

論文 新幹線橋りょう・高架橋の基礎構造物の設計における決定要因に関する分析

阪田 暁¹・川中島 寛幸²・曾我 大介³・佐名川 太亮⁴・森 寛典⁵

¹正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 設計部 (〒231-8315 横浜市中区本町 6-50-1)

E-mail: sakata.aki-f8r4@jrtr.go.jp (Corresponding Author)

²正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 設計部 (〒231-8315 横浜市中区本町 6-50-1)

E-mail: kawanakajima.hir-bc5v@jrtr.go.jp

³正会員 鉄道建設・運輸施設整備支援機構 北陸新幹線建設局 (〒532-0003 大阪市淀川区宮原 3-5-36)

E-mail: sogai.dai-px82@jrtr.go.jp

⁴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

⁵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: mori.hironori.88@rtri.or.jp

鉄道構造物等設計標準・同解説(基礎構造物)(以下、基礎標準)については、平成24年(2012年)に改訂され、実務設計において運用されている。この基礎標準改訂では、性能照査型設計法の導入に合わせて、照査指標を見直した。具体的には、各要求性能において各限界状態に対する余裕度を詳細に把握することができるとともに、異なる基礎形式を同一の指標で比較ができる。しかし、照査指標が旧標準よりも増加したため、設計の決定要因となる照査指標も複雑化した。そこで本論では、基礎標準を用いた整備新幹線構造物の杭基礎橋脚・高架橋を対象に、構造物諸元の決定要因となる照査指標について整理・分析を行った。その結果、杭基礎構造物の構造諸元の決定においては、橋脚・高架橋の構造形式による特徴と、杭工法の特徴が明確に表れたことが明らかになった。

Key Words: *pile foundation, design, cast in place concrete pile, steel pipe pile*

1. はじめに

鉄道構造物等設計標準・同解説は、2004年(平成16年)に改訂された鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造)¹⁾を皮切りに、性能照査型設計法へと移行されている。鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物²⁾(以下、基礎標準)については2012年(平成24年)に改訂され、実務設計において運用されている。この基礎標準の改訂では、構造物全体を統一した要求性能の下、これに属する形で基礎特有の性能項目を設定した性能照査型設計法の導入を行った。具体的には、すべての基礎形式で各要求性能に対して鉛直・水平・回転・部材の各照査指標を設定し、設計限界値に対する照査を実施することで、変形・損傷モードを詳細に把握する。これにより、各限界状態に対する余裕度を把握することができるようになるとともに、異なる基礎形式を同一の指標で比較することができるようになった。

一方で、照査指標の数が増加したことにより、設計における構造諸元の選定において、決定要因となる照査指標が複雑化することが予想された。各基礎形式や構造物の特徴ごとに決定要因となる照査指標が明らかになれば、設計実務の作業の簡略化につながることに加え、新たな基礎工法の開発等においても着眼点を明確に設定することができる。

そこで本論文では、基礎形式のなかで最も使用割合が高く、施工法や構造諸元が多岐にわたる杭基礎橋脚・高架橋を対象とし、基礎標準で設計された整備新幹線構造物の駅部等を除く一般区間における杭基礎橋脚・杭基礎高架橋の設計事例395事例を対象に整理・分析を行い、設計において構造物諸元の決定要因となる照査指標について検討を行った。

2. 杭基礎構造物の照査指標

鉄道標準では、表-1のように構造物の要求性能、性能項目と作用の組合せを定め、施工中および設計耐用期間中の性能の継時変化を考慮して、照査がなされている。

基礎標準においても、これらの考え方と整合を図り、表-2 に示した構造物の要求性能「安全性」「使用性」「復旧性」に対応する基礎構造物の限界状態を「基礎の安定」、「基礎の支持性能」、「基礎の残留変位」とし、それぞれの構成要素として鉛直方向・水平方向・回転方向の支持性能の照査の他、基礎部材等（等はフーチングや地中梁等の連結部材や杭頭部などの結合部を意味する）の照査の4項目の照査からなることとした。図-1に基礎構造物の照査指標の詳細を示す。この性能指標は、すべての基礎形式に対して同じものを設定しており、また設計限界値も統一しているため、例えば異なる基礎形式で比較設計を行う際に、照査値ならびに設計応答値を比較することで、基礎構造物の性能を直接的に比較することができる。

ここで、杭基礎を対象とした場合、杭本数や杭径、杭長などの基礎的な構造諸元の決定に大きく関わるのは鉛直・水平・回転に関する照査項目であり、部材の損傷や破壊に関する照査項目は、場所打ち杭の配筋諸元や、鋼管杭の肉厚等の決定要因となる。なお、本事例において杭径が場所打ち杭における最大鉄筋量や鋼管杭における径厚比といった仕様、あるいは曲げ耐力やせん断耐力といった部材性能の観点から杭径が決定した事例は見当たらなかった。そこで本検討では、鉛直・水平・回転に関する照査項目に着目して、設計事例を対象に整理・分析を実施した。

なお参考として、杭基礎における各照査項目の照査指標と設計限界値を表-3に示す。

3. 設計事例の概要と照査値の分布

整理・分析の対象とした設計事例は、基礎標準で設計された829事例（橋脚452基、高架橋377基）のうち、詳細な構造解析による照査が実施されていた395事例（橋脚310基、高架橋85基）である。なお本検討では、駅部を除く複線区間において、詳細設計を行った杭基礎を有するRC壁式橋脚、ならびに地中梁を有する1柱1杭式のビームスラブ式RCラーメン高架橋を対象としている。また、今回の基礎標準対象事例は地域別係数がす

