

部分安全係数法における安全率等の調整方法に関する調査検討

Study on calibration method of safety factors for load and resistance factor design method

(研究期間 平成 16~22 年度)

道路研究部 道路構造物管理研究室
Road Department
Bridge and Structures Division

室長 玉越 隆史
Head Takashi TAMAKOSHI
主任研究官 中洲 啓太
Senior Researcher Keita NAKASU
研究官 野村 文彦
Researcher Fumihiko NOMURA
交流研究員 加藤 浩一
Guest Research Engineer Koichi KATO

In order to introduce the load and resistance factor design method for highway bridges, NILIM conducted the calibration of load factors based on time-series simulations using statistic data such as vehicle, earthquake and wind load. It was indicated that it is a possibility that can apply the load and resistance factor design method, because results of trial design based on the design have the similar performance as those based on the allowable stress design.

[研究目的及び経緯]

我が国の道路橋の設計基準である道路橋示方書には、平成 13 年度の改訂において性能規定型の概念が導入される一方で、耐荷力照査の基本書式は許容応力度設計法が踏襲された。また、設計の目標とする期間において性能が満足されることの確からしさなどの信頼性についても陽な形では規定されておらず、技術や材料の信頼性や橋の規模に応じた荷重による影響の大小の相違などを過不足なく合理的に考慮できる信頼性に基づく性能の規定化については課題として残された。

本研究では、部分係数書式の耐荷力設計基準原案作成のため、現在入手可能な最新のデータを用いた時系列シミュレーションにより部分係数の試算を行った。

[研究内容及び研究成果]

1. 荷重係数の設定方法

荷重に関する最新のデータを収集し、当該データの性質を考慮して確率統計的な荷重側の条件を設定した。そしてこれらを単独又は複数組み合わせることで、道路橋が設計供用期間(100年)に発生する荷重・作用の状況を模擬するシミュレーションを実施した。

シミュレーションでは、現行基準に基づき設計されたモデル橋に対して、設計供用期間の標準と仮定した 100 年間に相当する荷重をそれぞれの統計モデルに従って同時に作用させる試算を 1,000 回行い、各回の着目断面力の最大値を抽出して 100 年間最大値の頻度分布を作成した。これは、同じ箇所設計供用期間 100

年の同じ橋梁を 1,000 回建設したことに相当するとの考えによる(図-1)。なお、モデル橋梁は、我が国での採用実績に加えて、設計上支的となりやすい作用要因の違い等を勘案して 20 橋程度を選定した。

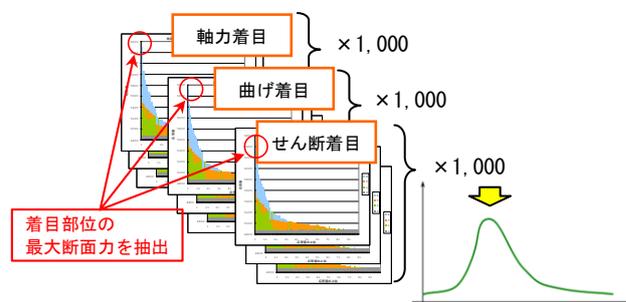


図-1 100 年最大値分布の作成イメージ

シミュレーションで用いた荷重条件のうち、代表的なものとして、死荷重、活荷重、地震の影響について述べる。

① 死荷重

材料品質が JIS 等の公的規格に準拠し、製作・施工技術に極端な変革がない限り既往の実績と同程度のばらつきが見込まれるものと仮定し、過去の調査結果を根拠データに主として寸法による死荷重のばらつきを考慮した。

② 活荷重

過去の実測データ(BWIM)をもとに、交通特性に対応する車列を車間距離や横ぶれを考慮して図-2 のように設定し、これを進行方向に 1m ずつ移動させた時の着

目部位の断面力を格子解析で求めた影響線から算出することとした。なお、通常時と渋滞時の荷重状態を考慮するため朝夕2回の渋滞列（車間距離の短縮）を設定している。

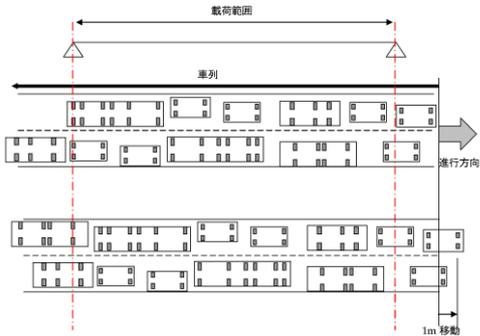


図-2 車列の載荷方法

③ 地震の影響

設計供用期間中に比較的発生する可能性の高い地震について、過去の地震記録（地域区分A：伊豆，B：室戸，C：旭川）をもとに地震危険度解析から得られる加速度分布を用いることとした。なお、再現期間については、地震単独のシミュレーションによる100年最大値分布(A)と、地震危険度解析から得られた最大加速度分布(B)とを比較し、震度換算での近似性から1年とした（表-1）。

表-1 再現期間別の最大値分布における震度比較

非超過確率	(A)シミュレーションによる100年最大値分布				(B)地震ハザード確率密度関数100年最大値分布
	再現期間2時間	再現期間1ヶ月	再現期間1年	再現期間50年	
36.6%	0.21 (0.88)	0.22 (0.92)	0.23 (0.96)	0.30 (1.25)	0.24
50.0%	0.23 (0.79)	0.25 (0.86)	0.28 (0.97)	0.35 (1.21)	0.29
60.5%	0.25 (0.74)	0.27 (0.79)	0.31 (0.91)	0.40 (1.18)	0.34
95.0%	0.50 (0.63)	0.58 (0.73)	0.75 (0.95)	0.82 (1.04)	0.79

注1：条件は、地域区分A・II種地盤・固有周期1.0s
注2：()内の数字は(B)に対する(A)の各震度の比率

図-3の上のグラフは、鋼橋の主桁端径間に着目した場合の発生断面力(最大曲げモーメント)の100年最大値の頻度分布の例である。また、下のグラフは100年間の発生断面力の頻度分布を1,000回分重ね合わせたものである。この場合100年間の頻度分布形状は概ね一致しており、最大値の頻度分布の特性を評価するための試算は1000回で十分であると判断した。

2. 荷重組合せ及び係数の抽出

1.に示した方法により、全ての着目部位毎に対して、100年間の最大値分布を算出し、現行基準による場合の断面力に近い断面力（±1%程度）を生じさせているシミュレーション結果から、最大値に対応する荷重組合せ及び荷重係数を抽出した。

その際、荷重組合せにおける各荷重の同時性、異常値等の影響への配慮、抽出過程の明確化等の観点から、以下の①から④に示す選出条件により、荷重組合せ、着目部位・部材、材料等毎に、シミュレーション結果から段階的に最大値に対応する荷重係数を抽出した。

- ① 係数は組合せ単位で選出
- ② 同じ荷重組合せにおいて、係数バランスが異なるものは漏れなく選出
(例：大D+小L、小D+大L、中D+中L等)
- ③ 荷重係数が「0.3未満」と小さい場合は、係数自体の意味が薄れるため、選出しない
- ④ 係数の過大・過小をなくするため、抽出された断面力がH14道示の断面力と乖離(±20%)する場合は選出しない

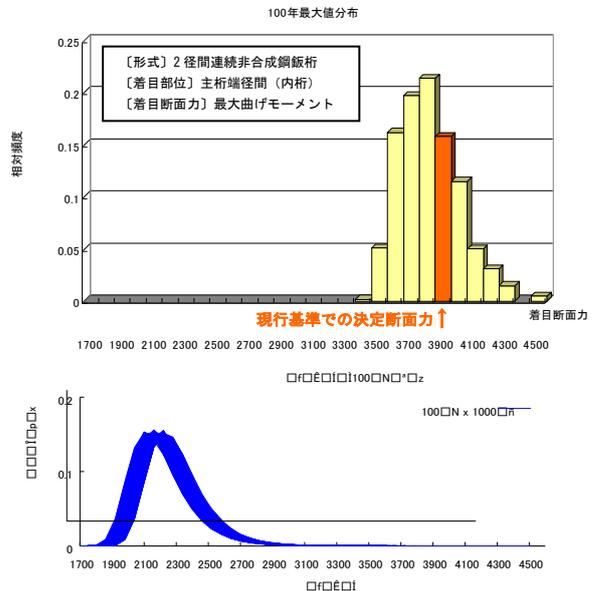


図-3 シミュレーションで得られた発生断面力の分布

3. 部分係数設計法による試設計

現行の道路橋示方書による詳細設計が完了している20橋梁に対して部分係数設計法による試設計を行い、部分係数設計法を用いた設計結果と現行の許容応力度設計法により設計された設計結果とを比較し、部分係数化の影響について整理した。その結果、部分係数化により、断面寸法等に著しい変更が必要とされるケースはなく、現行基準と同等の性能を担保しつつ部分係数化できることが確認できた。

