

設計の合理化・高度化や新技術等への対応に関する 調査研究と道路橋示方書の改定

木村嘉富* 玉越隆史** 宮田弘和*** 遠山直樹**** 西田秀明***** 塚 淳一*****

1. はじめに

設計の合理化・高度化等に資する新たな知見の導入促進等を目的として、平成13年12月に道路橋示方書が性能規定型の基準に改定されてから、従来の仕様規定によらない設計方法、新材料、新構造等が採用されるようになった。これらの新技術等が、要求する事項を満たしているかの定量的な判断基準や評価方法、あるいは適用できる範囲等を基準に示すため、国土技術政策総合研究所及び(独)土木研究所(以下「土研」)において各種の調査研究を行ってきた。今回の改定で道路橋示方書に反映された主な項目について、改定の趣旨とその根拠となるこれまでに得られた成果や知見を概説する。

2. 設計の合理化・高度化に関する改定

2.1 高力ボルト摩擦接合継手の設計法の見直し

近年、部材の簡素化、構造の合理化を図った鋼橋の普及により、板厚50mmを超える厚板鋼板を使用する事例が増えてきている。鋼板の接合方法には、主に溶接継手と高力ボルト摩擦接合継手の2種類が用いられているが、ボルト継手を用いる場合、部材の厚板化により連結部の継手自体も大型化するため、ボルト列数が多列化する傾向にある(写真-1)。一方で、ボルト継手の厚板・多列化がすべり耐力に及ぼす影響については、これまでに行われた調査研究において、ボルト列数の多列化に伴い継手としてのすべり耐力が低下する傾向が確認されているほか、厚板鋼板を使用した継手への接合面のすべり耐力やボルト列数の制限といった従来設計法の適用性については不明確な部分があった。

このため土研において、従来規定の根拠としていたボルト継手に対する既往の実験結果について、塗装条件とすべり係数の関係について整理分析を行った。その結果を踏まえて今回の改定では、接



写真-1 多列ボルト継手の適用事例

合面に無機ジंकリッチペイントを塗装する場合には、現状の接合面の塗膜厚管理値を考慮のうえ、接合面の塗装仕様を見直した(接触面片面あたりの最小乾燥塗膜厚を $30\mu\text{m}$ 以上から $50\mu\text{m}$ 以上に見直し)上で、すべり係数を従来の0.4から0.45とするとともに、ボルト継手の許容力の見直しを行った。

また、土研において、厚板鋼板にボルト接合を適用した場合を対象に、実物大継手部の引張載荷実験を実施し、ボルト列数、母板厚、肌隙等がすべり挙動に及ぼす影響について検討を行った。その結果を踏まえて、今回の改定では、ボルトに作用する力が不均等とならないよう、1ボルト線上に並ぶ本数に配慮することを規定(解説において従来と同様に無理のない範囲で8列までを推奨)するとともに、ボルト列数が8列を超える場合を対象として、高力ボルトの許容力に乗じる低減係数を解説に示した。また、実験結果を踏まえて、連結する母材間に板厚差がある場合に挿入するフィラープレートの厚さに関する配慮事項を追加(厚い側の母材板厚の1/2程度以下で、かつ25mm以下を推奨)した。

2.2 鋼製圧縮柱の許容応力度の見直し

局部座屈を考慮しない許容軸方向圧縮応力度については、これまで設計の簡略化を図るために、強度特性の異なる種々の断面形状の柱部材を想定した耐荷力曲線の下限值に相当する基準耐荷力曲線を基に設定されていた。しかし、既往の調査研

究や海外基準（複数耐荷力曲線の採用）を踏まえると、耐荷力に影響を与える断面形状に応じて強度分類すること等により、耐荷力曲線をより合理的に設定できる可能性があった。

