

複合地盤により耐震補強された既設橋梁杭基礎のモデル化 に関する基礎的検討

京田英宏¹・斉藤聡彦²・冨澤幸一³・林宏親⁴・磯部公一⁵

¹正会員 博（工） 北武コンサルタント株式会社 構造部（〒062-0020 札幌市豊平区月寒中央通 7-4-7）

²正会員 北武コンサルタント株式会社 構造部（〒062-0020 札幌市豊平区月寒中央通 7-4-7）

³正会員 博（工） 北武コンサルタント株式会社 （〒062-0020 札幌市豊平区月寒中央通 7-4-7）

⁴正会員 博（工） （国研）土木研究所寒地土木研究所 寒地地盤チーム

（〒062-8602 札幌市豊平区平岸 1 条 3 丁目 1-34）

⁵正会員 博（工） 北海道大学大学院工学研究院

（〒060-8628 札幌市北区北 13 条西 8 丁目）

1. はじめに

建設年代の古い既設橋梁には、現行の耐震基準^{1),2)}を満足しておらず耐震補強の必要なものが存在する。兵庫県南部地震以降、これらの既設橋梁について耐震補強の必要性が指摘され、例えば、橋脚については、段落し補強やせん断補強³⁾が優先的に進められてきた。しかしながら、基礎の耐震補強^{4),5)}については、一般に、地上部の橋脚や落橋防止対策に比べて大規模な工事となり、経済性、施工性の面から実施が難しいことに加えて、関係機関との協議に時間を要することなども実施の障害となり、対策が進んでいないのが実情である。

北海道に広く分布する泥炭性軟弱地盤⁶⁾に建設された既設橋梁については、杭基礎の耐震対策が容易ではなく、一般的な耐震補強工法である増し杭工法などでは対応が困難な状況にある。したがって、北海道における基礎の耐震補強を効率的に進めるには、泥炭性軟弱地盤に対応した基礎の耐震補強工法の確立が急務となっている。

これまで、泥炭性軟弱地盤に建設する新設橋梁を対象として、杭基礎周辺に地盤改良工法により複合地盤を形成し、杭の水平抵抗や支持力を増加させることで、基礎を縮小化すると同時に耐震性の向上を図る補助工法である複合地盤杭基礎として開発^{7~10)}、実用化され、設計基準（以下、「ガイドライン」と称す）¹¹⁾が運用されている。

この複合地盤杭基礎を既設橋梁杭基礎の耐震補強に適用することを目標に、既設杭基礎の周辺地盤を改良土に置換して複合地盤を形成することにより、杭周辺の地盤反力を改善し基礎の耐震性能を高める耐震補強工法（以下、「コンポジットパイル工法」と称す）として、これまで振動台実験や有限要素解析をもとに、複合地盤中の杭基礎の力学挙動に関する検証が行われてきた^{12),13)}。

泥炭性軟弱地盤にある既設杭基礎の耐震補強設計を行ううえで、周辺地盤ならびに改良地盤の地震時挙動が橋梁の応答に及ぼす影響を適切に評価することが重要と考えられる。しかしながら、鉄道構造物については地盤の地震時挙動を考慮した設計手法が基準化¹⁴⁾されているが、道路構造物については検討されているものの^{15)~17)}、これまでのところ、基準化には至っていない。これには、周辺地盤の影響を考慮した耐震設計を行ううえで、詳細な地盤情報、基盤波が必要なこと、解析の妥当性の評価そのものが難しいことなどが一因と推察される。

以上のような背景を踏まえて、本検討では、コンポジットパイル工法により耐震補強した既設杭基礎で支持された鉄筋コンクリート橋脚を対象として、杭基礎および周辺地盤のモデル化の異なる、SRばねモデル、積層せん断ばねモデル、有限要素モデルを用いて、とくに、周辺地盤のモデル化の違いが橋脚の地震時挙動に及ぼす影響について比較・検証し、コンポジットパイル工法のモデル化に関する基礎的検討を行った。

2. 解析対象橋梁と杭基礎の耐震補強設計

(1) 解析対象

図-1 に本検討に用いる解析対象橋梁の構造諸元、表-1 に使用材料一覧を示す。また、図-2 に周辺地盤の土質柱状図、表-2 に土質定数一覧を示す。

対象橋脚とその構造諸元は、既往の計算計算例^{3),4)}にある単純鋼鈑桁を支持する鉄筋コンクリート橋脚とし、表層地盤のみ液状化地盤から泥炭性軟弱地盤に変更したものである。設計基準は昭和 39 年鋼道路橋設計示方書であり、震度法（設計水平震度 0.25）で設計されている。

地表面からの深さ 17.7m の砂礫層を耐震設計上の地盤面とみなせば、表層地盤の固有周期は 0.49 秒であり、耐震設計上の地盤種別はⅡ種と判定される。

本検討では、橋脚－杭基礎系を対象として、橋軸方向への地震動入力に限定して解析を行う。

(2) 杭基礎の耐震補強設計

解析対象の橋脚杭基礎に対して、ガイドライン¹¹⁾に基づいて、コンポジットパイル工法による泥炭性軟弱地盤中の杭基礎の耐震補強設計を実施した。

ガイドラインは、地震時保有水平耐力法に基づく耐震設計を基本とし、改良土の改良強度 $q_u \geq 200\text{kN/m}^2$ 、変形係数 $E_0 = 100q_u$ と規定されている。検討の結果、基礎の損傷度⁵⁾は、既設の損傷度Ⅳに対して、改良強度 $q_u = 200\text{kN/m}^2$ 、 $q_u = 300\text{kN/m}^2$ に設定することにより、それぞれ、損傷度Ⅲ、損傷度Ⅱに耐震性能を向上することが可能である。