[成果の活用]

路橋示方書等、技術基準改定のための基礎資料として活用されるものである。今後は、提示した部分係数設計法を用いた実設計レベルでの試行を予定している。

耐久性を喪失させる要因分析及び設計・施工時の 対処方法に関する調査検討

Study on investigation into cause of durability loss and the measures in design and construction stages
(研究期間 平成 21～23 年度)

道路研究部 道路構造物管理研究室	室長	玉越 隆史
Road Department Bridge and Structures Division	Head	Takashi Tamakoshi
主任研究官 中洲 啓太	主任研究官	星野 誠
Senior Researcher Keita Nakasu	Senior Researcher	Makoto Hoshino
主任研究官 池田 秀継	交流研究員	小沼 恵太郎
Senior Researcher Hidetsugu Ikeda	Guest Research Engineer	Keitaro Konuma
交流研究員 藤田 知高		
Guest Research Engineer Tomotaka Fujita		

In order to improve durability of highway bridges and accuracy of deterioration prediction, NILIM conducted statistic analysis on chloride damage of concrete bridges, fatigue damage of reinforced concrete, and corrosion of weathering steel bridges using the periodic inspection data. Results indicate that they are possibilities that construction quality and applicable environment have effects on the deterioration progress.

〔研究目的及び経緯〕

道路橋の定期点検結果の分析により、比較的早期に劣化・損傷が進展するケースが多いことが明らかになっており、道路橋の耐久性向上及び劣化予測の信頼性向上等の観点から、早期に進展する劣化損傷の実態把握と進展要因の分析を行い、早期の劣化損傷の進展を回避するために設計・施工時に遵守すべき事項を整理する必要があります。

本研究では、鉄筋コンクリート部材の塩害による損傷、鉄筋コンクリート床版の疲労によるひびわれ、PC橋の持続荷重の影響による損傷、耐候性鋼材の異常腐食、コンクリートの補修・補強材の損傷を対象として、当該橋梁の構造条件や環境条件の違いが、橋梁の劣化損傷の進展等の状態に及ぼす影響を明らかにする目的で、道路橋の定期点検結果、竣工図書、現地調査結果等の整理・分析を行い、留意すべき事項を整理した。

〔研究内容及び研究成果〕

(1) コンクリート橋の塩害に関する調査

初回点検結果と第二回定期点検結果から塩害による損傷の進行状況を比較すると、初回点検時にひびわれの無かった部位から錆汁を伴う漏水が発生している事象が複数確認され(写真-1)、豆板や打継目等のコンクリートの施工品質の良否が塩害進行に影響があることが確認された。初期ひびわれの存在による劣化進行の影響は、今回整理した点検期間では確認されなかった。

また、定期点検結果を用いて、地域別、構造別に塩害による損傷状況を整理した。フィックの拡散方程式に基づく理論曲線と、塩害による損傷状況を比較した結果、現行のかぶり値を設定したばらつきを考慮した理論曲線(+1σ)よりも海岸からの距離が遠い場合は塩害の被害が概ね生じていないことが判明し、現行のかぶり値の妥当性が確認された(図-1)。



写真-1 錆汁を伴う漏水 (左:斑点状、右:打継目)

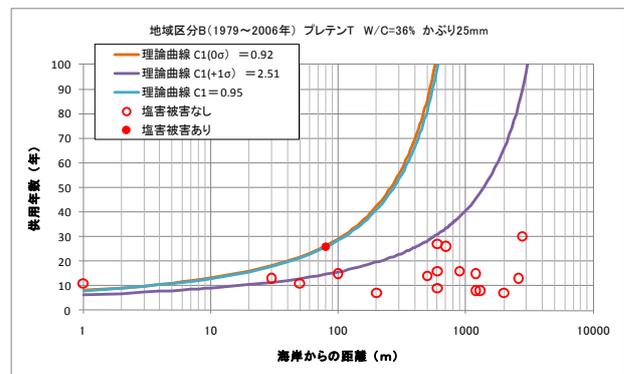


図-1 海岸からの距離-供用年数の関係

(2) RC床版の初期ひびわれが耐久性に及ぼす影響の整理

初回点検結果と第二回目定期点検結果を用いて、RC床版のひびわれパターンの経年的な変化について、貫通したひび割れと考えられる遊離石灰の有無に着目して整理した(表-1)。初回点検時に確認された一方向ひび割れ(ひびわれ間隔大)は、2回目の点検時には、遊離石灰を伴う場合は2径間/3径間で進展していた(表-1の黄枠)。一方、遊離石灰を伴わない場合においては、3径間/12径間のみで進展しており(表-1の青枠)、2回目点検時も遊離石灰は確認されなかった。遊離石灰を伴うひび割れは、損傷の進行が早まる可能性があることから、雨水の浸透を防ぐ防水工等の対策を行うとともに、施工時におけるコンクリートのひびわれ発生防止対策が望ましいことが確認された。

表-1 RC床版ひびわれの進展状況

初回点検(径間数)	中間部	2回目点検(径間数)											
		なし		一方向、間隔大		一方向、間隔小		二方向、間隔大		二方向、間隔小		なし	
		なし	遊離石灰	なし	遊離石灰	なし	遊離石灰	なし	遊離石灰	なし	遊離石灰	なし	遊離石灰
なし	なし	0	0	4	2	8	0	0	1	2	1	0	0
一方向、間隔大	なし												
一方向、間隔小	なし			8	1	1	1	0	0	1	0	0	0
二方向、間隔大	なし					2	0	0	0	0	0	0	0
二方向、間隔小	なし					1							
なし	なし							0	0	0	0	0	0
一方向、間隔大	遊離石灰												
一方向、間隔小	遊離石灰												
二方向、間隔大	遊離石灰												
二方向、間隔小	遊離石灰												

凡例: ■ ひびわれ、雨水遊離進展なし ■ ひびわれ進展、雨水遊離進展なし
■ ひびわれ進展なし、雨水遊離進展 ■ ひびわれ進展、雨水遊離進展あり
■ 両方進展

(3) PC 橋の持続荷重の影響に関する調査

持続荷重によるクリープや収縮等の影響が表れやすいと考えられるPC橋の構造形式を対象として、定期点検結果を用いて、構造形式毎、パターン毎に損傷の発生状況を整理した(図-2)。その結果、連結構造における支承部付近でのひび割れ、有ヒンジラーメン構造の異常たわみ等、構造形式毎に確認される損傷形態には特徴があり、これらに持続荷重が影響している可能性があることが確認された。

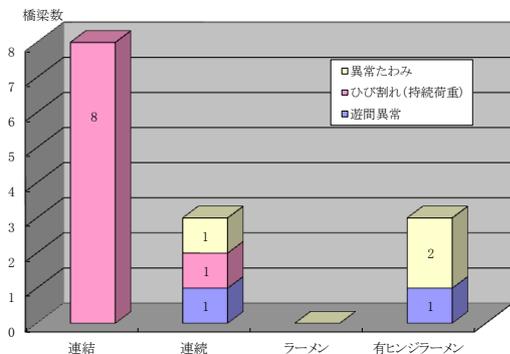


図-2 持続荷重による損傷の可能性のある橋梁

(4) 耐候性鋼材の異常腐食に関する調査

全国16箇所に設置した鋼球試験体(直径約45mmの

耐候性鋼材の曝露試験体)のさび厚計測(東・西・南・北の方向及び上部・中部・下部に区分した12領域を計測)及び観察を行い、腐食要因である塩分の飛来が想定される海側の部位のさび厚が1~3ヶ月間の曝露で顕著に厚くなる傾向が計測され、季節の異なる4回の計測とも海側の錆厚が大きくなる同様の傾向が確認された(表-2)。耐候性鋼材の異常腐食を防止するため、設計・施工時に鋼球試験体を利用して適用環境を簡易に評価できる可能性があることが確認された。

表-2 鋼球試験体の部位別さび厚比率(3ヶ月曝露)

