

RCラーメン橋脚における杭基礎の耐震設計

田崎 賢治¹・池谷正幸²・運上 茂樹³・寺山 徹⁴

¹正会員 工修 大日本コンサルタント株式会社 技術本部 耐震技術室（〒170-0003 東京都豊島区駒込 3-23-1）

²正会員 工修 大日本コンサルタント株式会社 技術本部 耐震技術室（〒170-0003 東京都豊島区駒込 3-23-1）

³正会員 工博 建設省土木研究所 耐震技術研究センター 耐震研究室（〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地）

⁴正会員 工修 首都高速道路公団 神奈川建設局 調査課（〒231-0016 神奈川県横浜市中区真砂町 2-25 関内中央ビル）

1. まえがき

大規模地震に対する基礎の耐震設計は、基礎の非線形領域の挙動を考慮した地震時保有水平耐力法により行われる。1本柱形式の橋脚基礎の場合には、慣性力の作用方法や基礎の荷重～変位の算定方法が提案されて実用化されている¹⁾。しかしながら、RCラーメン橋脚において各柱ごとに独立フーチングを有する杭基礎に対してはどのように地震時保有水平耐力法を適用すべきかに関しては十分明らかにされていない。

本文では、独立した杭基礎を有するRCラーメン橋脚を対象に、基礎に対する地震時保有水平耐力法の適用性を検討した。ラーメン橋脚躯体の終局水平耐力作用時において杭基礎の降伏の判定方法を提案するとともに、橋脚躯体の終局水平耐力作用時に杭基礎が降伏して非線形領域に入る場合の基礎のモデル化および基礎を含めたラーメン全体系モデルの水平力～水平変位関係の解析方法を提案し、その妥当性について検討を行った結果を報告するものである。

2. RCラーメン橋脚基礎に対する地震時保有水平耐力法の適用方法

各柱ごとに独立フーチングを有するラーメン橋脚の杭基礎の耐震設計法の流れを図-1に示す。ここで、基礎の設計でポイントとなるのは、基礎が降伏に達するかどうかをどのように判定するかという点と、基礎が降伏する場合にはラーメン橋脚全体系の荷重～変位関係の中でどのように基礎を照査するかである。

以下に、本研究で検討した基礎の降伏の有無に対する照査方法と基礎が降伏に達する場合の基礎および全体系のモデル化、さらに、基礎を含めたラーメン全体系モデルに対する静的解析方法を示す。

(1) 基礎の降伏の判定方法

地震時保有水平耐力法によって設計されたラーメン橋脚に対して、終局水平耐力時の各柱基部に生じる断面力からフーチング底面における作用外力（軸力N、曲げモーメントM、せん断力S）を算出する。そして、各柱ごとに杭基礎を地盤バネに支持されたラーメン構造にモデル化する。モデル化においては、震度法で設計した杭体と地盤反力係数を線形弾性体とする。尚、杭体の剛性は降伏時の曲げモーメントと曲率から算出される降伏剛性とし、降伏曲げ耐力を算出する際の軸力の考え方や鉛直方向および水平方向の地盤反力係数は道路橋示方書IV下部構造編の杭基礎の地震時保有水平耐力法に準じて算出する²⁾。

解析方法としては、フーチング底面位置に外力を作用させ、変位法によって各杭に生じる杭頭反力、曲げモーメントを算出し、基礎が降伏に達したかどうか判定する。ここで、杭基礎の降伏は「すべての杭において、杭体が降伏する」ときと定義し、本検討では地盤の押込み支持力は上限値に達しない場合を想定した。

(2) 基礎が降伏に達する場合の基礎のモデル化

杭基礎が降伏する場合を対象とし、杭基礎全体の水平方向と回転方向の抵抗特性を求める。

a) 杭基礎の解析モデル

杭基礎の解析モデルを図-2に示す。この中で、フーチングは剛部材とし、杭基礎は杭頭がフーチングに剛結されたラーメン構造で、杭体の曲げモーメント～曲率関係はトリリニア型とする。また、杭の軸方向の抵抗特性と杭周辺地盤の水平抵抗特性は完全弾塑性パイリニア型とする。

