

既設杭基礎のせん断に着目した 地盤と構造物の動的相互作用の影響に関する解析的検討

西谷 朋晃¹・後藤 源太²・李 首一³・中谷 隆生⁴

¹正会員 工修 西日本高速道路株式会社関西支社（〒567-0871 大阪府茨木市岩倉町1-13）

²正会員 工修 株式会社高速道路総合技術研究所（〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1）

³正会員 NEXCO西日本コンサルタンツ株式会社 大阪支店（〒532-0002 大阪市淀川区東三国四丁目13-3）

⁴正会員 NEXCO西日本コンサルタンツ株式会社（〒732-0057 広島市東区二葉の里三丁目5-7）

1. 背景と目的

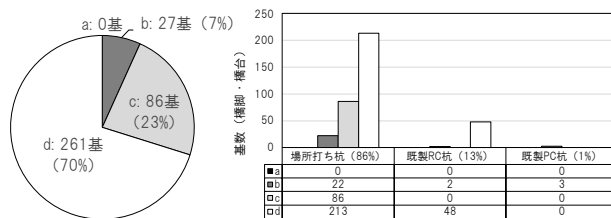
土木構造物の耐震設計法は、地震の影響によって構造物や地盤に生じる作用を慣性力や地盤変位といった静的な荷重に置き換えて応答値を算定して構造物の性能を照査する静的な設計法と、地震時に時々刻々と変化する地盤や構造物の挙動を動学的に解析して応答値を算定し、構造物の性能を照査する動的な設計法に大別される。

静的な設計法は、道路橋で一般的に採用されるような1次モードが卓越する比較的単純な構造物については適用性が高く、道路橋の設計基準である道路橋示方書（以下、道示）では、兵庫県南部地震を踏まえて改訂された平成8年度版以降、レベル2地震動に対する基礎の設計は地震時保有水平耐力法による静的な設計法、すなわち上部構造位置に静的な荷重を作用させた時の基礎の状態について照査する方法が示されている¹⁾。

一方、動的な設計法は、入力損失効果（剛性を有する基礎が周辺地盤の動的な挙動を拘束することで、構造物に作用する地震動が自然地盤における地震動よりも小さくなる現象）や地盤のひずみ依存性による地震時の地盤剛性の低下といった地盤と構造物の動的相互作用の影響等を解析モデルに反映することで、動的解析により複雑な地震時挙動を推定して設計することができる。ただし、これらの動的相互作用を考慮した動的解析は煩雑であり、解析方法や地盤抵抗のモデル化等について様々な研究^{2)~7)}がなされているものの、現在のところ、道路橋において汎用的に用いられている方法はない。

ここでNEXCOでは、平成28年熊本地震を契機に、大規模地震時でも軽微な損傷に留まり速やかな機能回復が可能となる橋梁の耐震対策を実施しているところである。特に、膨大なストックに対して効果的かつ効率的に耐震

対策を行うため、実務において既設基礎の保有耐力を適切に評価し、対策優先度の考え方を整備することが求められている。筆者ら⁸⁾は、NEXCOで実施している耐震補強設計業務で照査を満足しない杭基礎形式や照査項目の実態把握を行った。その結果、調査対象898基の基礎のうち、場所打ち杭が全体の78%（703基）を占め、そのうち27%（190基）がせん断に対する照査を満足しない状況であった。一方、過去の大規模地震における調査報告書等⁹⁾を基に、NEXCOで実績の多いRC及びPC杭基礎の被害を整理した結果を図-1¹⁰⁾に示す。図-1より、全体の93%（347基）の既設杭基礎が被災度c以下でその被害は限定的であり、杭基礎の沈下等の損傷に起因する落橋等の甚大な被害は生じていないことがわかる。このように、現行道示の照査を満足していない既設杭基礎が、大規模地震によって直ちに甚大な損傷に至るとは限らない。この一因として、現行の静的な設計法が、複雑な実現象を設計上安全側の仮定を設けたうえで単純化した体系となっていることが考えられ、既設杭基礎の耐震性能評価については合理化の余地があると言える。



被災度 ^{a)}	定義	判定基準	評価点の算出方法
a	・基礎の沈下と同時に大きな残留水平変位が見られる	-	杭体に生じたひび割れ幅に応じて、累積ひび割れ点数を算出。
b	・基礎に大きな残留水平変位が見られる ・杭体にき裂が見られる	9点以上	・0.0mm～0.4mm：0点 ・0.5mm～1.4mm：1点
c	・杭体に小さなき裂が見られる	5～8点	・1.5mm～2.9mm：2点 ・3.0mm以上：3点
d	・杭体に損傷がないか、き裂があっても軽微なもの	1～4点	

※ 組杭の中で最も厳しい杭体の評価点を用いて判定を行い、対象橋脚（または橋台）の被災度とした。

図-1 過去の大規模地震における杭基礎の被災度調査¹⁰⁾

既設杭基礎の合理的な耐震性能評価を行う手法として、いくつかのアプローチが考えられる。1つは構造物の「抵抗」に着目したもので、既報^{8,11)~13)}にてNEXCOの既設杭基礎で照査を満足しない傾向にある場所打ち杭のせん断耐力評価に関して各種検討を行っている。

本研究では、構造物への「作用」に着目し、合理的な既設杭基礎の耐震性能評価方法の提案に資する基礎資料を得る目的で、地盤と構造物の動的相互作用が杭基礎の応答のうち、特にせん断に及ぼす影響について、解析手法を用いた基礎的検討を実施した。

