

杭基礎の地震時保有水平耐力法における 静的解析と動的解析の比較

矢部正明¹・川島一彦²

¹正会員 東京工業大学 社会人博士課程 工学部土木工学科 (株)長大 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

²フェロー会員 工学博士 東京工業大学教授 工学部土木工学科 (〒152 東京都目黒区大岡山2-12-1)

1. まえがき

橋脚と基礎構造の両者に非線形化が生じる場合の耐震計算法として、平成8年の道路橋示方書では、橋脚の降伏曲げ耐力に相当する水平力を地震の作用とみなして基礎構造を耐震設計する方法が示されているが、これは静的なつりあいに基づいたものであり、橋脚-基礎構造物系の動的応答を見込んだ検討はまだ行われていない。

本研究では、杭基礎で支持されたRC橋脚を有する橋梁構造物を対象として、橋脚および杭基礎ともに非線形領域に入る場合に、非線形動的解析結果が荷重漸増法による非線形静的解析結果とどのような関係にあるかを検討した。なお、米国等では、耐震設計への適用を目的とした非線形系に対する荷重漸増法をプッシュオーバーアナリシスと呼んでおり、本研究でもこの名称を使うことにする。

2. 解析対象橋梁

解析対象橋脚および杭基礎を周辺地盤条件とともに図-1に示す。これは積層ゴム支承を水平地震力分散支承として用いた5径間連続鋼Iげた橋の一部を取り出したものである。この橋は、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たものである。

地表面下30mにある砂礫層上面を耐震設計上の基盤面とみなすと、表層地盤の固有周期は1.17秒程度であり、耐震設計上の地盤種別はⅢ種地盤と判定される。本研究では、隣接する橋脚、基礎系の構造条件がほぼ同じであることから、図-1に示した橋脚・杭基礎系だけを取り出し、橋軸方向に地震動が作用した場合に着目して解析を行う。

橋脚の耐震設計は、震度法と地震時保有水平耐力法により行われているが、断面寸法や軸方向鉄筋量は、地震時保有水平耐力法によって決まっている。橋脚の降伏水

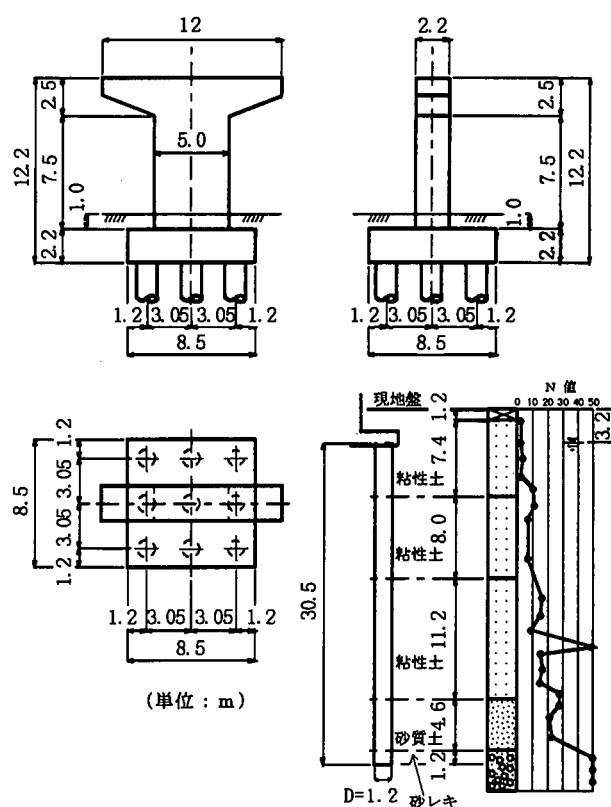


図-1 解析対象としたRC橋脚と杭基礎

平耐力（地震時保有水平耐力）は4.12MNであり、許容塑性率は、タイプⅠ、タイプⅡ地震動に対してそれぞれ2.48, 5.91となる。

杭基礎は径12m、長さ30.5mの現場打ち杭3列@3本＝9本から構成されている。杭基礎も震度法と地震時保有水平耐力法の両方で耐震設計されたが、この場合には、震度法による水平変位や杭体の引張応力度によって杭径や本数、配置が決まっている。