図-3 に、地震時保有水平耐力法に基づく杭基礎の応答塑性率と損傷度の関係を示す。

3. 解析概要

解析モデルは、杭基礎および周辺地盤のモデル化の異なる 4 タイプとした。

図-4 に、SR ばねモデルのモデル図を示す。SR ばねモデルは、杭基礎および周辺地盤の抵抗を線形ばねとするモデルである。

図-5 に、積層せん断ばねモデルのモデル図を示す。積層せん断ばねモデルは、周辺地盤および改良地盤を積層の質点－せん断ばねで構成された柱状モデルを構築し、杭とせん断ばねで連結した連成系モデルである。一般的に、修正 Penzien モデルと呼ばれるモデルである。ここで、周辺地盤のみをモデル化し改良地盤を直接にモデル化しない 1 柱状タイプと、

周辺地盤と改良地盤を別々にモデル化する 2 柱状タイプの 2 タイプとした。

図-6 に、有限要素モデルのモデル図を示す。有限要素モデルは、周辺地盤ならびに改良地盤を平面要素でモデル化し、杭とせん断ばねで連結する詳細なモデルである。

以上の杭基礎および周辺地盤のモデル化の大きく異なる解析モデルを用いた非線形動的解析を実施し、コンポジットパイル工法による杭基礎の耐震補強が橋脚の地震時挙動にどのような影響を与えるのか、また、橋梁としての耐震性能を適切に評価するためのモデル化について検討する。

(1) 解析モデル

a) 橋脚および杭基礎

橋脚および杭基礎は、はり要素でモデル化した。橋脚の塑性ヒンジ区間および杭体の非線形特性は、トリリニア型の Takeda モデルとした。ここで、軸力変動が部材耐力に及ぼす影響は小さい判断し、初期軸量をもとに曲げモーメント－曲率関係を設定した。

SR ばねは、道路橋示方書²⁾の動的照査法に用いる線形ばねでモデル化し、水平成分、鉛直成分、回転成分、水平－回転の連成成分を考慮した。

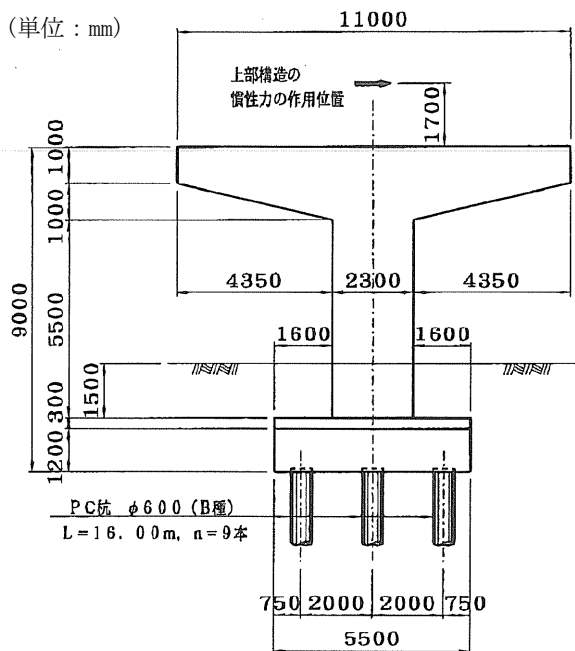
b) 地盤

有限要素モデル、積層せん断ばねモデルにおける周辺地盤および改良地盤の非線形特性には、Ramberg－Osgood モデルを適用した。ここで、Ramberg－Osgood モデルのパラメータは、中央防災会議で使用されている、せん断剛性－せん断ひずみ関係を参考に設定した。

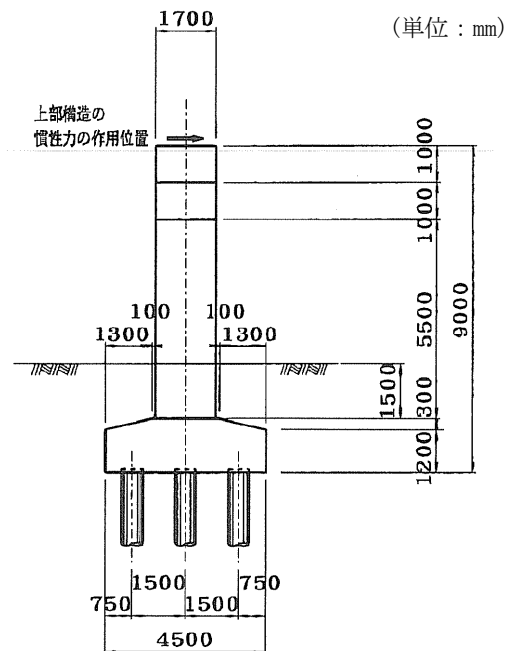
c) 相互作用ばね

杭と地盤を連結する杭の軸方向および軸直角方向のばねは、道路橋示方書^{1),2)}の地盤ばねを適用した。非線形特性は完全バイリニア型とし、パラメータは道路橋示方書の杭基礎の設計に準じて設定した。