2. 杭基礎に関する耐震設計法の整理

大規模地震時における杭基礎の動的解析問題については、上部構造、基礎本体及び地盤の相互作用の影響を考慮する必要がある。地盤と構造物の動的相互作用を考慮した耐震設計及び応答評価に関する検討については、これまでに様々な研究がなされており、基礎の動的挙動のうち、特に繰り返し水平载荷における曲げ挙動を評価するための実験的検討^{14)~18)}やそのモデル化手法^{19)~22)}に関するものがある。これらの研究にあるように、杭基礎の動的問題を検証する解析手法は、**図-2**²³⁾に示す①2次元骨組み解析法、②2次元有限要素法、③3次元有限要素法の3つに大別される。これらの解析手法のうち、一般的に使用されている解析手法は①2次元骨組み解析法（はり-ばねモデル）であり、静的及び動的な非線形解析で広く用いられている。一方、②2次元有限要素法及び③3次元有限要素法についても様々な解析手法が提案されている。しかしながら、これらの有限要素法では、モデル化の際に地盤と杭基礎の接点共有型が用いられることが多いが、接触要素や地盤物性値の設定に明確な定めがなく、解析により得られた応答の信頼性確保や、2次元骨組み解析法で用いられるような自動設計計算ツールが整備されていないことによる作業の効率性等、いずれも設計実務で汎用的に用いるためには解決すべき課題がある。本研究では、その目的を鑑みて、一般的に使用されている①2次元骨組み解析法を用いて検討を行うこととした。

ここで、同じ2次元骨組み解析法であっても、道路と鉄道によってその解析手法にはそれぞれ特徴がある。道示と鉄道構造物等設計標準・同解説（以下、鉄道標準）に示される解析手法を**図-2**の分類で整理すると**表-1**のとおりとなる。それぞれ設計地震動や部材のモデル化等に違いがあるが、最も特徴的な相違点は橋脚の解析モデルにおける地盤の扱いである。**図-3**に、道示と鉄道標準における橋脚の解析モデルを示す。道示では、橋脚のモデル化の際に基礎と地盤の抵抗を線形ばね要素で集約して表現した集約ばねモデル（以下、道示モデル）を用

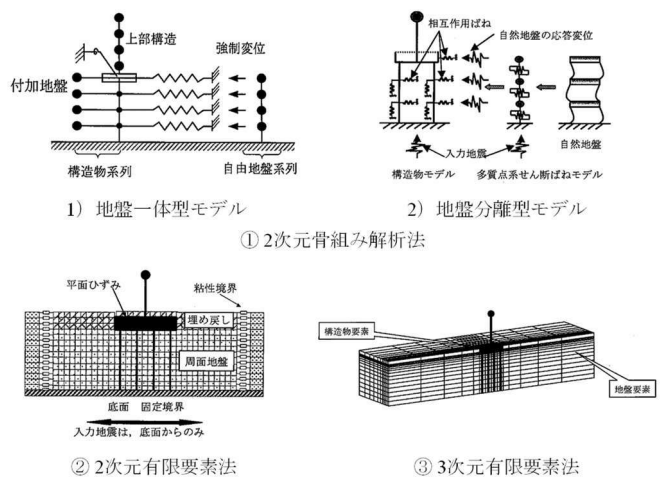


図-2 基礎構造の動的解析手法²³⁾

表-1 道示と鉄道標準の解析手法

基準	動的解析	静的解析
鉄道標準	① 2次元骨組みモデル (地盤一体型 or 地盤分離型)	① 2次元骨組みモデル (所要震度スペクトル法)
道路橋示方書 NEXCO 設計要領	① 2次元骨組みモデル (地盤是集約ばねとして評価)	① 2次元骨組みモデル (保有水平耐力法、ラーメンモデル)

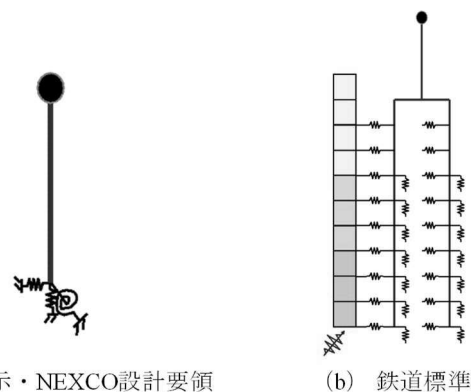


図-3 橋脚の解析モデル

いるのに対し、鉄道では、基礎と基礎周囲の地盤ばねを考慮した地盤・構造物一体型モデル（以下、鉄道モデル）を用い、地盤に関して詳細な非線形モデルを示している。また、道示では、橋脚と基礎の照査モデルが異なり、基礎の照査については、前述の通り静的に実施するのに対し、鉄道標準では同一の地盤・構造物一体型モデルを用いて実施する。

道路橋における既設杭基礎の耐震性能評価を合理化するための一手法として、このような地盤と構造物の動的相互作用の影響を考慮した耐震設計手法の適用性を検証するため、実構造物を対象に道示モデルと鉄道モデルを用いて、モデル化の違いが実杭の応答、特に照査を満足しない傾向が強いせん断に及ぼす影響評価を実施した。

3. 地盤と構造物の動的相互作用を考慮した解析検討

(1) 解析対象

解析対象は、NEXCO で耐震補強設計を実施しているせん断照査を満足しない場所打ち杭を有する橋梁から、代表的な杭径・杭長及び鉄筋量を有する橋脚を選定した。それらの橋脚のうち、地盤の基本固有周期 T_G が中間程度の $T_G=0.386$ s (II種地盤) となる橋脚 1 基を解析対象とした。図-4 に、解析対象橋脚の構造諸元を示す。

