

論文 支持層の出現深度の変動が 杭基礎橋脚・高架橋の応答に及ぼす影響

尾崎 匠¹・佐名川 太亮²・川中島 寛幸³・阪田 暁⁴・曾我 大介⁵

¹正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: ozaki.takumi.90@rtri.or.jp (Corresponding Author)

²正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: sanagawa.taisuke.39@rtri.or.jp

³正会員 鉄道・運輸機構 設計部 (〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町 6-50-1)
E-mail: kawanakajima.hir-bc5v@jrtr.go.jp

⁴正会員 鉄道・運輸機構 設計部 (〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町 6-50-1)
E-mail: sakata.aki-f8r4@jrtr.go.jp

⁵正会員 鉄道・運輸機構 北陸新幹線建設局 (〒532-0003 大阪府大阪市淀川区宮原 3-5-36)
E-mail: soga.dai-px82@jrtr.go.jp

線状構造物である鉄道橋りょう・高架橋の設計において地盤調査はある程度離散的に実施せざるを得ず、基礎工事の施工前確認において支持層出現深度が設計での想定と異なる場合がある。一般的には、支持層出現深度が想定よりも深い場合には杭長を伸ばし支持層への根入れ長を当初設計と同等とし、浅い場合には杭長は変更せず根入れ長を増やした上で、照査を実施する必要があるが、工期に多大な影響を与える可能性があるため照査作業の簡略化が求められている。そこで本論文では、杭基礎橋脚・高架橋を対象に支持層出現深度の変動が設計応答値に及ぼす影響を試算・分析した。結果として、基礎の変位・変形に関する設計応答値の変動は些少または小さくなる一方で、特に短い杭における部材の応答値については顕著に変動するものが見られた。

Key Words: pile foundation, bearing statum, design response value

1. はじめに

近年建設された新幹線橋りょう・高架橋の約7割は杭基礎で支持される構造となっているが、杭基礎構造物においては良質な支持層に着底された支持杭として設計されることが多いため、設計条件の設定の中でも支持層出現深度の設定が最も重要な項目のひとつである。一方で、線状構造物である新幹線橋りょう・高架橋の設計において、設計条件を設定する上で実施する地盤調査の間隔は地形条件に応じて数十から数百m程度となり、各構造物直近での地盤情報が必ずしも得られない状態で設計されることになる。そのため、施工時あるいは施工直前の地盤調査において、設計での想定と異なる支持層深度が判明する場合もある。このような場合には基本的には杭長を変更するなどの対応が必要となり、これまでの事例では、支持層出現深度が想定よりも深くなる場合には、杭

長を伸ばし根入れ長を設計結果と同等とすることで対応し、支持層出現深度が浅くなる場合には、杭長は変更せず根入れ長を増やすことで対応することが多い(図-1)。これらの対応を行う場合でも再照査を実施する必要があるが、すべての照査項目について照査を実施するためには時間やコストが必要となり、プロジェクト推進の大きな障害となる可能性もある。

これに対し、支持層出現深度の変動とこれに伴う杭長の変化による照査値への影響を定性的・定量的に予測することができれば、支持層出現深度変更に伴う再照査の際に照査項目を限定するなどの作業の簡素化が図ることが可能である。さらに、例えば支持層の傾斜や不陸が著しいことが予測されるような条件においては、照査値に一定程度の安全余裕を確保することで、支持層出現深度が変動した場合でも、杭基礎構造物の寸法諸元の変更なしで対応することも可能になると考える。

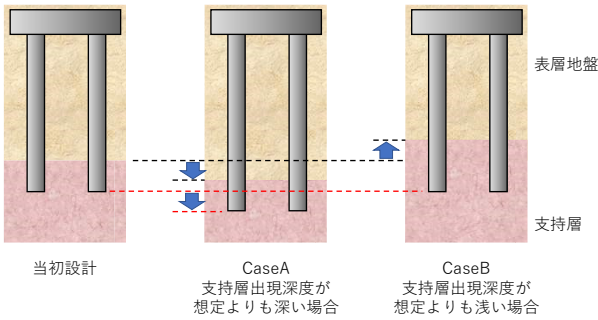


図-1 対象とする支持層深度の変動と対応例

表-1 杭基礎における照査指標と設計限界値

構造物の要求性能	杭基礎の性能項目	照査指標			対応する安定レベル		
		着目位置	設計応答値	設計限界値			
地震時以外 安全性	基礎の安定	地盤の破壊	杭頭部	設計鉛直力	設計鉛直支持力	安定レベル1	
		水平安定	フーチング等の天端	最大応答水平変位	$2\%L_s \leq 100\text{mm}$		
		回転安定	フーチング等の天端	最大応答回転角	$6/1000\text{rad}$		
		基礎部材等の破壊	杭体・結合部	設計断面力	設計せん断耐力		
地震時以外 使用性	基礎の支持性能	長期支持性能	鉛直方向	杭頭部	設計鉛直力	設計鉛直支持力	安定レベル2
			水平方向	フーチング等の天端	最大応答水平変位	$0.4\%L_s \leq 40\text{mm}$	
		回転方向	フーチング等の天端	最大応答回転角	$2/1000\text{rad}$		
		短期支持性能	鉛直方向	杭頭部	設計鉛直力	設計鉛直支持力	
			水平方向	フーチング等の天端	最大応答水平変位	$0.4\%L_s < 40\text{mm}$	
		回転方向	フーチング等の天端	最大応答回転角	$2/1000\text{rad}$		