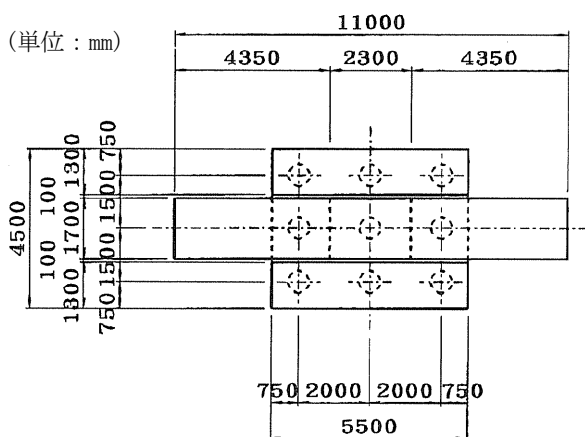
ここで、コンポジットパイル工法を 1 柱状タイプの積層せん断ばねモデルでモデル化する場合には、改良地盤は直接モデル化せず、相互作用ばねに改良地盤中の地盤ばねを適用した。また、2 柱状タイプの積層せん断ばねモデルにおいて、周辺地盤と改良地盤を連結する相互作用ばねは、周辺地盤のせん断ばねは、積層せん断ばねモデルと同様の考えで設定した。



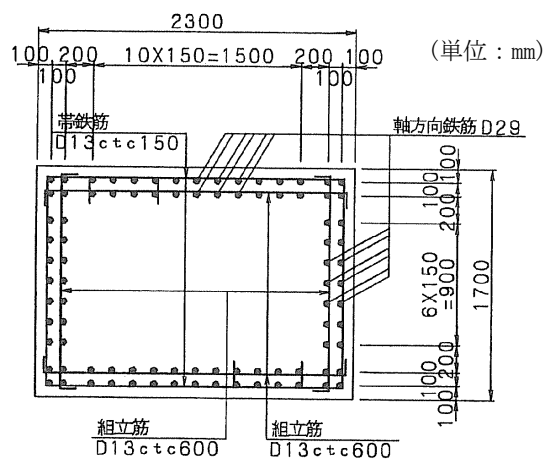
(a) 正面図



(b) 側面図



(c) 平面図



(d) 橋脚基部断面図

図-1 解析対象橋梁の構造諸元

表-1 使用材料一覧

部材	コンクリート	鉄筋
橋脚	$\sigma_{ck}=21\text{N/mm}^2$	SD295
フーチング	$\sigma_{ck}=21\text{N/mm}^2$	SD295
杭	PC杭B種 $\sigma_{ck}=50\text{N/mm}^2$ 中詰コンクリート $\sigma_{ck}=21\text{N/mm}^2$	

表-2 地盤定数一覧

標高 (m)	層厚 (m)	土質	平均 N値	粘着力 c (kN/m ²)	せん断 抵抗角 φ(度)	単位体積重量		変形係数 $\alpha E0^{*1}$ (kN/m ²)
						γ_s (kN/m ²)	$\gamma_{s'}$ (kN/m ²)	
0.0	10.0	泥炭	2	0	0	14	14	5600
-10.0	4.8	粘性土	5	30	0	17	8	14000
-14.8	2.9	砂質土	15	0	30	18	9	42000
-17.7	1.2	砂礫	50	0	40	19	10	140000

※1: 常時の値を示す

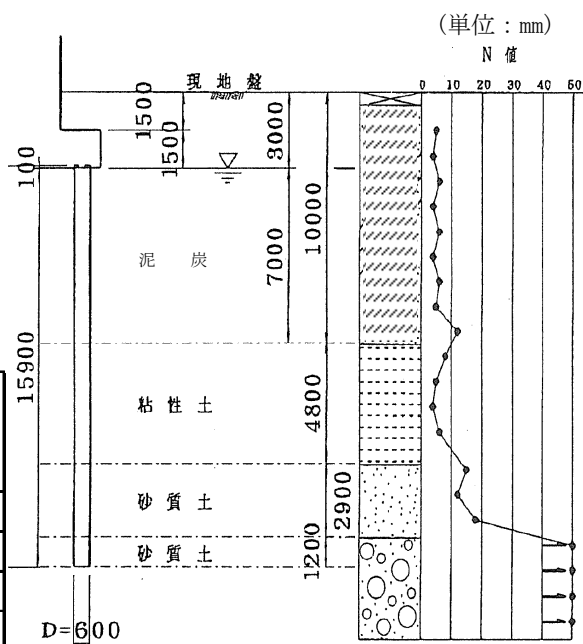


図-2 土質柱状図

(2) 比例減衰

比例減衰の設定に用いるモード減衰定数は、ひずみエネルギー比例減衰法により求め、要素減衰定数は、橋脚：2%、杭基礎：2%、地盤：2%とした。

比例減衰は Rayleigh 型とし、泥炭性軟弱地盤を対象とした質点-せん断ばねモデルの固有値解析結果をもとに設定した。なお、解析モデルの違いによる影響を明確にするため、その他の解析モデルに対して共通の比例減衰を与えることとした。