今回、トラスやアーチにおける圧縮部材として適用頻度の高い溶接箱形断面部材（矩形断面の四辺を溶接接合した部材）を対象として、断面形状、初期不整、材質等をパラメータとした弾塑性有限変位解析を行うことにより、耐荷力に与える影響が最も大きい因子として、部材製作において生じる初期たわみや溶接部の残留応力といった初期不整であることを確認した。残留応力については、既往の計測結果の整理を行ったうえで $0.25\sigma_y$ （ σ_y ：降伏応力）とし、初期たわみについては、鋼橋編18.3.2に規定する $l/1,000$ （ l ：部材長（mm））とした場合の耐荷力を基に設定し、溶接箱形断面部材の設計に用いる基準耐荷力曲線式を新たに設定した²⁾。この基準耐荷力曲線に対して安全率1.7を考慮のうえ許容軸方向圧縮応力度を設定した（図-1）。

今回提案した耐荷力曲線は、溶接箱形断面部材に対して、従来の耐荷力曲線に比べて最大で10%程度大きく耐荷力を評価している。断面形状に応じてこれらの耐荷力曲線を使い分けることにより、設計の合理化に資するものと考えられる。

2.3 PC合成桁橋における接合面設計の見直し

PC合成桁における桁と床版の接合面に配置される鉄筋量の規定について、従来の最小鉄筋量規定が必ずしも接合面の抵抗特性を適切に評価した設計法ではなく、設計合理化の余地があった。また、従来の規定による密な配筋によって、足場の確保が困難な場合等があることが報告されている。これらの改善のため、土研及び(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会は「橋梁用プレキャストPC部材の接合技術に関する共同研究（平成17～18年度）」においてPC合成桁の接合部に着目した実験的検討を実施した。今回の改定では、研究成果^{3),4),5)}から得られた新たな知見等を踏まえて、接合面に関する規定を見直している。

