

【様式1】

道路政策の質の向上に資する技術研究開発
【研究終了報告書】

①研究代表者	氏名 (ふりがな)		所属	役職
	おおたけ ゆう 大竹 雄		新潟大学 自然科学系	准教授
②研究 テーマ	名称	道路橋示方書の改定を踏まえた性能設計概念に基づく設計照査手法についての研究開発－特に下部構造物を中心として－		
	政策 領域	[主領域] 【領域4】 コスト構造改革 [副領域] 【領域8】 道路資産の保全	公募 タイプ	タイプII
③研究経費 (単位:万円)	平成25年度	平成26年度	平成27年度	総合計
	813	745	600	2,158
※端数切り捨て。				
④研究者氏名 (研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)				
氏名		所属・役職 (※平成27年3月31日現在)		
本城 勇介		岐阜大学 名誉教授		
七澤 利明		(国研)土木研究所・上席研究員		
河野 哲也		(国研)土木研究所・主任研究員		
飯島 翔一		(国研)土木研究所・研究員		
⑤研究の目的・目標 (提案書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)				
道路橋示方書は、H.23年度改定に引き続き、数年以内に性能設計概念の徹底と、部分係数法による設計照査を全面的に導入した大幅改定が予定されている。本研究はこの改定に備え、この概念と手法を全面的に取り入れた、道路構造物の建設や維持補修のコストの縮減や、合理化を目指した設計照査手法を廻る諸問題に、具体的な解を示すことにより、性能設計の導入の効果が発揮されることを目的としている。				

⑥これまでの研究経過・目的の達成状況		
研究項目	研究経過・達成状況	研究分担等
国内外の動向調査に基付く部分係数法導入の意義の再確認と問題点抽出	<p>初年度に実施。1990年代の米国AASHTOのLRFD基準導入の主導的推進者、現役の下部構造設計基準コードライターを招聘し、個別の意見交換、講演会の開催、会議への招待講演等を通じて、経緯と総括を含む多くの有用な情報を得た。結果を学術誌等に公表、好評を得た。</p> <p>国内の経験豊富な橋梁下部構造関係技術者を招集、現行道示の性能設計の観点からの問題点を抽出した。構造物変形関連の地盤パラメータの推定方法に問題が多いと判断した。</p>	本城・大竹は、北米との交渉と旅程調整を担当。七澤らは、意見交換、講演会等の設定を担当。
地盤変形係数 E と地盤反力係数 k_H の推定方法の開発	<p>構造物基礎の設計における変位の推定精度は、耐力照査に比べて相対的に低く、地盤変位に関する推定精度の向上が求められている。これを踏まえて、日本全国5995箇所の橋梁建設現場で計測された各種の地盤調査データを統計的に解析することにより、新しい推定式を提案した。具体的には、地盤の歪レベルを考慮した地盤変形係数Eと杭の地盤反力係数k_Hの推定方法を提示した。この成果は、性能設計実現への大きな一歩であり、結果は、改定される道示への反映が提案されている。本研究のエフォートの半分程度は、この研究に投入された。</p>	土研側がデータを提供。大竹・本城が、解析作業、原案の提示を行い、定期的な討論を経て、提案式を完成させた。紙データ電子化作業、FEM解析の一部を外注した。
信頼性理論に基付いた下部構造物独特の抵抗係数設定方法	<p>下部構造物独特の、地盤調査位置や数、載荷試験の実施数等の違いによる、抵抗係数の設定方法を、信頼性理論に基づき検討、提案した。結果は、道示改定に関する基礎資料となる予定である。</p>	本城・大竹が原案提示、土研側との定期的な討論を経て、最終案をまとめた。
信頼性解析のためのマニュアルと例題の作成	<p>橋梁下部構造物の典型例である、杭基礎と浅い基礎について、実務者が自ら信頼性解析を行うための例題に基づくマニュアルと作成した。</p>	例題の内容を検討・設定の上、本城と大竹が作成。
⑦中間・FS評価で指摘を受けた事項への対応状況		
中間評価の指摘事項	対応	
<p>第一年度終了時：</p> <ul style="list-style-type: none"> 広範囲の研究内容を扱っているので、研究体制の強化や役割分担の明確化が望まれる。 研究成果を体系的に取りまとめて欲しい。 	<p>一年目は、情報収集作業が主だったので、研究内容を分りやすくかつ体系的に提示できなかった。2年目以降は、道示における地盤変形に関わるパラメータ推定法の改良と、信頼性設計理論に基づく、下部構造物独特の抵抗係数設定法に研究資源を集中投入した。</p>	
<p>第二年度終了時：</p> <ul style="list-style-type: none"> 研究成果が広範なので、最終年度は研究を収斂させる意識を持って取りまとめて欲しい。 今後橋梁下部工の設計が、従来と比べて改善される点を、具体的かつ分かりやすく示すことを意識して、成果を取りまとめること。 	<p>最終成果報告書で、左記の点に注意して作成した。特にその序論的部分で、本研究の成果を、道示改定における性能設計の具現化という観点から説明している。具体的には、①地盤変形照査用地盤パラメータの推定方法の開発、②下部構造独自の抵抗係数の設定方法の開発、③信頼性設計法普及のためのマニュアル作成に注力した。</p>	