表-1 鉄道構造物の要求性能と性能項目^{2,3)}

要求性能	性能項目	作用の組み合わせ
安全性	破壊	永久作用+主たる変動作用+従たる変動作用 永久作用+偶発作用+従たる変動作用
	疲労破壊	永久作用+変動作用
	走行安全性	永久作用+変動作用 永久作用+偶発作用+従たる変動作用
使用性	乗り心地	永久作用+変動作用
	外観	
復旧性	損傷	永久作用+変動作用 永久作用+偶発作用+従たる変動作用

べて1.0の地域であるため、復旧性性能レベル2の照査を満たすことで安全性（地震時）の性能項目を包含している。

橋脚・高架橋の構造・地盤条件等の諸元をまとめたヒストグラムを図-2、図-3に示す。新幹線構造物は経済性

表-2 基礎構造物の要求性能と性能項目²⁾

構造物の要求性能	杭基礎の性能項目		照査指標			
	地震時以外	安全性	基礎の安定	地盤の破壊	設計鉛直力	
水平安定				最大応答水平変位		
回転安定				最大応答回転角		
基礎部材等の破壊				曲率、設計断面力		
使用性		基礎の支持性能	長期支持性能	鉛直方向	設計鉛直力	
				水平方向	最大応答水平変位	
			短期支持性能	鉛直方向	設計鉛直力	
				水平方向	最大応答水平変位	
					回転方向	最大応答回転角
					回転方向	最大応答回転角
地震時	復旧性	基礎の残留変位	残留鉛直変位	設計鉛直支持力		
			残留水平変位	最大応答水平変位		
			残留傾斜	最大応答回転角		
			基礎部材等の損傷	曲率、設計断面力		
			残留鉛直変位	設計鉛直支持力		
			残留水平変位	最大応答水平変位		
	安全性	基礎の安定	地盤の破壊	設計鉛直支持力		
			水平安定	最大応答水平変位		
			回転安定	最大応答回転角		
			基礎部材等の破壊	曲率、設計断面力		

※1: 基礎の変位が生じるが残留変位は些細で、構造物の補修は行わずに機能を持てる状態
 ※2: 基礎の変位が残留し、場合によっては補修が必要となるが、早期に機能が回復できる状態

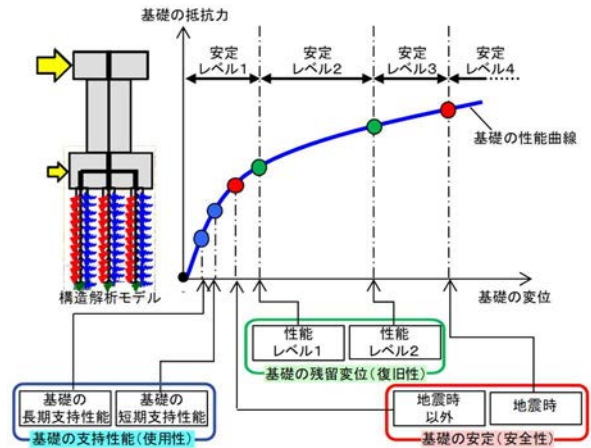


図-1 基礎構造物の抵抗力～変形関係と性能項目、設計限界値の関係²⁾

表-3 杭基礎における照査指標²⁾

構造物の要求性能	杭基礎の性能項目		照査指標				
			着目位置	設計応答値			
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		
			水平安定	フーチング等の天端	最大応答水平変位		
			回転安定	フーチング等の天端	最大応答回転角		
			基礎部材等の破壊	杭体・結合部・フーチング	曲率、設計断面力		
	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	
				水平方向	フーチング等の天端	最大応答水平変位	
			短期支持性能	鉛直方向	杭頭部	設計鉛直力	
				水平方向	フーチング等の天端	最大応答水平変位	
					回転方向	フーチング等の天端	最大応答回転角
					回転方向	フーチング等の天端	最大応答回転角
地震時	復旧性	基礎の残留変位	残留鉛直変位	杭頭部	設計鉛直支持力		
			残留水平変位	フーチング等の天端	最大応答水平変位		
			残留傾斜	フーチング等の天端	最大応答回転角		
			基礎部材等の損傷	杭体・結合部・フーチング	曲率、設計断面力		
			残留鉛直変位	杭頭部	設計鉛直支持力		
			残留水平変位	フーチング等の天端	最大応答水平変位		
	安全性	基礎の安定	地盤の破壊	杭頭部	設計鉛直支持力		
			水平安定	フーチング等の天端	最大応答水平変位		
			回転安定	フーチング等の天端	最大応答回転角		
			基礎部材等の破壊	杭体・結合部・フーチング	曲率、設計断面力		

や施工性などの観点から、橋脚・高架橋区間の高さを6~20m程度、桁式高架橋の桁長は20m程度を最も多く計画することが多く、く体高さ（フーチング上面から桁座面）や桁長の結果には、これら特徴が表れている。杭基礎の主たる諸元に着目すると、杭工法としては、①場所打ち杭工法、②鋼管ソイルセメント杭工法、③回転鋼管杭工法、④深礎杭工法の4つである。杭径は1.5mのものが大多数であり、杭本数も6本が最も多い。桁長に関しては、10~50mまで幅広く、支持層への根入れは0~10m程度まで分布しており、0mの摩擦杭も見られた。

各設計事例について作用を地震時以外、L1地震動、L2地震動の3つに区分し、各照査項目に対して対応する

作用の組合せの中で最も大きな照査値を図4に示す。なお、地震時の照査項目については、非液化化時の慣性力設計、液化化時の慣性力設計、地盤変位の影響を考慮した応答変位法による設計、の3つに分けて記載している。また、図中のドットは照査値の分布を表しており、赤字は中央値を示している。

この照査値の分布から、地震時以外の水平・回転の照査項目を除いて、照査値が幅広く分布していることが明らかになった。特に、鉛直の照査値が1.0に近い箇所でも分布しており、鉛直の照査値に比べると、それ以外の水平・回転の照査値は、分布幅があるものの、鉛直の照査値と比べると比較的低い値で分布している。また、橋脚

