

深い土被りを有する橋脚の耐震性評価法

西村 隆義* 室野 剛隆*

An Evaluation Method of a Seismic Performance of Pier Structure Deeply Embedded in the Soil

Takayoshi NISHIMURA Yoshitaka MURONO

In evaluation of a seismic performance of pier which is deeply embedded in the soil, the covered soil affecting the dynamic behavior of the pier should be properly taken into consideration. In this paper, we conducted numerical simulations to clarify the effect of the covered soil. As a result, we confirmed that its effect on the structure can be classified as two factors: restriction and action. In addition, we proposed a new evaluation method for a seismic performance of a pier structure considering those effects for seismic design.

キーワード：橋脚，耐震性，土被り，慣性力の影響，地盤変位の影響，応答変位法

1. はじめに

橋脚の耐震性評価における土被りの取り扱い、土被りが通常 1m 程度であり影響が小さいと想定されることや、一般に抵抗要素として働き耐震性能向上に寄与すると考えられることなどから、設計上ではその影響を無視することが多い。しかし、河川の堤体に位置する場合や地盤の不陸が大きい箇所などでは、橋脚のほとんどが地盤中に埋まるような場合も存在する。このような場合には、土被りが橋脚の地震時の挙動に少なからず影響を及ぼすことが想定される。

杭基礎などの深く根入れされた基礎は、一般に地震時には上部工からの慣性力の影響のほかに、地盤震動に伴う地盤変位の影響を受けることが知られている¹⁾。そのため、「鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計」²⁾（以降、耐震標準と呼ぶ）においては、応答変位法などを適用して、これら両者の影響を適切に考慮する体系になっている。したがって、橋脚が地盤中に埋まる場合にも、慣性力の影響だけでなく、地盤変位の影響を受けることが想定されるが、その影響は十分に把握されていないのが現状である。そこで標準的な鉄道構造物を対象にして、深い土被りを有する場合の地震時挙動の特性を地盤と構造物の相互作用の観点から明らかにするため、土被り深さを変化させた解析を行ない、土被りが橋脚に与える影響について検討した。また、応答変位法の考え方を適用することで、土被りの影響を考慮した静的非線形解析方法を提案した。

2. 解析対象構造物と検討ケース

検討対象としたのは、鉄道構造物に用いられる標準的な杭基礎橋脚と直接基礎橋脚である。諸元を以下に示す。

2.1 杭基礎橋脚

杭基礎橋脚の概要図を図 1 (a) に示す。対象構造物は、RC 橋脚が PRC 単純 3 主桁 (L=29.2 × 2 連) を支持する形式であり、橋脚躯体の高さは 8m、断面寸法は 1.5m × 4.0m、フーチング寸法は 8.0m × 8.0m である。杭は、場所打ち杭 (φ1000mm, L=19m) とし、3 列に計 8 本 (奥行き方向に、3 本-2 本-3 本) を配置した。解析で着目する方向は、対象構造物の線路方向とした。地盤条件は、表 1 に示す条件とした。土被り部の物性は、耐震標準に示される埋め戻し土程度 (N 値 2, φ=32°) とした。当該地盤の基盤～フーチング底面間の固有周期を 1/4 波長法により算定すると 0.48sec とする。

2.2 直接基礎橋脚

直接基礎橋脚の概要図を図 1 (b) に示す。杭基礎橋脚と同様に、RC 橋脚が PRC 単純 3 主桁 (L=29.2 × 2 連) を支持する形式であり、橋脚躯体の高さは 10m、断面寸法は 1.5m × 4.0m、フーチング寸法は 5.8m × 7.7m である。解析で着目する方向は、対象構造物の線路方向とした。地盤条件は、基盤上に N 値 30 の砂質土が 15m 堆積し、その上にフーチングが設置されているものと設定した。フーチング底面より上の地盤は、杭基礎橋脚と同様の埋め戻し土とした。当該地盤の基盤～フーチング底面間の固有周期を 1/4 波長法により算定すると 0.24sec とする。

* 構造物技術研究部 (耐震構造)