⑧研究成果

はじめに：

本研究は平成28年度に改定が予定される道路橋示方書における性能設計概念の徹底と、合理的な部分係数の決定方法について検討を行い、提案を行ったものである。その成果の主要部分は、改定される道路橋示方書への反映が提案されている。研究内容の概要は以下の通りである。

- 国内外の動向調査に基づいて、部分係数法導入の意義の再確認と、問題点の明確化を行った。
- 耐力計算に比べて相対的に精度が低い変位・変形照査を改善し、性能設計実現のために、土研が蓄積してきた膨大な地盤調査データベースを解析し、地盤変形係数と杭の水平地盤反力係数の新しい推定法を提案した。
- 下部構造物独特の問題について、抵抗係数設定方法を信頼性理論に基づき提案した。具体的には、地盤調査の点数や載荷試験の実施数に応じた部分係数設定方法の提案した。
- 設計実務者が自分で信頼性解析を行うことができるように、マニュアルと例題を作成した。

調査に基づく部分係数法導入の意義の再確認と問題点抽出：

初年度には、米国のAASHTO道路橋示方書が1990年代に荷重抵抗係数法(LRFD)に移行したとき、主導的な役割を果たしたKulicki博士と、現在AASHTO道路橋示方書の地盤構造物関連のコードライターであるワシントン州道路局のAllen氏を日本に招待し、土研での討論、日米橋梁ワークショップへの参加、学会関連の関係委員会メンバーとの意見交換、道路会議や学会主催の講演会等で、幅広く米国の経験を聞き、意見交換を行った。Kulicki博士からは、次の諸点を学んだ。

- (1) 橋梁建設全体に投じられる資源量は、LRFDの導入前後でそれほど変化していない。しかしそれらの資源は、異なる橋梁間で、より適切に配分されるようになった。
- (2) 橋梁全体に統一的な安全性に関する尺度を得たので、これを元に、橋梁全体の安全性の昇降を制御できるようになった。これは、橋梁の維持管理・補修において重要な基礎を与えている。その一つの方向性は、LRFR(Load and Resistance Factor Rating)である。

Allen氏からは、地盤構造物の抵抗係数の決定方法について、米国でも日本と同じ問題に悩んでいること、また米国でそれらの問題をどのようにアプローチし、解決しているかを学んだ。

地盤変形係数 E と地盤反力係数 k_H の推定方法の開発：

橋梁基礎の設計では、弾性理論に基づく等価線形解析により基礎の変位が計算される。この等価線形解析の最重要地盤パラメータは地盤変形係数 E である。 E は、軸差応力-歪関係の割線勾配として定義される指標であり、設計照査で着目する基礎の変位量、地盤のひずみレベルに応じて、本来変化させるべきである。しかしながら、従来の地盤変形係数の推定方法は、それぞれの地盤調査で発生する地盤の歪レベルに無頓着で、着目する地盤のひずみレベルが不明確であり、このことが地盤変形係数の推定ならびに基礎の変位照査の精度を低下させている。そこで、本研究では、各種地盤調査法間を理論的に考察した上で、日本全国の橋梁建設地点約六千箇所の地盤調査データに基づいて、地盤変形係数 E の歪レベル依存性について考察した。これらの考察から、各地盤調査からそれぞれ E を汎用的かつ精度良く推定する方法を提案した。