PC合成桁のせん断伝達は、接合面におけるコンクリート間の付着、摩擦及びずれ止め鉄筋のダウエル効果^{*}で構成されるが、荷重やずれ変位が

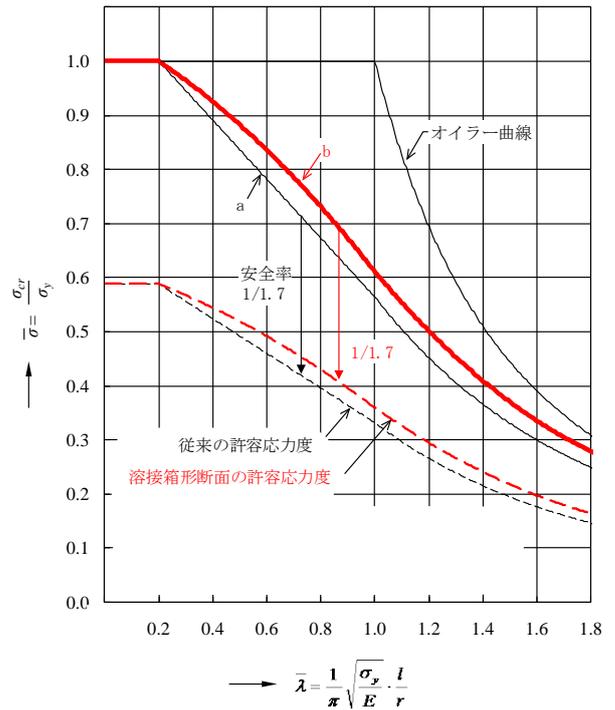


図-1 溶接箱形断面に適用する許容軸方向圧縮応力度



写真-2 载荷実験状況

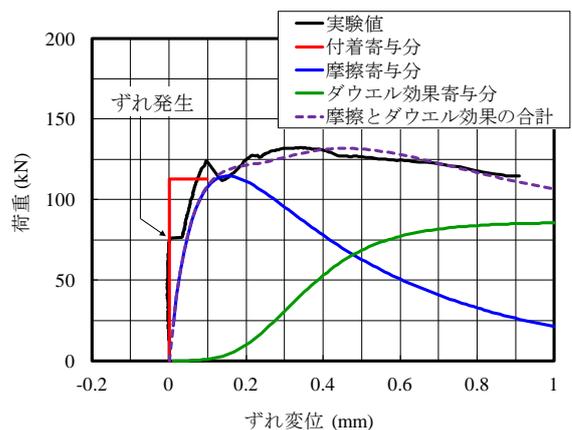
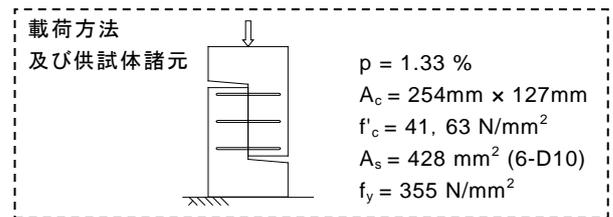


図-2 载荷方法、供試体諸元及び荷重－変位関係

*土木用語解説：ダウエル効果

増加していく中でのそれぞれの寄与を明確にするため、共同研究において写真-2に示す载荷実験を実施した。供試体諸元及び载荷方法とあわせて試験結果を図-2に示す。鉄筋のダウエル効果による寄与と、鉄筋軸力の増加を伴う摩擦の寄与はいずれも、初期のずれが発生するまではごく僅かであり、大部分はずれが発生した後に増加し始めている。このことから、供試体の初期のずれは、コンクリート間の付着に依存しており、その発生荷重は接合面の付着によるせん断強度で表されることが明らかとなった。

接合面の許容せん断応力度は、従来、接合面に配置されるずれ止め鉄筋がせん断に対する付着切れの抑制に寄与することが前提とされたものであった。ところが、前述のとおり接合面の水平せん断伝達がコンクリートの付着に大きく依存することが明らかとなったことから、これを踏まえて表-1に示すとおり許容せん断応力度の算出式を見直している。ここで、式中の付着係数は、接合面を洗い出し仕上げやこれと同等以上の付着が確保できる方法により表面処理する場合を標準として想定しており、接合面の処理に関する施工の規定についても充実を図っている。これにより、コンクリート間の付着確保の観点から接合面の処理の重要性を強調した。なお、表-1に示すとおり、接合面に作用するせん断応力度の算出式については、欧米の基準を参考として見直した。従来は、設計荷重作用時に曲げひび割れの発生がないものとして適用する式であったが、曲げひび割れ発生を考慮した作用せん断応力度の算定式とすることにより、限界状態設計法となる場合にも適用できることを想定したものである。

2.4 地震の影響を支配的に受ける部材の基本

耐震設計の観点から新技術を導入する際に実験等により明らかにすべき事項を明確にするために、今回の改定では耐震設計編において「5.5 地震の影響を支配的に受ける部材の基本」として新たに節を設けて規定した。

新しい材料、装置や構造等の新しい技術を地震の影響を支配的に受ける部材として適用する場合には、その力学的機構が明確であること、実験で確認された条件の範囲内で適用すること等が求められる。特に、動的な特性が部材や装置に生じる速度等の影響により静的な特性と異なる場合、動

表-1 合成桁接合面の設計式

<p>【せん断応力度 τ_b 算出式】 $\tau_b = \frac{S}{b \cdot d_v}$</p> <p>ここに、 τ_b : 接合面におけるコンクリートのせん断応力度 (N/mm²) S : 桁断面に作用する設計せん断力 (N) b : 桁と床版の接合面における橋軸直角方向の幅 (mm) d_v : 引張鋼材の図心から床版図心までの距離 (mm)</p>
<p>【許容せん断応力度 τ_{ba} 算出式】 $\tau_{ba} = k_c \cdot \sigma_{ck}$</p> <p>ここに、 τ_{ba} : 接合面におけるコンクリートの許容せん断応力度 (N/mm²) k_c : 付着係数 ($k_c = 0.03$) σ_{ck} : 床版に使用するコンクリートの設計基準強度 (N/mm²)</p>