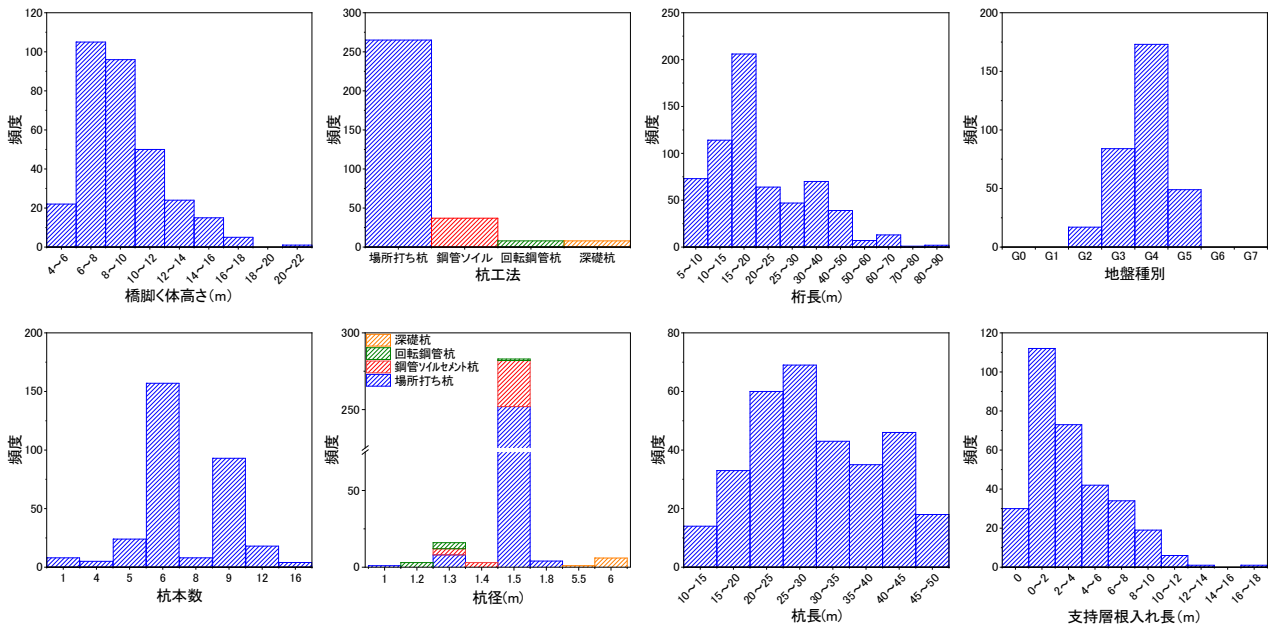


図-2 分析対象とした設計事例における主な構造諸元のヒストグラム（橋脚） (n=310)

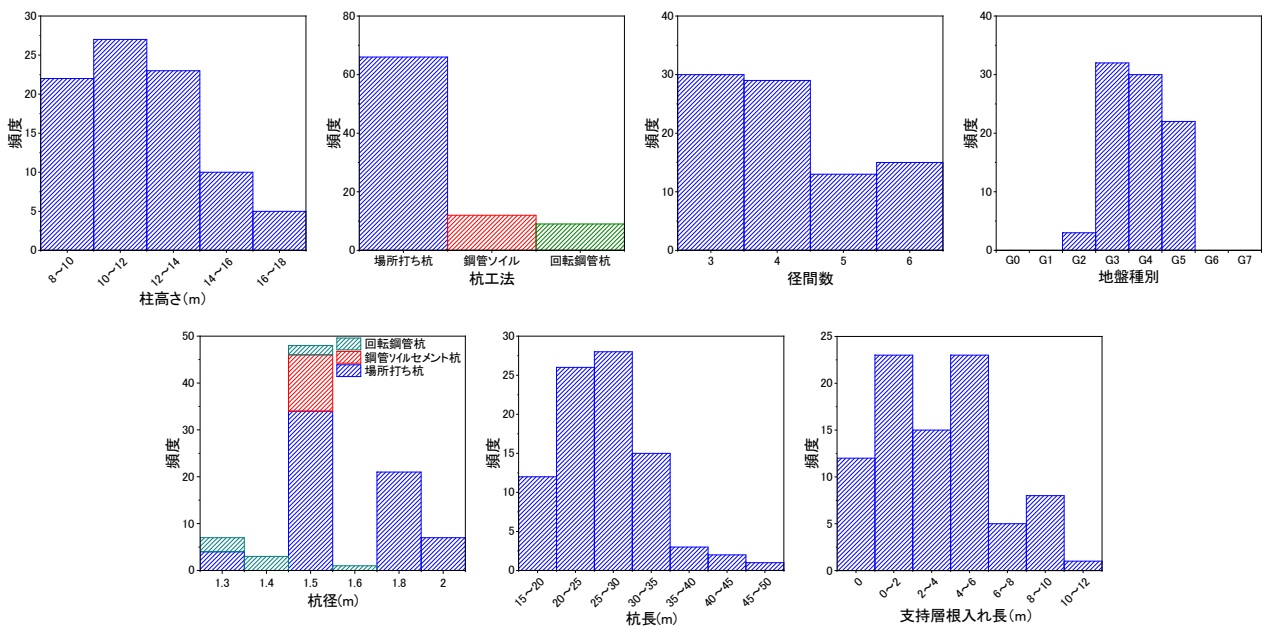


図-3 分析対象とした設計事例における主な構造諸元のヒストグラム（高架橋） (n=85)