本解析で対象とする橋脚と杭基礎に対してプッシュオーバーアナリシスを行った結果、この基礎では、水平震度0.83で全ての杭の頭部が降伏して、杭基礎としての降伏

に達する。これに対して、前述したように、橋脚の降伏水平耐力は4.12MNであり、これを等価重量7.91MNで除することにより、橋脚の降伏水平震度は0.52と求められる。これより、基礎の降伏水平震度は橋脚の降伏水平震度よりも大きく、基礎は耐震性があると判定されることになる。

3. 解析モデル

このような桁－橋脚－杭基礎系からなる構造系を解析するために、これを図-2に示すようにモデル化した。上部構造の軸方向剛性は橋脚や杭の曲げ剛性に比較して大きいと見做し、積層ゴム支承は線形せん断バネによってモデル化した。橋脚躯体については、橋脚基部から1.1mの塑性ヒンジ区間は非線形回転バネで、また、これ以外の区間は線形梁要素でそれぞれモデル化した。ただし橋脚躯体のうち、横梁部は剛体とした。さらに、フーチングも剛体とし、橋軸方向の並進と橋軸直角軸回りの回転を有する2自由度系とし、杭は非線形梁要素でモデル化した。杭の質量には杭に囲まれた範囲の地盤の質量を付加質量として見込んだ。

地盤は、基礎の影響を受けない自然地盤として1次元の非線形せん断バネ（Hardin-Drelich型）モデルによって表した。基礎と地盤間の水平方向の拘束は非線形せん断型バネによって表した。

橋脚の塑性ヒンジ区間は、図-3に示すようにひびわれ点を見逃した剛性低下型のTakedaモデルで表した。場所打ち杭もRC橋脚と同様な挙動を示すと考えられることから、ここでは図-4に示すように橋脚と同様にひびわれ点を見逃した剛性低下型のTakedaモデルによって表わすこととした。基礎～地盤間のバネは、基本的に道路橋示方書に規定された杭基礎の地震時保有水平耐力法に用いるバネを用いることとするが、動的解析では以下の点を変更した。地盤バネの剛性 K_0 を求めるための地盤反力係数は、N値ではなく地盤のせん断弾性波速度から求めた。また、地盤バネの剛性や極限支持力は杭位置によって異なることから図-5に示すように、中央列の杭の初期剛性を K_0 から $1/2K_0$ に変化させた。

入力地震動は耐震設計上の基盤面において与えることとし、道路橋示方書のタイプⅡ地震動によるⅢ種地盤上での標準波形（Ⅱ－Ⅲ－1）から、SHAKEにより基盤面の地震動を求め、これを基盤地震動として地盤モデルに作用させて地盤の応答を求めた。

減衰定数は、ゴム支承では2%、橋脚では2%、杭では2%、基礎～地盤間バネでは逸散減衰を見込んで20%とした。地盤は非線形復元力特性を見込んでモデル化しているため、また、フーチングは剛体振動するため、それぞれ、減衰定数を0とした。これから、上部構造の橋

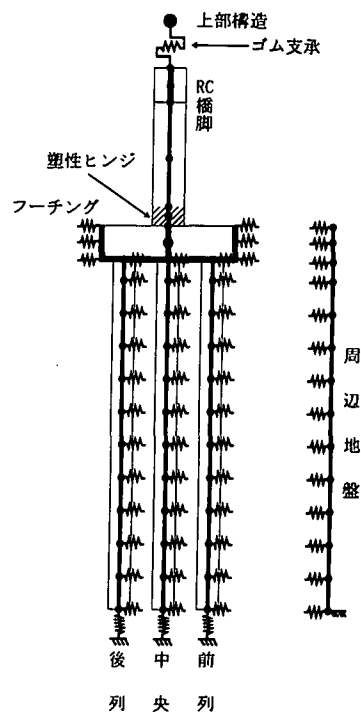


図-2 RC橋脚－杭基礎－周辺地盤系の解析モデル

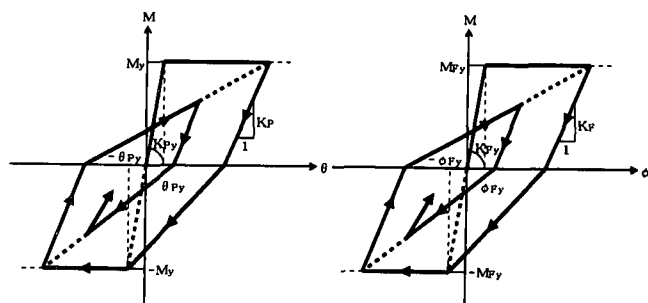
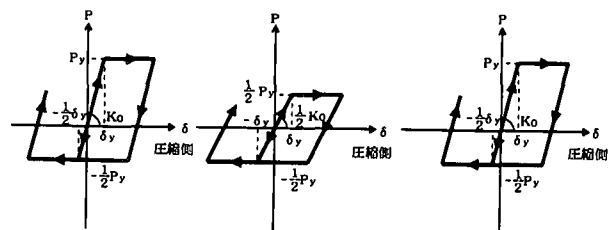