b) 抵抗特性の解析方法

杭基礎の抵抗特性を求める場合、水平力と同時にモー

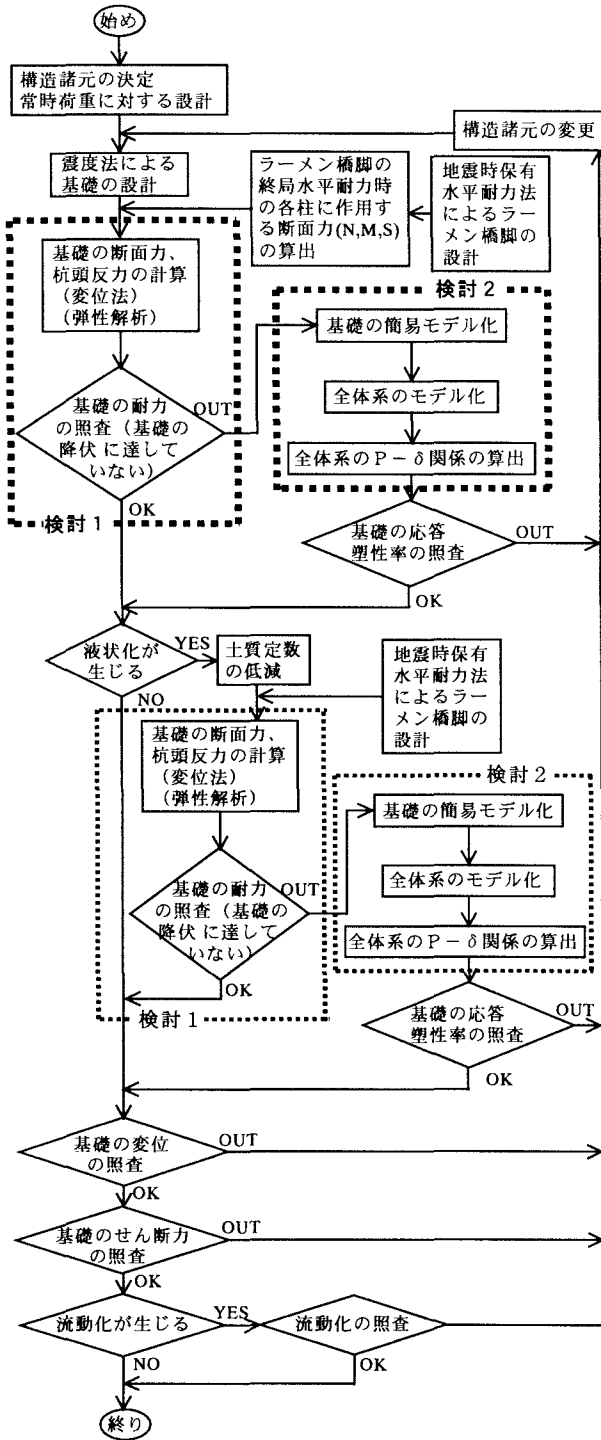


図-1 検討フロー

メントを作用させる必要がある。そこで、解析対象としたラーメン橋脚に水平変位を漸増させたときの柱下端の水平力 H と曲げモーメント M の比率を求め、鉛直荷重と M/H を一定に保ちながら、図-2のモデルのフーチング下面位置に水平力と曲げモーメントを漸増させる。そして、フーチング下面中心における水平力-水平変位関係と曲げモーメント-回転角の関係を求める。さらに、鉛直荷重を変化させて曲げモーメント-曲率の関係を求めておき、軸力変動の影響を考慮できるようにする。