質量比例項についてはひずみエネルギー比例減衰の最低次の振動モードに着目して設定している。剛性比例項については過減衰となるのを避けるため、10Hz で 2.0%程度となるように設定している。

なお、SR モデルについては、要素減衰定数の影響を把握するため、地盤モデルに使用した 2%、一般に設計で逸散減衰を見込む場合に用いられる 20%、それよりも高い 30%の計 3 ケースを実施した。

(3) 入力地震動

設計地震動は、道路橋示方書のレベル 2 タイプ II 地震動のうち II 種地盤の標準波形 (II-II-1) とする。この設計地震動は地表面波形であることから、周辺地盤をモデル化する場合には、耐震設計上の基盤面における地震動を求める必要がある。

本検討では、重複反射理論に基づく SHAKE を用いた等価線形解析により、地表面波形を基盤に引き戻すことで基盤波形を求めた。

ここで、SHAKE は、加速度レベルの高い地表面波形を引き戻す場合に、基盤波形が収束しないことが知られている。このような現象を回避するため、本検討では、地盤や構造物の地震応答に与える影響が小さいと考えられる 15Hz 以上の高周波数成分をハイカットフィルターで取り除く処理を施した。

図-7 に、地表面地震動と SHAKE を用いて求めた基盤地震動をフーリエ振幅スペクトルと併せて示す。また、図-8 に、地表面波形と基盤波形の減衰定数 5% の線形加速度応答スペクトルを、図-9 に表層地盤の伝達関数を示す。さらに、図-10 に、SHAKE による解析結果として表層地盤内の最大応答分布図を示す。

基盤の最大加速度は 432gal、フーチング下面から -7m 付近において最大せん断ひずみは 0.6%である。地表面と基盤の加速度応答スペクトルを比較すると、0.3~0.5 秒の周期帯が増幅しており、このことは、伝達関数より表層地盤の 1 次固有周期が 0.4 秒前後であることと符合している。

(4) 数値積分

数値積分法は Newmark β 法を使用した。積分時間

間隔は、入力波形の時間間隔 Δt の 1/100 (0.0001sec) に設定した。Newmark β 法のパラメータについては数値減衰を期待し、 $\gamma = 0.5$ 、 $\beta = 1/3$ に設定した。

4. 解析結果および考察

図-11 に、泥炭性軟弱地盤、 $q_u = 200\text{kN/m}^2$ 、 $q_u = 300\text{kN/m}^2$ の 3 ケースについて、SR ばねモデル、積層せん断ばねモデル、有限要素モデルの橋脚基部の変位応答塑性率を示す。

本検討では、既往の研究成果^{7)~10)}に基づき、有限要素モデルにより複合地盤杭基礎の動的挙動を評価できることを前提として考察を行うものとする。

(1) 耐震補強効果

有限要素モデルの解析結果より、基礎の耐震補強により橋脚の応答塑性率が低減されることがわかる。一方、耐震補強レベルの違いに着目すれば、改良強度が動的応答に与える影響は小さいことがわかる。この理由として、複合地盤杭基礎における改良強度の最小値であっても、周辺地盤は N 値 28 の比較的良好な支持地盤と同程度まで改善されているため、さらに改良強度を上げてもその補強効果が低いものと推察される。

図-12、図-13 に、 $q_u = 200\text{kN/m}^2$ 、 $q_u = 300\text{kN/m}^2$ の地表面における周辺地盤および改良地盤の変位応答波形を示す。周辺地盤と改良地盤の変位応答は概ね同様の周期特性を呈しているが、相対変位応答から明らかなように、改良地盤は周辺地盤に対して最大で 0.20m 程度の変位の低減が確認できる。このことから、コンポジットパイル工法により適切な範囲を地盤改良することにより、周辺地盤から基礎へ作用する地盤変位の低減効果が期待できることがわかる。

(2) 解析モデルの適用性

a) 積層せん断ばねモデル

積層せん断ばねモデルの 1 柱状タイプは、耐震補強の有無によらず橋脚の応答塑性率に有意な差は認められない。この原因として、解析モデル上、地盤改良を相互作用ばねに対してのみ考慮しているため、周辺地盤の変位が杭に強制変位として作用するものと推察される。これに対して、2 柱状タイプは耐震補強により、橋脚の応答塑性率が低減していることがわかる。したがって、複合地盤杭の挙動を適切に評価するには、改良地盤を解析モデルに直接組み込む必要があることを示唆している。