特集：構造物技術

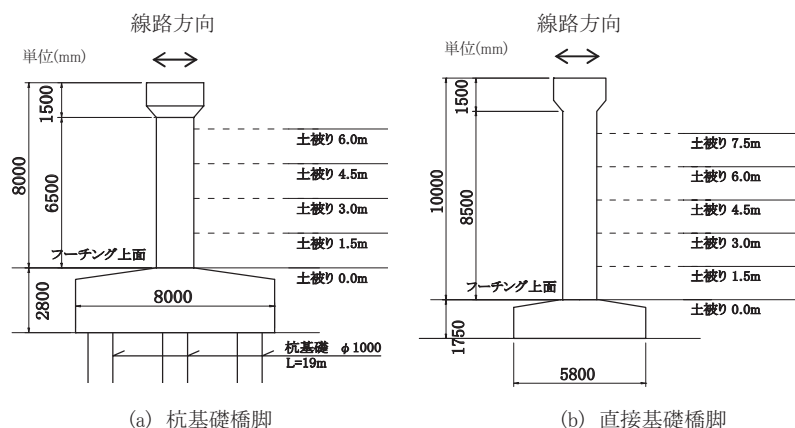


図1 解析対象構造物

2.3 解析ケース

本検討では、土被り深さをパラメータとして解析を実施した。解析ケースと土被り深さの関係を表2に示す。土被り深さは、橋脚躯体とフーチングの接合部を基点として、1.5mごとに橋脚上部まで変化させることとした。

3. 土被りの考慮方法と解析モデル

3.1 土被りの影響の考慮方法

土被りが橋脚に与える影響として、以下の効果を考慮することとした。効果のイメージを図2に示す。

① 橋脚躯体前面の水平抵抗

(土被りによる拘束効果)

② 基礎のロッキングに対する抵抗

(土被りの重量による効果)

①の土被りによる水平抵抗については、橋脚と土被り地盤間に地盤ばねを配置して、抵抗力を生じるようにモデル化した。②の回転抵抗については、土被りを深くすることで土被りの重量すなわち鉛直荷重が増加し、フーチングの浮き上がりが抑制されることで表現した。回転抵抗に寄与する土被りの対象範囲は、フーチング端部を想定破壊線としたフーチング上の土塊とし、破壊線上に生じる抵抗力は無視した。なお、土塊重量は慣性力にも寄与するものと仮定し、フーチングの質量に付加した。

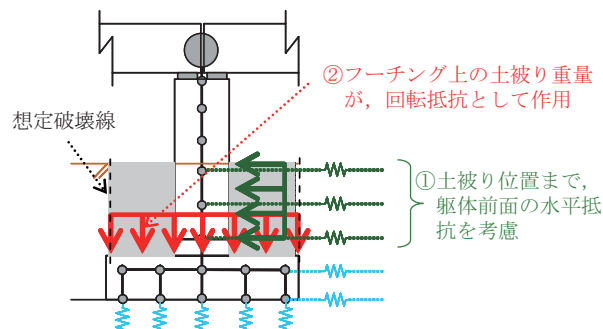


図2 土被りの影響の考慮方法

表1 地盤条件(杭基礎橋脚)

地層	土質	層厚 (m)	N 値	c (kN/m ²)	γ (kN/m ³)
土被り部	砂質土		2		18
0	砂質土	2.8	2		18
1	砂質土	2.6	10		18
2	砂質土	5.0	15		18
3	粘性土	4.0	4	50	15
4	粘性土	6.4	10	100	16
5	砂質土	1.0	50		20

表2 解析ケース

(a) 杭基礎橋脚

Case No.	土被り深さ (m)
Case 1	0
Case 2	1.5
Case 3	3
Case 4	4.5
Case 5	6

(b) 直接基礎橋脚

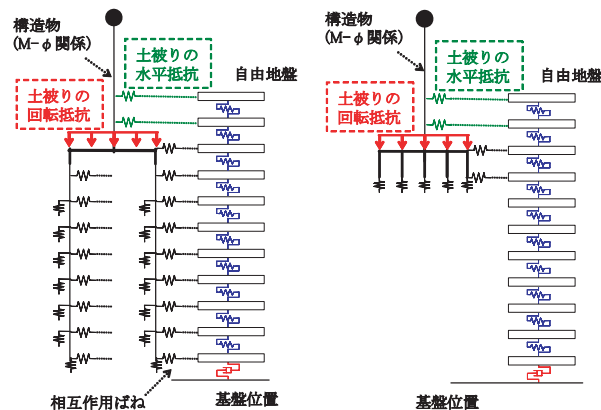
Case No.	土被り深さ (m)
Case 11	0
Case 12	1.5
Case 13	3
Case 14	4.5
Case 15	6
Case 16	7.5

