設計の手順

非線形スペクトル法は、構造物の振動モードが比較的単純でかつ非線形化する部位が明確である場合に用いる。地盤条件や構造諸元が複雑な場合やより詳細な

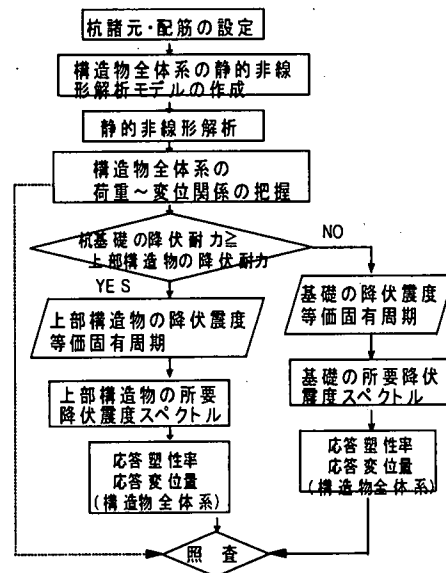


図-1 耐震設計の手順

検討を行う場合は、時刻歴動的解析法によることとする。時刻歴動的解析法は、基礎を支持ばねに置換する解析法と地盤と基礎および上部構造物の一体解析法に分類され、地盤条件や構造諸元等に応じて使い分けることとする。

非線形スペクトル法による杭基礎の耐震設計の手順を図-1に示す。所要降伏震度スペクトルは、地盤種別ごとに基礎用と上部構造物用があり、静的非線形解析により杭基礎と上部構造物の降伏耐力を比較し、適用するスペクトルを選択する。そして、所要降伏震度スペクトルから算定した応答値と静的非線形解析から得られる荷重-変位関係により耐震性能の照査を行う。

(2) 所要降伏震度スペクトル

所要降伏震度スペクトルは図-2に示しているように、縦軸に構造物の降伏震度を取り、応答塑性率ごとに等価固有周期と降伏震度との関係を図化したものである。したがって、降伏震度と等価固有周期が求まると、所要降伏震度スペクトル上でその交点を読みとれば簡単に応答塑性率を算定することができる。また、構造物の等価固有周期と目標とする応答塑性率がわかれば、必要な降伏震度を求めることもできる。

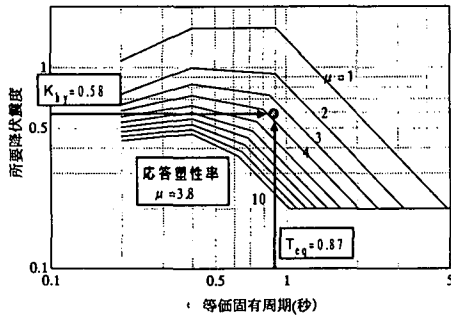


図-2 所要降伏震度スペクトル

塑性率 μ に対する所要降伏震度スペクトルは、様々な固有周期の系に対して降伏震度を変数として、1自由度の弾塑性応答解析を行い、応答塑性率が目標塑性率 μ になるまで収束計算を行うことにより作成している。所要降伏震度スペクトルの考え方や特徴について詳しくは文献²⁾を参照されたい。文献²⁾によると、「鉄道構造物等設計標準・同解説(基礎構造物)」(以下、基礎標準³⁾の耐震設計で用いられているエネルギー一定則と比較を行った結果、所要降伏震度スペクトルの方が、長周期側および塑性率が大きい範囲で精度良く応答値を算定できることが確認されている。

(3) 杭基礎の耐震性能

杭基礎の耐震性能は、地震動を受けた杭基礎が構造物全体としての機能や安全性に及ぼす影響の程度、および復旧の難易性に基づいて設定される。そして、地盤の強度や変形特性、杭部材の耐力および変形性能等を考慮して定められた杭基礎の安定レベルにより耐震性能を照査することとなる。表-1に耐震性能に対応する杭基礎の状態の概念を示すが、杭基礎の耐震設計では、一般に、耐震性能Ⅰの場合は安定レベル1、耐震性能Ⅱの場合は安定レベル2、耐震性能Ⅲの場合は安定レベル3を満足させることとする。