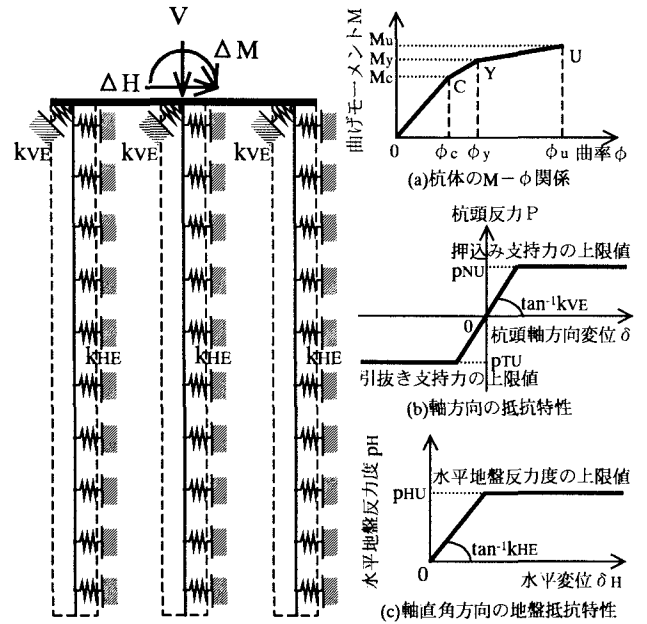


図-2 杭基礎の解析モデル

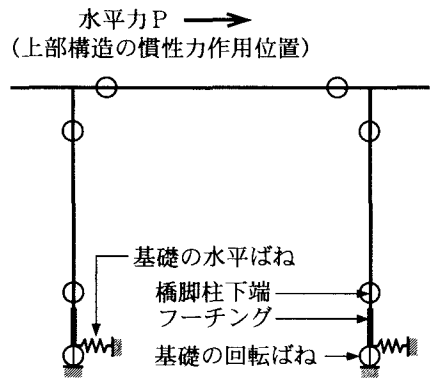


図-3 橋脚と基礎全体の骨組み解析モデル

(3) 基礎が降伏する場合のラーメン橋脚全体の水平力-水平変位関係

図-3に示すように、上記(2)b)で求めた基礎の簡易ばねモデルを考慮した橋脚と基礎全体のモデル化を行い、上部構造の慣性力作用位置に水平変位を漸増させていくことにより、水平力-水平変位関係を算出する。なお、ラーメン橋脚の地震時保有水平耐力法ではフーチングに水平震度を作用させていないので、基礎を考慮した本解析においてもフーチングには水平震度を作用させていない。しかし、フーチングの慣性力の影響は動的解析によって検討しておく必要がある。

3. 検討項目と解析対象橋脚

上記2. に示したラーメン橋脚の杭基礎に対する地震

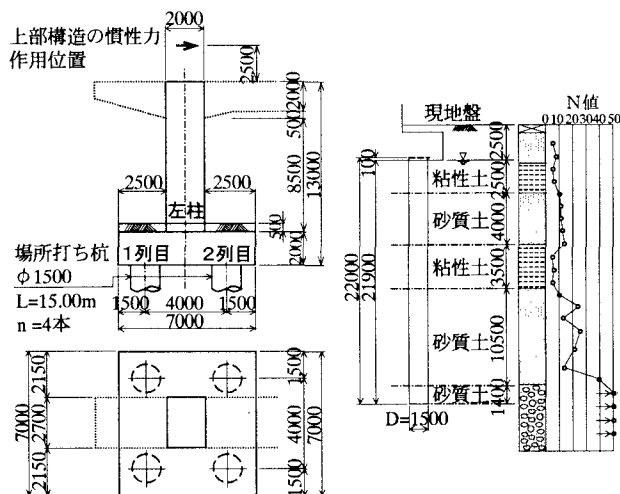


図-4 解析対象橋脚

時保有水平耐力法の適用性を試算により検討した。基礎の簡易モデル化の妥当性の検討として、基礎を図-2に示す詳細モデルとし、ラーメン橋脚全体をモデル化して水平変位漸増解析を行った場合の水平力-水平変位関係との比較を行った。

解析対象橋脚と基礎および地盤条件を図-4に示す。解析対象とした橋脚は10径間連続鋼I桁橋の一部を取り出したものであり、二柱式の門型ラーメン橋脚で、各柱ごとに独立したフーチングと杭基礎を有している。左右対称な構造であるため、図中にはラーメン橋脚の左柱側のみを示している。なお、橋脚躯体は平成8年の道路橋示方書に基づいて震度法と地震時保有水平耐力法によって耐震設計されており、また、杭基礎については震度法によって耐震設計されたものである。

4. 解析結果

(1) 基礎の降伏の判定

図-4の対象橋脚に対して、杭基礎の降伏の判定を行ったところ、表-1に示すように、両柱の各杭基礎ともラーメン橋脚の終局水平耐力時に降伏していないことがわかった。

そこで、杭基礎が降伏して非線形領域に入る場合を想定するために、橋脚躯体の曲げ耐力を変化させた解析を行った。図-5に解析結果を示す。図の縦軸には杭基礎の降伏の判定基準となる各杭の最大モーメント M_{max} を降伏曲げモーメント M_y で除した M_{max}/M_y を示しており、横軸は橋脚躯体の地震時保有水平耐力 P_a を地震時保有水平耐力法に用いる水平震度に相当する水平力 P_e ($=k_h e \cdot W$) で除した P_a/P_e である。図中で何れかの柱の全列の杭が $M_{max}/M_y \geq 1.0$ の場合に杭基礎の