3.2 解析モデルの考え方

本検討では、地盤変位による影響を適切に考慮して検討を行うため、図3のように構造物モデルと自由地盤モデルを、相互作用ばねで連結した多質点系モデルを用いた。相互作用ばねは、基礎周辺の水平地盤ばねで表現している。このモデルは、基礎にあたる自由地盤下端から地震動を入力することで自由地盤が応答し、その挙動が相互作用ばねを介して構造物基礎に入力される。このモデルを使用することで、表層地盤の増幅特性の影響を直接的解析において考慮することができる³⁾。

3.3 部材のモデル化

橋脚および杭は、梁でモデル化した。質量は、各質点に分割して与え、桁の質量は1質点で代表させて橋脚天端に与えた。部材の非線形特性はM-φ関係で与え、骨格曲線はひび割れ、降伏、最大耐力の3点を表現するトリリニアモデルを用いた。軸力変動は考慮していない。履歴特性は修正武田モデル⁴⁾を適用した。また、対象構造物は、奥行き方向に複数本の杭を有するが、解析上は各列の複数本の杭を1本の杭として表現した。なお、フーチングは剛体とし質量のみ与えた。



(a) 杭基礎橋脚

(b) 直接基礎橋脚

図3 解析モデル概要

3.4 基礎周辺の地盤ばねのモデル化

基礎周辺の地盤は、ばね要素でモデル化した。土被りの水平抵抗は、耐震標準に示されるフーチング前面ばねの考え方を準用し、地盤反力係数から算出された初期剛性と有効抵抗土圧を上限値とするバイリニアモデルを用いることでモデル化した。杭の水平、鉛直方向の支持力特性も、同様に耐震標準に従ってモデル化した。杭周囲の鉛直ばねは、 $1/\beta$ (β は杭の特性値で $\beta = \sqrt{k_h D / 4EI}$) ここで、 k_h : 設計水平地盤反力係数 (kN/m³), D : 杭径 (m), EI : 杭の曲げ剛性 (kN・m²) を以深にのみ考慮した。また、群杭効果を考慮して設定している。

直接基礎の底面地盤のモデル化は、直接基礎の回転挙動を評価できる分布地盤ばねモデル⁵⁾を用いた。

3.5 自由地盤のモデル化

周辺地盤全体をモデル化する自由地盤は、フーチングの面積の100倍の断面積を持つ土柱として設定し、この土柱を質点とそれらをつなぐせん断ばねでモデル化した。これは、自由地盤の応答に構造物が影響を与えないように質量を大きくしたものであり、自由地盤単体での応答結果と同等の結果となるように考慮する面積を変化させた解析により同定したものである。

土のせん断特性を表現する骨格曲線には修正R-Oモデル⁶⁾を用いた。また、履歴則はMasing則を用いて表現している。せん断特性の設定パラメータは、せん断波速度 V_s については地盤のN値より算出し、修正R-Oモデルのパラメータは、 $h_{max}=0.2$, $\gamma_r=0.0005$ で一律で設定した。なお、土柱の最下端には粘性境界を設け、基盤のせん断波速度は $V_s=400$ m/s で設定した。

3.6 解析条件および入力地震動

動的解析は、Newmark- β 法 ($\beta=1/4$) により実施した。減衰は、剛性比例減衰と与えるものとし、1Hzで3%となるように設定した。入力する地震動は、耐震標準に示されるL2地震動スペクトルII (G1地盤) とし、基盤面より入力した。

4. 解析結果と考察

4.1 静的非線形解析結果

対象構造物の基本的特性を把握するため、静的非線形解析を実施した。荷重は、上部工、橋脚およびフーチングに作用させ、その荷重を漸増させて荷重-変位曲線を算出した。なお、自由地盤は固定とした。