杭基礎の安定レベルの照査は、一般に所要降伏震度スペクトルにより算定された応答値に対して、①応答塑性率、②部材の損傷レベル、③応答変位量を用いて行うこととなる。各指標について詳しくは文献³⁾を参照されたい。

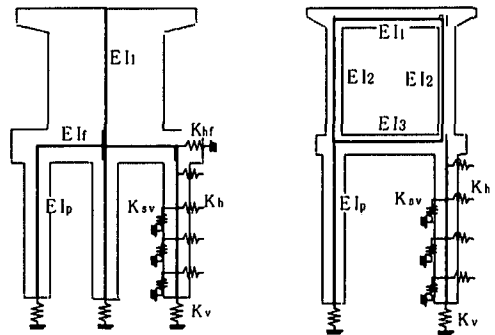
表-1 耐震性能に対応する杭基礎の状態

構造物の耐震性能	基礎の安定レベル	杭基礎の状態(地盤・部材)
耐震性能Ⅰ	安定レベル1	杭基礎が降伏していない状態
耐震性能Ⅱ	安定レベル2	杭基礎が降伏し、杭部材が塑性化したり、地盤抵抗が上限値に達するが、十分な支持力を保持している状態
耐震性能Ⅲ	安定レベル3	多くの杭部材が損傷したり、地盤抵抗が上限値に達するが、構造物の崩壊は生じない安定性を保持している状態

3. 静的非線形解析

(1) 構造解析モデル

非線形スペクトル法による杭基礎の耐震設計では、静的非線形解析により大変形領域での地盤の塑性化の状況や杭部材の損傷過程を把握することとなる。また、耐震性能の照査にも使用するため、精度の高いモデル化が必要となる。耐震標準での静的非線形解析では、図-3に示すように上部構造物と杭基礎を一体としてモデル化し、地盤抵抗や構造部材に非線形性を考慮する。



K_v : 杭先端の設計鉛直ばね定数 K_{sv} : 杭周面の設計せん断ばね定数
 K_h : 設計水平ばね定数 K_{hr} : フーチング前面の設計水平ばね定数

(1) 橋脚 (2) ラーメン高架橋
 図-3 構造解析モデル

(2) 地盤抵抗のモデル化

杭基礎の地盤抵抗は、図-4に示すような弾塑性体(バリエーション型)と仮定し、地盤反力が上限値に達すると塑性化するものとする。地盤抵抗は図-3に示すように、杭先端の鉛直方向、杭周面の鉛直方向、および杭の水平方向について考慮する。各地盤抵抗の設計用値の算定方法は、耐震標準および基礎標準を参照されたい。なお、図-4に示す基礎の支持力係数 α_1 は、支持地盤の強度のばらつきを考慮した補正係数であり、 $\alpha_1=1.0$ および $\alpha_1=2.0$ の2ケースを考え、各地盤抵抗の上限値に考慮する。 $\alpha_1=1.0$ は主として基礎の照査に、 $\alpha_1=2.0$ は主として上部構造物の照査に用いる。

また、群杭基礎の場合、単杭に比べて水平地盤反力係数が低下したり、水平荷重の負担割合が異なるなど

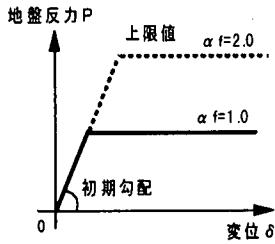


図-4 地盤抵抗のモデル化の例

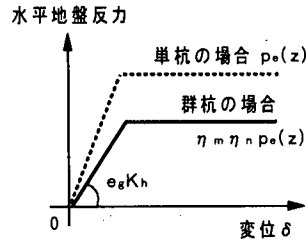


図-5 群杭の影響のモデル化の例

の影響がある。そこで、耐震標準では、図-5に示すように、水平地盤抵抗の初期勾配および上限値に群杭の影響を考慮した補正係数を用いることとしている。初期勾配については基礎標準(解説10.1.7-6)に示されている補正係数 e_g を用いることとし、上限値については式(1)により群杭の影響を考慮する。