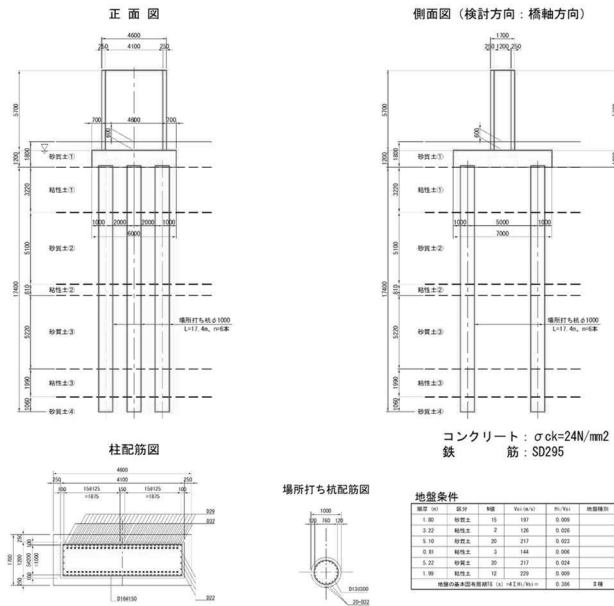


図-4 解析対象橋脚の構造諸元

(2) 解析ケース

道示モデルと鉄道モデルのモデル化の違いにより杭基礎への応答に影響を及ぼすと考えられる、地盤条件と構造諸元を解析パラメータとした。表-2 に、解析ケースを示す。地盤条件は、実杭における地盤の基本固有周期 $T_G=0.386$ s (II種地盤) に対して、層厚や地盤区分は変えずに N 値のみを変化させて基本固有周期を $T_G=0.546$ s (III種に近いII種地盤)、 $T_G=0.311$ s (I種に近いII種地盤) とした 3 ケースを設定した。また、構造諸元は、実杭の主鉄筋比 1.6% に対して、曲げ剛性を変化させて主鉄筋比 1.0% とした 2 ケースを設定した。なお、帯鉄筋については全ケースで $D16@150$ を配置した。

表-2 解析ケース

CASE	構造諸元	地盤条件	備考
1-1	主鉄筋比 1.6%	$T_G=0.311$ s	-
1-2		$T_G=0.386$ s	実杭諸元
1-3		$T_G=0.546$ s	-
2-1	主鉄筋比 1.0%	$T_G=0.311$ s	-
2-2		$T_G=0.386$ s	-
2-3		$T_G=0.546$ s	-

(3) 解析モデル

検討に用いた動的解析モデルは、図-3 (a) に示す道示モデルに加えて、図-5 に示す上部構造及び橋脚重量 - 杭基礎 - 周辺地盤から構成されるモデルとした。すなわち、周辺地盤の水平変位挙動について、地盤と構造物間の相互作用をモデル化した Winkler 型 $p-y$ 曲線履歴モデルを介して杭体へ作用させる橋脚・杭基礎・周辺地盤一体系でのモデルとした。解析は、橋軸方向に対する 2 次元モデルとし、自由地盤(ばね)は Ramberg-Osgood 骨格曲線でモデル化した (以下、R-O モデル)。

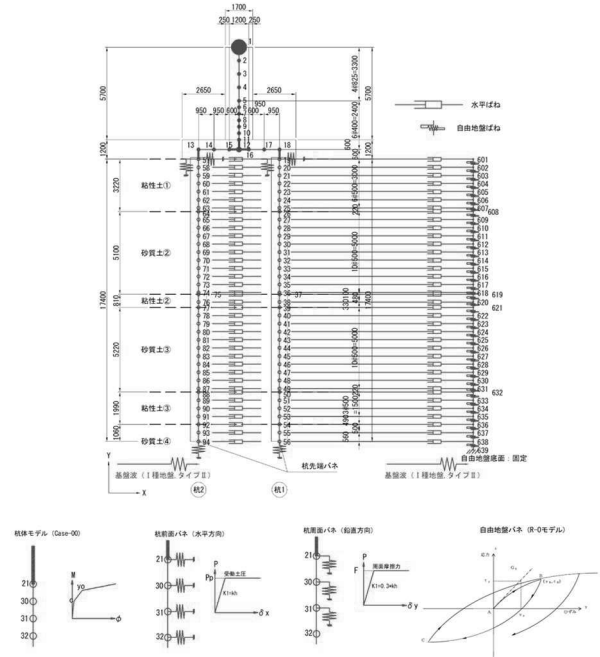


図-5 地盤 - 構造物系の動的解析に用いる解析モデル

(4) 水平方向の抵抗特性

a) 水平方向地盤反力係数 kH の設定

本解析では、水平地盤反力係数 kH は以下のように算出した、ただし、本検討では自由地盤が杭に及ぼす影響を確認する目的で実施するため、フーチング前面及び側面の地盤抵抗は考慮しない。

$$kHE = \eta k \cdot \alpha k \cdot kH$$

$$kH = kH_0 \cdot \left(\frac{BH}{0.3}\right)^{\frac{3}{4}}$$

$$kH_0 = \alpha \cdot E_0 / 0.3$$

$$\alpha \cdot E_0 = \beta \cdot \sum (\alpha \cdot E_{0i} \cdot Li)$$

$$BH = \sqrt{\frac{D}{\beta}}$$

ここに、 kHE はレベル 2 地震時照査に用いる水平方向地盤反力係数 (kN/m^3)、 ηk は群杭効果を考慮した水平方向地盤反力係数の補正係数、 αk は単杭における水平地盤反力係数の補正係数、 kH は地震時の水平方向地盤反力係数 (kN/m^3)、 β は杭の特性値 (m^{-1})、 BH は杭の換算載荷幅 (m)、 D は杭外径 (m) である。