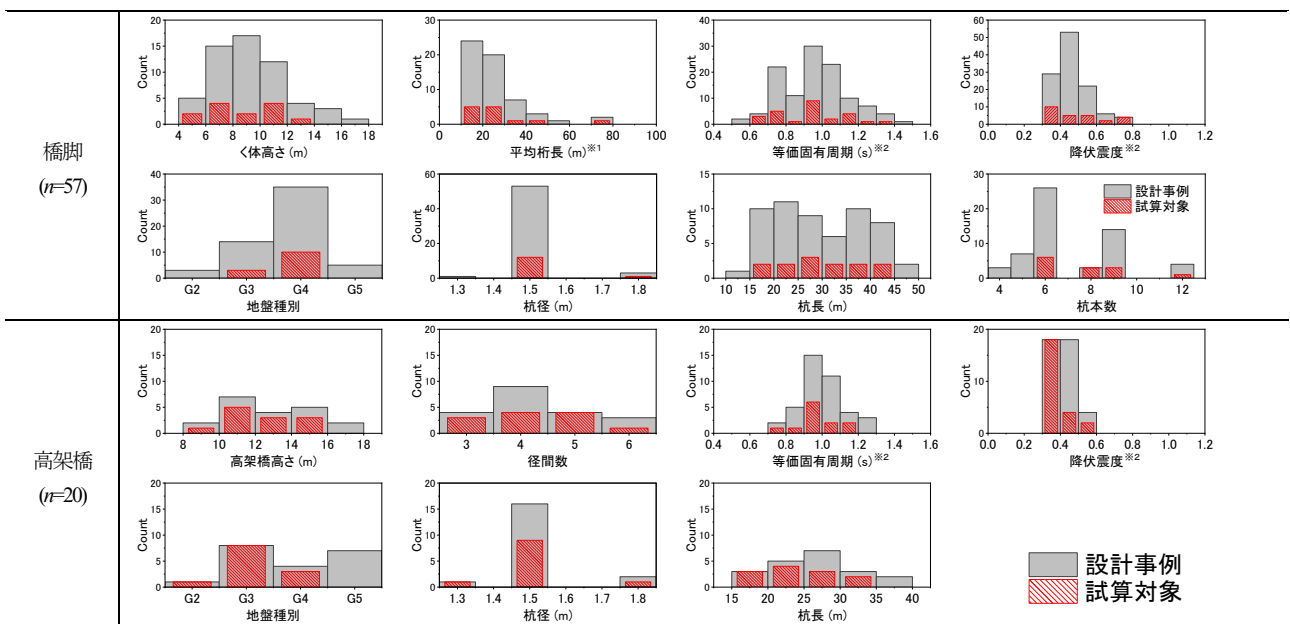
図-1に示した対応をとる場合には、杭の鉛直地盤抵抗等が増加することで基礎の固定度（あるいは剛性）が大きくなるとともに、設計鉛直支持力といった設計限界値は増加するか、あるいは変化しないことが明らかである。このため、支持層出現深度の変動が設計応答値へ与える影響を評価することが、前述した再照査作業の簡素化において重要となる。一方で、既往の研究^{例えば2),3)}では、地盤条件の空間的な変動が設計限界値に及ぼす影響について検討されているものの、設計応答値や照査値への影響について検討された事例は確認できない。

そこで本論文では、杭基礎を有する新幹線橋脚・高架橋を対象に、支持層出現深度が変動した場合、図-1の方法で対応することを前提に、設計応答値に及ぼす影響について試算し、算出された設計応答値の変動と構造・地盤条件の相関について分析を行った。

2. 構造解析の対象構造物

本検討では、2012年版の鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計⁴⁾（以下、耐震標準）、鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物¹⁾（以下、基礎標準）、および関連する基準類に準拠して近年設計が行われた、駅部を除いた一般区間における新幹線構造物の場所打ち杭で支持された橋脚・ラーメン高架橋（橋脚は群杭構造の1柱式の複線用RC壁式橋脚、高架橋は地中梁を有する1柱1杭式ビームスラブ式複線用RCラーメン高架橋を対象）の設計事例（77事例）の中から、橋脚13基、高架橋12基を選定して支持層出現深度の変動による影響を試算した。なお、杭本数や杭長などの構造的諸元を広く