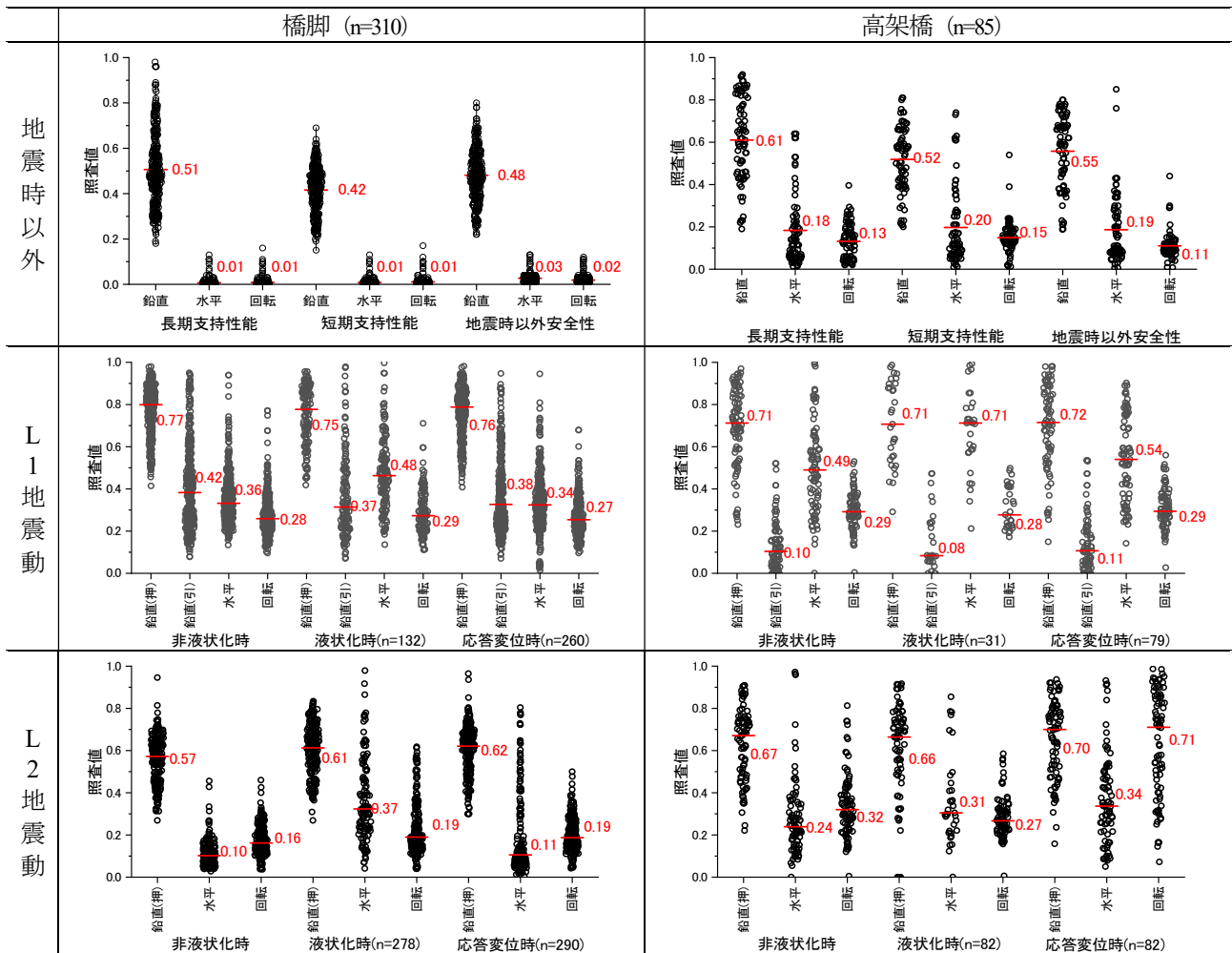


図4 設計事例における照査値の分布

と高架橋の違いを見ると、水平・回転の照査値は橋脚より高架橋の方が分布が高くなっていること見て取れるが、これは橋脚のフーチングに比べて高架橋の地中梁の部材厚が小さく、橋脚では水平・回転の照査値が厳しい場合には3列以上の群杭とすることが多いから、剛性の小さい高架橋の杭頭変位や回転角が大きくなるためと推察される。

4. 構造物諸元の決定要因となる照査項目

杭基礎構造物の諸元の決定要因となる照査項目を抽出するため、各設計事例の中で最も大きな照査値を示している照査項目を抽出した。ただし、設計事例の中には、工学的判断等により照査結果に余裕を持たせている事例もあるため、ここではすべての照査項目の中で最大照査値が0.85を超えている事例のみを対象として分析を行った。結果として対象となった構造物は橋脚165基、高架橋60基である。

図5に、橋脚・高架橋に対して、各杭工法において最大照査値を示す照査項目の割合を円グラフで示す。なお、地震時の照査項目は液状化時とそれ以外（非液状化時・

応答変位時）に分けている。この結果を見ると、橋脚と高架橋の構造形式の特性や杭工法の特性が表れている。以下では杭工法ごとに考察を示す。

一つ目に最も数量が多い場所打ち杭の照査結果に注目すると、橋脚、高架橋ともにその大半がL1地震動に対する残留鉛直変位の照査値が最大であった。これは、他の杭工法の事例ではL1地震動に対する残留鉛直変位が決定要因となっている事例はほぼなかったが、その理由として場所打ち杭の終局支持力（復旧性能レベル2の設計限界値）に対する降伏支持力（復旧性能レベル1の設計限界値）の比率が他の杭工法より比較的小さくなるためであると考えられる。設計支持力は地盤抵抗係数に基準支持力を乗じることで算出されるが、载荷試験データベースの統計値²⁾や図6を見ると、場所打ち杭の復旧性能レベル1と復旧性能レベル2における地盤抵抗係数の差が鋼管ソイルセメント杭と比較して大きくなっていることがわかる。次に、場所打ち杭の高架橋に着目すると、L1地震動に対する残留鉛直変位の決定要因に続いてL1地震動に対する残留水平変位や、L2地震動に対する残留回転角が要因となる事例が見られた。これは橋脚と比較すると高架橋の方が上部構造物の死荷重が