図4に、杭基礎、直接基礎の各ケースの荷重-変位曲線と損傷モードを示す。杭基礎では、降伏震度は土被り深さが3m (Case3) までは大きな違いは見られないが、4.5m (Case4) になると約20%、6.0m (Case5) になると約40%上昇しており、より大きな慣性力を負担することが分か

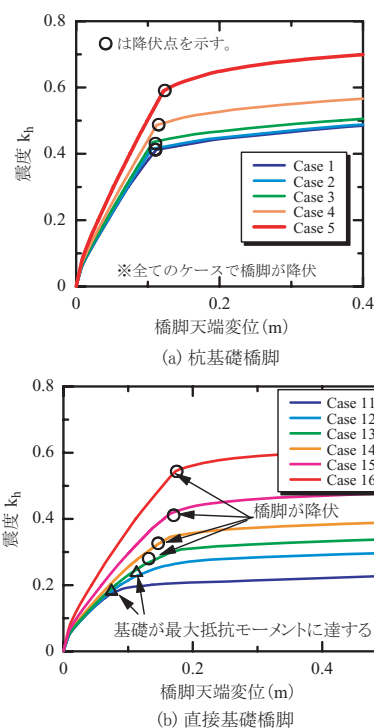


図4 静的非線形解析より得られた荷重-変位曲線

る。また、降伏点までの見かけ上の剛性も上昇しているのが分かる。損傷モードは、全てのケースで橋脚が降伏するモードとなった。直接基礎では、降伏震度の上昇が杭基礎よりも顕著に確認でき、Case14および16では、Case11に対してそれぞれ2.0、3.1倍に増加している。見かけ上の剛性も明らかに上昇しており、土被りの深さにより橋脚の拘束効果が増加することが分かる。損傷モードは、Case11,12では、橋脚の降伏より先に基礎の抵抗モーメントが最大となったのに対して、Case13~16では橋脚が先に降伏している。これは土被りが深くなることによる回転抵抗の増加と、く体前面の水平抵抗の増加による影響と考えられる。したがって、慣性力の影響を考慮した場合、土被りが深くなることにより構造物の拘束効果が増加し、見かけ上の剛性および降伏震度が増大することから橋脚の慣性力負担が増加すること、またフーチングの回転抵抗やく体前面の水平抵抗が増加することにより、降伏箇所が変化する可能性があることが分かった。

4.2 杭基礎橋脚の動的解析結果

図5に、Case1およびCase5における橋脚天端の時刻歴応答加速度を示す。応答加速度は解析時間全域で、Case5の応答値がCase1に対して100gal程度大きい値を示しているのがわかる。これは、先に示した土被りの拘束効果による慣性力負担の増大の影響と考えられる。

図6に、自由地盤に発生するせん断ひずみの最大値の分布を示す。高さ0mの位置はフーチング底面の位置に相当する。せん断ひずみは、主な剛性変化位置となる

特集：構造物技術

フーチング底面付近と深さ 10m 付近で大きくなっている。フーチング底面付近のせん断ひずみは、土被りの重量の増加の影響を受け、土被り深さに比例して増大している。これに対して、深さ 10m 位置のせん断ひずみは、土被り深さが小さいほど大きくなっているが、これは土被りが深いケースでフーチング底面付近のエネルギー消費が大きく、その影響を受けたものと考えられる。したがって、地盤変位の影響は、土被りの深いケースでは杭頭部で、土被りの浅いケースでは深さ 10m 付近で、比較的強く受けることが分かる。

図7,8には、橋脚および杭に発生する最大断面力分布を示す。橋脚の曲げモーメントには、土被りの深さにより大きな違いは見られないが、せん断力分布には違いが見られた。橋脚上部に着目すると Case5 のせん断力は他のケースに比べて大きい。これは、土被りによる拘束効果により慣性力負担が増加した影響と考えられる。橋脚基部に着目すると、土被りが深いほどせん断力が増加している。これは、せん断力分布の変曲点（急激にせん断力が増加する高さ）に土被り深さととの相関がみられること、また土被りが深いほどフーチング付近のせん断ひずみ量が大きいことを考えると、土被りの地盤変位による影響が示唆される。これについての詳細な検討は 4.4 節に示す。