ここで、杭基礎構造物の要求性能、照査指標ならびに設計限界値²⁾を表-1に示す。これらの照査指標ならびに設計限界値を見ると、支持層出現深度の変動に合わせて

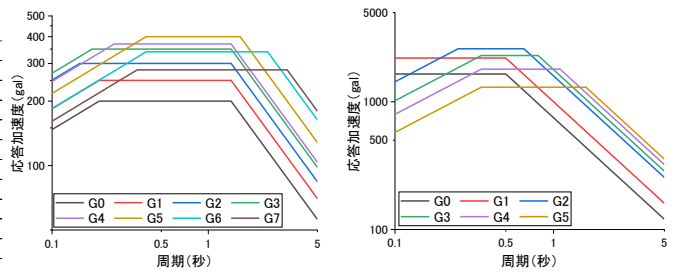


※1: 起終点の桁の平均 ※2: 橋軸方向と橋軸直角方向それぞれのデータを示しているため、母数が倍となっている

図-2 設計事例（77事例）における諸元等の条件分布

表-2 設計事例（77事例）の照査値の分布

作用の種類	主な性能項目	橋脚			高架橋			
		最小値	中央値	最大値	最小値	中央値	最大値	
地震時以外	長期支持	鉛直	0.39	0.66	0.82	0.34	0.67	0.89
		水平	0.00	0.01	0.09	0.01	0.05	0.49
		回転	0.00	0.01	0.09	0.02	0.06	0.40
	短期支持	鉛直	0.41	0.51	0.62	0.29	0.58	0.74
		水平	0.00	0.05	0.14	0.01	0.12	0.40
		回転	0.00	0.04	0.09	0.02	0.09	0.39
地震時以外安全性	鉛直	0.46	0.61	0.74	0.38	0.68	0.80	
	水平	0.03	0.08	0.19	0.01	0.08	0.22	
	回転	0.02	0.05	0.10	0.01	0.09	0.30	
L1地震動	復旧性 (性能レベル1)	鉛直	0.63	0.79	0.96	0.43	0.76	0.94
		水平	0.14	0.36	0.80	0.14	0.42	0.89
		回転	0.10	0.27	0.41	0.20	0.33	0.52
		杭体 (曲げ)	0.19	0.44	0.84	0.16	0.32	0.79
		鉛直	0.51	0.72	0.88	0.38	0.71	0.83
L2地震動	復旧性 (性能レベル2)	水平	0.05	0.16	0.72	0.05	0.19	0.93
		回転	0.07	0.25	0.74	0.17	0.47	0.93
		杭体 (曲げ)	0.08	0.16	0.78	0.10	0.21	0.75
		杭体 (せん断)	0.46	0.86	0.99	0.63	0.81	0.99
		鉛直	0.51	0.72	0.88	0.38	0.71	0.83



L1地震動 L2地震動 スペクトルII

図-3 地表面設計地震動の弾性加速度応答スペクトル⁴⁾

析の方針を以下に整理する。

(1) 地震時以外の作用の特性値, 設計応答値への影響

基礎構造物の設計において考慮する地震以外の作用の特性値は、桁等の上部構造物の形状寸法に強く依存し、支持層出現深度の変動により基礎の固定度が変化した場合でも、影響を受けるものはない。一方で、設計応答値は一般的には静的線形解析により算出するが、図-1に示す対応を行うことで基礎の固定度が大きくなるため、作用の特性値が増加しない限り、設計鉛直力を除く設計応答値が当初設計よりも大きくなることはない。図-6および図-8のように、設計鉛直力（すなわち杭頭軸力）は基礎の固定度の上昇に伴い増加する傾向にあるものの、地震時以外の作用については水平方向の荷重は相対的に小さいため、設計鉛直力の設計応答値の変動も極めて些少（変動量で1%未満）であることを確認している。

以上のように、すべての事例に対して支持層出現深度が変動したとしても照査を満足することから、支持層出現深度が変動したとしても図-1の対応を行うことで再照査は不要と考える。

(2) 地震時の作用の特性値, 設計応答値への影響

地震時の影響による作用の特性値（例えば地表面地震動の設定など）ならびに設計応答値については、支持層出現深度や基礎の固定度によって変化する可能性がある。例えば、地表面地震動は、一般的に地盤の固有周期に応じて定まる地盤種別ごとに設定したものをを用いる（一例として図-3に鉄道標準に記載されている設計地震動の弾性加速度応答スペクトルを示す）。そのため、支持層出現深度が変化すると地盤の固有周期の変化により地表面地震動の変化に応じて慣性力等の地震動による影響も変化する可能性がある。

さらに、基礎の固定度が大きく変化すると、構造解析による設計応答値の算出結果にも影響を及ぼす。鉄道橋脚・高架橋の耐震設計では、L1地震動に対しては地表面地震動の弾性加速度応答スペクトルを用いて評価した慣性力を考慮した静的非線形解析により、L2地震動に対してはプッシュ・オーバー解析+非線形応答スペクトル

包含するように選定を行った。また、基礎先行降伏となる事例は含まれていない。

設計事例および解析対象とした橋脚・高架橋の諸元等を図-2に示す。また、主な性能項目における照査値の概要を表-2に示す。ここで照査値とは、設計応答値を設計限界値で除した値であり、1.0以下で照査を満足することを示すものである。橋脚、高架橋ともに、長期支持の鉛直方向、L1地震動に対する復旧性（性能レベル1）の鉛直方向、およびL2地震動に対する杭体（せん断）の照査値が比較的大きな値となっており、設計の決定要因となっていることがわかる。なお、同表地震時の照査値は、慣性力設計に加えて液状化時および応答変位法による照査値を含めて示しているが、本検討対象においては液状化時の照査が最大照査値になる事例はなかった。応答変位法では、杭体地中部の決定要因となる事例が見られた。

3. 検討の概要

一般的な鉄道橋脚・高架橋の設計では、構造解析モデルとして、部材を線材、地盤抵抗を相互作用ばねとしてモデル化した梁ばねモデルを用いて設計応答値を求めるため、本検討においても梁ばね解析モデルを用いた試算を実施することとした。

ここで、前述したとおり支持層出現深度の変動に伴い図-1の対応を行うことで、鉛直支持力等の地盤抵抗が増加し、基礎の固定度が高くなることは明かである。一方で、基礎の固定度が高くなると、例えば構造物の周期の変動に伴い地震時の応答加速度が増加する可能性も考えられる。そのため本研究では、支持層変動に伴い基礎の固定度が当初設計よりも大きくなった場合の作用の特性値あるいは設計応答値への影響について検討した。

なお、一般的な設計においては、鉄道橋脚・高架橋の設計は作用を地震時と地震時以外の2つに区分して構造解析や照査を実施することも勘案し、作用の種類に応じて支持層出現深度の変動による影響を推測し、試算・分

ル法により設計応答値を算出する（以下、応答スペクトル法）。また、鉄道構造物の耐震設計では地震時の地盤変位の影響を加味した応答変位法による照査が行われる。支持層出現深度が変動すると変形形状や地盤変位量が増加することに加え、応答変位法による設計応答値の算出の際には地盤と構造物の周期比によって慣性力と地盤変位の影響度が変化する。以上より、基礎の固定度の変化に起因して設計応答値が増加する方向に変化する可能性は否定できない。