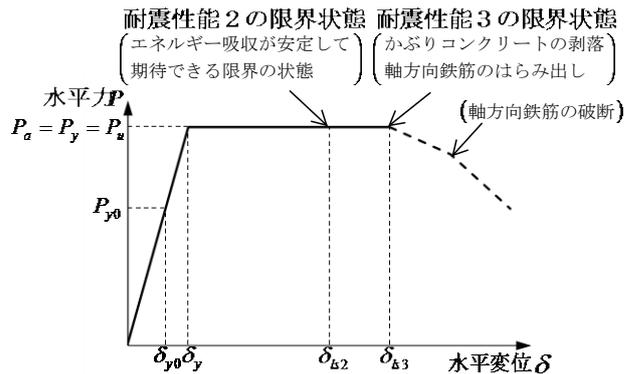


図-3 曲げ破壊型の鉄筋コンクリート橋脚の水平力-水平変位関係と限界状態

的な特性が温度等の使用される条件の影響を受ける場合又は長期的な使用により力学的特性が変化する可能性がある場合には、適用範囲とそれに応じた力学的特性等に十分留意する必要がある。

ここで、地震の影響を支配的に受ける部材について、実験等により明らかにすべき事項として、破壊に対して適切な安全余裕度を確保すること、地震応答の繰返しに対して挙動が安定していること、部材の抵抗特性を評価する方法が確立されていることの3つを示している。

地震応答の繰返しの影響については、その影響が顕著にならない範囲を設計で考慮する範囲とすることが地震応答の繰返しに対する挙動の安定性を確保する上で重要であることを解説に示している。

2.5 鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形能の評価手法の見直し

鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形能^{*}の評価手法の高度化を目的として、土研では塑性ヒンジの形成メカニズムに関する研究^{6),7)}を行ってきた。これらの成果を踏まえ、今回の改定では、曲げ破壊型の鉄筋コンクリート橋脚の限界状態に相当する変位(図-3)の算出方法を、これらの変位を直

*土木用語解説：塑性変形能

接的に算出する方法に見直した。その上で、塑性ヒンジ長の新しい推定式と軸方向鉄筋の引張ひずみに基づく限界状態の定義を新たに導入している。この手法に基づけば、設計で考慮する限界状態における変位の推定精度は、従来は変動係数にして40%近かったばらつきが15%程度になり、大幅に改善されている⁶⁾。

2.6 中空断面RC橋脚において塑性変形能を確保するための構造細目

近年、山間部における高橋脚では、橋脚自重の低減によるコスト縮減の観点から、中空断面にした上で、壁厚を薄くし、橋脚断面を絞った結果、高軸力が高軸方向鉄筋比の橋脚となっている。しかし、これは従来から検討されてきた構造条件と比較すると、塑性変形能を確保するという観点から耐震性の観点からは望ましくない方向に外れてきていることから、土研では、そのような構造条件の中空断面RC橋脚の塑性変形能に関する実験的検討を行ってきた^{8),9)}。これらの実験的検討より、上記の構造条件に該当する中空断面の鉄筋コンクリート橋脚において、その中空断面部に塑性ヒンジが形成される場合には、以下の傾向があることが明らかになった。すなわち、曲げの作用を受けた際に圧縮力を負担する壁部のコンクリートの圧縮破壊によって最終的には軸耐荷力を失うという致命的な損傷が生じる場合があり、また、中空断面の内面の損傷の方が外周面の損傷よりも大きい場合がある。さらに、地震後における中空断面の内面の点検及び損傷が生じた場合の修復が容易ではないこと、中空断面の内面の損傷を外周面の損傷から推定することに関する十分な技術的知見がないこと等の課題も明らかとなった。これらの課題については、今後も引き続き研究を行っていく必要があるが、今回の改定では、中空断面部を有する鉄筋コンクリート橋脚については、こうした中空断面橋脚に特有な特性を踏まえ、塑性変形能が確実に発揮できるような形状及び配筋とすることを構造細目として規定した。この規定を受けて解説では、図-4に示すように塑性ヒンジが形成される部位とその近傍で塑性ヒンジの影響を受ける領域は充実断面とすること、塑性ヒンジの影響を受けない領域は中空断面としてもよいが、充実断面から中空断面へと変化する部位が新たな損傷箇所とならないように、適切にハンチ等を設置