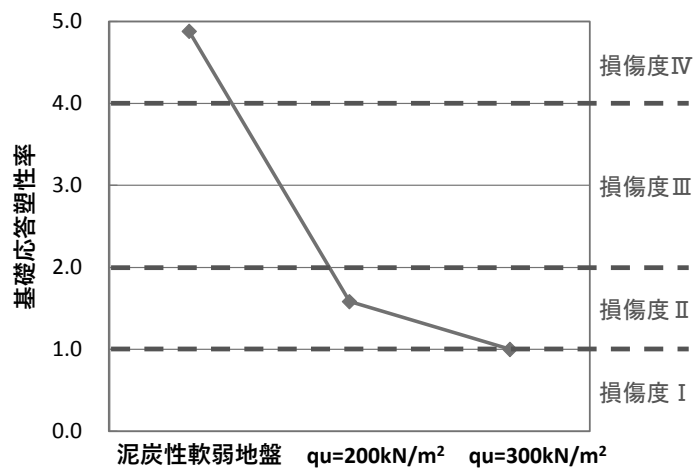


図-3 基礎応答塑性率と損傷度の関係

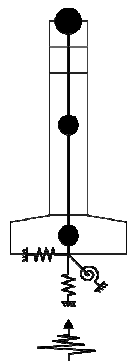
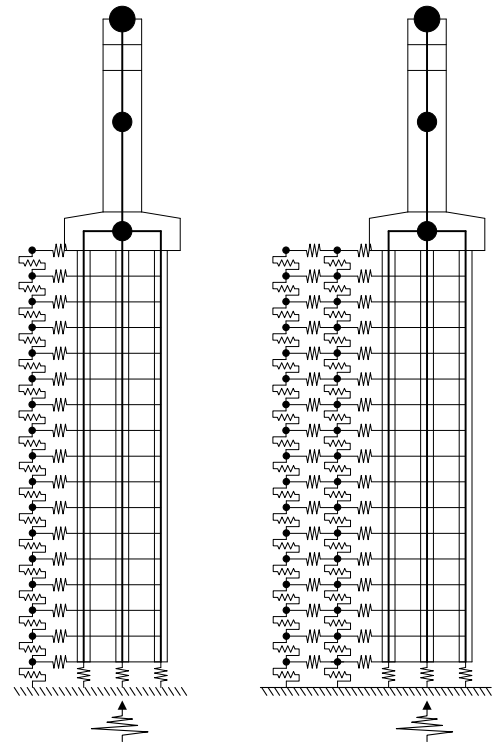