以上を勘案し、以下に示す検討では耐震設計における設計応答値への影響について評価を行うこととした。なお、設計事例では地域別係数が 1.00 と設定されていたため、耐震設計実務上、復旧性能レベル 2 の照査を満たすことで安全性（地震時）の性能項目を包含できることを鑑み、L2地震動に対しては復旧性能レベル 2 の設計限界値を設定することとした。

(3) 設計応答値への影響評価を目的とした試算の概要

鉄道の耐震設計における一般的な構造解析手法である梁ばね解析モデルによるプッシュ・オーバー解析+応答スペクトル法により設計応答値を算出し、支持層出現位置が変動した場合の設計応答値への影響について試算した。構造解析モデルについては、基礎標準、耐震標準に準拠してモデル化しており、地盤条件に応じて、液状化時ならびに応答変位法による設計応答値の算出も行っているが、液状化程度の判定などについては、当初設計の条件をそのまま適用している。

次に、支持層出現深度の変動量が地盤種別の判定に与える影響について検討した。前述の 77 事例を対象として仮想的に 2 m, 3 m, 4 m と支持層深度を変化させることで地盤の固有周期の変化を試算した。結果を図-4 に示すが、変動量±2mでは 10 事例、±3mでは 27 事例、±4mでは 44 事例で地盤種別が変化する結果となった。±4m の変動量では、試算事例の半数以上で地盤種別が変化し耐震設計への影響は著しく大きくなることから再照査を綿密に実施する必要があると判断し、本検討で実施する構造解析では支持層出現深度の変動量を±3m と設定した。なお本論文では、支持層が深くなる場合を+3m と表記し、浅くなる場合には-3m と表記することとする。

構造解析による設計応答値の試算の条件としては、当初設計よりも 3 m 深くなった場合 (CaseA) と、3 m 浅くなった場合 (CaseB) に加え、当初設計を対象とした、計 3 パターン地盤条件に対して設計応答値の算出を行った。なお地震時の地表面変位量としては、CaseA の場合には平均で当初設計の 13% 程度増加し、CaseB の場合には 10% 低下する結果となった。

支持層出現深度の変動に伴う具体的な地盤条件の設定においては、例えば図-5 に示すように、支持層上面の深

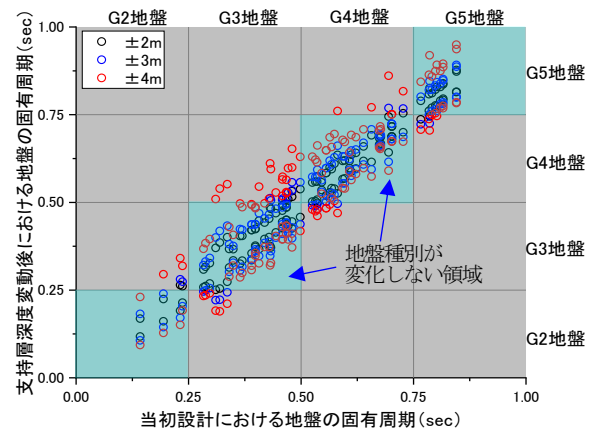


図-4 支持層変動に伴う地盤の固有周期

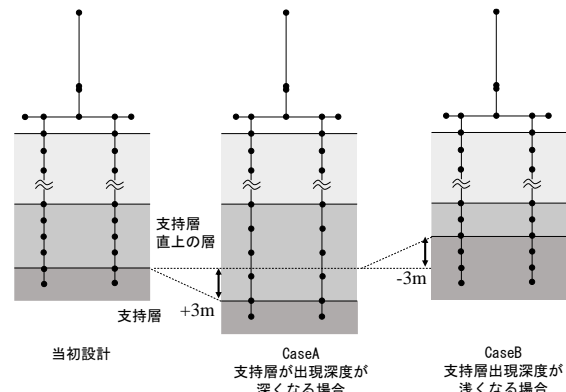


図-5 梁-ばねモデルにおける支持層深度の変動方法

度を変化させた上で支持層直上の地層の層厚を増減させた。これらの地層構成以外の条件（例えば地盤の変形係数や強度定数など）については、当初設計から変化がないものと仮定して試算を行った。

なお、上述のように地盤の固有周期に応じて地盤種別が変化する場合には地表面地震動の変化により設計応答値も著しく変化することは明らかである。そのため、本研究では地盤種別の変化は生じない（すなわち、支持層出現深度の変動が生じた場合でも、地盤の固有周期の変動の影響を応答スペクトル法における応答加速度および応答塑性率自体の変動には考慮せず、構造物の固有周期の変動のみの影響で応答が変化する）と仮定した条件での試算を行っている。

4. 試算結果・考察

本章では、試算により得られた設計応答値から、支持層深度が変化することにより構造物の地震時挙動への影響について考察する。

なお以降では、支持層出現深度の変化のパターン (CaseA および CaseB) に加えて、支持層出現深度の変化に応じた βL (β : 杭の特性値 (m^{-1}), L : 杭長 (m)) の値で区分して分析を行った。ここで、弾性床土上の梁理