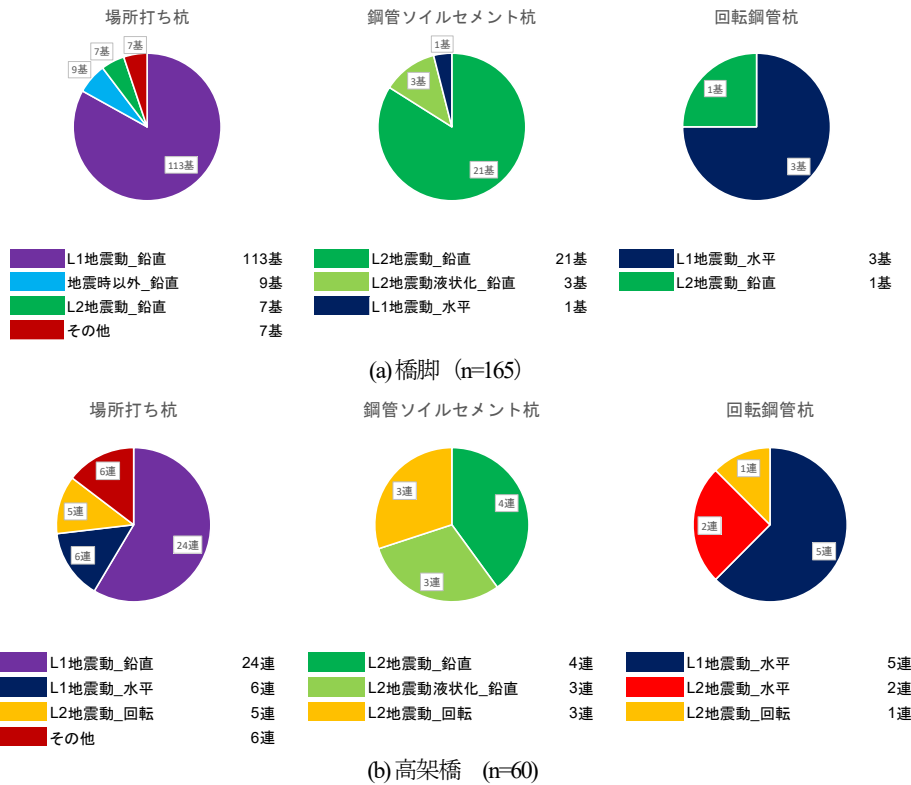
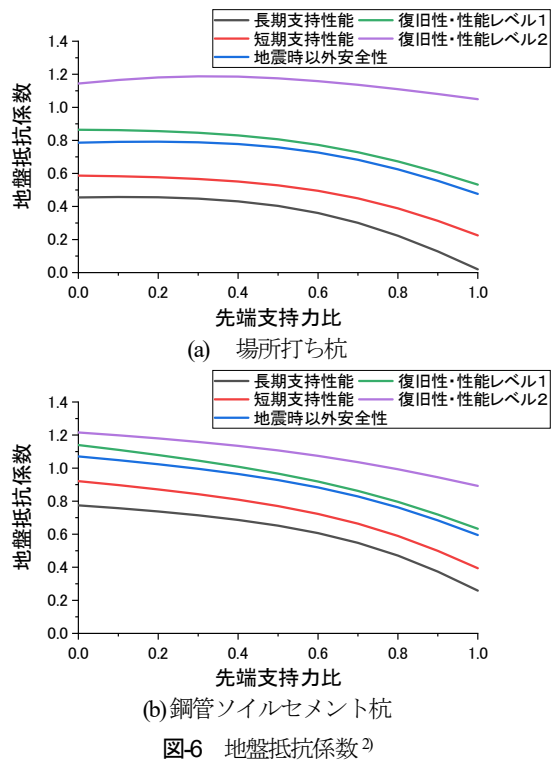


図-5 最大照査値となる照査項目の数量

小さいことに加え、線路直交方向の橋脚く体の最大応答震度が小さいため、基礎構造物への鉛直方向の負担が小さいことが要因の一つとして挙げられる。また、高架橋の決定項目について詳細に分析を行うと、L1地震動に対して液状化の検討を行う場合には残留水平変位で決定する傾向となるケースが見られた。さらに、G4-G5地盤の軟弱地盤においてはL2地震時の地盤変位量が相対的に大きくなるため、地盤変位作用時に地中梁の相対的な曲げ剛性が低くなる線路方向の残留回転角の照査で構造諸元が決定するケースがみられた(図-7)。

2つ目に鋼管ソイルセメント杭に注目すると、橋脚・高架橋ともにその大半がL2地震動に対する残留鉛直変位の照査が決定要因であった。これは、前述のように降伏支持力(復旧性性能レベル1の設計限界値)と終局支持力(復旧性性能レベル2の設計限界値)の算出に用いられる地盤抵抗係数(図-6(b))の値が近い(すなわち、終局支持力に対する降伏支持力の比率が場所打ち杭よりも鋼管ソイルセメント杭の方が高い)ことに加え、鋼管ソイルセメント杭は高い周面摩擦力を有していることから、軟弱な地盤において不完全支持杭として適用されることが多く、不完全支持杭として必要となる追加の群杭としての鉛直支持力の照査²⁾が決定要因となっていることが考えられる。

最後に回転鋼管杭に注目すると、残留鉛直変位は決定要因とはならず、橋脚・高架橋ともにその大半がL1地震動に対する残留水平変位の照査で構造諸元が決定して



いた。これは、回転鋼管杭では杭先端の羽根部(拡径部)により高い支持力が得られる反面、鋼管杭本体の径は鋼管ソイルセメント杭よりも比較的小さくなるため、杭の剛性ならびに水平抵抗の受圧面積が相対的に小さくなることから、水平に関する照査が決定要因となっていると考えられる。