図-3 橋脚の塑性ヒンジ
区間の復元力特性

図-4 杭の復元力特性



(a) 前列杭 (b) 中央列杭 (c) 後列杭

図-5 基礎～地盤間の水平方向バネの復元力特性

軸方向振動が卓越する1次振動モードと橋脚躯体や杭体の曲げ変形が卓越する4次振動モードに着目して、レイリー減衰により減衰力をモデル化した。

4. 橋脚と基礎の非線形応答

図-6は慣性力作用位置で表した橋脚からフーチングに対する作用力であり、図-7は杭の曲げモーメントを示し

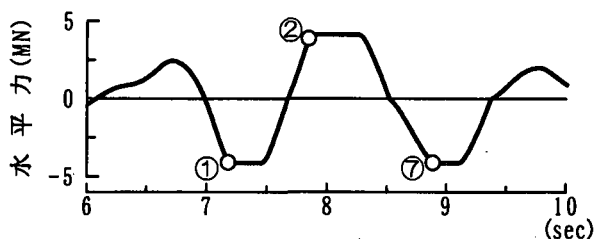
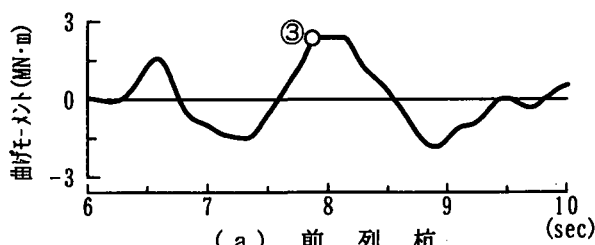
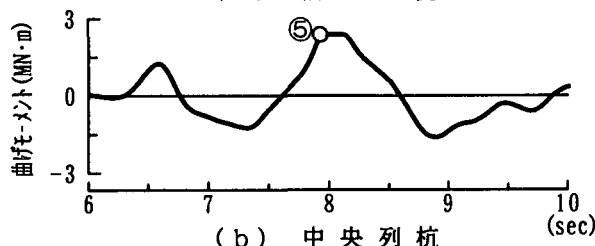


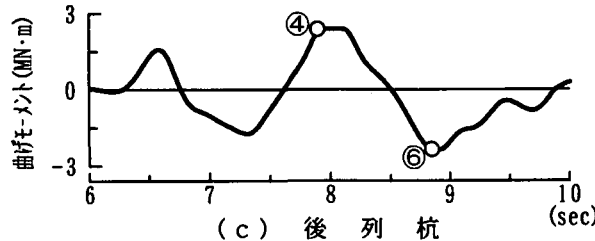
図-6 慣性力作用位置で示した橋脚の作用力



(a) 前列杭



(b) 中央列杭



(c) 後列杭

図-7 杭頭部に生じる曲げモーメント

たものである。これらは、ともに、応答が最大となる4秒間について示した結果である。ここには、次の状態に達したときの時刻を示している。

- ①橋脚が後列方向に変位し、最初に降伏 (7.18秒)
- ②橋脚が前列方向に変位して2回目の降伏 (7.85秒)
- ③前列の杭の頭部が降伏 (7.87秒)
- ④後列の杭の頭部が降伏 (7.90秒)
- ⑤中央列の杭の頭部が降伏 (7.93秒)
- ⑥後列の杭の頭部が2回目の降伏 (8.85秒)
- ⑦橋脚が後列方向に変位し、3回目の降伏 (8.89秒)

これによれば、橋脚が2回目の降伏に達した(②)あとの0.08秒間に前列、後列、中央と相次いで杭が降伏し、また、後列の杭が2回目に降伏(⑥)する0.04秒後に橋脚が3回目の降伏に達することがわかる。減衰力の影響で、橋脚と杭の降伏が生じる時間は完全には同一ではないが、時間差はごくわずかであり、実務的には降伏を越える大きな応答が橋脚に生じると、杭は橋脚と同時に降伏すると考えても差し支えない。