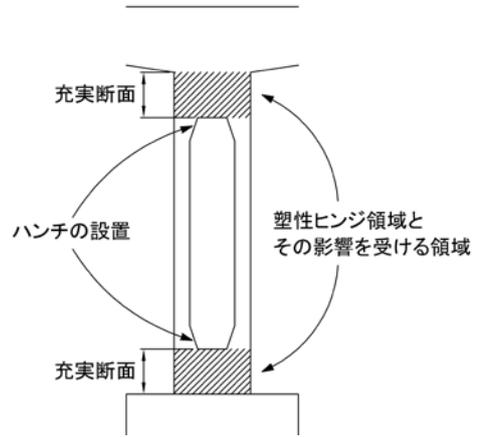


図-4 中空断面部を有するRC橋脚の構造の例



写真-3 回転杭

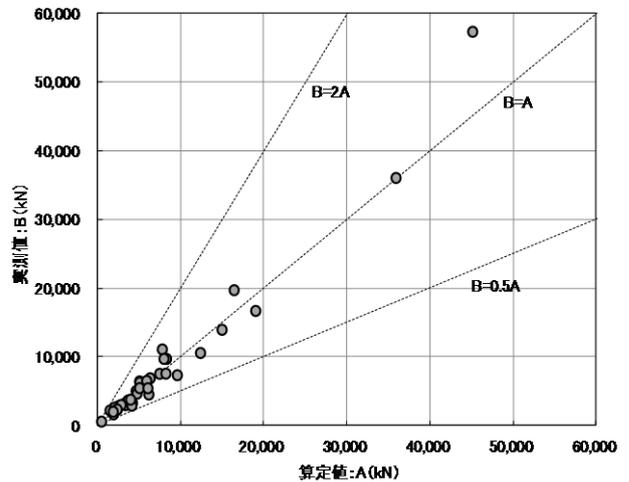


図-5 回転杭工法における極限支持力の
実測値と推定値の比較

するなど構造的な配慮をすることを示した。

3. 新技術への対応に関する改定

3.1 回転杭の設計・施工

回転杭工法は、先端に羽根を有する鋼管杭を回転させて地盤に貫入させる工法である（写真-3）。低騒音・低振動で、被圧地下水を有する地盤や軟弱地盤、斜杭としての適用など従来の基礎工法で

は困難であった条件でも適用可能な工法であり、採用が進み、その知見の蓄積が行われたことから、今回の改定で新たに設計・施工について規定した。この工法は、平成19年杭基礎設計便覧の巻末参考資料で示されていたが、今回の規定にあたっては、載荷実験の結果を収集・再評価し、支持力等を改めて定めている。具体的には、新たに得られた実験データを含めるとともに、杭先端支持力度については杭頭位置での変形量からの評価、また周面最大摩擦力度については統計分析した結果の平均値からの評価にそれぞれ変更し、他の杭工法と評価方法をあわせている(図-5)。

3.2 深礎基礎の設計・施工

深礎基礎は、地下水位の低い斜面上に適用される基礎工法であり、近年、杭基礎や直接基礎に次いで採用実績が多くなっている。従来は、場所打ち杭の規定の中で設計・施工に関して一部を示していたが、大口径の柱状体構造の採用が増加するなど従来の規定では対応できない事例が増えてきている。施工面でも、孔内における鉄筋の崩落事故が生じるなど、安全で適切な品質が確保される施工管理に関する規定が求められていた。