以上のように、杭基礎構造物の構造諸元の決定において、橋脚・高架橋の構造形式による特徴、杭工法の特徴が明確に表れていることが分析結果から明らかになった。

5. 基準の改訂による構造物諸元への影響

上記整理・分析は基礎標準ならびに耐震標準に準拠して設計した設計事例を対象としたが、平成9年版鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎構造物）⁴⁾（以下、旧標準）に準拠して設計された事例についても構造物諸元等を整理し、比較を行った。なお、鋼管ソイルセメント杭、および回転鋼管杭は比較的近年開発されたものであり、旧標準では記載されていないことから、場所打ち杭の橋脚・高架橋のみを整理・分析の対象とし、基礎標準では717事例（橋脚365基、高架橋352基）、旧標準では473事例（橋脚187基、高架橋286基）の駅部を除いた複線区間を対象とした。ただし、旧標準事例対象地域は基礎標準事例と異なるサイトのため、地盤条件等は異なる。

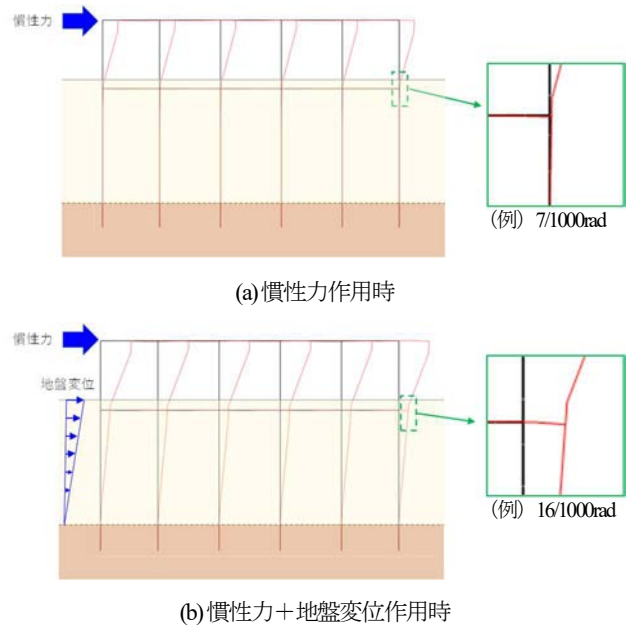


図-7 高架橋の地震時挙動の概要

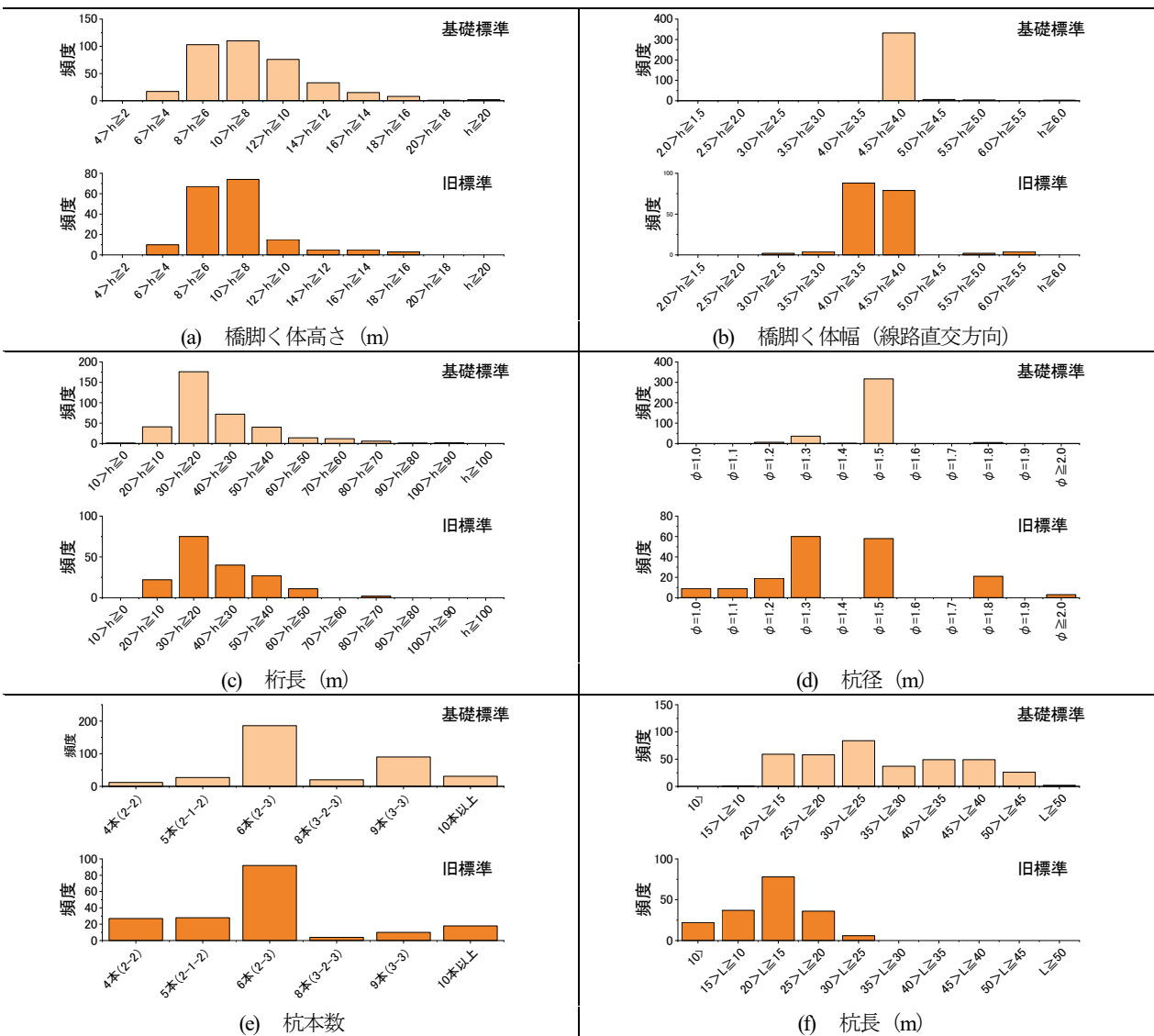


図-8 橋脚の構造諸元のヒストグラム（基礎標準n=365、旧標準n=187）

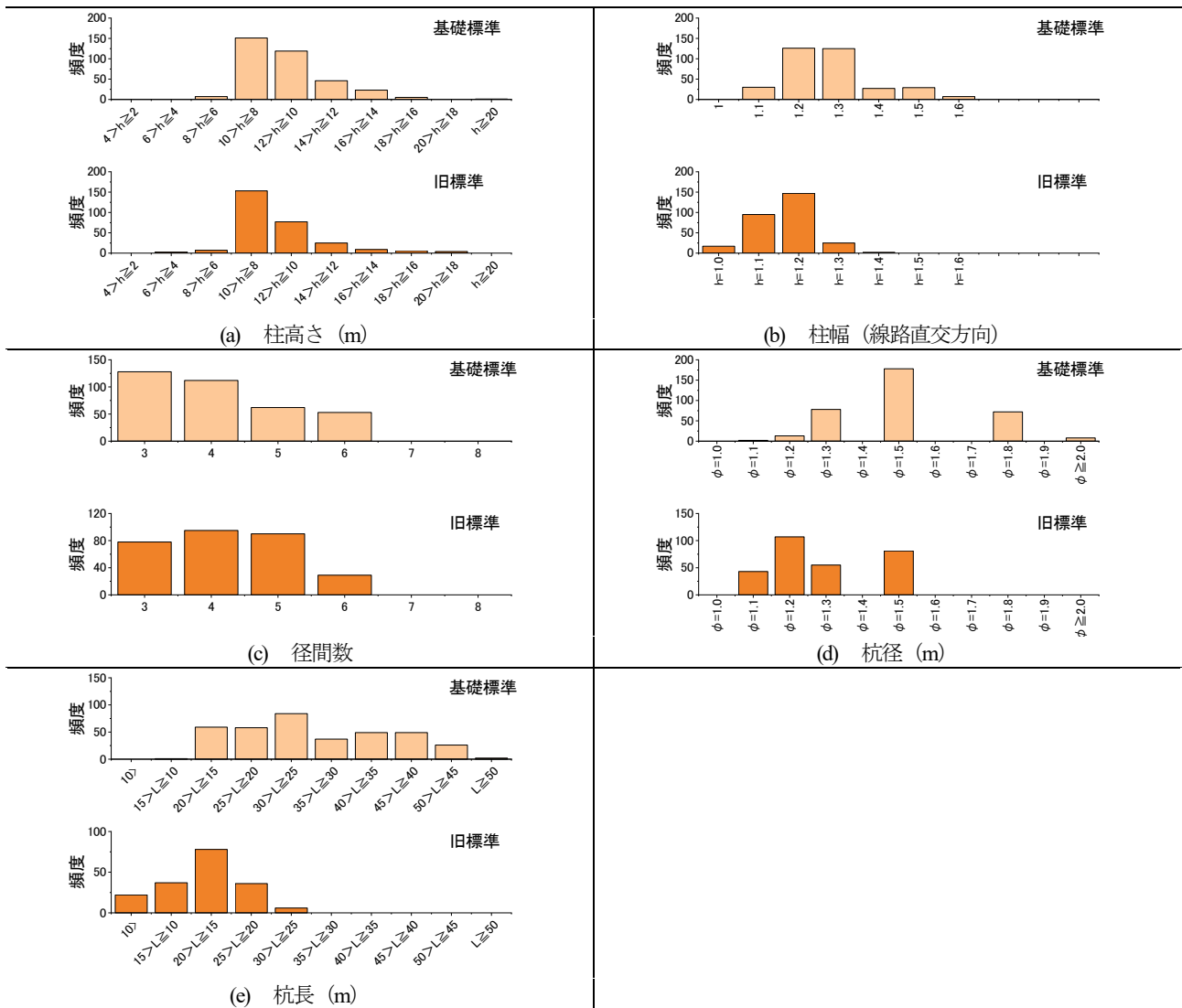


図9 高架橋の構造諸元のヒストグラム (基礎標準 n=352, 旧標準 n=286)

主たる構造諸元の分布を図-8, 図-9 に示す. ここでは, 橋脚と高架橋で区分して記載している. まず, 橋脚く体や柱寸法で比較すると, 基礎標準の設計事例の方が橋脚・く体高が高く, また幅も旧標準に比べて大きい. また橋脚においては支持する桁長も長いものが多いことから, 地震動によって基礎に作用する上部工からの荷重は大きいものと推測される.