b) 水平地盤反力度の上限値 pHu の設定

杭の水平地盤反力度の上限値 pHu は、道示 IV の受働土圧 pEp に基づいて設定した。

$$pEp_i = kEp \cdot \{ \sum \gamma_i \cdot h_i + q \} + 2 \cdot c_i \cdot \sqrt{kEp_i}$$

$$kEp_i = \frac{\cos^2 \phi_i}{\cos \delta Ei \cdot \left[1 - \sqrt{\frac{\sin(\phi_i - \delta Ei) \cdot \sin \phi_i}{\cos \delta Ei}} \right]^2}$$

$$pHu = \eta_p \cdot \alpha_p \cdot pEp$$

ここに、pEp は受働土圧強度 (kN/m²)、kEp は受働土圧係数、γ は土の単位重量 (kN/m³)、h は層厚 (m)、q は上載荷重 (kN/m²)、c は土の粘着力 (kN/m²)、φ は土のせん断抵抗角 (°)、σE は壁面摩擦角 (°)、pHu は水平地盤反力度の上限値 (kN/m²)、ηp は群杭効果を考慮した水平地盤反力度の上限値の補正係数、αp は単杭における水平地盤反力度の上限値の補正係数である。

(5) 鉛直方向の抵抗特性

a) 鉛直方向地盤反力係数 kv の設定

本解析では、水平地盤反力係数 kv は以下のように算出した。

$$kv = a \cdot Ap \cdot Ep / L$$

ここに、Ap は杭の純断面積 (m²)、Ep は杭体のヤング率 (kN/m²)、L は杭長 (m) である。

b) 押し込み支持力の上限値 PNu の設定

本解析では、押し込み支持力の上限値 PNu は以下のように算出した。

$$PNu = \min (Ru, Rpu)$$

$$Ru = qd \cdot Ap + U \cdot \sum (Li \cdot fi)$$

$$Rpu = 0.85 \cdot \sigma ck \cdot Ac + \sigma y \cdot As$$

ここに、Ru は地盤から決まる杭の極限支持力 (kN)、Rpu は杭体から決まる押し込み支持力の上限値 (kN)、qd は杭先端で支持する単位面積当りの極限支持力度 (kN/m²)、Ap は杭先端面積 (m²)、U は杭の周長 (m)、Li は層厚 (m)、fi は層の最大周面摩擦度 (kN/m²)、σck は杭体コンクリートの設計基準強度 (kN/m²)、Ac は杭体コンクリートの断面積 (m²)、σy は鉄筋の降伏点 (kN/m²)、As は鉄筋断面積 (m²) である。

c) 引抜き抵抗力の上限値 PTu の設定

本解析では、押し込み支持力の上限値 PTu は以下のように算出した。

$$PTu = \min (Pu+W, Ppu)$$

$$Pu+W = U \cdot \sum (Li \cdot fi) + W$$

$$Ppu = \sigma y \cdot As$$

ここに、Pu は地盤から決まる杭の極限引抜き力 (kN)、W は杭の有効重量 (kN)、Ppu は杭体から決まる引抜き抵抗力の上限値 (kN) である。

(6) 地盤のモデル化

杭の周辺地盤は、図-5 に示すように多層系のせん断土柱としてモデル化した。すなわち、地盤の質量を深度方向に離散化した質点として配置し、質点間を自由地盤ばねで連結したモデルとなる。なお、解析モデルの基部にあたる自由地盤底面の境界条件は固定としており、地盤の深さ方向への分割は、地盤 - 基礎系の解析を行うことを考慮して杭径の 1/2 程度の層分割とした。

a) 自由地盤ばねの骨格曲線と非線形特性

質点間を連結する自由地盤ばねは、地盤の動的挙動に大きな影響を与える。本解析では、自由地盤ばねの骨格曲線を図-5 に示す双曲線型の R-O モデルとして与えた。R-O モデルの骨格曲線は次式によって表され、初期せん断剛性 G₀ と地盤の最大せん断応力 τ_f は、拘束圧依存性を考慮して与えられる。

$$\tau = \frac{G_0 \gamma}{1 + G_0 \gamma / \tau_f} = \frac{G_0 \gamma}{1 + \gamma / \gamma_r}$$

また、初期せん断剛性 G₀ とせん断弾性波速度 V_s の関係は次式から算出した。

$$G_0 = \rho \cdot V_s^2$$

ここに、γ は単位重量 (kN/m³)、ρ は質量密度 (t/m³) である。

b) 粘性減衰

本解析では、周辺地盤と構造物に対してそれぞれの特性を踏まえた粘性減衰を設定した。各部材に与える粘性定数は道示 V を参考に、表-3 の値を用いた。

表-3 減衰定数

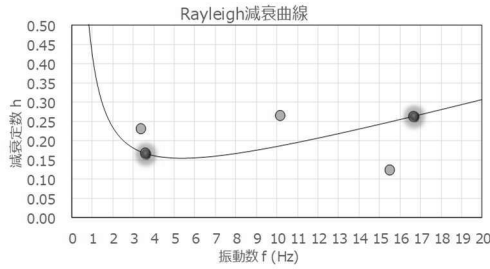
部材	減衰定数
地盤	0.200~0.290
地盤 - 基礎間のばね	0.200
杭体	0.000
橋脚	0.050
フーチング, 上部構造等の剛体	0.000

構造物に与える粘性減衰マトリックスは、各解析ケースに応じて、地盤の 1 次モードや構造物のスウェイ・ロッキングモードの中から過大な減衰を与えないような 2 点を選択し、それらから定まる Rayleigh 型減衰を用いた。固有振動モードごとの減衰定数は、ひずみエネルギー比例減衰法により求めた。図-6 に、固有値解析の結果より作成した粘性減衰マトリックスを示す。