日本海Ⅱ(2~4月)						太平洋(2~4月)					
No.33	北	東	南	西	平均	No.5	北	東	南	西	平均
上部	0.94	0.68	0.78	0.98	0.84	上部	0.84	0.88	0.80	0.78	0.82
中部	1.01	0.83	0.90	1.24	1.00	中部	0.80	0.98	1.11	0.92	0.98
下部	1.16	1.14	1.03	1.31	1.16	下部	1.06	1.09	1.42	1.22	1.20
平均	1.04	0.88	0.90	1.17	1.0	平均	0.93	0.98	1.11	0.98	1.0
日本海Ⅱ(5~7月)						太平洋(5~7月)					
No.63	北	東	南	西	平均	No.61	北	東	南	西	平均
上部	0.87	0.82	0.85	0.91	0.86	上部	0.78	0.70	0.76	0.72	0.74
中部	0.80	0.91	1.10	1.32	1.06	中部	0.85	0.93	1.06	0.97	0.95
下部	1.11	0.98	1.11	1.12	1.08	下部	1.05	1.09	1.59	1.50	1.31
平均	0.96	0.90	1.02	1.12	1.0	平均	0.99	0.90	1.11	1.06	1.0
日本海Ⅱ(8~10月)						太平洋(8~10月)					
No.82	北	東	南	西	平均	No.68	北	東	南	西	平均
上部	0.80	0.78	0.85	0.77	0.80	上部	0.89	0.80	0.89	0.72	0.82
中部	1.09	0.98	1.06	1.07	1.05	中部	0.84	0.87	1.26	0.74	0.93
下部	1.17	1.04	1.16	1.24	1.15	下部	1.03	1.27	1.63	1.06	1.25
平均	1.02	0.93	1.02	1.02	1.0	平均	0.92	0.98	1.26	0.84	1.0
日本海Ⅱ(11~1月)						太平洋(11~1月)					
No.98	北	東	南	西	平均	No.96	北	東	南	西	平均
上部	0.80	0.77	0.76	1.09	0.85	上部	0.77	0.73	0.75	0.80	0.76
中部	1.09	0.96	0.97	1.16	1.05	中部	0.78	0.80	0.96	0.80	0.84
下部	1.09	1.12	1.09	1.11	1.10	下部	0.91	1.46	1.96	1.29	1.41
平均	0.99	0.95	0.94	1.12	1.0	平均	0.82	1.00	1.22	0.84	1.0

※海側: 北西を中心とした方向 ※海側: 南を中心とした方向

(5) 補修・補強後の早期劣化の要因に関する調査

定期点検結果から「コンクリート補強材の損傷」を有する橋梁を抽出し、補強方法の種類毎に補強材の損傷状況を整理するとともに、5橋抽出して竣工図書と詳細設計成果の整理及び現地調査を行い、コンクリート補強材の劣化に影響する要因を整理した(図-3)。主桁を鉄筋コンクリートで補強している部材に、著しい劣化の発生が多く、その要因として乾燥収縮や温度応力と推定されているものが多いことが確認された。

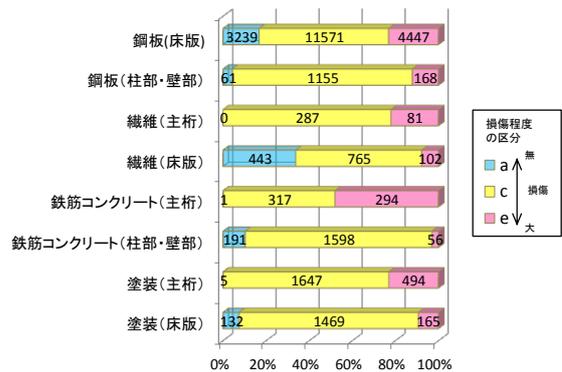


図-3 補強方法と変状の有無の関係

[成果の発表]

国総研資料及び土木学会等の論文で発表予定。

[成果の活用]

橋梁の耐久性に関する項目として点検・評価・設計等の基準に反映予定。

部材の重要度を考慮した設計手法に関する調査検討

Study on design method considering importance of member for road structures

(研究期間 平成 21 年度～平成 22 年度)

道路研究部 道路構造物管理研究室
Road Department Bridge and Structures Division
主任研究官 中洲 啓太
Senior Researcher Keita NAKASU
交流研究員 加藤 浩一
Guest Research Engineer Koichi KATO

室長 玉越 隆史
Head Takashi TAMAKOSHI
主任研究官 池田 秀継
Senior Researcher Hidetsugu IKEDA

As truss bridge collapse in US, it is a possibility that fracture critical member collapse causes whole bridge collapse depending on structures of bridges. In order to establish design method that can evaluate performance effects of the fracture critical members on bridges as a whole, NILIM conducted trial calculations using several types of simulation models and analyzed the results in view of accuracy and practicality.

〔業務目的〕

道路橋の設計では、一般にその耐荷力性能については、橋を構成する部材それぞれに着目して、それぞれが破壊や不安定などによって大きくその機能を喪失しないようにしたり、弾性挙動を行うことの信頼性の程度を確保することで、橋全体としての耐荷力性能を満足させることが行われる。一方、米国で発生した大規模トラス橋の崩壊事故の例のように、橋梁の構造によっては、一部の部材の破壊や不安定が他の部材にも連鎖的に影響を及ぼし、結果的に橋全体に落橋などの致命的な影響を及ぼす可能性がある。

本研究は、設計基準の高度化のために、道路橋の耐荷力性能を前提となる部材単体の性能状態によって間接的に評価するだけでなく、部材が橋全体の耐荷力機構の中で果たす役割にも着目し、一部の部材の影響が橋全体の性能に及ぼす影響についても評価できる実用的な設計手法を確立することを目的としたものである。

〔業務内容及び成果〕

1. 重大損傷事例の整理

一般的な道路橋の供用形態と維持管理の実態を想定した場合に、既存の道路橋について、その部材の一部が橋全体に致命的な悪影響を及ぼすような形態で劣化や損傷を生じるに至る可能性とその形態について、既往の文献や損傷事例から検討を行った。その結果、鋼橋では局部的な腐食の進行による断面欠損や疲労による亀裂の発生は比較的高い頻度で発生しており、コンクリート橋についてもプレストレス鋼材の破断や鉄筋の腐食による断面欠損は劣化の進んだ橋ではある程度数が現実に生じていることが確認された。

そのため、本研究では、代表的な橋梁形式に対して

これらの劣化や損傷の深刻化によって部材の一部が機能を損なう条件を設定し、それらが橋全体の耐荷力機構に及ぼす影響について解析的に検討を行った。

2. 橋梁形式の選定

対象として2主構系の鋼橋（鋼トラス橋、鋼アーチ橋）、コンクリート床版を有する鋼桁橋、プレストレストコンクリート橋等を選定した。ここでは、代表として2主構系鋼橋（鋼トラス橋・鋼アーチ橋）の検討結果を報告する。

3. 解析手法

一部の部材が破断するなど橋の構造系が変化するような状態の橋全体の耐荷力を評価するには、当初設計における仮定に拘わらず、部材各部の発生応力や塑性化の影響などをある程度精度よく表現することが必要である。一方で、橋全体を精緻なFEM解析モデルで再現することは、少なくとも設計段階の負担が過度に大きくなることが想定され、現実的でない。本研究では、耐荷力状態を必要な信頼性で判定できる目的に過不足のない程度の合理的な解析モデルの条件を見いだすために、鋼単純トラス橋、鋼アーチ橋それぞれについて、床版の剛性を考慮した三次元骨組解析モデルを基本とし、それに対して塑性化の影響を適切に考慮する必要があると考えられる格点部とその近傍について、一部又は全部をシェル要素（鋼トラス橋のみ）や一定せん断流パネル要素でモデル化した全橋モデルでの解析を行って、モデル化の相違が結果に及ぼす影響について検討を行った。なお、実際の状態に近い再現モデルとして、別途全橋FEMモデルによる解析も行った。図-1及び図-2に解析モデルの例、表-1及び表-2に解析パラメータの例を示す。

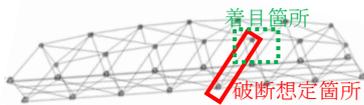


図-1 鋼トラス橋モデル

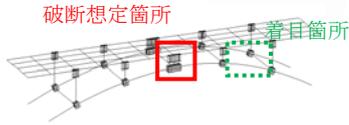


図-2 鋼アーチ橋モデル

表-1 解析パラメータ (鋼トラス橋)

ケース名	主部材	格点部(置換箇所数)	要素分割
1 骨組(ピン)	はり	ピン	—
2 骨組(剛)	はり	剛結	—
3 骨組(換算剛性)	はり	換算剛性	—
3 簡易せんパンネ全箇所	はり	せんパンネ(全30箇所)	分割数少
4 基本せんパンネ8箇所	はり	せんパンネ(8箇所)	標準
5 基本せんパンネ4箇所	はり	せんパンネ(4箇所)	標準
6 粗せんパンネ4箇所	はり	せんパンネ(全20箇所)	分割数少
7 FEM	はり	シェル	—

表-2 解析パラメータ (鋼アーチ橋)

ケース名	主部材	格点部(置換箇所数)	要素分割
1 骨組(ピン)	はり	ピン	—
2 骨組(剛)	はり	剛結	—
3 骨組(換算剛性)	はり	換算剛性	—
3 基本せんパンネ全箇所	はり	せんパンネ(全20箇所)	標準
4 基本せんパンネ4箇所	はり	せんパンネ(4箇所)	標準
5 簡易せんパンネ4箇所	はり	せんパンネ(4箇所)	分割数少
6 簡易せんパンネ全箇所	はり	せんパンネ(全20箇所)	分割数少