$$p_{og}(z) = \eta_m \eta_n p_o(z) \leq p_o(z) \quad (1)$$

$p_{og}(z)$: 群杭の有効抵抗土圧力度(kN/m²)

$p_o(z)$: 単杭の有効抵抗土圧力度(kN/m²)

η_m : 杭列による抵抗分担係数で以下による。

	1列目	2列目	3列目以降
η_m	1.0	0.5	0.4

(注)粘性土の場合は各列とも $\eta_m = 1.0$ とする

η_n : 杭本数による抵抗補正係数で式(2)による。

$$\eta_n = (d/3)^{0.42} n^{-0.09} \quad (2)$$

d : 杭間隔係数

n : 水平荷重作用直角方向の杭本数

ただし、粘性土の場合は $\eta_n = 1.0$ とする。

これらは、模型杭や実杭での載荷試験結果をもとに検討を行い得られた結果である。⁴⁾

(3) 杭部材のモデル化

杭部材は曲げモーメントが曲線状に変化するので、部材の非線形性は、一般に、曲げモーメントと曲率の関係を用いてモデル化する。図-6に一般的な軸力が作用する場合の場所打ち杭のモデル化の例を示すが、杭部材は地震の影響により軸力が変動するので、軸力が曲げモーメントに与える影響を考慮してモデル化を行う。一般に、図-6の ϕ_1 を損傷レベル1、 ϕ_2 を損傷レ

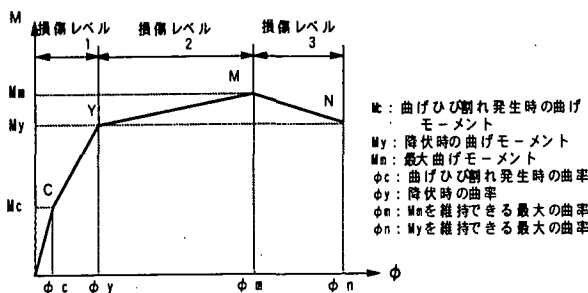


図-6 杭部材のモデル化の例(場所打ち杭)

ベル2、 ϕ_3 を損傷レベル3の制限値として考える。

(4) 杭基礎の降伏点

杭基礎の降伏点は、構造物全体系の荷重-変位曲線において、杭基礎が主な要因となり変位が急増し始める点として設定する。変位が急増し始める要因としては、地盤抵抗が上限値に達したり、杭部材の降伏による曲げ剛性の低下などが考えられる。そこで、一般的な実構造物の群杭基礎について試設計を行い⁵⁾、表-2に示す状態のいずれかに最初に達するときを降伏点と設定することとした。

表-2 杭基礎の降伏点

押込側地盤	最外縁の杭頭反力が設計鉛直支持力の上値に達するとき
引抜き側地盤	全本数の半数の杭頭反力が設計引抜き抵抗力の上値に達するとき
杭部材	全本数の半数の杭が降伏耐力に達するとき 半数の杭本数は、全杭本数を2で除して、小数点以下を切捨て得られる本数とする