(7) 入力地震動

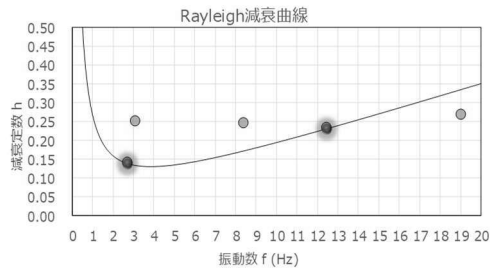
道示モデルの入力地震動は地表面波であるため、道示タイプ II 地震動の中で、図-7 (a) に示す地盤種別 II 種の 3 波形のうち、最大加速度が最も大きい 3 波目【加速

選択回数	f	h	
2	3.601	0.16550	$\alpha = 5.168418$
6	16.659	0.26191	$\beta = 0.004533$



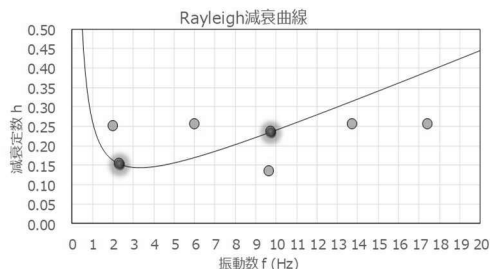
(a) CASE1-1, CASE2-1

選択回数	f	h	
1	2.699	0.13843	$\alpha = 3.145959$
6	12.461	0.23094	$\beta = 0.005386$



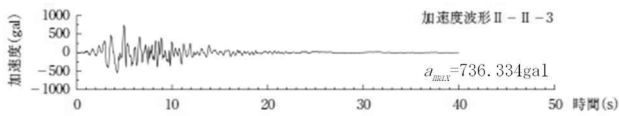
(b) CASE1-2, CASE2-2

選択回数	f	h	
2	2.313	0.15214	$\alpha = 2.968345$
5	9.731	0.23468	$\beta = 0.006882$

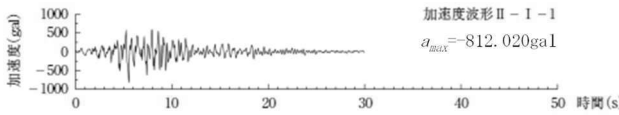


(c) CASE1-3, CASE2-3

図-6 粘性減衰マトリックス (Rayleigh型)



(a) 道示モデル



(b) 鉄道モデル

図-7 入力地震動

度波形 II-II-3】を入力地震動とした。一方、鉄道モデルの入力地震動は基盤波のため、道示タイプII地震動の中で、図-7 (b) に示す地盤種別I種の3波形のうち、最大加速度が最も大きい1波目【加速度波形 II-I-1】を入力地震動とした。

4. 解析結果と考察

表-2 に示す解析ケースを対象に解析を実施した結果を以下に示す。なお、応答の影響評価は、杭頭のせん断力、柱天端の水平変位、及び柱基部の断面力に着目した。

(1) せん断力分布

図-8 に、実杭諸元の CASE1-2 におけるせん断力の比較を示す。鉄道モデルによる解析では、自由地盤との相互作用の影響により、道示モデルでは想定していない杭先端付近の地中部においてせん断力が発生していることがわかる。この傾向は、地盤の固有周期や杭の曲げ剛性が異なる場合であっても同様であった。

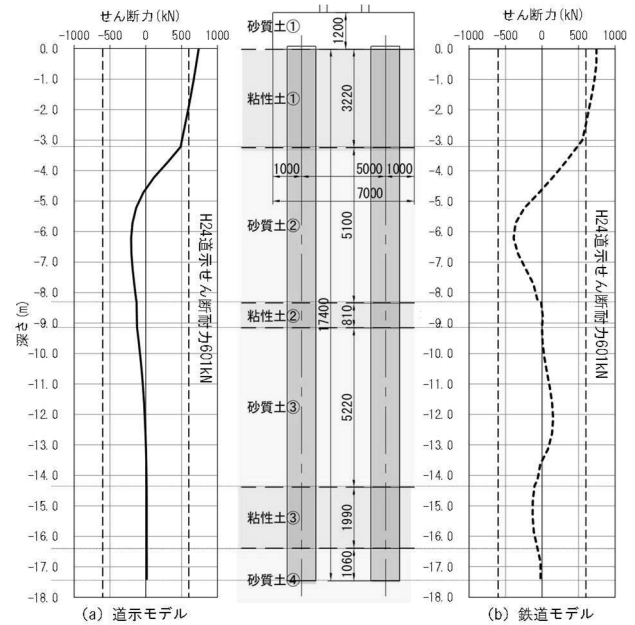


図-8 杭体に作用するせん断力の比較 (CASE1-2)

(2) 杭頭のせん断力

a) 地盤の固有周期の影響

図-9 に、主鉄筋比 1.6% の場合の杭頭のせん断力を地盤の固有周期ごとに示す。杭頭のせん断力に着目すると、地盤種別が I 種地盤に近いほど、鉄道モデルによる解析では道示モデルと比較して杭頭部に発生するせん断力が大きくなる傾向にある。一方、地盤種別が III 種地盤に近いほど、鉄道モデルによる解析では道示モデルと比較して杭頭部に発生するせん断力が小さくなる傾向にある。