杭の断面力に着目すると杭頭部では、土被りが深いケースでせん断力と曲げモーメントの両方で大きくなる傾向を示しており、また杭中間部では逆に、土被りの浅いケースで断面力が大きくなっている。これは、自由地盤の

当該深さにおけるせん断ひずみの最大値とも整合している。したがって、杭は地盤変位の影響を受けて、杭頭付近では土被りの深いケース、地中部では土被りの浅いケースで、相対的に断面力が大きくなったものと考えられる。

4.3 直接基礎橋脚の動的解析結果

図9に、Case11 および Case16 における橋脚天端の時刻歴応答加速度を示す。応答加速度は、Case16 が解析時間全域にわたって大きい値を示しているのが分かる。杭基礎橋脚と比較すると、土被りの拘束効果による慣性力負担の増大の影響が顕著に表れており、これは静的非線形解析の結果とも整合する。

図10に、橋脚に発生する最大断面力分布を示す。せん断力分布に着目すると、橋脚上部では土被りが深いほどせん断力が大きくなっている。これは、杭基礎橋脚と同様に、慣性力負担が増大による増加と解釈できる。橋脚基部も杭基礎橋脚と同様に橋脚上部と同様に土被りが深いほど、せん断力が増加しており、せん断力分布の変曲点にも土被り深さととの相関がみられる。これについての詳細な検討は 4.4 節に示す。

次に曲げモーメントに着目すると、土被りが深くなると躯体が降伏に達する範囲が拡大し、これに伴い見かけ上のせん断スパンが短くなっているのが分かる。降伏範囲は、土被り深さと相関が見られる。したがって、土被