4. 非線形スペクトル法による照査例

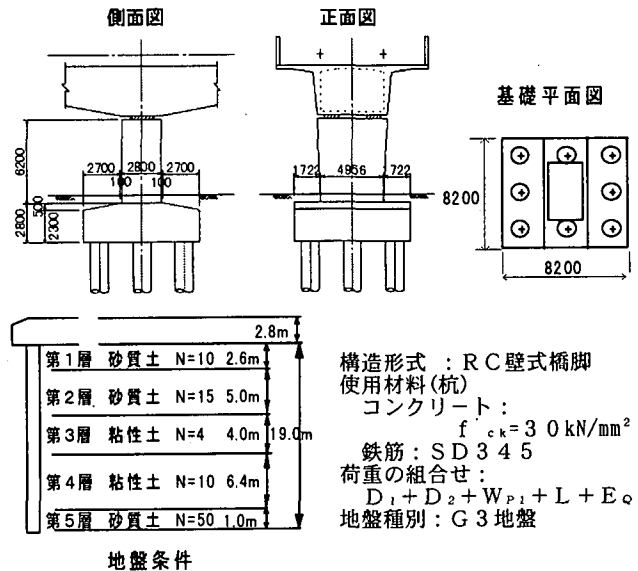


図-7 検討対象構造物

(1) 設計条件

検討の対象とした構造物は、図-7に示す一般的な構造形式の壁式橋脚で、主に杭基礎が塑性化する線路直角方向の照査例を示す。目標とする耐震性能は耐震性能Ⅲとし、基礎の安定レベル3を満足することを確認する。設計地震動は、L2地震動でスペクトルⅡ(内陸型地震動)を考慮し、基礎の支持力係数 $\alpha_r = 1.0$ としている。検討フローは図-1、地盤条件は図-7、構造解析モデル等静的非線形解析のモデル化については3.静的非線形解析を参照されたい。

(2) 照査結果

静的非線形解析より得られた構造物全体系（橋脚天端）の荷重変位曲線を図-8に示す。杭基礎は最初に引抜杭と押込側地盤が同時に降伏し、その後引抜杭が最大耐力となり、引抜側地盤が降伏するという損傷過程となる。構造物全体系の降伏点は上部構造物が降伏したときであり、降伏震度 $K_{hy}=0.58$ 、降伏変位量 $\delta_p=11.0$ cm、等価固有周期 $T_{eq}=0.87$ secとなる。したがって、図-2に示す所要降伏震度スペクトルより、応答塑性率 $\mu=3.8$ 、応答変位量は $\delta_s=11.0 \times 3.8=41.8$ cmとなる。

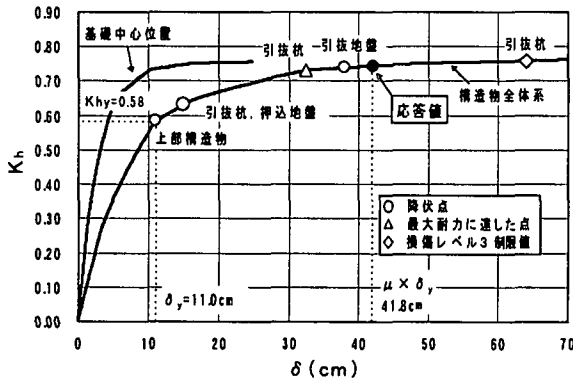
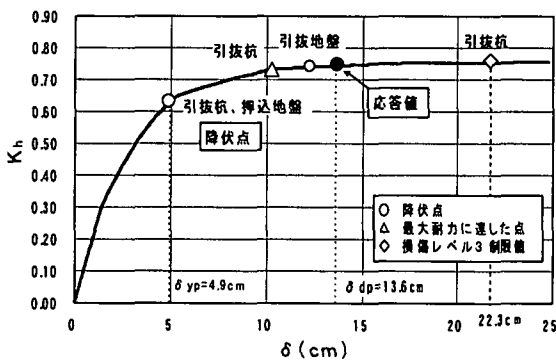


図-8 構造物全体系の荷重変位曲線



基礎中心位置での応答塑性率 $\mu=13.6\text{cm}/4.9\text{cm}=2.8$
部材の損傷レベルから定まる制限値 $\mu_L=22.3\text{cm}/4.9\text{cm}=4.6$