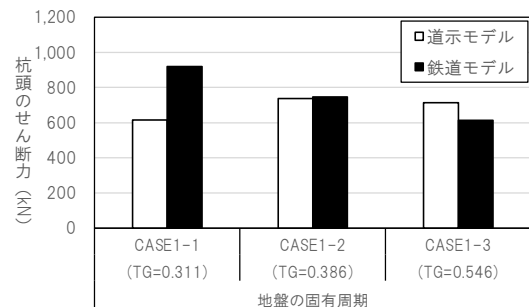


図-9 杭頭のせん断力の比較 (主鉄筋比 1.6%)

b) 杭の曲げ剛性の影響

図-10に、杭頭のせん断力比（主鉄筋比1.6%に対する主鉄筋比1.0%のせん断力）を地盤の固有周期ごとに示す。せん断力比が小さいことは、主鉄筋比1.6%の場合と比較して、主鉄筋比1.0%の場合に発生するせん断力が小さいことを意味する。図-10より、同じ地盤条件であっても、道示モデルはせん断力比がほとんど変化しないのに対して、鉄道モデルはせん断力比が2~3割程度低下している。これは、主鉄筋比が小さくなると杭体の曲げ剛性は小さく変形しやすくなるためであり、鉄道モデルは道示モデルと比較して、杭の曲げ剛性の違いによる減衰効果の影響が表現されていると考えられる。

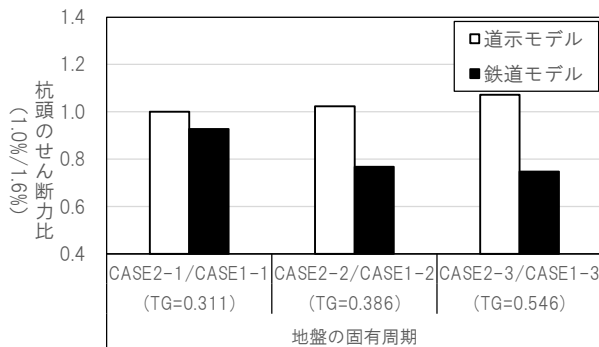


図-10 杭頭のせん断力比（主鉄筋比1.0%/1.6%）の比較

(3) 柱天端の水平変位

a) 地盤の固有周期の影響

図-11に、主鉄筋比1.6%の場合の柱天端の水平変位を地盤の固有周期ごとに示す。鉄道モデルによる解析では、道示モデルと比較して柱天端の水平変位が大きくなる傾向にある。これは、図-12に示すように、地盤とフーチング・杭を一体でモデル化した鉄道モデルでは、高次振動モードにおいて柱と基礎の変形方向が反対になる場合があるため、杭基礎をフーチング下面の集約ばねとしてモデル化した道示モデルと比較して、柱とフーチングの相対変位量が大きくなったためと考えられる。モデル化の違いによる柱天端の水平変位の差は、地盤種別がI種地盤に近いほど大きくなる傾向にある。

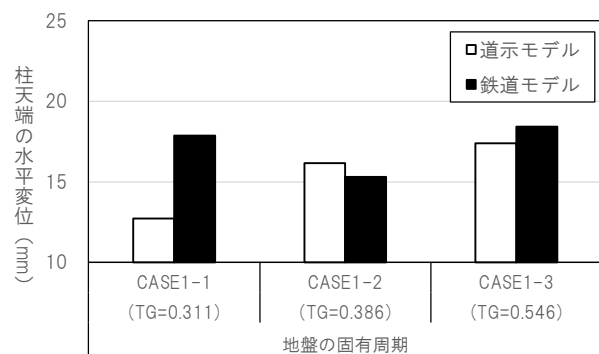
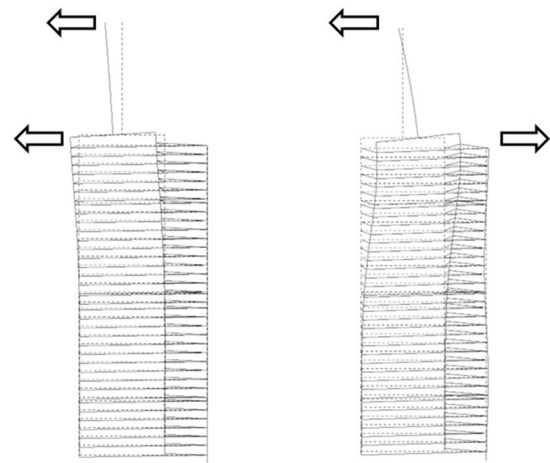


図-11 柱天端の水平変位の比較（主鉄筋比1.6%）



(a) 2次モード (T=0.432s) (b) 5次モード (T=0.103s)

図-12 鉄道モデルの主要モード図 (CASE1-3)

b) 杭の曲げ剛性の影響

図-13に、柱天端の水平変位の比（主鉄筋比1.6%に対する主鉄筋比1.0%のせん断力）を地盤の固有周期ごとに示す。水平変位の比が小さいことは、主鉄筋比1.6%の場合と比較して、主鉄筋比1.0%の場合に発生する水平変位が小さいことを意味する。図-13より、同じ地盤条件であっても、道示モデルは水平変位の比が変化しないのに対して、鉄道モデルは水平変位の比が1~2割程度低下している。これは、主鉄筋比が小さくなると杭体の曲げ剛性は小さく変形しやすくなるためであり、鉄道モデルは道示モデルと比較して、杭の曲げ剛性の違いによる減衰効果の影響が表現されていると考えられる。