※せんパンネ：一定せん断流パネル要素

4. 解析結果

図-3に、鋼トラス橋の破断想定部材近傍の格点部のFEM解析に基づく応力性状(von Mises)を示す。破断箇所近傍の格点部では、ガセットプレート縁端付近や弦材においても複雑な応力分布がみられた。したがって、トラス橋の部位によっては、単純な格子モデルでは表現し得ない部材構成板の各部の応力状態を把握して、この影響を考慮しなければ、連鎖的に損傷が拡大するなどの橋全体としての耐荷力機構の変化を推定することは困難であることがわかった。図-4及び図-5に、破断部材に近接する格点部の縁端位置での斜材側(鋼トラス橋)及び吊材側(鋼アーチ橋)での応力分布を、表-1及び表-2に示した各モデルに対して描画した結果を示す。なお、ここでは、設計で一般的に用いられる骨組部材との対比のため、部材軸方向の応力に着目した。

当初の耐荷力設計で一般的に用いられる格点部をピン結合とした格子解析モデルでは、破断後の構造系の変化により影響が無視できなくなる格点部回転回りの

部材応力状態や変形挙動が表現できない。一方、一定せん断流パネル要素でモデル化すると、せん断遅れ等による断面内応力の変化の再現レベルには差異があるものの、板内の発生応力の分布傾向がある程度FEM解析による結果と近い性状で再現できることがわかる。

このように、構造特性に応じて必要な箇所のみ、板内の応力分布性状がある程度精度よく表現できるモデルを格子モデルに組み込むだけで、効率よく橋全体の耐荷力機構の変化とそれが致命的な影響をもつかどうかの判定は行える可能性があることがわかった。今後は、実設計事例や既設橋の耐荷力照査に当たってモデル化レベルを変えた試算例を増やして、モデル化要領を確立することが必要である。

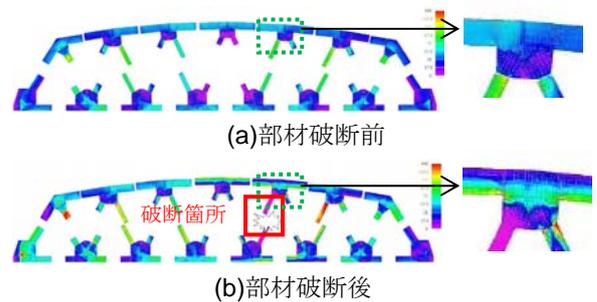


図-3 鋼トラス橋FEM解析結果

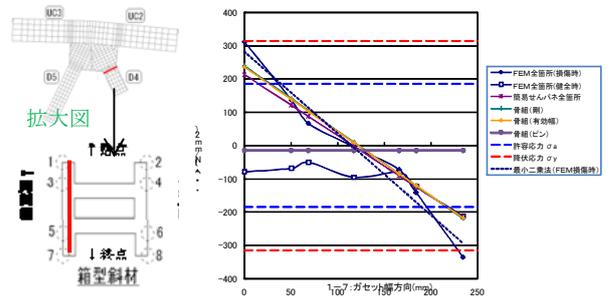


図-4 応力分布の比較 (鋼トラス橋)

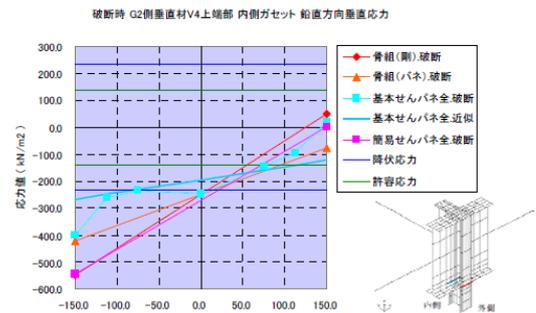


図-5 応力分布の比較 (鋼アーチ橋)

[成果の発表]

国総研資料及び各種論文に発表予定である。

[成果の活用]

実務設計段階で構造的冗長性を検証する場合の参考となる。

ボックスカルバートの耐震性能に関する実験的解析的検討

Experimental and numerical study on seismic capacity for concrete box culvert

(研究期間 平成 22～23 年度)

道路研究部 道路構造物管理研究室
Road Department, Bridge and Structures Division

室長 玉越 隆史
Head Takashi Tamakoshi
主任研究官 中洲 啓太
Senior Researcher Keita NAKASU
研究官 北村 岳伸
Researcher Takenobu Kitamura

In order to propose a seismic design method for large scale concrete box culverts over 6.5m width and 5m height, NILIM carried out cyclic loading tests of the culvert models and numerical analyses. Results indicate that seismic behavior of the box culverts depending on structures details are complex and it is not easy to apply the existing method used in the design of piers, girders, and so on.

〔研究目的及び経緯〕

道路土工カルバート工指針（平成 22 年 3 月・日本道路協会）では、幅 6.5m×高さ 5m の標準断面寸法を超える場合、耐震性について、詳細な検討を加え、合理的な設計を行う必要があると記載されているものの、具体的な照査法等が明示されていない。

本研究は、大断面のボックスカルバートの実績が増えつつあることから、道路盛土に設けられるボックスカルバートの耐震性能照査方法の確立のため、ボックスカルバート模型の正負交番載荷実験及び数値解析を行い、ボックスカルバートの地震時挙動、耐震性能に関する基礎的データを収集するとともに、それらを適切に再現、評価できる解析手法について検討したものである。

考えられる。また、供試体によっては、頂版のせん断破壊に進展する可能性のあるひび割れ、側壁外側や壁内部（点検不可能箇所）でのひび割れがみられたため、実構造物の耐震性能の評価にあたっては、これらの破壊形態を適正に評価できる方法による必要があることが確認された。

表-1 実験供試体一覧 単位 m

ケース	形状	土かぶり	内空幅	内空高さ	中間構造
1	1 BOX	1.5	6.5	6.0	—
2	2 BOX	1.5	6.5	6.0	壁構造
3	2 BOX	1.5	6.5	6.0	柱構造

〔研究内容及び成果〕

(1) 交番載荷試験

ボックスカルバートの地震時挙動、耐震性能等を把握するため、表-1 に示す断面形状、中壁構造をパラメータとした 3 ケースのボックスカルバートについて、道路土工カルバート工指針に準拠した実験供試体の設計・製作を行い、正負交番載荷実験を実施した。図-1 にケース 1 を例として実験供試体断面図を示す。また、正負交番載荷により得られた荷重-変位関係を図-2（ケース 1 のみ）、載荷終了時のひび割れ状況図を図-3、ひび割れ発生状況写真を写真-1 に示す。

正負交番載荷実験の結果、ボックスカルバート模型のハンチ部や頂版部の段落とし部に顕著なひび割れが見られており、これらの破壊形態は、ハンチ部、段落とし部などの配筋条件等によって大きく左右されると

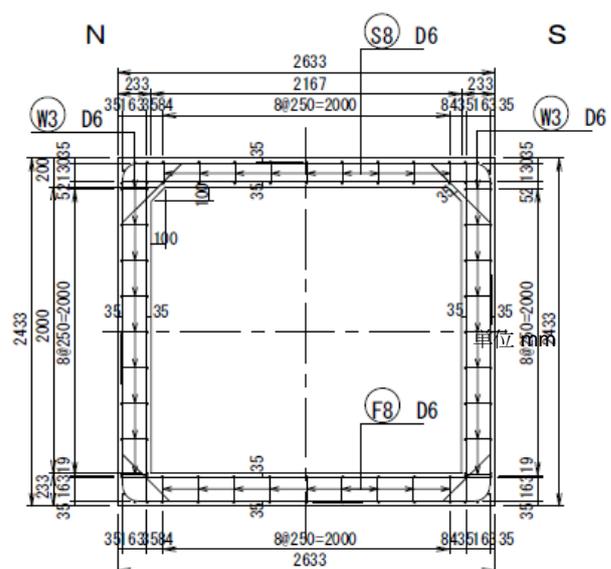


図-1 実験供試体断面図(ケース1)