図-9 基礎中心位置での荷重変位曲線

ここでは、応答塑性率の照査例を示す。応答塑性率の照査は基礎中心位置（橋脚の場合フーチング中心）の荷重と変位の関係を用いて行い、式(3)を満足することを確認する。

$$\gamma_i \mu_R / \mu_L \leq 1.0 \quad (3)$$

μ_R : 設計応答塑性率

$\mu_R = \gamma_s \mu$ μ : 応答塑性率, γ_s : 構造解析係数

μ_L : 塑性率の制限値, γ_i : 構造物係数

基礎中心位置の応答塑性率は、基礎中心位置での荷重変位曲線上の、杭基礎の降伏点と構造物の応答値に対応する変位量から算定し、図-9に示すように応答塑性率 $\mu=2.8$ となる。また、塑性率の制限値 μ_L は、基礎の安定から定まる制限値と部材の損傷レベルから定まる制限値のうち小さい方とする。基礎の安定から定

まる制限値は $\mu_L=8.0$ (耐震性能Ⅲ)であり、図-9に示す部材の損傷レベルから定まる制限値の方が小さいため、 $\mu_L=4.6$ を塑性率の制限値として用いる。したがって、以下に示すように基礎の安定レベル3を満足することが確認でき、応答塑性率については耐震性能Ⅲを満足しているといえる。

$$\gamma_i \mu_R / \mu_L = 1.0 \times 2.8 / 4.6 = 0.61 \leq 1.0$$

なお、今回の照査例は、部材が曲げ破壊モードであるという仮定でモデル化したものであり、別途破壊モードの検討が必要である。

(3) 従来鉄道基準との比較

図-7に示す橋脚について、杭部材の主鉄筋量について従来の鉄道基準との比較を行った。比較は許容応力度設計法⁶⁾と基礎標準（限界状態設計法）について行った。表-3に検討結果を示すが、耐震性能Ⅲを満足する主鉄筋量は、許容応力度設計法と比べると若干増えているが、基礎標準とは同じ量となっている。

表-3 従来鉄道基準との比較

適用基準	許容応力度 ⁶⁾	基礎標準	耐震標準
杭径	1200mm	1200mm	1200mm
主鉄筋量	D29-28本 $A_s: 179.9\text{cm}^2$	D32-26本 $A_s: 206.5\text{cm}^2$	D32-26本 $A_s: 206.5\text{cm}^2$
増減率	0.87	1.0	1.0

1) 増減率は耐震標準での鉄筋量に対する率を示している。

2) 耐震標準の鉄筋量は耐震性能Ⅲを満足する配筋量である。

5. おわりに

新しい鉄道構造物の杭基礎の耐震設計における、非線形スペクトル法の考え方や照査例を示した。非線形スペクトル法を用いることで、合理的かつ簡便な設計が可能になると考えられる。今後は、試計算を数多く行い、解析法や耐震性能の照査に用いる指標について深度化をはかる必要がある。

参考文献

- 1) 西村昭彦, 室野剛隆: 所要降伏震度スペクトルによる応答値の算定, 鉄道総研報告第13巻第2号, 1999.2
- 2) (財)鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説(基礎構造物・抗土圧構造物), 丸善, 1997.3
- 3) 棚村史郎, 西村昭彦: 基礎の耐震性能と耐震設計法, 鉄道総研報告第13巻第3号, 1999.3
- 4) 高瀬直輝, 池亀真樹, 西村昭彦ら: 杭基礎の耐震設計, 鉄道総研報告第13巻第3号, 1999.3
- 5) 黒木亮, 高橋正好, 松浦靖治ら: 大地震時における杭基礎の降伏耐力に関する一考察, 土木学会第53回年次学術講演会, 1998.10
- 6) (社)土木学会: 国鉄建造物設計標準解説(基礎構造物・抗土圧構造物), 1986.3