さらに、橋梁基礎の設計では、地盤を地盤反力係数 k_H でモデル化し、弾性理論に基づく等価線形解析により基礎変位が計算される。この計算を汎用的かつ精度良く行うためには、着目する変位が基礎に生じたとき、地盤を等価線形弾性体モデルに適切に置き換える必要がある。本研究は、上記の E 推定法の成果を踏まえ、着目する対象基礎の変位レベルと地盤のひずみレベルを関係づける方法を提案する。これにより要求される様々な変位の制限値（照査の対象値）に対して、着目する変位と地盤のひずみの関係から適切な E の推定を経由して、構造物基礎の変位を汎用的かつ精度よく計算するための k_H の設定方法を提示した。

以上のようにして得られた E や k_H を用いた場合、現行の方法により推定された場合に比較して、変位の推定精度がどの程度向上するかについても検討し、結果を示した。推定精度は、地盤調査法・土質試験法により異なり、これらを提示することにより、構造物の変位・変形を照査の対象とする場合は、より適切な地盤調査法・土質試験法が選択されるための情報を提示した。

以上の成果は、今年度改定される道路橋示方書への反映が既に提案されている。さらに、下記の2編の論文として土木学会論文集に投稿済である。

- 1) 大竹雄・七澤利明・本城勇介・河野哲也・田辺晶規、地盤調査法とひずみレベルを考慮した設計用地盤変形係数の推定法、土木学会論文集【2016年7月投稿済】

- 2) 大竹雄・七澤利明・本城勇介・河野哲也・田辺晶規，基礎の変位レベルと地盤のひずみレベルを考慮した設計用地盤反力係数の推定法，土木学会論文集【2016年7月投稿済】

信頼性理論に基付いた下部構造物独特の抵抗係数設定方法：

下部構造物の部分係数法による設計では，地盤調査の位置と数，載荷試験の実施数等により抵抗係数の設定を適切に行うと言う独特の問題があり，その方法論は確立されているとは言えない．これに対して，次のような検討を行った．

- 既に部分係数が確定している，非常に多く（100例近く）の載荷試験結果が存在する杭工法のデータから，その中の任意数のデータを無作為に抽出する（ブートストラップ法）ことにより，どの程度の試験数があれば，現在設定されている抵抗係数と同程度の値が，安定的に得られるかを調べることにより検討した．
- 実務者に使い易い，モンテカルロ法により信頼性解析と部分係数の値を決定する方法を，例題を含めて示した．
- 当該サイトで，載荷試験が行われた場合の，部分係数の再設定法について，ベイズ統計学の手法を用いて提案した．

信頼性解析のためのマニュアルと例題の作成

道示改定により性能規定化が進展することを見据えて，実務者が信頼性解析を自分で実施できるように，マニュアルとステップバイステップで計算方法を示した例題を作成した．例題は，橋梁基礎でもっとも頻度の高い，橋脚杭基礎と浅い基礎について作成した．

⑨研究成果の発表状況

本城勇介・七澤利明（2014）：米国道路橋設計基準における荷重抵抗係数設計法（LRFD）の策定経緯と評価，橋梁と基礎，Vol. 48, No. 12, pp. 26-31.

本城勇介(2015)：道路橋の部分係数設計法：欧州と北米の動向(上)，土木施工，Vol. 56, No. 2 pp. 117-120.

本城勇介(2015)：道路橋の部分係数設計法：欧州と北米の動向(下)，土木施工，Vol. 56, No. 3, pp. 157-160 .

⑩研究成果の社会への情報発信

平成25年10月31日 第30回日本道路会議 特別セッションにおける講演（同時通訳有り）

「Developing a probability based limit states bridge specification – the US experience」

Dr. John M. Kulicki, Ph.D. P.E., M. NAE., Chairman, Madjeski and Masters, Inc.