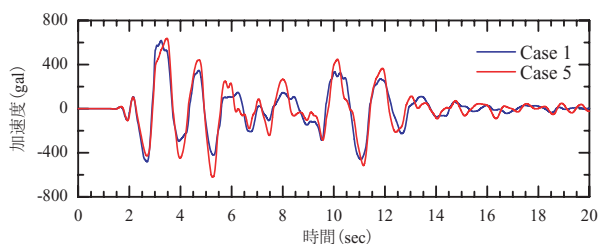


図5 橋脚天端の時刻歴応答加速度（杭基礎）

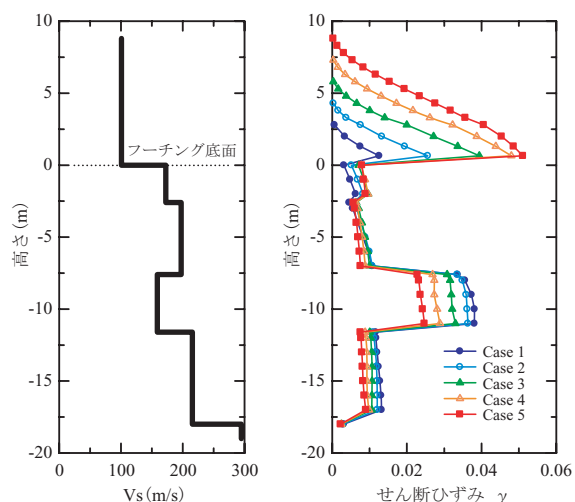


図6 自由地盤のせん断波速度と最大せん断ひずみの分布

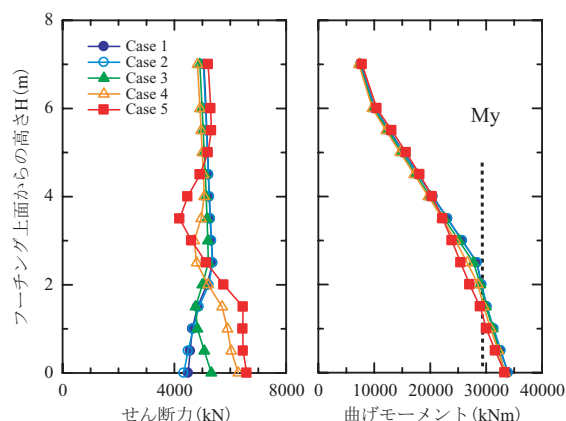


図7 橋脚の最大断面力分布（杭基礎橋脚）

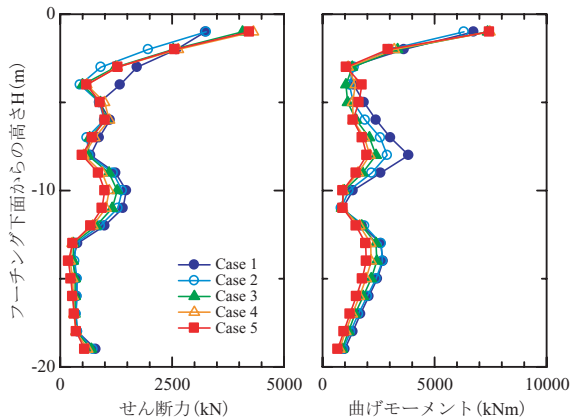


図8 杭の最大断面力分布（杭基礎橋脚）

りが深い場合には、土被りが橋脚を支持する影響で橋脚基部より上の範囲でも大きな曲げモーメントが発生するため、見かけ上のせん断スパンが短くなり、作用慣性力が増大したものと考えられる。

4.4 土被りに埋まる橋脚部分に関する検討

動的解析の結果より、土被りが深い橋脚では、慣性力による橋脚上部の断面力の増加の他に、地中に埋まる部分での断面力の増加が確認されたため、橋脚が地中に埋まる場合には地盤変位の影響も受ける可能性が想定された。そこで、地盤変位の影響を把握するため、構造物の質量を無視し、地盤変位の影響のみを受ける動的解析を実施した。ただし、簡単のために橋脚躯体は線形とした。

橋脚躯体の最大断面力分布を図11に示す。この結果を見ると、土被り深さが3.0m (Case13) まではそれほど影響は見られないが、4.5m以上のケース (Case14) では断

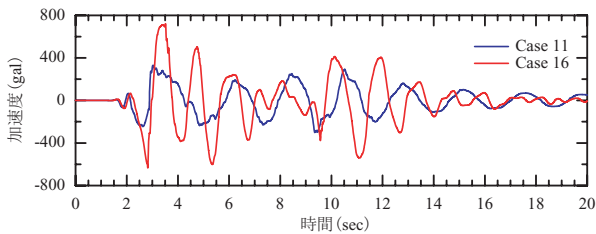


図9 橋脚天端の時刻歴応答加速度（直接基礎橋脚）

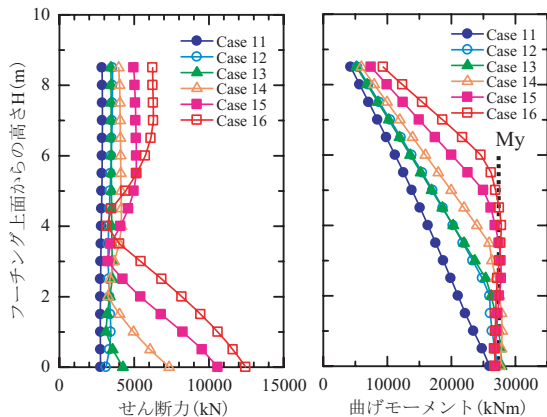


図10 橋脚の最大断面力分布（直接基礎橋脚）

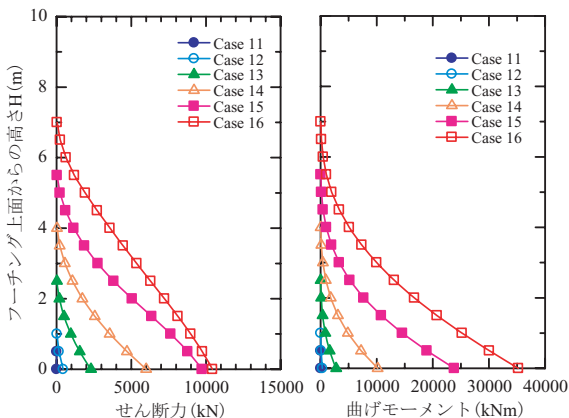


図11 橋脚の最大断面力分布（直接基礎橋脚）

面力が顕著に増加している。これは、4.3節に示した橋脚基部の断面力の増加とも整合している。杭基礎橋脚でも同様の結果が得られており、土被りが深い橋脚では、橋脚躯体の断面力に与える土被り部の地盤変位の影響を無視できないことが確認できた。以上の結果より、土被りが深い橋脚では、地盤が橋脚を拘束する効果だけでなく、作用としての効果もあることが確認できた。