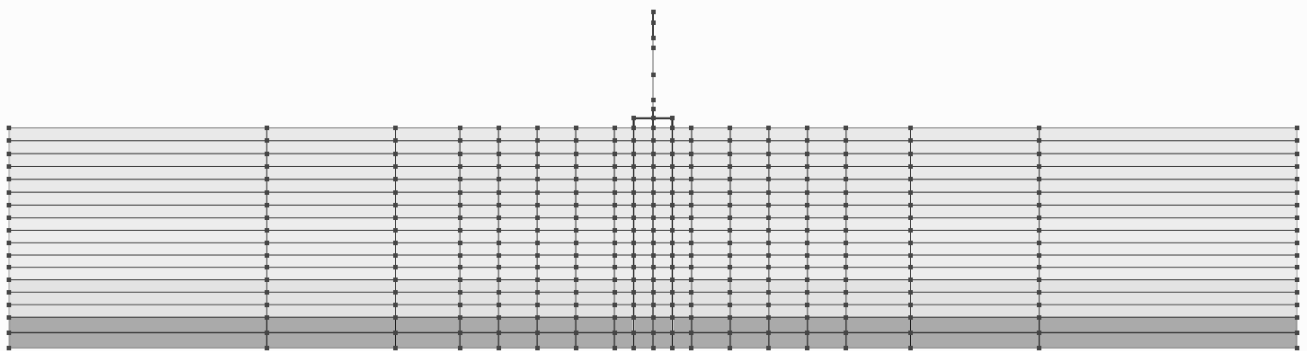
図-4 SRばねモデル



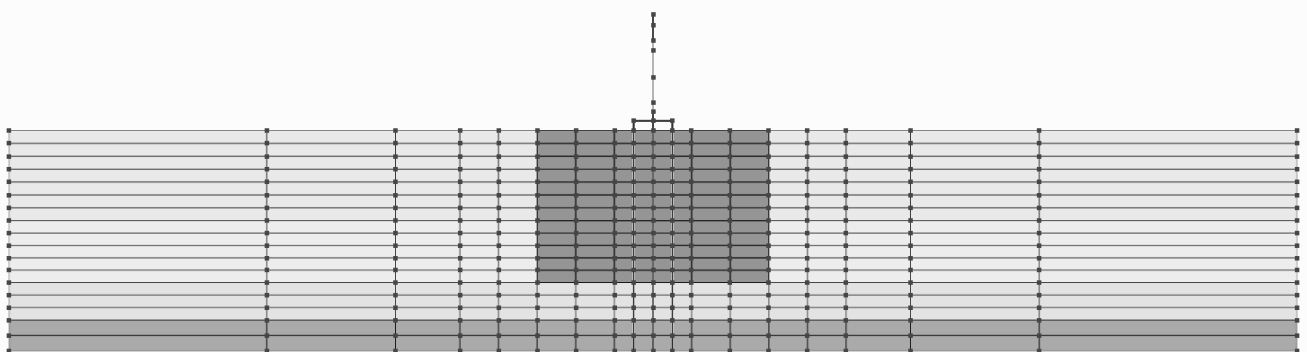
(a) 1柱状タイプ

(b) 2柱状タイプ

図-5 積層せん断ばねモデル

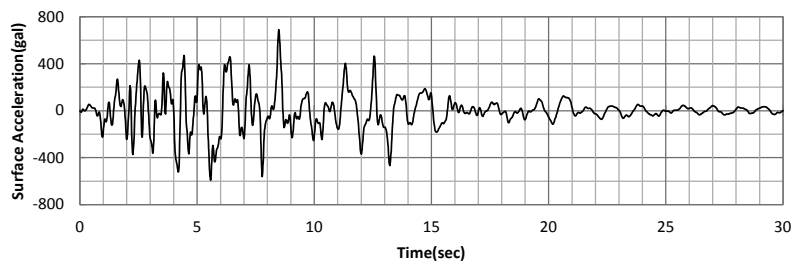


(a) 泥炭性軟弱地盤

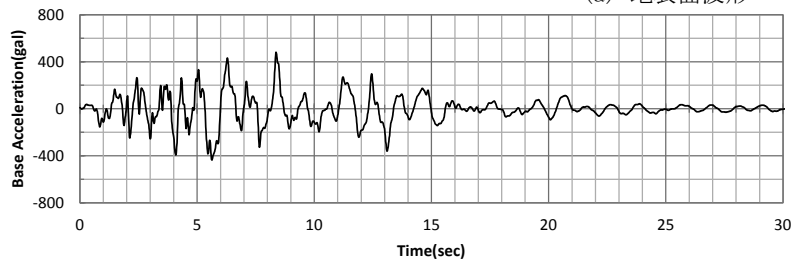
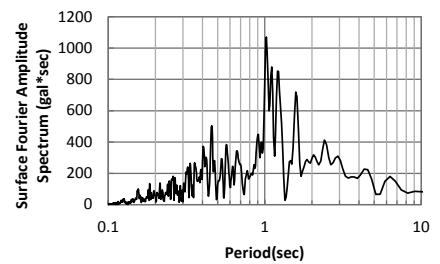