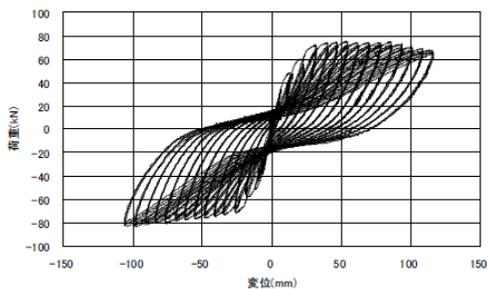
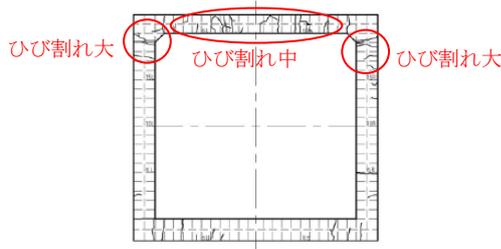
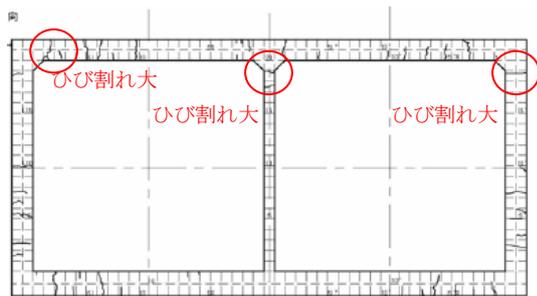


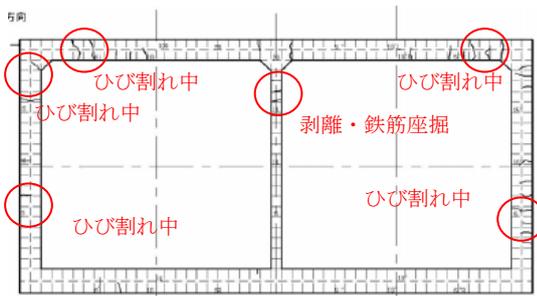
図-2 水平荷重－変位関係 (case1)



(a) case1



(b) case2



(b) case3

図-3 ひび割れ状況図



(a)ハンチ部



(b)頂版部

写真-1 ひび割れ発生状況

(2) 交番載荷実験の再現解析

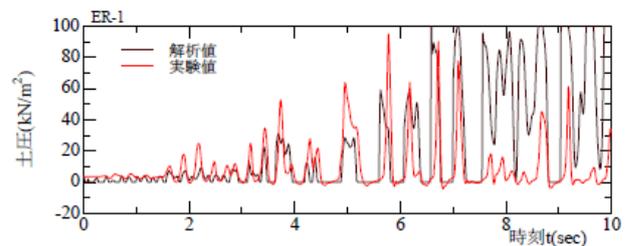
実験ケースを含む、断面寸法、断面構成（単・連）、側道の有無、中壁の型式（充覆・柱）等の各種パラメータを変化させた数値解析モデルを作成し、正負交番載荷実験を再現した解析を実施した。

解析の結果、橋脚や桁などの設計で用いられる手法を準用した場合、塑性化が生じやすい部位の推定は行えても、ボックスカルバート特有の構造細目（ハンチ、段落としなど）による相違の評価には課題があることが明らかになった。

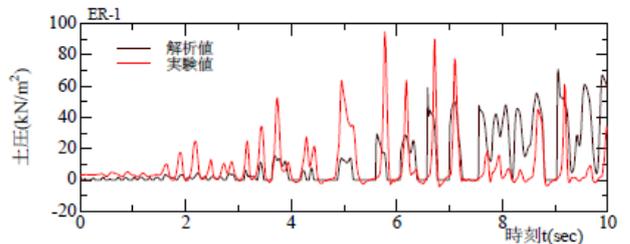
(3) 盛土内の地震時作用に関する解析

盛土内で地震時にボックスカルバートに作用する外力を、三次元FEMモデルを用いた動的応答解析等により算定した。解析では、動的遠心載荷実験で得られた原地盤底面での加速度波形を解析モデルの同位置に作用させた。図-4に構造物～地盤間のすべり抵抗 μ を変化させた場合の地盤からカルバート側壁（頂版位置）に作用する外力の解析結果を示す。

解析の結果、L2級の大地震に対する土圧分布は、他の地中構造物で一般的に用いられている解析手法による推定と乖離が見られ、例えば、構造物～地盤間のすべり抵抗 μ など解析条件のわずかな相違が推定土圧分布に大きく影響を及ぼすことが明らかとなった。



(a) $\mu = \tan \phi$ の場合



(b) $\mu = \tan(\phi/2)$ の場合

図-4 地震時作用の解析結果例

[成果の発表]

国総研資料及び各種論文に発表予定である。

[成果の活用]

道路土工－カルバート工指針等、技術基準改定のための基礎資料となるものである。

道路工事における総合的なコスト構造改善の評価に関する調査

Investigation concerning evaluation of the overall cost structure improvement in road works

(研究期間 平成 21 年度～平成 22 年度)

ーコスト構造改善プログラムの普及・促進に向けた総合コスト改善の実績分析ー

Analysis of results of integrated cost reduction for spread and promotion of cost structure improvement program

総合技術政策研究センター 建設システム課
Research center
For Land and Construction Management,
Construction System Division

課 長 金銅 将史
Head Masashi KONDOU
主任研究官 駒田 達広
Senior Researcher Tatsuhiro KOMADA
交流研究員 中島 章
Guest Researcher Akira NAKAJIMA

In this study, improvement of the integrated cost in fiscal year 2009 was analyzed. To promote the public works which tackle an issue to improve the lifecycle-cost and the social-cost, that is new evaluation factor, improvement of the efficiency of the follow-up method such as easy calculation method was examined and case studies which are easy to understand were shown.

【研究目的及び経緯】

道路行政では、これまでのコスト削減の取り組みに加え、行き過ぎたコスト削減は品質の低下を招く恐れもあることからコストと品質の両面を重視する取り組みとした「国土交通省公共事業コスト構造改善プログラム」(平成 20 年度～平成 24 年度)(以下「改善プログラム」という。)に基づき、平成 20 年度から 5 年間で、15% (平成 19 年度比) の総合コスト改善を目標とした「総合的なコスト構造改善」に取り組んでいる。

平成 21 年度の総合コスト改善率は、国土交通省・関係機構等合計で、5.6%の低減となった。物価変動等を含めた改善率は 4.5%の低減となった。

本研究では、総合コスト改善実績の分析、新たな評価項目であるライフサイクルコストの改善及び社会的コストの改善施策の普及・促進を図るための、分かりやすい算出事例の作成並びに算出手間の軽減等のフォローアップ方法の効率化について検討を行った。

【研究内容】

平成 21 年度に国土交通省が実施した道路事業等に関する全コスト構造改善実績データを収集し、総合コスト改善率の構成要素である工事コストの改善、ライフサイクルコストの改善、社会的コストの改善の各実績を、工事単位及び個別のコスト改善施策単位で分析した。

工事単位の分析においては、工種や地域別に、全発注工事件数に対するコスト改善を実施した工事の割

合を分析した。コスト改善施策単位の分析においては、施策内容、件数、コスト改善額を分析した。

また、ライフサイクルコストの改善、社会的コストの改善については各施策内容を分析し、具体的算出方法のケーススタディを作成した。

【研究成果】

1.1 工事コスト改善施策の実施概況 (道路事業)

道路事業の平成 21 年度の全発注工事 5,444 件のうち、工事コストの改善施策が実施された工事は 1,356 件で、実施率は約 25%であり、平成 20 年度の実施率(約 18%)に比べ、工事コスト改善施策の現場への波及等により上昇した結果となった(表 1 参照)。

表 1 道路事業工事コストの改善施策の実施率の推移

年度	コスト構造改善プログラム		コスト構造改善プログラム	
	H18	H19	H20	H21
発注工事件数	5,896 件	7,345 件	7,312 件	5,444 件
実施工事件数	2,406 件	3,944 件	1,349 件	1,356 件
実施率	41%	54%	18%	25%

1.2 地方整備局別工事コストの改善効果の分析

地方整備局別に分析した結果を図 1 に示す。実施工事件数順では、中部地方整備局が 276 件と多く、ついで、九州地方整備局(247 件)となっている。また、実施工事での平均コスト改善率順では、実施件数の最も少ない近畿地方整備局が約 155 百万円と高い結果となっている。これは、橋梁工事やトンネル工事等において効果が高い施策を実施していることによるものである。

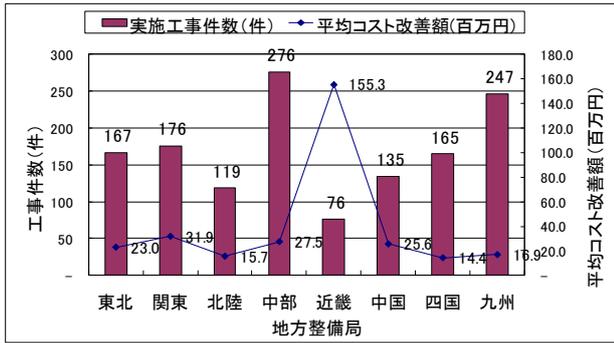


図1 地方整備局別の工事コストの改善効果

1.3 工事区分別の改善効果の分析

工事区分別に分析した結果を図2に示す。実施工事件数順では、道路改良工事が593件と多く、ついで、道路維持工事(296件)となっている。また、実施工事での平均コスト改善額順では、共同溝工事が最も高く約119百万円となっており、ついで、鋼橋上部工事(約71百万円)となっている。