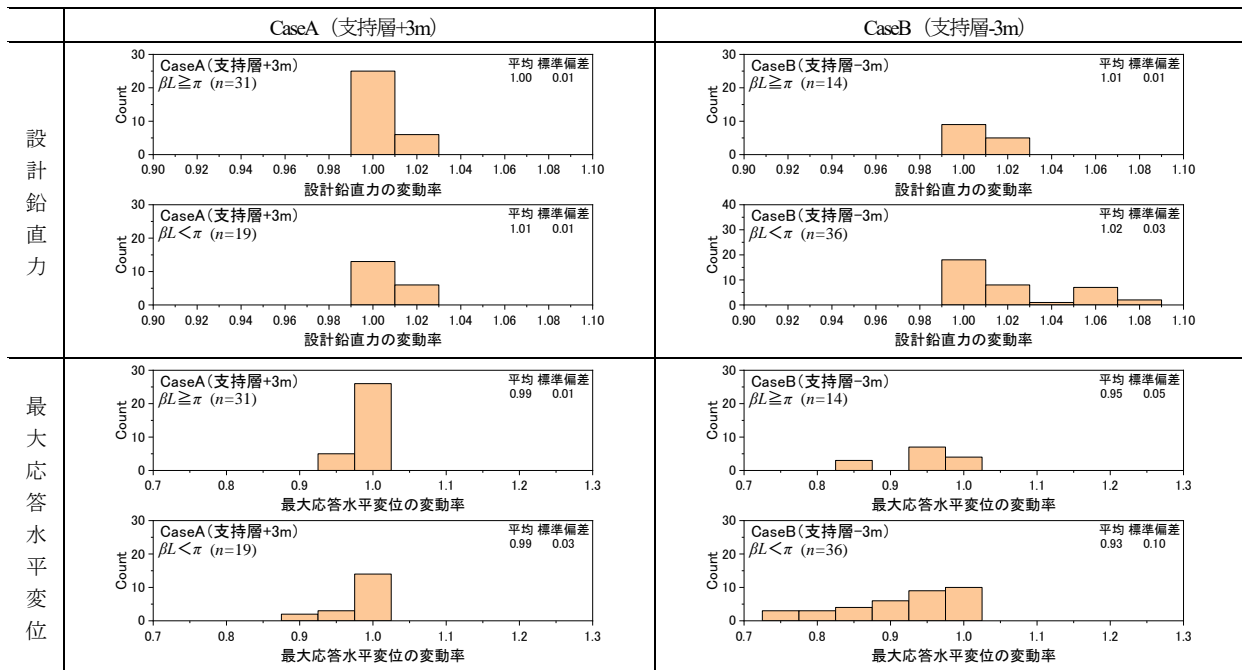


図-6 L1地震動に対する設計鉛直力, 最大応答水平変位の変動率

論では、 $\beta L \geq \pi$ の場合には半無限長の杭としてみなせることが示されている⁵⁾ことから、 $\beta L = \pi$ を基準としている。また、橋軸方向、橋軸直角方向の照査値をそれぞれで整理しているため、母数は事例の倍 ($n=50$) となっている。

(1) L1地震動に対する設計応答値への影響

鉄道構造物の設計においては、L1地震動に対しては要求性能として復旧性の性能レベル1(安定レベル1)が設定される。これに対応する設計限界値は、基本的には部材や地盤抵抗の降伏相当の状態に対応している。そのため、L1地震動に対する設計応答値への影響分析は、橋脚・高架橋における部材・地盤抵抗が未降伏の状態において、支持層出現深度の変動が設計応答値に及ぼす影響を分析することに相当する。表-2および既往の事例分析⁶⁾に示すように、L1地震動に対しては、特殊な構造・地盤条件の場合を除き、一般的に残留鉛直変位と残留水平変位の照査が基礎構造物の諸元の決定要因となる。

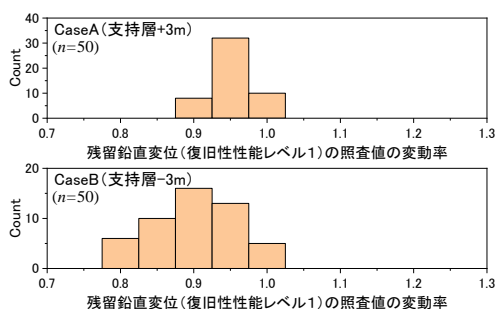


図-7 L1地震動に対する残留鉛直変位(復旧性能レベル1)の照査値の変動率

そのため、以下ではこの2つの性能項目について整理・分析を行った。設計地震動については、当初設計の等価固有周期の分布が0.6~1.4秒程度(図-2)、支持層出現深度の変化に伴う変動率は最大でも10%程度であったことから、応答水平震度の変化は生じなかった。

試算の結果として、支持層出現深度が変化した場合の設計鉛直力(ここでは押し込み・引抜き設計鉛直力のうち当初設計における照査値が大きい方を記載)ならびに最大応答水平変位の変動率を図-6に示す。ここで、変動率とは支持層出現深度変動後の設計応答値を当初設計の設計応答値で除した値として定義している。

まず、残留鉛直変位の設計応答値である設計鉛直力について分析する。設計鉛直力は杭1本あたりに杭頭において発生する鉛直力であるが、すべての事例において支持層出現深度の変化により設計鉛直力が増加する傾向がみられた。これは、図-1に示す対応により杭の鉛直剛性が増加するためであり、既往の検討結果においても同様の傾向がみられる⁷⁾。特に $\beta L < \pi$ の短い杭を対象としたCaseBの場合において、設計応答値が最大8%増加したが、設計限界値(設計鉛直支持力)も増加するため、照査値としては当初設計を下回ることを確認した(図-7)。

次に、残留水平変位の設計応答値として最大応答水平変位に着目する。最大応答水平変位は、支持層出現深度が深くなった場合には最大で10%、浅くなった場合には最大25%設計応答値が小さくなっている。特に $\beta L < \pi$ の時には変動率が $\beta L \geq \pi$ よりも小さい値となっている。これは、CaseA、CaseBともに杭の地盤抵抗が大きくなり基礎の固定度が上昇した結果であるが、特に短い杭の場合には杭の固定度が大きく変化する傾向がみられた。