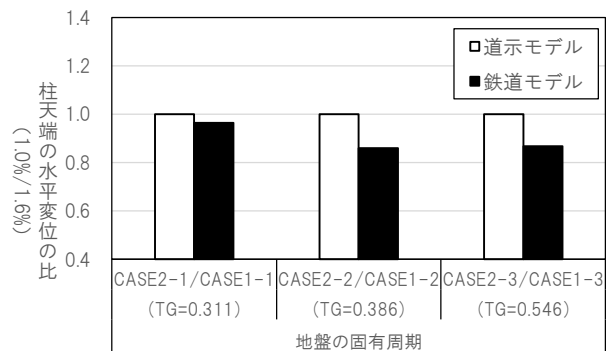


図-13 柱天端の水平変位の比（主鉄筋比1.0%/1.6%）

(4) 柱基部の断面力

a) 地盤の固有周期の影響

図-14に、主鉄筋比1.6%の場合の柱基部のせん断力を地盤の固有周期ごとに示す。地盤種別がI種地盤に近い場合、鉄道モデルによる解析では道示モデルと比較して柱基部に発生するせん断力が大きくなる。一方、地盤種別がIII種地盤に近いほど、鉄道モデルによる解析では道示モデルと比較して柱基部のせん断力は小さくなる傾向にある。そのため、地盤と構造物の動的相互作用を考慮

することによる躯体に作用する外力の低減効果は、杭体と同様に地盤条件の影響を大きく受けると考えられる。

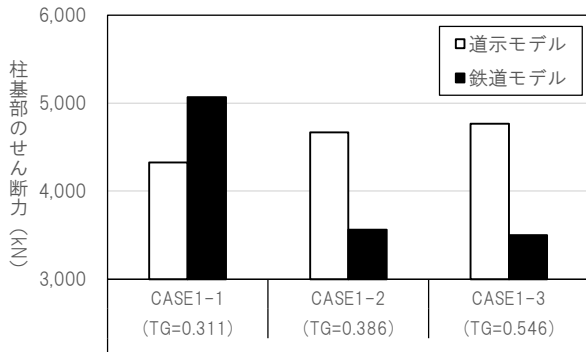


図-14 柱基部のせん断力の比較 (主鉄筋比 1.6%)

b) 杭の曲げ剛性の影響

図-15 に、柱基部のせん断力の比 (主鉄筋比 1.6%に対する主鉄筋比 1.0%のせん断力) を地盤の固有周期ごとに示す。図-15 より、同じ地盤条件であっても、道示モデルは柱基部のせん断力の比が変化しないのに対して、鉄道モデルは柱基部のせん断力の比が 1~2 割程度低下している。これは、主鉄筋比が小さくなると杭体の曲げ剛性は小さく変形しやすくなるためであり、鉄道モデルは道示モデルと比較して、杭の曲げ剛性の違いによる減衰効果の影響が表現されていると考えられる。

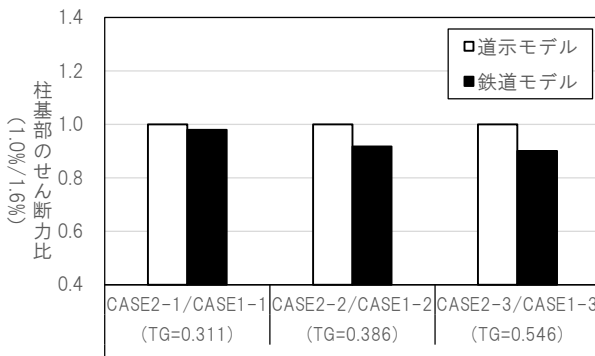


図-15 柱基部のせん断力の比 (主鉄筋比 1.0%/1.6%)

5. 結論

本研究では、構造物への「作用」に着目し、合理的な既設杭基礎の耐震性能評価方法の提案に資する基礎資料を得る目的で、地盤と構造物の動的相互作用が杭基礎の応答のうち、特にせん断に及ぼす影響について、解析手法を用いた基礎的検討を実施した。具体的には、道路橋における既設杭基礎の耐震性能評価を合理化するための一手法として、地盤と構造物の動的相互作用の影響を考慮した耐震設計手法の適用性を検証するため、実構造物を対象に道示モデルと鉄道モデルを用いて、モデル化の違いが実杭の応答、特に照査を満足しない傾向が強いせん断に及ぼす影響評価を実施した。

解析により得られた結果を以下に示す。

- ・地盤の固有周期や杭の曲げ剛性に関わらず、鉄道モデルによる解析では、自由地盤との相互作用の影響により、道示モデルでは想定していない杭先端付近の地中部においてせん断力が大きくなることが確認された。
 - ・杭頭のせん断力に着目すると、地盤種別がⅠ種地盤に近いほど、鉄道モデルによる解析では道示モデルと比較して杭頭部に発生するせん断力が大きくなる傾向にある。一方、地盤種別がⅢ種地盤に近いほど、鉄道モデルによる解析では道示モデルと比較して杭頭部に発生するせん断力が小さくなる傾向にある。
 - ・柱天端の水平変位に着目すると、モデル化の違いにより、特に高次振動モードでは柱とフーチングの相対変位量が異なることから、鉄道モデルによる解析では、道示モデルと比較して柱天端の水平変位が大きくなる傾向にある。
 - ・同じ地盤条件の場合、主鉄筋比が小さいほど杭体の変形しやすく、杭の曲げ剛性の違いによる減衰効果の影響により、鉄道モデルは道示モデルと比較して応答値が小さくなる傾向がある。
- 一方で、上記の結果を踏まえると、地盤条件や構造諸元によって構造物の応答に及ぼす動的相互作用の影響程度は異なり、必ずしも杭体に作用する外力の低減効果が期待できるわけではない。今後、既設基礎杭の合理的な耐震性能評価手法の確立に向けて、次のような課題が挙げられる。
- ・鉄道モデルに用いる入力地震動について、地震動の入力位置が杭先端と自由地盤の底面であることから、本研究では、道示における耐震設計上の基盤面となるⅠ種地盤の地震波を便宜的に用いているが、より解析の精緻化を図るために、橋梁ごとに道示波レベルに相当する入力地震動の作成が必要と考えられる。
 - ・杭周辺地盤の水平変位挙動について、地盤と構造物の相互作用をモデル化するためには、自由地盤におけるばね要素の精緻化が重要であり、解析では地盤の最大ひずみと減衰の関係に留意する必要がある。特に、既設橋のように古い杭基礎では地盤情報が十分ではない場合があるため、本稿で使用した解析モデルを設計実務で適用するためには、動的三軸試験等により現況地盤の特性を正確に把握する必要がある。