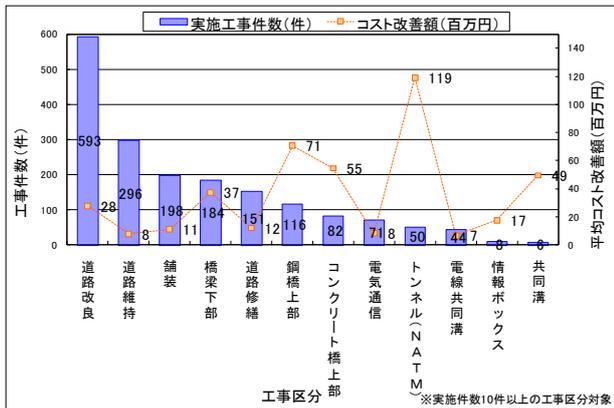


図2 工事区分別の工事コストの改善効果

1.4 工事コスト改善の施策別の分析

道路事業における工事コストの改善が実施された工事を改善施策単位毎に整理し取組み件数が多い施策上位15位を表2に示す。取組み件数順では「新技術・新工法の採用」が560件と他の施策に比べ多い結果となっている。平均コスト改善額では、「橋梁形式の見直し(上部工・下部工)」や「鋼橋の少本数主桁化」等の橋梁の見直しに関する施策が上位となっている。

表2 工事コストの改善施策のランキング表

順位	具体的施策内容	件数(件)	コスト改善額(百万円)		コスト改善率平均(%)
			合計	平均	
1	新技術・新工法の採用	560	5,438.6	9.7	5.1%
2	道路除草頻度の見直し	164	531.4	3.2	2.3%
3	道路法面の緑化基準の見直しと法面緑化技術の開発	130	904.0	7.0	3.0%
4	凍結防止剤の計画的な散布	114	609.5	5.3	2.9%
5	橋梁形式の見直し(上部工・下部工)	98	5,203.4	53.1	15.9%
6	ローカルルールへの適用	91	2,443.0	26.8	10.6%
7	コンクリート構造物の大型プレキャスト化	86	152.5	1.8	1.1%
8	コンクリート二次製品の活用	82	411.1	5.0	3.7%
9	パワーレンダリング工法の採用	54	608.5	11.3	4.7%
10	直線ボールの採用	45	83.6	1.9	3.1%
11	路面清掃回数の検討	39	260.7	6.7	7.9%
12	支保構造・形式の変更	37	806.4	21.8	5.2%
13	鋼橋の少本数主桁化	32	1,506.6	47.1	10.0%
14	鋼管ワイルセメント杭工法の採用	32	242.4	7.6	8.3%
15	路床安定処理の採用	30	426.2	14.2	5.6%

2 ライフサイクルコストの改善効果の分析

道路事業のライフサイクルコストの改善効果において取組まれている改善施策を表3(件数順)に示す。取組み件数順では「防草対策の実施」が137件と多く、ついで、「耐候性鋼・ステンレス鋼材等の採用」が55件となっている。平均コスト改善額順では、「高耐久性床版の採用」が約33百万円と高く、ついで、「防耐候性鋼・ステンレス鋼材等の採用」が約32百万円となっている。

表3 ライフサイクルコストの改善施策

順位	具体的施策内容	件数(件)	コスト改善額(百万円)		コスト改善率平均(%)
			合計	平均	
1	防草対策の実施	137	696.1	5.1	46.1%
2	耐候性鋼材・ステンレス鋼材等の採用	55	1,758.5	32.0	17.8%
3	照明器具の見直し	21	88.2	4.2	24.6%
4	道路構造物の長寿命化・延命化	20	530.1	26.5	16.4%
5	区画線の水性ペイント化	14	49.3	3.5	27.3%
6	高耐久性床版の採用	9	292.9	32.5	14.9%
7	更新周期の延伸	1	25.6	25.6	16.3%
8	ジェットファンの見直し	1	0.7	0.7	35.2%

3. 社会的コストの改善効果の分析

道路事業の社会的コストの改善効果においては、「事業便益の早期発現による効果」は0件(昨年度0件)であり、「工事に伴う通行規制の改善による効果」は7件(昨年度1件)でコスト改善額の合計は約7億円であった。この結果より、昨年度よりは取組み件数は増えたが、今後もさらに伸ばしていく必要がある施策であると考えられる。

4. 具体的算出方法のケーススタディの作成

新たな評価項目であるライフサイクルコストの改善効果・社会的コストの改善効果について、現場への施策の普及・促進を目的として具体的算出方法のケーススタディを作成した。ライフサイクルコストの改善効果については、平成21年度実績より、件数が高く効果が大きい改善施策の抽出を行い、「道路構造物の長寿命化・延命化」、「橋梁の更新周期の延伸」の2件について作成した。社会的コストの改善については、実績が少ないため、効果算出のモデルケースを設定し、「事業便益の早期発現」では「道路の暫定・部分供用時の早期発現効果の算出」を作成し、「工事に伴う通行規制の改善による効果」では、「工事区間での作業帯縮小による交通規制の改善」について作成した。

【成果の発表】

本研究の成果は、「平成23年コスト削減担当者会議」において公表予定である。

【成果の活用】

本研究の成果は、各地方整備局担当者に情報提供することにより、毎年度実施されるコスト改善構造フォローアップにおいてコスト改善額の算定に活用され、総合コスト構造改善の促進・普及に寄与している。

道路事業における総合評価落札方式の技術評価の改善に関する検討

Study for the application of Overall Evaluation Bidding Method with Technical Proposal

(研究期間 平成 15～22 年度)

総合技術政策研究センター 建設マネジメント技術研究室
Research Center for Land and Construction Management
Construction Management Division

室 長 笛田 俊治
Head, Toshiharu FUETA
主任研究官 塚原 隆夫
Senior Researcher, Takao TSUKAHARA
研究官 多田 寛
Researcher, Hiroshi TADA

The overall evaluation bidding method with technical proposal has merits such as improvement of quality of infrastructures through the competition not only by price bidding but also by advantage of technical proposal. The objective of this study is to develop measures for generalization and smooth application of the bidding.

[研究目的及び経緯]

平成 17 年 4 月に施行された「公共工事の品質確保の促進に関する法律」において、公共工事の品質は、「経済性に配慮しつつ価格以外の多様な要素をも考慮し、価格及び品質が総合的に優れた内容の契約がなされることにより、確保されなければならない」と規定されており、公共工事の品質確保のための主要な取り組みとして総合評価落札方式の適用を掲げている。

国土交通省においては、平成 11 年度より大規模かつ難易度の高い工事を対象に、ライフサイクルコストを含めた総合的なコスト、工事目的物の性能・機能、環境の維持や交通の確保等の社会的要請事項に関する技術提案を入札者に求め、これらと価格を総合的に考慮して落札者を決定する総合評価落札方式を試行してきたところである。公共工事全体の品質の確保のためには、より規模の小さな工事を含め原則としてすべての工事において総合評価落札方式を適用していくことが求められている。そこで本調査は、そのための具体的方策について検討を行うものである。

[研究内容]

国土技術政策総合研究所においては平成 21 年 1 月に「総合評価方式の活用・改善等による品質確保に関する懇談会」(座長:小澤一雅 東京大学大学院工学系研究科教授)を設置し、総合評価落札方式の活用・

改善や多様な入札・契約制度の導入等、入札・契約に関する諸課題への対応に向けた検討を行っている。今年度は、工事における総合評価落札方式の適切な運用に資するため、総合評価落札方式の方法及びこれまで実施されてきた総合評価落札方式の改善等を網羅的かつ体系的にとりまとめた「国土交通省直轄工事における総合評価落札方式の運用ガイドライン(案)」の作成に関する検討を行った。

[研究成果]

(1)「国土交通省直轄工事における総合評価落札方式の運用ガイドライン(案)」の概要
運用ガイドライン(案)の項目と主な内容は以下のとおりである。

① 総合評価落札方式の基本的事項

総合評価落札方式の基本的な考え方を示すとともに、適用範囲、タイプ、タイプ別の選定フロー等を示した。

具体的には、「LCC低減」、「性能・機能向上」等が見込まれる工事に適用することとし、難易度や予定価格だけによらず、求める技術力に応じた技術提案の数、内容等に応じて、総合評価落札方式のタイプ(高度技術提案型、標準型、簡易型)を選択することを示した。

② 総合評価落札方式の実施手順

各タイプ（高度技術提案型、標準型、簡易型）の実施手順として、実施フロー及び留意点を示した。また、実施にあたっての留意事項として、高度技術提案型における応札者の負担軽減のための留意事項を示した。