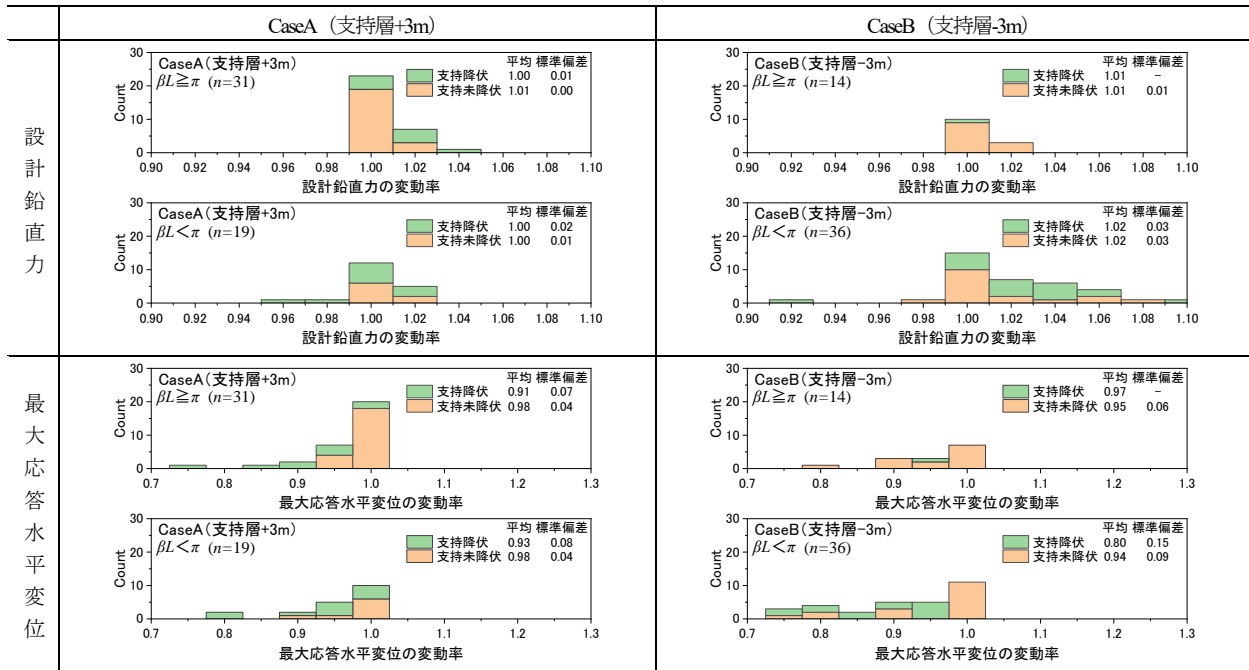


図-8 L2地震動に対する設計鉛直力，最大応答水平変位の変動率

以上より，単杭の剛性が増加することで一般的には基礎の安定性は増加すると考えられるが，設計鉛直力（杭頭軸力）のように照査項目によっては設計応答値が増加するものもあるため，注意が必要と考える。

(2) L2地震動に対する設計応答値への影響

L2地震動に対する照査項目の中から基礎の変形（残留鉛直変位，残留水平変位：以下，残留変位）と部材の照査（杭体の損傷）に分けて支持層出現深度変動の影響を整理する。また， βL に加えて当初設計において支持降伏を許容の有無により区分して整理を行った。なお，残留傾斜の照査項目については，L1地震動に対する照査と同様，基礎構造物の諸元の決定要因となることは比較的少ないため，ここでの検討は省略する。

a) 最大応答震度への影響

等価固有周期の変動は最大でも10%程度と限定的であり，かつすべての事例で柱先行降伏であったことから，支持層出現深度の変動に伴う最大応答震度の有意な変化は見られなかった。

b) 残留変位に関する設計応答値への影響

残留変位に関する照査項目の中から，設計鉛直力，最大応答水平変位の設計応答値に及ぼす影響を図-8に示す。設計鉛直力を見ると， $\beta L \geq \pi$ の一般的な条件の場合には最大応答震度に対して鉛直支持降伏（以下，支持降伏）を許容するか否かにかかわらず，変動率は最大4%にとどまるが， $\beta L < \pi$ の短い杭の場合には変動率が最大10%と大きくなっている。特に，当初設計において支持降伏を許容している場合には，鉛直地盤抵抗が増加することで杭頭軸力がさらに増加するため，支持降伏を許容しな

い場合と比較して変動率がより大きくなっている。ただし，L1地震動に対する鉛直支持力と同様に，設計限界値も増加するため照査値としては当初設計を上回る結果は見られなかった。

一方で，水平変位の設計応答値についても，当初設計において支持降伏を許容している場合には，支持層出現深度の変化に伴う変動率が比較的大きくなる傾向であったが，設計応答値はすべての事例において減少する結果となった。

c) 部材に関する設計応答値への影響

次に，部材に関する照査項目への影響として，基礎標準にて一般的な杭部材の照査指標として設定されているせん断力と曲率について分析する。

杭体に発生するせん断力の設計応答値への影響を図-9に示す。杭頭部におけるせん断力の変動をみると， $\beta L \geq \pi$ の場合には，変動率は最大でも5%である。しかしながら， $\beta L < \pi$ の短い杭の場合には変動量が大きくなっており，支持層深度が深くなるCaseAでは設計応答値が減少する方向に，支持層深度が浅くなるCaseBでは概ね増加する方向に変動する傾向がみられる。なお，CaseA，CaseBともに，支持降伏の有無による明確な差異は見られない。ここで，地震動の作用によって杭体に発生するせん断力の概要を図-10に示す。検討対象とした設計事例は柱先行降伏であり，L2地震動に対しては柱部材のM点（最大耐力点）に至っているため，上部工慣性力によって生じる杭頭せん断力は基礎の固定度が変化しても変化していない。一方で地盤変位の影響による断面力は地層境界で発生するため支持層上面付近で卓越し土被りが浅くなるにつれて収束する場合が多い。一般的な地盤