5. 土被りの影響を考慮した橋脚の耐震性評価法の開発

5.1 耐震性評価における土被りの影響の考慮方法

4章の検討より、土被りの深い橋脚では、土被りに拘束効果と作用効果があることが分かった。拘束効果としては、水平抵抗および回転抵抗であり、作用効果としては、土被り地盤の変位による作用である。

これらの動的相互作用は、詳細な動的解析により考慮されるべき影響であるが、現状の設計実務では静的解析法によるのが主流である。そこで本検討では、一般的に設計で用いられる静的非線形解析によりその影響を考慮するため、土被りの変位量も考慮した応答変位法を適用した深い土被りを有する橋脚の耐震設計法を提案した(図12参照)。手順は、耐震標準に示す応答変位法と概ね同様であり、以下に示す通りとする。

手順1) 土被りの拘束効果を考慮した橋脚に対して静的非線形解析を実施し、等価固有周期、降伏震度を算定する。

手順2) 等価固有周期、降伏震度を用いて非線形応答スペクトル法²⁾により、土被りの拘束要素のみを考慮した地震応答値を推定し、応答震度を算定する。

手順3) 地盤の応答解析を実施して、地盤変位量と変形モードを算定する。

手順4) 得られた応答震度と地盤変形量を応答変位法によって橋梁に作用させることで、地震時の応答値を推定し、性能照査を実施する。

ただし、一般に土被り部分に用いられる土の物性は相

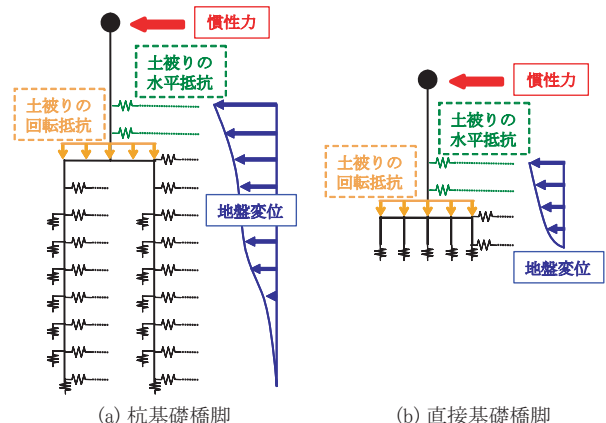


図12 土被りの深い橋脚の設計解析モデル

特集：構造物技術

対的に弱い場合、土被り部とフーチング以下の地盤で挙動に位相差が発生し、それぞれの最大相対変位発生時刻が大きく異なる可能性がある。その場合は、性能照査を行う部位の相対変位が最大になる変形モードでも照査を行うなどの配慮が必要である。

5.2 応答変位法を用いた土被りの影響の検討

耐震標準で用いられている応答変位法では、異なる振動性状を持った系を対象とした荷重の組み合わせを簡易に考慮する手法として、構造物に作用する慣性力と地盤変位の位相差を考慮する方法が提案されている。これは慣性力、地盤変位のそれぞれを主体とした場合に、他方の荷重を両者の周期比によって設定し、組み合わせるといったものである。本検討においてもこれと同様の流れで荷重の組み合わせを考慮することとした。荷重の組み合わせは次式で表現される。

(i) 慣性力を中心とした検討ケース：

$$R_i = 1.0 \times R_a + v \times f(z) \quad (1)$$

(ii) 地盤変位を中心とした検討ケース：

$$R_i = v \times R_a + 1.0 \times f(z) \quad (2)$$

ここで、 R_i は地震荷重、 R_a は橋梁に作用する慣性力、 $f(z)$ は地盤変位分布、 v は慣性力と地盤変位を組み合わせるための係数である^{2), 7)}。この係数は、耐震標準に示す値を用いることが可能である。