③ 総合評価落札方式の評価方法

技術的要件及び評価基準の入札説明書等への明示や、技術的要件の設定方法について示すとともに、各タイプにおける競争参加者の選定方法、タイプ別の評価項目及び配点割合を示した。

また、評価項目の加算点の評価方式、タイプ別の評価項目・評価基準の設定例を示すとともに、評価にあたっての基本的な考え方や、高度技術提案型における「技術提案の審査」「技術提案の改善」等の留意事項を示した。

さらに、中立かつ公正な審査・評価の確保のため、学識経験者への意見聴取の内容を示した。

④ 総合評価落札方式の評価結果の公表

評価結果の公表について、評価及び落札結果の記録と契約後の早期の公表を示すとともに、技術提案内容の保護に留意することを示した。

また、技術提案の採否の通知について、技術提案の採否・評価結果に関する通知の内容を示すとともに、通知に関する問い合わせ窓口の設置について示した。

あわせて、入札及び契約過程に関する苦情処理について、入札者からの苦情処理の内容（評価結果・理由の記録と説明）を示した。

⑤ 総合評価落札方式の評価内容の担保

技術提案の施工計画書への明記等の技術提案の履行確保の方法を示した。

⑥ 総合評価落札方式の試行

次の総合評価落札方式の試行に関することを示した。

- 施工体制確認型総合評価落札方式の試行
- 総合評価落札方式における提出資料の簡素化等（実績重視型総合評価落札方式）
- 地元企業活用審査型総合評価落札方式の試行
- 一般競争入札等の競争参加資格における施工実績に係る要件を緩和する工事の試行
- 特定専門工事審査型総合評価落札方式の試行

○ 二段階選抜方式、事後審査型入札方式の考え方

施工体制確認型総合評価落札方式の試行については、適切な施工体制確保が必要な工事を対象とすることとし、施工体制評価項目の内容と審査・評価方法を示した。

総合評価落札方式における提出資料の簡素化等（実績重視型総合評価落札方式）については、小規模かつ施工計画の工夫の余地が小さい工事を対象とすることとし、客観的な評価が可能となる評価項目の設定について示した。

地元企業活用審査型総合評価落札方式の試行については、入札参加者だけでなく下請企業等も評価する方式として、「地域精通度・貢献度等」や「地域での施工実績等」による評価を実施することを示した。

一般競争入札等の競争参加資格における施工実績に係る要件を緩和する工事の試行については、競争参加資格で工事量を求めないことによる実績要件の緩和を示した。

特定専門工事審査型総合評価落札方式の試行については、特定専門工事（法面処理工・杭基礎工・地盤改良工）が工事全体に占める重要度の高い工事を対象とすることとし、特定専門工事部分の評価項目の内容と審査・評価方法を示した。

二段階選抜方式、事後審査型入札方式の考え方については、受発注者の事務量の軽減等の効果を示すとともに、実施方法と留意事項を示した。

【成果の発表】

「総合評価方式の活用・改善等による品質確保に関する懇談会」（第4回 平成23年3月10日開催）において、「国土交通省直轄工事における総合評価落札方式の運用ガイドライン（案）」として公表。

(<http://www.nilim.go.jp/lab/peg/index.htm>)

【成果の活用】

検討成果は、上記懇談会の資料に反映された。また、ガイドライン（案）については、必要に応じて各地方整備局等において活用されることを期待するものである。

3次元CADデータに関する検討業務

Examination business concerning three dimension CAD data

(研究期間 平成 22~24 年度)

高度情報化研究センター 情報基盤研究室
*Information Technology Div. Research Center
 for Advanced Information Technology*

室長 平城 正隆
 Director Masataka Hirajo
 主任研究官 青山 憲明
 Senior Researcher Noriaki Aoyama
 研究員 井星 雄貴
 Research Engineer Yūki Iboshi

In the field of civil engineering, advanced product system using 3D-CAD needs for productivity improvement as well as manufacture. We examined an exchange standard of 3D-CAD data as a part of CALS/EC activities in this study.

〔研究目的及び経緯〕

建設事業は、公共事業の削減、社会資本ストックの老朽化による維持管理費の増大、技術者の高齢化と熟練者不足等の課題に加え、労働生産性が他の産業に比べて著しく低く、建設生産システムの変革が早急に求められている。また、近年、一般競争入札の導入に伴うダンピング受注の増加や、不良不適格業者の参入、体制が脆弱な発注者の存在等により、公共工事の品質低下が懸念されている。品質確保を図るためには、監督検査の強化を図る一方、オペレータの熟練度に依存しない出来形・品質管理技術の導入が求められている。

国土技術政策総合研究所では、国土交通省成長戦略に掲げられた「我が国の建設業の国際競争力を向上」のため、3次元設計や情報化施工技術の導入、普及を図り、建設生産性向上を実現するべく取り組んでいる。

本研究においては、公共事業支援総合情報システム(CALS/EC)の構築に向けた検討の一環として、3次元設計、情報化施工、各種の3次元シミュレーションのための3次元データ流通・利活用等を検討の対象とした。

〔研究内容〕

(1) 2次元で設計したデータを3次元化するデータ交換標準の策定

過年度作成した3次元データ交換標準(素案)を情報化施工に活用するための適用性を検証した。具体的には、設計データを3次元データ交換標準(素案)(XMLデータ)で表現したものを対象に、施工側の標準である「トータルステーション(TS)による出来形管理基本設計データ」および「マシンコントロール(MC)、マシンガイダンス(MG)に必要な3次元データ」に変換した場合において、不足する要素はないか、ビジュアルソフトで目視した場合に問題がないかという観点で、「断面定義パターン」と「要素定義パターン」の両面から検証した。(図1)

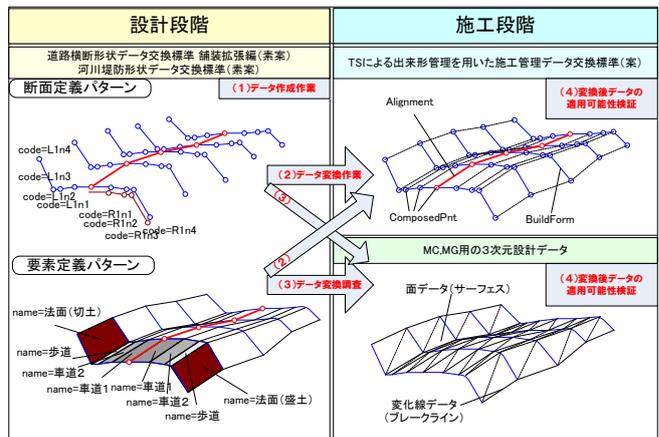


図1 データ変換のイメージ

(2) 設計～施工～維持管理に渡り3次元データが流通・利用できる環境の構築

橋梁を対象に、「設計ミスの防止」、「工程上の安全性向上」、「維持管理性の向上(被災や損傷の早期把握、早期復旧)」の観点から、構造物の基本的な位置情報であるコントロールポイントの座標を設計～施工～維持管理段階で流通させる試行工事(5件)を実施し、その効果と課題を検証した。

具体的には、座標図の作成及び3次元モデルを作成し、それらの3次元データを利用した工事設計図書(照査)を行った。また、設計から施工へ受け渡すコントロールポイント(構造物設置基準点)(図2)及び施工から維持管理へ受け渡すコントロールポイント(監視基準点)を設定し、3次元モデルへ旗上げを行った。その他、試行工事の受発注者へヒアリングを行い、3次元データ利活用の効果や課題を整

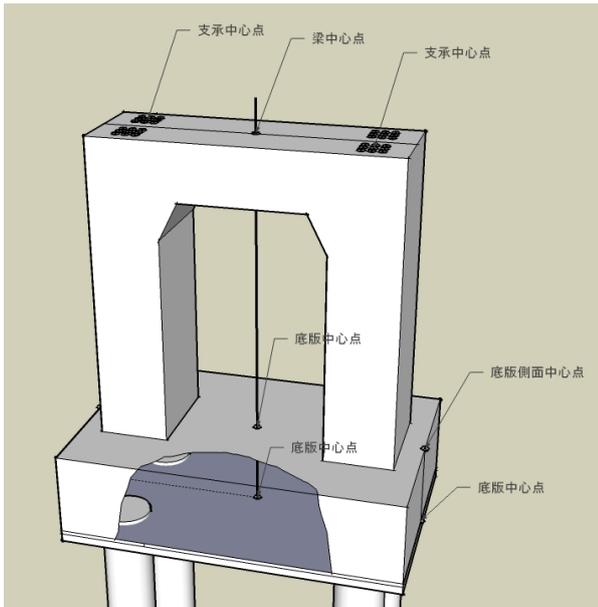


図2 構造物設置基準点のイメージ

理した。

(3) 諸外国の3次元データ実態調査

欧米、アジアの7ヶ国を対象に、3次元データの利活用状況とそのフォーマットについて調査を行った。

[研究成果]