(b) コンポジットパイル工法

図-6 有限要素モデル



(a) 地表面波形



(b) 基盤面波形

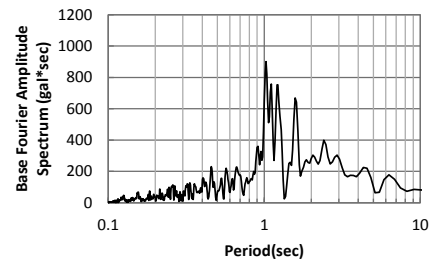


図-7 加速度波形，フーリエ振幅スペクトル

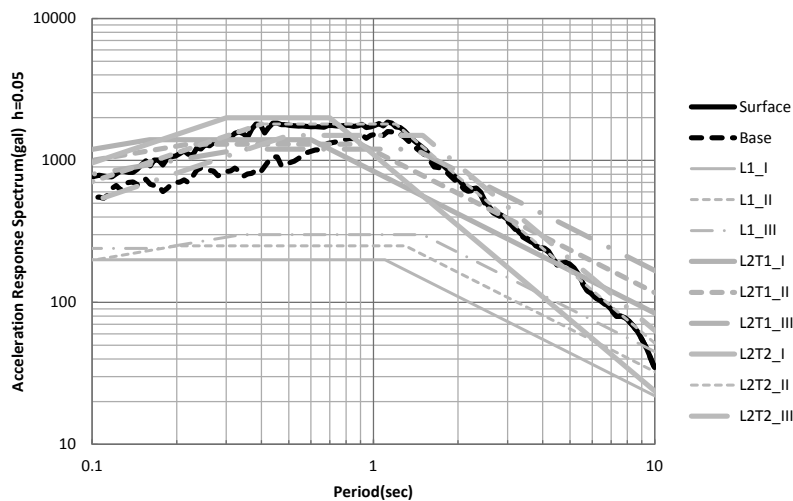


図-8 加速度応答スペクトル

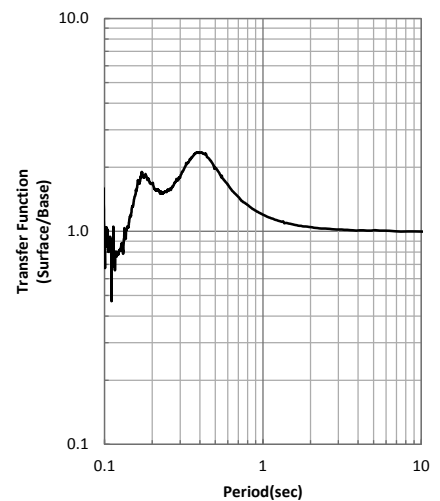


図-9 表層地盤の伝達関数

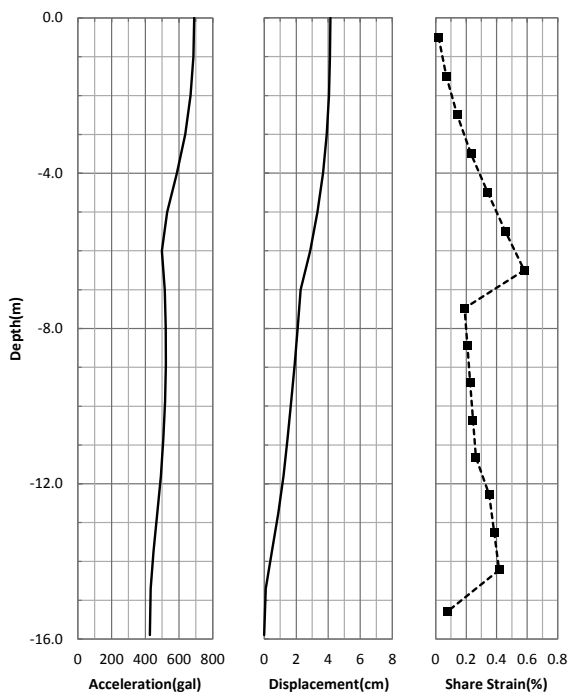


図-10 表層地盤の最大応答分布

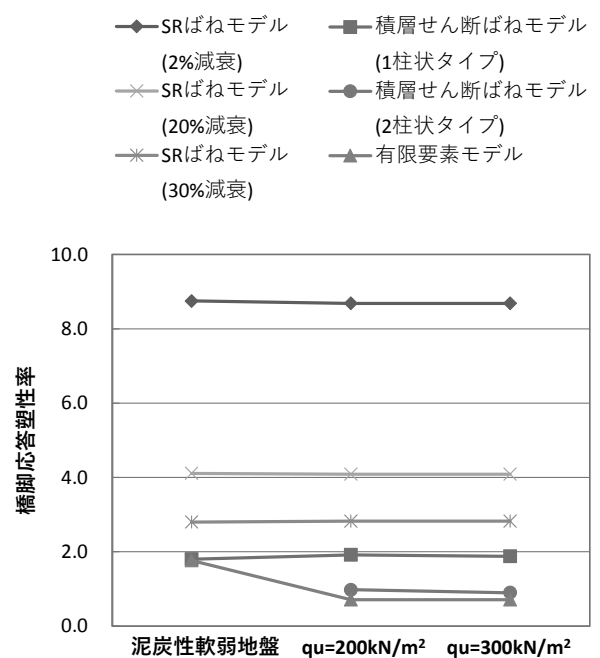


図-11 橋脚応答塑性率

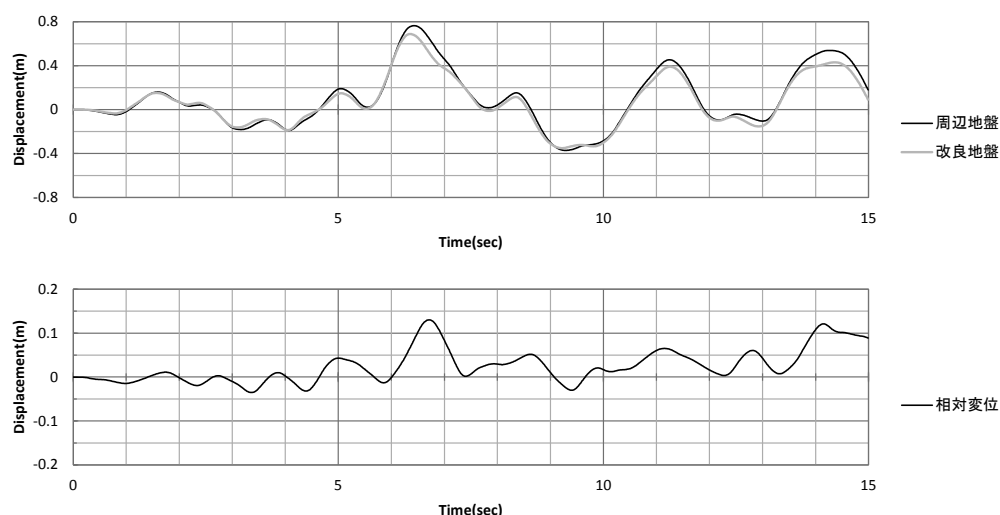


図-12 有限要素モデル; $q_u=200\text{kN/m}^2$ 地表面における周辺地盤と改良地盤変位応答

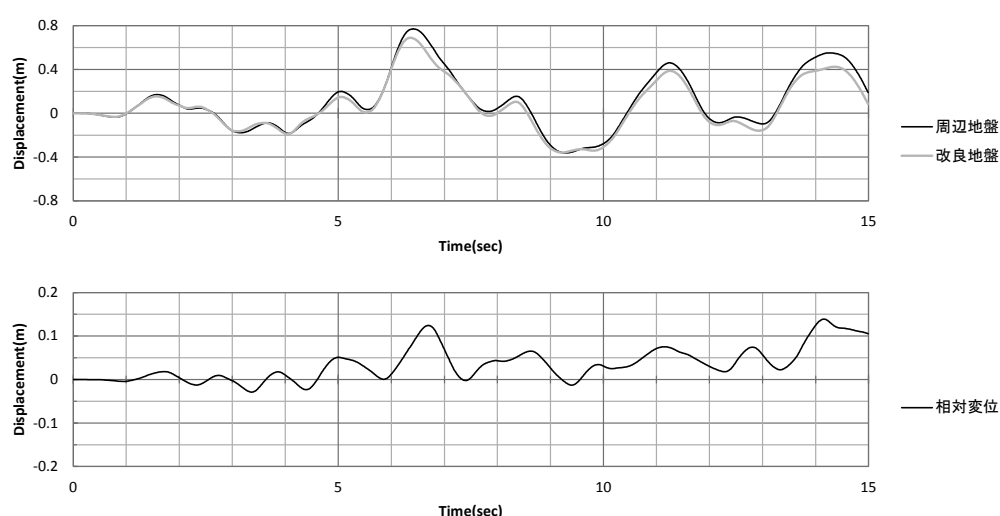


図-13 有限要素モデル; $q_u=300\text{kN/m}^2$ 地表面における周辺地盤と改良地盤変位応答

b) SR ばねモデル

SR ばねモデルは、有限要素モデルおよび積層せん断ばねモデルに対して、橋脚の応答塑性率が大きなことがわかる。このことは、軟弱地盤においては、慣性力応答よりも周辺地盤からの変位入力が支配的であることを示唆している。