土被りの深い橋脚に対して、応答変位法の適用性を検討するため、土被り7.5mの直接基礎橋脚を例に、応答変位法による解析と動的解析の結果を比較する検証解析を実施した。応答変位法に用いる橋脚の最大応答加速度および地盤の最大変位は動的解析で得られた結果から、また構造物の等価固有周期は拘束要素をモデル化し、慣性力の影響を考慮した静的非線形解析結果から算出した。

図13には、応答変位法による解析結果と動的解析の結果を比較した橋脚の断面力分布を示した。応答変位法の結果としては、慣性力主体のケース ($v=1.0$) と地盤変位主体のケース ($v=0.7$) を示している。せん断力に着目すると、橋脚上部では、慣性力主体のケースで動的解析での発

生断面力が表現できている。また、地盤の作用を受ける橋脚の中央部～基部については、地盤変位主体のケースで表現できていることが分かる。次に、曲げモーメントについては、慣性力主体のケースと動的解析の応答曲げモーメントがほぼ同等である。これは、曲げモーメントに対しては、桁の慣性力の影響が卓越している影響であると考えられる。この結果より、土被りの深い橋脚の耐震性評価は、応答変位法によって評価可能であることが確認された。

6. まとめ

本検討より得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 深い土被りを有する橋脚の地震時挙動について解析的な検討を行った。その結果、土被りには拘束効果と作用効果の2つの効果があることが分かった。
- (2) 土被りが拘束として働く場合には、構造物全体系の剛性の向上および耐力が向上する。その結果、地震時に負担する慣性力が増大し、土被りの影響を考慮しない場合に比べて、橋脚の発生断面力が増加することが分かった。
- (3) 土被りが作用として働く場合には、土被りの地盤変位が橋脚に作用する。その結果、慣性力だけを考慮した場合に比べて橋脚躯体の断面力が増加する可能性があることが分かった。
- (4) 基礎の設計に用いられている応答変位法に土被りの影響を考慮することで、静的非線形解析においても動的相互作用の効果を評価可能であることが確認できた。

文献

- 1) 室野剛隆, 西村昭彦, 永妻真治: 軟弱地盤中の杭基礎構造物の地震応答特性と耐震設計への応用, 構造工学論文集, A, Vol.44-2, pp.631-640, 1998
- 2) (財) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計, 丸善, 1999
- 3) 豊岡亮洋, 室野剛隆: 免震橋の動的挙動に与える慣性力および地盤変位相互作用の影響, 土木学会地震工学論文集第30巻, pp283-290, 2009
- 4) 武田寿一: 鉄筋コンクリート建物の動的計算, コンクリートジャーナル Vol.12, No.8, pp.33-41, 1974
- 5) 西村隆義, 西村昭彦, 西岡英俊, 神田政幸, 羽矢洋, 舘山勝: 直接基礎の地震時残留沈下量評価のための構造解析モデルの提案と試算例, 第43回地盤工学研究発表会, 2008
- 6) 龍岡文夫, 福島伸二: 砂のランダム繰返し入力に対する応力～歪関係のモデル化(1), 生産研究359, 30巻9号, pp.26-29, 1978
- 7) 室野剛隆, 西村昭彦: 杭基礎構造物の地震時応力に与える地盤・構造物の非線形性の影響とその評価手法, 日本地震工シンポジウム講演論文集, Vol.10, No.2, pp.1717-1722, 1998

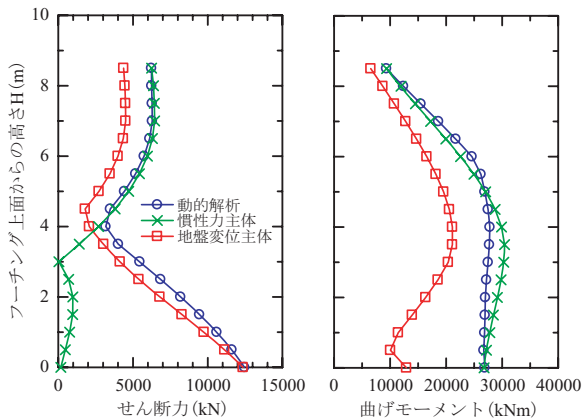


図13 橋脚の最大断面力分布 (直接基礎橋脚)