このため、深礎基礎の設計及び施工について新たに章を設け、組杭深礎基礎、柱状体深礎基礎(図-6)それぞれの設計法を示すとともに、所要の性能や安全性を確保するための施工管理等に関して規定した。設計法に関しては、他の柱状体基礎の設計法との整合を図り、基礎前面の地盤抵抗の考え方や基礎底面のせん断に関する照査などについて、従来行われていた設計方法とは異なった設計法を採用した。土留構造については、実績を踏まえてライナープレート等の土留材を用いた場合を基本としているが、モルタルライニングや吹付けコンクリートなど基礎周面の地盤抵抗が期待できる土留構造を用いる場合の設計法や留意点についても示している。躯体との接合部については、補強鉄筋を適切に配置し確実に荷重の伝達ができるような構造とすることを規定した。施工に関しては、鉄筋組立て時の崩落事故を踏まえ、適切な仮設計画のもと圧縮力を支持できる形鋼を組立用鋼材として用い堅固に組立てるなど、規定・解説を充実した。また、採用する土留構造に応じた施工上の留意点についても具体的に解説した。

深礎基礎の設計法の体系化に際しての課題の一

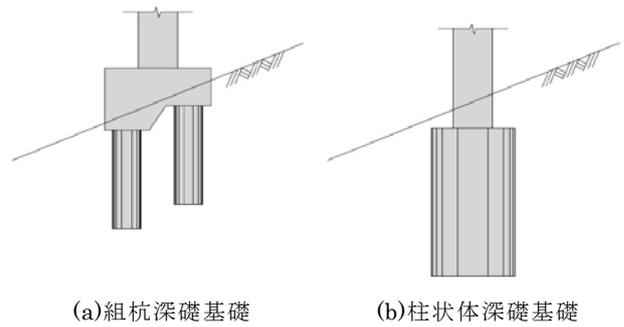


図-6 深礎基礎の種類

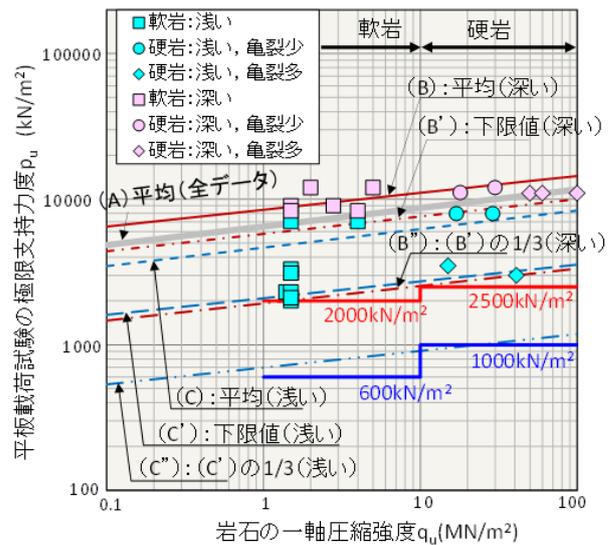


図-7 $q_u - p_u$ 関係(深度を区分した整理結果)

つとして、亀裂等を有する岩盤の支持力の評価があったが、既往の載荷試験結果の分析に基づいて基礎底面の最大地盤反力度の上限値を提案した土研の成果を用いることでこれを解決した。以下にその概要を示す¹⁰⁾。

深礎基礎は、岩盤に支持又は根入れされる例が多いが、亀裂・割れ目等を有する岩盤に支持される場合に期待できる地盤反力についてはこれまで明らかでなかった。このため、土研では既往の硬岩及び軟岩に対する平板載荷試験結果を分析し、試験位置の深さ(5m以深か否か)や亀裂の多寡別に、岩石の一軸圧縮強度と平板載荷試験の極限支持力度との関係を整理・分析した(図-7)。分析の結果から深い位置では地盤の緩み等が生じにくいいため亀裂の多寡により支持力度に差が生じにくいことなどを明らかにし、この整理に基づき、直接基礎における最大地盤反力度の上限値と同等の安全余裕度が確保されるよう、深礎基礎等の深い基礎に適用する基礎底面の最大地盤反力度の上限値を定め、下部構造編に示した。