表-1 杭基礎の降伏の判定結果

| 左柱側 | | | 1列目 | 2列目 |
|-----------------|-------|--------|---------------|---------------|
| 最大曲げモーメント | M | tf・m/本 | 218.704 | 218.704 |
| 降伏曲げモーメント | M_y | tf・m/本 | 176.2 | 295.6 |
| 判定 | - | - | $M > M_y$ | $M \leq M_y$ |
| | | | 降伏する | 降伏しない |
| 杭頭の鉛直反力 | | | PN | tf/本 |
| 押込み支持力の上限值 | | | PNU | tf/本 |
| 判定 | - | - | 1336 | |
| | | | $PN \leq PNU$ | $PN \leq PNU$ |
| | | | OK | OK |
| 押込み支持力の上限值に達しない | | | | |

| 右柱側 | | | 1列目 | 2列目 |
|-----------------|-------|--------|---------------|---------------|
| 最大曲げモーメント | M | tf・m/本 | 212.493 | 212.493 |
| 降伏曲げモーメント | M_y | tf・m/本 | 176.2 | 295.6 |
| 判定 | - | - | $M > M_y$ | $M \leq M_y$ |
| | | | 降伏する | 降伏しない |
| 杭頭の鉛直反力 | | | PN | tf/本 |
| 押込み支持力の上限值 | | | PNU | tf/本 |
| 判定 | - | - | 1336 | |
| | | | $PN \leq PNU$ | $PN \leq PNU$ |
| | | | OK | OK |
| 押込み支持力の上限值に達しない | | | | |

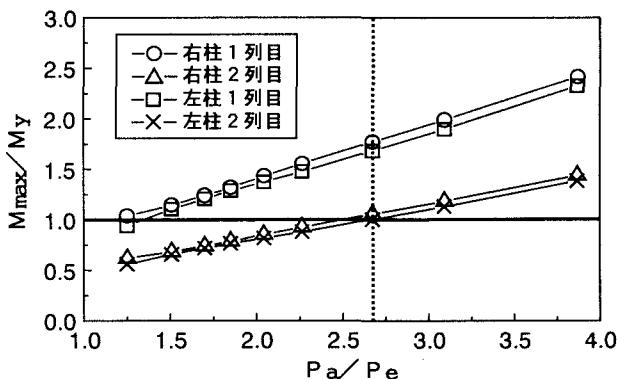


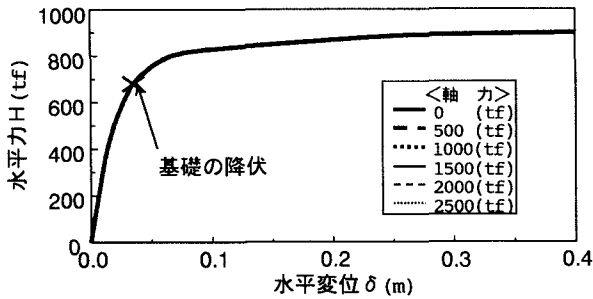
図-5 杭基礎の降伏の判定

降伏となる。この図によると、 $P_a/P_e=2.7$ 程度で杭基礎が降伏に達していることがわかる。

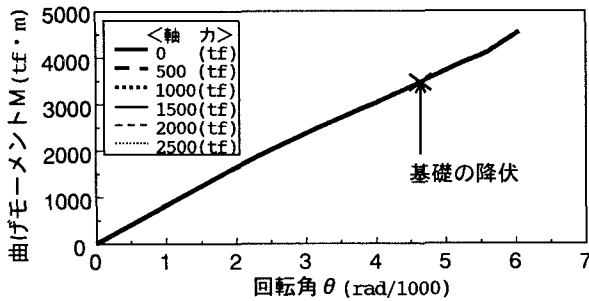
(2) 基礎が降伏に達する場合の基礎のモデル化

杭基礎が降伏すると判定された場合のラーメン橋脚を対象として、基礎全体のモデル化を行った。対象としたラーメン橋脚の水平変位漸増解析時における柱下端の曲げモーメントと水平力の比率は概ね $M/H=5.1$ 程度であったため、図-2のモデルのフーチング下面位置に曲げモーメントと水平力をこの比率に保ちながら漸増させた。図-6(a)(b)にそれぞれ杭基礎全体の水平力-水平変位関係と曲げモーメント-回転角関係を示す。