謝辞：本研究は (国研) 土木研究所、首都高速道路 (株) との共同研究の一環として実施したものであり、関係各位からは貴重なご意見を頂いた。ここに記して関係各位に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書Ⅳ下部構造編，2002。
- 2) 岩上憲一，大塚久哲，久納淳司：地盤と構造物の動的相互

- 作用を考慮した杭基礎の耐震設計法に関する研究, 第25回地震工学研究発表会講演論文集, 1999.7.
- 3) 白戸真大, 木村嘉富, 福井次郎: 鉄筋のはらみ出しを考慮した場所打ち杭のモデルと地盤振動が杭基礎に与える影響評価への適用, 土木学会論文集, No.689/I-57, pp.153-172, 2001.10.
 - 4) 橋本至, 林川俊郎, 小幡卓司, 寿楽和也: レベル2地震動下における杭基礎の群杭効果に関する解析的考察, 土木学会応用力学論文集, Vol.8, 2005.8.
 - 5) 星隈順一, 堺淳一, 河野哲也, 谷本俊輔, 安藤滋芳: 地盤物性値のばらつきが杭基礎の地震時応答評価に与える影響に関する研究, 土木研究所資料第4283号, 2014.3.
 - 6) 岡田太賀雄, 堺淳一, 谷本俊輔, 河野哲也, 運上茂樹, 星隈順一: 場所打ち杭を用いた道路橋基礎への動的照査法の適用に関する基礎的検討, 第13回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2010.2.
 - 7) 安藤滋芳, 河野哲也, 谷本俊輔, 西田秀明, 星隈順一: 動的解析による既製コンクリート杭を有する既設道路橋基礎の耐震性評価に関する検討, 土木学会構造工学論文集, Vol.59A, 2013.3.
 - 8) 西谷朋晃, 長谷俊彦, 李首一, 中谷隆生: 既設場所打ち杭のせん断耐力評価の合理化に関する検討, 第75回土木学会年次学術講演会講演概要集, 2020.9.
 - 9) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会: 兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書, 1995.12.
 - 10) 稲荷優太郎, 高橋章浩, 後藤源太, 西谷朋晃: 正負交番載荷により損傷を受けたRC組杭基礎の鉛直支持機能, 第57回地盤工学研究発表会 (投稿中)
 - 11) 西谷朋晃, 後藤源太, 高原良太, 李首一, 中谷隆生: 既設場所打ち杭のせん断耐力に及ぼすせん断スパン比の影響に関する実験的検討, 第77回土木学会年次学術講演会講演概要集 (投稿中)
 - 12) 李首一, 後藤源太, 高原良太, 中谷隆生, 西谷朋晃: 解析的手法に基づいた既設場所打ち杭の破壊形態に関する検討, 第77回土木学会年次学術講演会講演概要集 (投稿中)
 - 13) 後藤源太, 高原良太, 西谷朋晃, 李首一, 中谷隆生: 既設場所打ち杭のせん断耐力に及ぼす帯鉄筋構造細目の影響に関する実験的検討, 第77回土木学会年次学術講演会講演概要集 (投稿中)
 - 14) 吉川正昭, 安倍勇, 山田善一: 杭基礎-地盤の非線形動的相互作用に関する実験的研究, 土質工学会論文報告集, Vol.23.No.3, Sept.1983.
 - 15) 木村亮, 幸左賢二, 伊藤恭平, 坂本眞徳: 場所打ち杭の大変形水平挙動に関する研究, 土木学会構造工学論文集, Vol.39A, 1993.3.
 - 16) 王海波, 室野剛隆, 西村明彦: 大型せん断土槽を用いた杭基礎と地盤の動的相互作用に関する実験的検討, 土木学会論文集, No.661/I-53, pp.57-69, 2000.10.
 - 17) 福井次郎, 中谷昌一, 白戸真大, 野々村佳哲, 喜多直之: 群杭基礎の大型振動台実験, 土木研究所資料第4015号, 2006.8.
 - 18) 河野哲也, 堺淳一, 岡田太賀雄, 谷本俊輔, 運上茂樹, 星隈順一: 地盤の層構成の違いが群杭基礎の地震時挙動に与える影響に着目した加振実験, 第13回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2010.2.
 - 19) 小阪拓哉, 松浦靖治, 今村年成, 斉藤雅文, 張峰, 近藤政弘, 西村昭彦: 3次元FEM解析を用いた場所打ち杭の水平地盤抵抗に関する検討, 第53回土木学会年次学術講演会, 1998.10.
 - 20) 谷本俊輔, 堺淳一, 岡田太賀雄, 河野哲也, 運上茂樹, 星隈順一: 大地震時の地盤の動的挙動に関する動的遠心模型実験とその動的解析, 第13回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2010.2.
 - 21) 周友昊, 時松孝次, 吉田洋之, 鈴木比呂子, 貫井泰: 大型振動台実験における地盤-杭-構造物系の3次元動的挙動に関する解析的検討, 日本建築学会構造系論文集第77巻, 第677号, pp.1079-1088, 2012.7.
 - 22) 竇地雄大, 室野剛隆: 杭基礎による入力損失効果の実務的評価手法の提案, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.73, No.2, pp.473-482, 2017.
 - 23) 大塚久哲, 最新地中・基礎構造の耐震設計, 2006.2.