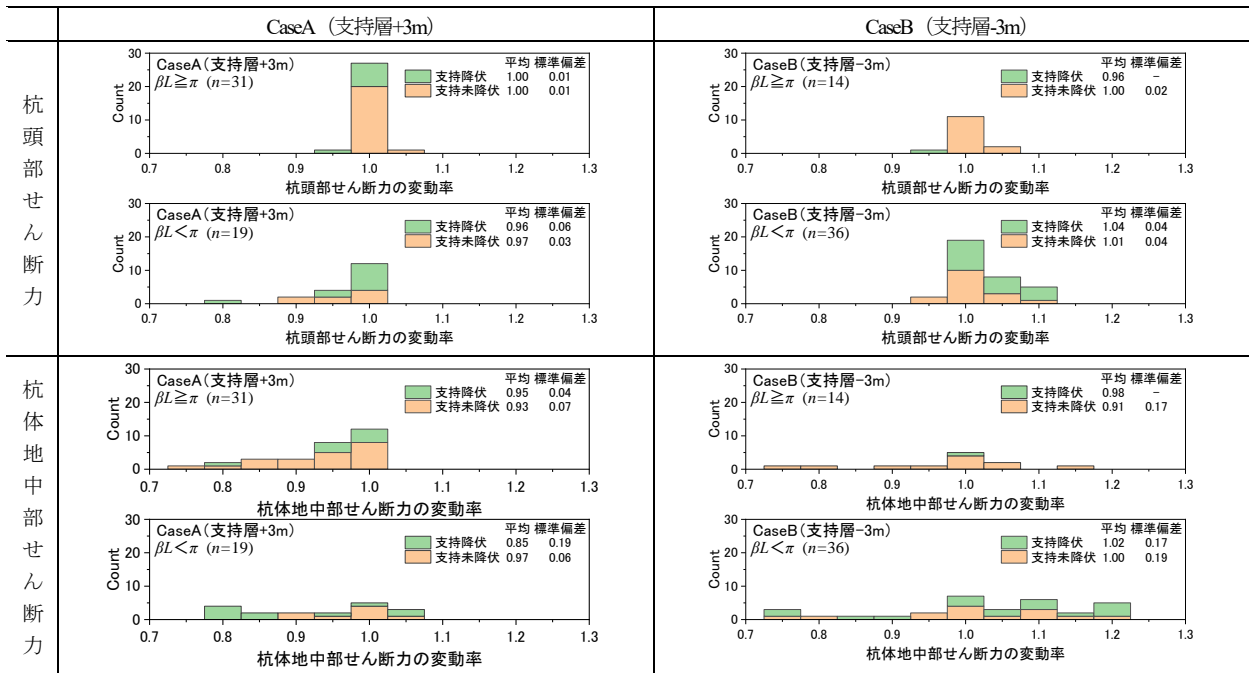


図-9 L2地震動に対する杭体のせん断力の変動率

条件 ($\beta L \geq \pi$) の場合、地盤変位の影響によるせん断力が杭頭付近で小さくなるのに対し、短い杭 ($\beta L < \pi$) や支持地盤が浅くなる場合には地盤変位によって生じたせん断力が杭頭部で収束せず、慣性力と地盤変位の影響による合計値が大きくなる場合が生じる。そのため、CaseA では杭頭せん断力が減少する傾向にあり、CaseB ではせん断力の増加する頻度が多くなったと考える。

一方で、杭体地中部（杭頭から 2D 区間以深）に発生するせん断力については、支持層出現深度の変動による影響が非常に大きい。地中部における断面力は主に地盤変位により地層境において発生するが、支持層出現深度が変化すると、地盤の変位量の分布や変形モードが容易に変化するため、杭体せん断力の変動率も高くなったと推測される。ただし、図-10 に示したように、表層地盤の層厚が大きくなることにより慣性力により発生するせん断力と地盤により発生するせん断力が重ならなくなるため、定性的にみれば、支持層出現深度が深くなる CaseA についてはせん断力の設計応答値が当初設計よりも減少する傾向にあると推測される。支持層出現深度が浅くなる CaseB において杭長が短い場合は、せん断力が増加する場合があることに留意すべきといえる。

最後に杭体の曲率への影響を整理した。図-11 に杭頭部における曲率の変動率を示すが、当初設計において支持降伏を許容している事例において、支持層出現深度の変動により曲率が大幅に増加することが明らかになった。他の設計応答値よりも変動率が著しく大きい原因としては、曲げモーメントが降伏時の曲げモーメントを超過すると曲率が急激に増加することが考えられる。この傾向は、支持層の出現深度が浅くなる CaseB で、さらに当初

設計において押し込み・引抜き両方の支持降伏が発生している事例で特にみられた。支持層出現位置が浅くなったことにより鉛直地盤抵抗が増大し、杭体に発生する引張軸力が大きくなった結果、RC 部材の曲げ耐力が低下し、結果として曲率の応答値が大幅に増加したと考えられる。