4. まとめ

近年の解析技術の進歩は著しく、精緻かつ容易に設計が可能となることによってこれまでに比べて新構造・新工法が採用されやすくなった。その一方で、これまで建設されてきた橋における不具合に関して、国土技術政策総合研究所及び土研には多くの技術相談が寄せられており、その相談件数は年々増加している。このうち、建設当時の知見に基づく新技術が採用された道路橋において、建設後数十年で致命的な損傷を生じている事例もあり、その主な原因としては、設計・施工時において耐久性への配慮が欠けていることによるものや、維持管理段階における適切な処置が必ずしも十分に行われていないことによるものが少なからず見受けられる。新構造等が採用される場合でたとえ計算が成り立つからといっても、計算の仮定等の条件やその構造に要求される事項が供用期間にわたり満足されるためには、耐久性確保や維持管理が適切に行われることが前提となることは言うまでもない。さらには、設計で前提とした条件が供用期間中において満足しているかの検証や確認など、新技術を適用した後のフォローアップも極めて重要である。国土技術政策総合研究所及び土研においては、道路管理者である国土交通省地方整備局や自治体等との密な連携により現場の情報を集約し、調査分析から得られた知見を基準類に反映している。紙面の都合によりここでは詳述しないが、今般改定された道路橋示方書においては、維持管理の確実性を設計段階において配慮すべきことなどを新たに規定している。こうした設計・施工・維持管理のいずれも密接に連携することが必要であり、これらのどの段階においても

相互の重要性を強く認識した上で、それぞれの行為が適切かつ確実に実行されることが望まれる。

参考文献

- 1) (独)土木研究所、大阪市立大学：高力ボルト摩擦接合継手の設計法の合理化に関する共同研究報告書、共同研究報告書第428号、2012.1
- 2) (独)土木研究所：鋼箱形断面圧縮部材の耐荷力に関する検討、土木研究所資料第4221号、2012.3
- 3) (独)土木研究所、(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会：橋梁用プレキャストPC部材の接合技術に関する共同研究報告書(I)、共同研究報告書第362号、2007.2
- 4) (独)土木研究所、(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会：橋梁用プレキャストPC部材の接合技術に関する共同研究報告書(II)―ずれ止め鉄筋及びスタッドの挙動―、共同研究報告書第370号、2008.3
- 5) (独)土木研究所、(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会：橋梁用プレキャストPC部材の接合技術に関する共同研究報告書(III)―PC合成げたのせん断伝達に関する検討―、共同研究報告書第383号、2008.3
- 6) 浅津直樹、運上茂樹、星隈順一、近藤益央：軸方向鉄筋の座屈解析による鉄筋コンクリート橋脚の塑性ヒンジ長に関する研究、土木学会論文集、No. 682/I-56、pp.177~194、2001.
- 7) 小森暢行、星隈順一、堺淳一：RC橋脚の地震時限界状態の評価手法に関する研究、第14回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、2011.
- 8) 玉越隆史、星隈順一：軸方向鉄筋にSD490を用いるRC中空断面橋脚の耐震性について、土木技術資料、第53巻、第5号、pp.54~55、2011.
- 9) 八ツ元仁、堺淳一、星隈順一：高軸力・高軸方向鉄筋比条件下の中空断面RC橋脚の正負交番繰返し載荷実験、土木学会第67回年次学術講演会(投稿中)
- 10) (独)土木研究所：岩盤上の基礎の鉛直方向の安定照査法のための地盤反力度の評価に関する研究、土木研究所資料第4222号、2012.3

木村嘉富*



独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター
上席研究員
Yoshitomi KIMURA

玉越隆史**



国土交通省国土技術政策総合研究所道路研究部道路構造物管理研究室長
Takashi TAMAKOSHI

宮田弘和***



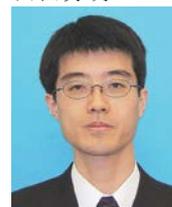
独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター研究員
Hirokazu MIYATA

遠山直樹****



独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター主任研究員
Naoki TOYAMA

西田秀明*****



独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター主任研究員
Hideaki NISHIDA

堺 淳一*****



独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター主任研究員、博(工)
Dr. Junichi SAKAI