各抵抗特性に対する軸力変動の影響を考慮するために、鉛直力を変化させて解析を行ったが、水平、回転バネとも軸力変動によってほとんど特性は変化しなかった。これは軸力変動によって杭体の曲げモーメント-曲率関係は変化するが、本解析で対象とした地盤条件では基礎全体の抵抗特性は地盤の影響が支配的であったためと考えられる。また、図-6(b)の基礎の回転バネが線形弾性となっているのは、地盤が降伏する前に杭体が終局曲げ耐力に達し、地盤が塑性化しないためである。



(a) 基礎の水平バネ



(b) 基礎の回転バネ

図-6 基礎の簡易バネモデル

(3) 基礎が降伏する場合のラーメン橋脚全体系の水平力-水平変位関係

図-6の基礎の簡易バネモデルを用いて、図-3に示すようなラーメン橋脚と基礎全体系のモデル化を行った。基礎の水平バネは図-6(a)の曲線を包絡するバイリニア型に近似し、また、基礎の回転バネは線形弾性型として解析を行った。基礎を含めた全体系モデルに対して、上部構造の慣性力作用位置に水平変位を静的に漸増させた場合の水平力-水平変位関係を図-7に示す。図の縦軸と横軸にはそれぞれ上部構造の慣性力作用位置における水平力と水平変位を示している。塑性ヒンジははりの両端部(C, D)、左柱下端(A)、右柱側の基礎(H)、右柱下端(F)の順番で生じ、これら7個の塑性化が生じると水平力はほぼ一定となる。また、橋脚躯体の各塑性ヒンジが終局に達するのはD, F, A, Cの順番となり、はり右端、柱下端、はり左端の順番で終局に達する。

基礎の水平と回転の簡易ばねを用いたラーメン橋脚全体系の静的解析の妥当性を検討するために、基礎を図-2の詳細モデルとし、ラーメン橋脚全体系をモデル化して水平変位漸増解析を行った場合の水平力-水平変位関係を図-7に点線で示している。この比較結果から、基礎を簡易バネでモデル化した場合の解析は、基礎を詳細モデルで解析した場合の解析結果をほぼ再現できることがわかる。なお、1個目の塑性ヒンジが発生してから水平力が一定となる領域($\delta=10\sim 20\text{cm}$ 程度)で解析結果

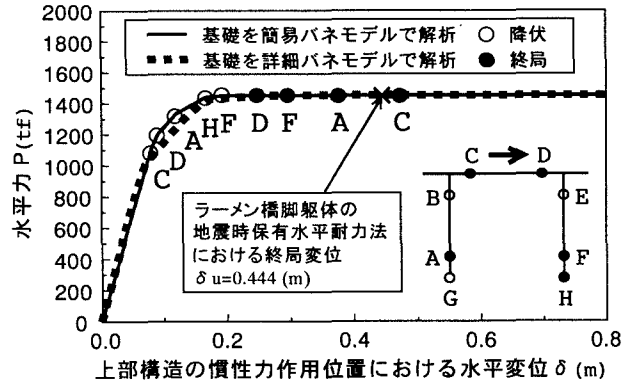


図-7 全体系の水平力-水平変位関係

に若干の相違が見られるが、これは基礎の簡易水平バネモデルをバイリニア型に近似したことによるものである。

5. まとめ

本検討では、橋脚躯体がラーメン構造で各柱ごとに独立フーチングを有する場合の杭基礎に対して、地震時保有水平耐力法の適用性を検討した。検討結果をまとめると以下の通りである。

- ① ラーメン橋脚躯体の終局水平耐力時における杭基礎の降伏の有無に対する照査方法を提案した。
- ② 杭基礎が降伏して塑性化する場合の解析方法として、基礎を簡易な水平および回転バネにモデル化し、基礎を含めたラーメン全体系モデルで静的な水平変位漸増解析を行い、水平力-水平変位関係を求める解析方法を提案した。そして、その妥当性の検討として、基礎を詳細モデルでモデル化した場合の水平力-水平変位関係と比較したところ、基礎を簡易バネでモデル化した場合の解析は、基礎を詳細モデルで解析した場合の解析結果をほぼ再現できることがわかった。

今後は、地盤が液状化する場合や地盤の押込み支持力が上限値に達する場合など地盤条件を変化させたケースや杭基礎全体の曲げモーメント-回転角関係に影響を及ぼす杭配置や杭本数をパラメータとした解析を行う予定である。

さらに、基礎を含めたラーメン全体系の終局の設定方法を検討する必要がある。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、1996.12
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編、1996.12