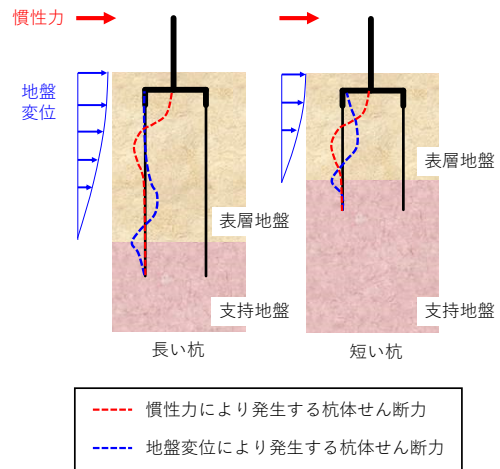


図-10 地震動作用と杭体発生せん断力の概念図

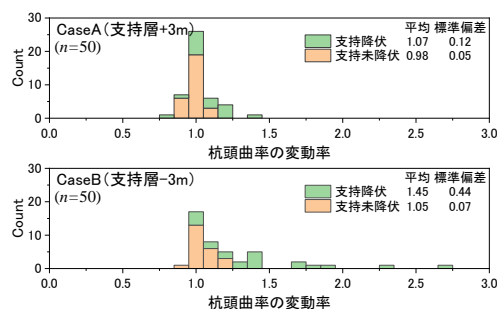


図-11 L2地震動に対する杭頭部における曲率の設計応答値の変動率

5. まとめ

本論文では、支持層出現深度に応じた対応を実施した場合に、設計の決定要因となりする照査項目について設計応答値に与える影響について試算・分析を行った。得られた知見を下記に示す。

- 1) L1 地震動に対する設計応答値に関しては、支持層出現深度に応じた対応により基礎の固定度が増加するため残留水平変位等の変形量に関する設計応答値は減少する。一方、杭の鉛直剛性が高まるため設計鉛直力については増加することが示された。特に、短い杭の場合には鉛直剛性の変化量が大きいため、設計鉛直力の変動率も大きくなる。
- 2) L2 地震動に対する設計応答値に関しては、杭の長さの影響に加えて、当初設計における支持降伏を許容している場合には、残留鉛直変位、残留水平変位および杭頭曲率の設計応答値の変動率が大きいことが確認された。ただし、杭体に発生するせん断力については、地盤変位による影響が大きく、支持降伏の許容の有無による優位な差異は見られなかった。

以上の分析結果を参考とすることで、支持層出現深度が変化した場合の再照査を合理的に実施することが可能になると考える。ただし、地盤種別が変化しない条件での試算結果であり、地盤種別が変化する場合には設計応答値への影響は大きいと考えられるため、注意が必要である。また、支持層位置が変動しやすい地域において短い杭基礎を計画する場合、支持層出現深度の変動による設計応答値への影響が大きいため、設計において密な地盤調査を実施して地盤条件を適切に把握することが合理的な設計につながると考える。

REFERENCES

- 1) 国土交通省鉄道局監修 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物, 2012.

- [Railway Technical Research Institute: *Design Standards for Railway Structures and Commentary (Foundation Structures)*, 2012.]
- 2) 大竹雄, 本城勇介: 地盤構造物設計の不確実性寄与度分析と設計の観点からみた地盤工学の課題, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.72, No.4, pp.310-326, 2016. [Otake, Y and Honjyo, Y.: GEOTECHNICAL RELIABILITY ANALYSIS AND CHALLENGES IN GEOTECHNICAL DESIGN, *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser.C (Geosphere Engineering)*, Vol.72, Issue 4, pp.310-326, 2016.]
 - 3) 松井謙二, 落合英俊: 地盤の不確実性を考慮した摩擦杭基礎の支持力評価, 土木学会論文集 No.445/III-18, pp.83-92, 1992. [Matsui, K. and Ochiai, H.: UNCERTAINTY OF SOIL PROPERTIES, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, Vol.1992, Issue 445, pp.83-92, 1992.]
 - 4) 国土交通省鉄道局監修 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. [Railway Technical Research Institute: *Design Standards for Railway Structures and Commentary (Seismic Design)*, 2012.]
 - 5) Chang, Y.L.: Discussion of "Lateral Pile-Loading Tests" by L.B.Feagin, *Trans. ASCE*, Vol.102, pp.272-278, 1937.
 - 6) 川中島 寛幸, 曾我 大介, 磯谷 篤実, 二村 俊輔, 佐名川 太亮: 杭基礎を有する鉄道構造物の設計照査結果の傾向分析, 年次学術講演会, Vol.75, pp.III-390-391, 2020. [Kawanakajima, H., Soga, D., Isogai, A., Futamura, S. and Sanagawa, T.: Case study on design of railway structure with pile foundation, *Proceedings of annual conference of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 75, p.III-390, 2020.]
 - 7) 有江義晴, 玉置修, 矢作枢, 青柳史郎: 杭頭固定度を考慮した組杭の3次元解析法, 土木学会論文集, Vol.204, pp.81-92, 1972. [Arie, Y., Tamaki, O., Yahagi, K. and Aoyagi, S.: Three dimensional analysis of group piles with elastic restraints at their heads, *Proceedings of the Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 204, pp.81-92, 1972.]

(Received April 1, 2022)

(Accepted June 3, 2022)

EFFECT OF DIFFERENCE BETWEEN SUPPORT LAYER DEPTH IN DESIGN AND ACTUALLY CONFIRMED DEPTH ON RESPONSE OF PILE FOUNDATION BRIDGES AND VIADUCTS

Takumi OZAKI, Taisuke SANAGAWA, Hiroyuki KAWANAKAJIMA,
Akira SAKATA and Daisuke SOGA

Because soil investigations like standard penetration tests for design are discretely conducted, depth of support layer turn out to be different from the depth assumed in design at the time of pre-construction confirmation of each pile. At this time, it is necessary to change the spec of piles and verify the all verification items, and it has a great impact on the construction period. In this paper, calculation is carried out to evaluate the change of the response values when the depth of bearing stratum turn change. As a result, while there was no significant effect on the response value regarding the deformation of the foundation, some design response value of foundation members like pile greatly changed when the piles are short.