次に, 杭の諸元である橋脚・高架橋の杭径, 杭長, 杭本数 (図-8 (d)-(f), 図-9(d), (e)) の新旧標準の結果を比較すると, 基礎標準での設計事例の方が大きいことがわかる. 前述のように橋脚く体や柱, 桁などの諸元によって基礎構造物に対する地震時の荷重が大きくなっていることも要因の一つとして考えられるが, その他要因の一つとして, 標準改訂に伴う設計鉛直支持力の修正と, 水平および回転の照査項目によって杭諸元が決定する場合があるためと推察される. 設計鉛直支持力については, 図-10 に示すように, 基礎標準改訂の際, 降伏点の設定方法を載荷試験結果から直接的に設定するよう変更され

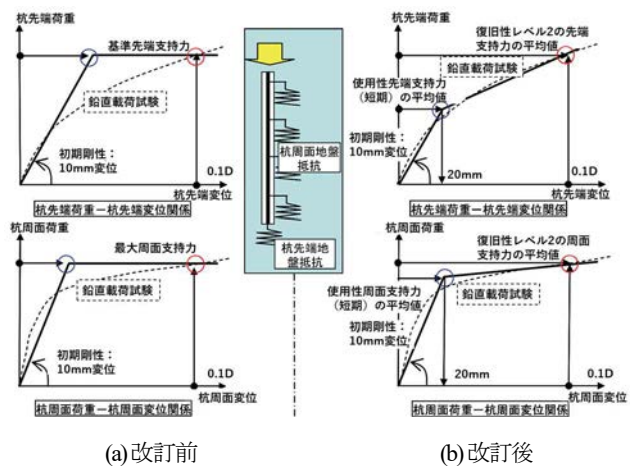


図-10 杭の鉛直地盤抵抗特性のモデル化の概要²⁾

た. 旧標準における場所打ち杭の設計鉛直支持力の評価においては, 変位量が小さい範囲で実測値に対して過大評価となっているという課題²⁾もあり, 設計降伏支持力が改訂前と比較すると低い値となっている. 結果とし

て4章で示したように、多くの橋脚・高架橋においてL1地震動に対する残留変位の照査が決定項目となっていることから、設計鉛直支持力の改訂による変更も改訂前後の杭の諸元に影響を与えたと推察される。

6. おわりに

以下の知見が得られた。

- 1) 橋脚の場合、最も採用事例の多い場所打ち杭では、その大半が L1 地震動に対する残留鉛直変位の照査で基礎構造物の諸元が決まっていた。その他、鋼管ソイルセメント杭は、L2 地震動による残留鉛直変位の照査、回転鋼管杭では、L1 地震動による残留水平変位の照査が決定要因となり、L1 地震動による残留鉛直変位が決定要因となっている事例は場所打ち杭以外はほぼ見られなかった。
- 2) 高架橋の場合、場所打ち杭の決定要因が最も高かったのは、橋脚と同様 L1 地震動による残留鉛直変位であった。その他、L1 地震動による液状化の検討を場合は残留水平変位、軟弱地盤の場合は L2 地震動による残留回転角の照査が決定要因である事例も見られた。その他、鋼管ソイルセメント杭は L2 地震動による鉛直変位の照査、回転鋼管杭は L1 地震動による残留水平変位の照査が決定要因となっており、傾向はいずれも橋脚と同様の傾向であった。
- 3) 基礎標準と旧標準の設計事例における杭諸元（杭径、杭長、杭本数）を比較すると、現行標準の方が大きな値が多く見られた。その結果、要因の一つとして、橋脚く体や柱、桁などの諸元によって基礎構造物に対する地震時の荷重が大きくなった他、標準改訂に伴う設計鉛直支持力の修正と、水平および回転の照査項目も要因の一つと推察された。

以上より、基礎標準における杭基礎構造物の構造諸元の決定においては、橋脚・高架橋の構造形式による特徴と、杭工法の特徴が明確に表れていることが明らかになった。本稿が、今後の設計実務や新たな基礎工法の開発等の参考になれば幸いである。

REFERENCES

- 1) 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 コンクリート構造物, 2004. [MLIT and RTRI: *The design Standards for Railway Structures and Commentary concrete structure*, 2004]
- 2) 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 基礎構造物, 2012. [MLIT and RTRI: *The design Standards for Railway Structures and Commentary pile foundation*, 2012]
- 3) 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. [MLIT and RTRI: *The design Standards for Railway Structures and Commentary Seismic Design*, 2012]
- 4) 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 基礎構造物, 1997. [MLIT and RTRI: *The design Standards for Railway Structures and Commentary pile foundation*, 1997]
- 5) 村田修, 青木一二三, 真田道夫：場所打ち杭の支持力評価, 構造物設計資料, No.77, pp.31-34, 1984. [Murata, O and Aoki, H and Sanada, M: Evaluation of the bearing capacity of cast in place concrete piles, *The design structure resource*, No.77, pp.31-34, 1984.]
- 6) 村田修, 館山勝：場所打ち杭の支持力性状についての統計的考察, 鉄道総研報告, No.7, pp.30-36, 1990. [Murata, O and Tateyama, M: A study of allowable bearing capacity of cast in place concrete piles, *RTRI Report*, No.77, pp.30-36, 1990.]

(Received April 1, 2022)

(Accepted June 3, 2022)

ANALYSIS OF DETERMINING FACTOR IN DESIGN OF PILE FOUNDATION OF SHINKANSEN RAILWAY BRIDGES AND VIADUCTS

Akira SAKATA, Hiroyuki KAWANAKAJIMA, Daisuke SOGA,
Taisuke SANAGAWA, Hironori MORI

The design Standards for Railway Structures and Commentary (pile foundation) (hereinafter referred to as the standards for pile foundation) were revised in 2012 and are used in design. In this revision of the standards for pile foundation, the verification index was reviewed in accordance with the introduction of the Performance based Design Method. Specifically, it is possible to know in detail the margin for each limit state in each required performance, and to compare different pile foundation types with the same index. However, since the number of verification index has increased from the old standard, the verification index that are the determinants for design have also become complicated.

Therefore, in this paper, we analyzed the verification indexes that are the determinants of the structure specifications for the piers and viaducts of Shinkansen railway structures using the standards for pile foundation. As a result, it was clarified that it's related to the characteristics of the structural type of the piers and viaducts and the characteristics of the pile construction method in the determination of the structural specifications of the pile foundation structure.