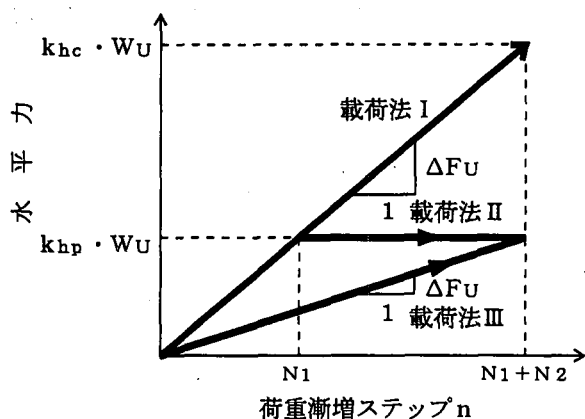
5. プッシュオーバーアナリシスと動的解析の比較

以下では動的解析に用いた条件でプッシュオーバーアナリシスにより計算し直した結果と動的解析結果との関連を比較することとする。

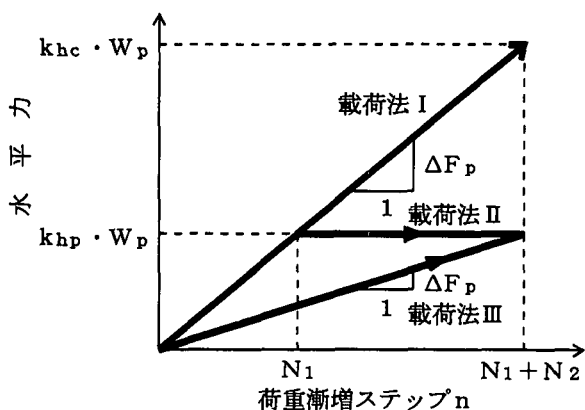
橋脚の曲げ降伏の影響を見込んでプッシュオーバーアナリシスを行うためには、桁、橋脚、フーチングに対してどのような経路と順番で地震力を加えるかが重要である。このために、ここでは、図-8に示す3種類の方法を検討する。載荷法Ⅰはフーチング底面位置に、これより上に存在する構造部分の重量を初期荷重として作用させた状態で、桁、橋脚、フーチングの慣性力を作用させる。地震時保有水平耐力法により桁および橋脚に作用させる水平震度を k_{hc} 、フーチングに作用させる震度を k_{hG} とすると、本橋では、Ⅲ種地盤のタイプⅡ地震動を考慮すると、 $k_{hc} = 1.5, k_{hG} = 0.6$ となる。ここでは、この比率を保持したまま、桁および橋脚、フーチング底面の水平力を荷重漸増法により求めるものである。載荷法Ⅱはフーチングより上に存在する構造部分の自重を作用させた状態で、桁、橋脚、フーチングに分けて水平力を荷重漸増法で与える点は、載荷法Ⅰと同じである。しかし、図-8に示すように、橋脚が曲げ降伏した後は、これ以上の慣性力が桁および橋脚からフーチングには作用しないため、橋脚が降伏するまでの区間と橋脚が降伏した後の区間に分けて、増分荷重を評価しようというものである。ただし、フーチングに作用させる地震力は橋脚の降伏の影響を受けないため、載荷法Ⅰと同じとする。載荷法Ⅱでは、橋脚が降伏する前と降伏した後に分けて増分荷重を与えるが、全区間を同じ荷重増分で解析しようという方法が載荷法Ⅲである。

プッシュオーバーアナリシスと動的解析の比較で最も重要な点は、橋脚からフーチング底面に作用する水平力および曲げモーメントがどの程度であるかである。載荷法Ⅰでは、橋脚が曲げ降伏すると、これ以上の水平力や曲げモーメントが橋脚からフーチングには作用しないことが考慮されていないために、プッシュオーバーアナリシスは非線形動的解析結果を過大評価する。