参加人数 約150名

平成25年11月18日 地盤工学会平成25年度第1回国際講演会

場所 弘済会館 会議室

講師 Tony Allen氏（ワシントン州道路局，米国）

講演タイトル 米国の橋梁基礎設計における荷重抵抗係数設計法の適用

参加人数 約50名

⑪研究の今後の課題・展望等

本研究成果を踏まえ、道路橋示方書関連の研究では、次の諸点が重要であると考えられる。

- 平成29年度に道示が改定されると、部分係数設計法の根本的な理解を実務者に促す必要がある。このために、本研究で示した信頼性解析のためのマニュアルや設計例題を最終的な改定内容に対応させるとともに、ソフトウェアの供給を含めて促進してゆく必要がある。
- 本研究の主要成果である、地盤変位・変形に関連する地盤パラメータの推定方法の提案と、その道示への導入は、その端緒に付いたばかりであり、今後実務者の理解を促し、この提案が真に有効に機能するような広報活動が必要である。学術誌への論文投稿、土研資料としての公開の他、他の研究者との交流による改善等も視野に入れる必要がある。
- 本研究は一部を除いて、新設構造物を対象としている。北米で荷重抵抗係数法が、既設構造物の維持管理・補修に適用できる荷重抵抗係数評点法(Load and Resistance Factor Rating)に進展したように、改定される道示の部分係数法、しいてはその背後にある信頼性設計法が、既設構造物の維持管理・補修にフレキシブルに適用できる形に、発展させる研究が不可欠であると考えられる。
- 信頼性解析の実務者への普及も、重要な課題である。このための計算例題を含むよい参考図書が必要である。

⑫研究成果の道路行政への反映

本研究の主要部分は、平成28年度に大幅な改定が予定されている道路橋示方書の下部構造編への反映が既に提案されている。

橋梁設計においても、従来の外力と抵抗力を比較した終局限界状態の照査に加えて、変位や変形に着目した使用限界状態、あるいは修復限界状態に関する照査を、社会の要求の高度化、多様化に基づいて実施してゆく方向にある。所謂、性能設計の導入である。

従来地盤に関連した設計では、力に基づく終局限界状態の照査が主流で、杭の水平抵抗の照査等、一見変位に基づく照査も存在したが、それは結局、最終的には終局限界状態を照査するものである。従ってそこで設定される地盤反力係数も、発生応力を求めるための便宜であり、真に変位を照査するという意図を持って設定されたものではなかったと考えられる。

本研究は、社会が要求する構造物の性能を出来る限り直接照査の対象として構造物を設計する、と言う性能設計の考え方を具現化するため、地盤調査結果に基づく地盤変形係数や地盤反力係数の推定法を、抜本的に変更したものである。このような変更により、設計者は、変位をより意識した橋梁下部構造の設計を行うようになり、これは橋梁に対する社会の要求の高度化、多様化への対応に結びつくと考えている。

⑬自己評価

研究提案者のグループでは、日本の地盤構造物関連の設計基準において、性能設計が真に実現されるためには、地盤変形に関連する地盤パラメータ推定法の改変が不可欠であると考えてきた。それは、構造物への社会の要求の高度化・多様化は、地盤に関連した構造物の変位・変形に関する要求を、地盤構造物においても正面から照査できるものに変化してゆく必要があるという認識による。従来の地盤変形係数等の推定方は、多分に力の釣り合いを中心とした照査法の、補助と考えられ、精度の低い方法である。

今回の研究で、我が国の土木構造物の設計に最大の影響を持つ道路橋示方書に、上記の考え方に基づく、地盤変形に関連する地盤パラメータ推定法を導入できたことの意義は、極めて大きい。今回の提案が究極的で唯一の推定方法であるとは毛頭考えていないが、パラメータ推定の方向性を、地盤の歪レベルと構造物の変位に着目し、非線形特性の強い地盤材料の応力-歪関係を考慮して推定する、この枠組みは画期的であると自己評価している。これは長期的に見て間違えなく、道路橋下部構造物の設計の品質を向上させると信じている。

以上の研究は、橋梁建設工事に関わる膨大な地盤調査データベースに基づいて行っており、これより信頼性の高い提案につながったものと考えている。