基礎の耐震補強効果に着目すれば、SR ばねモデルにおいて改良強度によらず応答が同じなのは、ばね定数を支持地盤のせん断弾性波速度 V_s から算出しており、 N 値 25 以上の粘性土層のばね定数は同等となり、解析モデルに差がないためである。

SR ばねモデルにおける基礎の減衰定数の違いに着目すれば、杭基礎の設計で一般に用いられる減衰定数 20% のケースでは積層せん断ばねモデルよりも大きな応答を示しており、減衰定数 30% のケースにおいても、積層せん断ばねモデルに対して 1.5 倍程度の応答を示していることから、泥炭性軟弱地盤では基礎地盤に対してより大きな逸散減衰が期待できることがわかる。

5. まとめ

本検討では、泥炭性軟弱地盤中の既設橋梁杭基礎に対してコンポジットパイル工法により耐震補強を行った鉄筋コンクリート橋脚を対象として、コンポジットパイル工法のモデル化に関する検討を行った。本検討により得られた知見をまとめると、以下のとおりである。

- 1) コンポジットパイル工法による杭基礎の耐震補強は、橋脚の耐震性能に対しても効果が期待できる。
- 2) コンポジットパイル工法は、改良強度を上げたとしても必ずしも補強効果が向上するわけではない。
- 3) コンポジットパイル工法に積層せん断ばねモデルを適用する場合は、改良地盤を直接モデルに組み込む必要がある。
- 4) 軟弱地盤中の杭基礎に SR ばねモデルを適用する場合は、減衰定数を適切に設定しなければ橋脚の応答を過大評価する可能性がある。

今後、コンボジットパイル工法のモデル化、設計手法などをより詳細に検討する必要がある。

参考文献

- 1) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編, 2012.3
- 2) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編, 2012.3
- 3) 社団法人日本道路協会：既設道路橋の耐震補強に関する参考資料, 1997.8
- 4) 社団法人日本道路協会：既設道路橋基礎の補強に関する参考資料, 2000.2
- 5) 独立行政法人土木研究所：既設道路橋基礎の耐震性能簡易評価手法に関する研究, 土木研究所資料, 第 4168 号, 2010.5
- 6) 国立研究開発法人土木研究所寒地土木研究所：泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル, 2017.3
- 7) 富澤幸一, 西川純一：深層混合処理工法により形成した複合地盤における杭設計手法, 土木学会論文集, No.799/III-72, p.183-193, 2005.
- 8) 富澤幸一, 三浦清一, 渡辺忠朋：複合地盤の改良範囲および改良強度が杭の地震時挙動に及ぼす影響, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.1, p.127-143, 2008.
- 9) 富澤幸一, 西本聡, 三浦清一：複合地盤における杭基礎の力学挙動評価と耐震性能照査, 構造工学論文集, Vol.55A, p.1182-1195, 2009.
- 10) 富澤幸一, 西本聡, 渡辺忠朋, 三浦清一：固化改良体を併用する杭基礎の限界状態および設計照査に関する実験的検討, 土木学会論文集 C, Vol.69, No.1, p.1-19, 2013.
- 11) 独立行政法人土木研究所寒地土木研究所：北海道における複合地盤杭基礎の設計施工法に関するガイドライン, 2010.4
- 12) 富澤幸一, 牧剛史, 渡辺忠朋, 笹谷輝勝：既設杭基礎にセメント系固化材による地盤改良体を併設する耐震補強技術に関する実験的検討, コンクリート工学, 51 巻, 6 号, p.499-506, 2013.6
- 13) 富澤幸一, 西本聡, 三浦清一, 牧剛史：コンボジットパイル工法による既設杭基礎の耐震補強技術, 地盤工学会誌, 61 巻, 8 号, p.18-21, 2013.8
- 14) 国土交通省監修, 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 2012.9
- 15) 矢部正明, 川島一彦：杭基礎の非線形地震応答特性とプッシュオーバーアナリシスによる解析法に関する研究に関する研究, 土木学会論文集, No.619/I-47, p.91-109, 1999.4
- 16) 矢部正明, 川島一彦：橋脚と杭の降伏耐力比が杭基礎の塑性損傷に及ぼす影響, 土木学会論文集, No.626/I-48, p.51-68, 1999.7
- 17) 河野哲也, 谷本俊輔, 安藤滋芳, 堺淳一, 星隈順一：地盤物性値のばらつきが杭基礎に対する動的応答評価に与える影響, 地盤工学ジャーナル, 9 巻 2 号, p.119-139, 2014.6