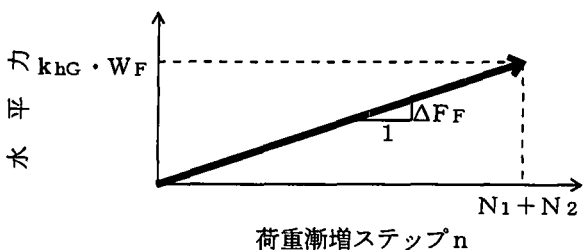
載荷法Ⅱ、Ⅲによりフーチング底面の水平力とフーチングの変形によって上部構造慣性力作用位置に生じる水平変位 δ_F の関係を求め、これを非線形動的解析結果と比較した結果が図-9である。載荷法Ⅱ、Ⅲにおける載荷経路はそれ程大きく解析結果に影響しないが、載荷法Ⅱの方がより動的解析結果との一致度は高い。しかし、載荷法Ⅱを用いても、なお動的解析結果よりもフーチング底面に生じる水平力は小さくなっており、この原因としては、プッシュオーバーアナリシスでは、橋脚の降伏耐力以上の水平力は橋脚からフーチングに作用しないと考えているが、実際には(動的解析では)、これに加えて減



(a) 桁による水平力の増分



(b) 橋脚による水平力の増分



(c) フーチングによる水平力の増分

図-8 フーチング底面に作用させるプッシュオーバーアナリシスによる増分水平力

衰力の寄与がある。今、これを検討するために、フーチング底面に作用する水平力 F_F および曲げモーメント M_F を次のように求めることにした。

$$F_F = \sum_{i=1}^n m_i (\ddot{u}_i + \ddot{z}_g), \quad M_F = \sum_{i=1}^n m_i (\ddot{u}_i + \ddot{z}_g)$$

ここで、 $m_i, \ddot{u}_i$ は節点 i における質量および相対加速度、 $\ddot{z}_g$ は入力地震動加速度、 h_i はフーチング底面から節点 i までの距離である。このようにして、 F_F, M_F の最大値 $F_{F \max}, M_{F \max}$ を求めると $8.64N, 78.34N \cdot m$ となる。この $F_{F \max}, M_{F \max}$ を用いて、载荷法 II によりフーチング底面の水平力と慣性力作用位置の水平変位 δ_F の関係を求めた結果が図-10であ

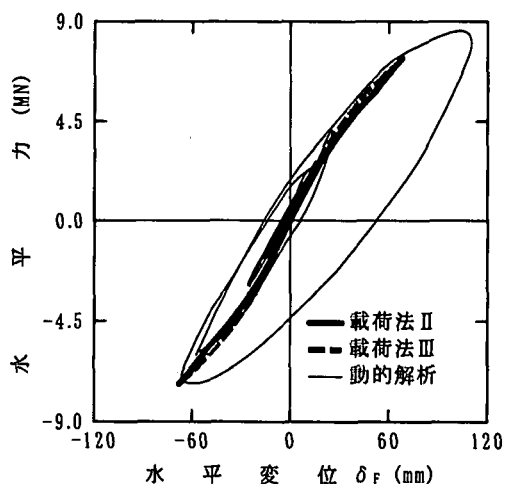


図-9 フーチング底面の水平力と慣性力作用位置の変位

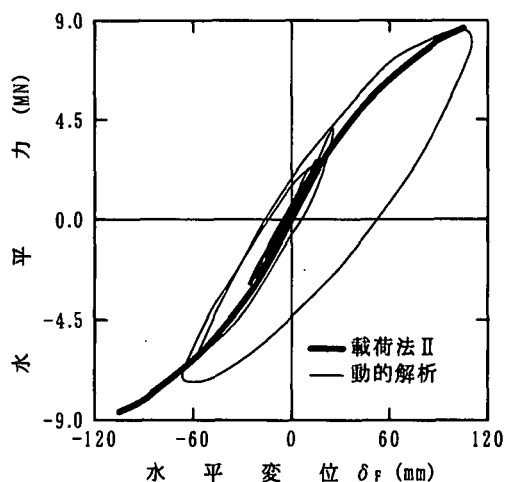


図-10 フーチング底面の水平力と慣性力作用位置の変位

る。図-9に比較して、プッシュオーバーアナリシスと動的解析結果との一致度は大幅に向上している。

6. 結 論

本解析で得られた結果は次のとおりである。

- 1) 载荷法 II, III における载荷経路はそれ程大きく解析結果に影響しないが、载荷法 II の方がより動的解析結果との一致度は高い。
- 2) フーチング底面に作用する水平力と曲げモーメントは減衰力の寄与により、橋脚の降伏耐力や降伏曲げ耐力よりも大きい。
- 3) 上述の減衰力による割り増しを考慮したフーチング底面に作用する水平力と曲げモーメントを用いたプッシュオーバーアナリシスによる結果は、非線形動的解析結果と良く一致する。