(1) 2次元で設計したデータを3次元化するデータ交換標準の策定

MC/MG用のデータへの変換は、「断面定義パターン」・「要素定義パターン」とともに大きな課題はなく、適用可能性が検証された。基本設計データへの変換に関しては、若干の留意点があるものの、適用性はあるものと検証された。なお、留意点としては、設計サイドに関係するもの、施工サイドに関係するもの、スキーム（標準類）に関するもの等があり、今後、3次元データ交換標準（素案）の修正を行う必要がある。

(2) 設計～施工～維持管理に渡り3次元データが流通・利用できる環境の構築

座標図や3次元モデル等の3次元データを利用して工事設計図書の照査を実施し、効果を検証した結果、図面間の不整合や空間的な把握不足による部材間の干渉等、2次元図面の照査では気付きにくかった多くの不具合を、3次元モデルの作成過程で容易に照査できることを確認した。

監視基準点については、構造物の変位が把握できるように5面（橋台は4面）に設置することを基本とし、後の維持管理段階で測量できることを現地で確認した上で設定・設置した（図3）。

また、3次元データ利活用の標準化に向けた課題と対応方針を以下のとおりまとめた。

①座標図

- ・線形計算書にない座標はCAD計算となる。
→設計の段階で必要な座標位置を考慮し、線形計算を実施する。
- ・上部工工事では小座標系の方が分かりやすい。
→大座標系と小座標系の両方を作成する。

②3次元モデル

- ・2次元設計図面では表現されていない箇所は想定で作成する必要がある。
→モデル作成者が構造を理解するとともに、発注者と協議する。
- ・作り込むレベルを設定する必要がある。
→目的を明確にした上で、モデル作成箇所、制度を設定する。

③3次元データを利用した工事設計図書の照査

- ・設計の知識がないと3次元モデル作成過程で照査できない。
→設計者自ら3次元CADで設計する。

④監視基準点

- ・高い位置に設置した場合、後に測量できない。
→検査路の利用、ノンプリズム方式での測量など、現場状況に応じて対応する。

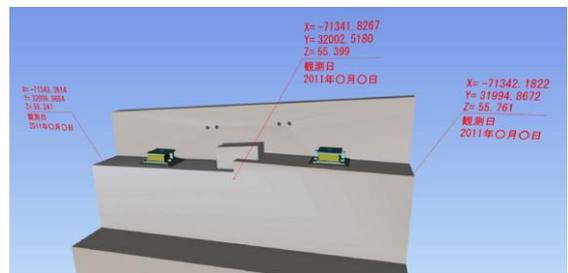


図3 監視基準点明示の例

(3) 諸外国の3次元データ実態調査

3次元データの歴史は浅く、「要領・基準類」は策定されていなかった。情報化施工で利用している箇所はいくつかあるものの、その他の目的での利活用は進んでいないことが判明した。

[成果の発表]

平成23年度に関係団体との意見交換会を予定しており、そこで今回の成果を報告する予定である。

[成果の活用]

本成果を基に、3次元データ交換標準及び3次元データ流通に関する標準仕様の作成を行う予定である。

地点ごとの特性を考慮した地震動推定手法の検討

Study on methods for estimation of site-specific earthquake ground motion

(研究期間 平成 21～22 年度)

危機管理技術研究センター地震防災研究室
Research Center for Disaster Risk Management
Earthquake Disaster Prevention Division

室長 高宮 進
Head Susumu TAKAMIYA
主任研究官 片岡 正次郎
Senior Researcher Shojiro KATAOKA
研究員 松橋 学
Research Associate Manabu MATSUHASHI

Design earthquake motion for highway bridges shall be formulated based on appropriate estimation of site-specific earthquake ground motion. This study aims to provide a reference technical note that describes characteristics of various estimation methods of earthquake ground motion and their application to the practice of seismic design of highway bridges.

〔研究目的及び経緯〕

現行道路橋示方書は、標準加速度応答スペクトルと地域別補正係数で設計地震動を設定することを基本としているが、活断層やプレート境界で発生する地震、地下構造等の情報を考慮して地震動を適切に推定することができる場合は、これらに基づいて設計地震動を設定することとしている。しかしながら、具体的な判断基準や地震動推定手法が整理されておらず、合理化を目指して積極的に個別検討が行われる事例は限定的である。本調査では、地点ごとの特性を考慮した地震動推定を行うための手法を検討するとともに、既存の手法も含め、手法の選定基準等を整理し道路橋示方書を運用する上での参考資料を作成する。

22年度は、地震ごとの震源特性並びに地点ごとの地震動増幅特性の違いを考慮することができる地震動推定式を作成し、既往の研究による推定地震動と比較して妥当性を検討した。

〔研究内容〕

1. 震源スペクトルの推定

強震記録を収集・整理し、スペクトルインバージョン解析により地震ごとの加速度震源スペクトルを算出した。加速度震源スペクトルは、震源域から放射される地震動加速度のスペクトル特性であり、-1に示すとおり地震の規模 (M_w はモーメントマグニチュード)につれて大きくなること、短周期側では一定の値となることが知られている。この、加速度震源スペクトルが短周期側でとる値を短周期レベルとよぶ。-1はそれぞれの M_w に対する平均的な加速度震源スペクトルを示したものであり、実際には M_w が同じでも短周期

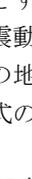
レベルは大きく異なる場合がある。

2. 地震動推定式の作成

整理した強震記録をもとに、観測点ごとの特性を観測点補正係数として分離した上で、振幅特性と位相特性を対象とする地震動推定式を作成した。振幅特性については、短周期レベルをパラメータとする場合と震源深さをパラメータとする場合の2ケースの推定式を作成した。これら地震動推定式とサイト係数の組み合わせにより想定地震の地震動を推定し、既往の研究と比較して地震動推定式の妥当性を検討した。

〔研究成果〕

1. 震源スペクトルの推定

1989～2010年の94地震で得られた13713記録を収集・整理し、スペクトルインバージョン解析により震源特性、伝播経路特性、サイト特性を分離して地震ごとの加速度震源スペクトルを算出した。この震源スペクトルの短周期レベル A と地震の規模 M_w との関係を示すと-2のようになる。この図から、地震の規模が大きくなると短周期レベルも大きくなるが、その傾向は地震のタイプによって異なり、 M_w が同じ場合にはプレート内地震、プレート境界地震、内陸地殻内地震の順に短周期レベルが大きい傾向があることが分かる。また、地震の規模とタイプが同じでも、発生する地域によって短周期レベルが異なる傾向があることも最近知られてきており、このような地震のタイプや発生地域による短周期レベルの違いを考慮することで、より精度の高い地震動の推定が可能になると考えられる。

2. 地震動推定式の作成

1. と同様の強震記録を用いた統計解析により、

振幅特性と位相特性を対象とする地震動推定式を作成した。振幅特性としては、固有周期 0.1~10[s]の加速度応答スペクトル $S_A[\text{cm/s}^2]$ (減衰定数 5%) を対象とする推定式を作成した。次のように、それぞれ短周期レベル $A[\text{Nm/s}^2]$ と震源深さ $D[\text{km}]$ をパラメータとする 2 つの式を作成した。

$$\log S_A(T) = a_1(T)M + a_2(T)\log A - b(T)X + c_j(T) - \log(X^{d(T)} + p(T)10^{qM}) \quad (1)$$

$$\log S_A(T) = a_1(T)M + a_2(T)D - b(T)X + c_j(T) - \log(X^{d(T)} + p(T)10^{qM}) \quad (2)$$

ここで、 T は固有周期[s]、 X は震源域からの距離[km]、 a_1, a_2, b, d, p, q は回帰係数である。

観測点補正係数 c_j は観測点 j の地震動増幅特性を補正する係数であり、この空間補間により任意の地点を対象に地震動推定式を補正するサイト係数を算出した。

位相特性としては、周期帯ごとの地震動の到達時間およびそのばらつきを表現する群遅延時間の平均値と分散を対象として、それぞれの推定式を作成した。これらは同じ式形で表され、次のようになる。

$$Z(T) = \alpha(T)M_0^{1/3} + \beta(T)X^k + \gamma(T) \quad (3)$$

ここで、 Z は群遅延時間の平均および分散[s]、 M_0 は地震モーメント[dyne·cm]、 α, β は回帰係数、 k は平均の場合 1、分散の場合 2 である。

観測点補正係数 γ_j は観測点 j に地震波が到達するのに要する時間とそのばらつきを補正する係数であり、これを空間補間することでサイト係数を算出した。

以上のように作成した推定式とサイト係数を用いて、想定する地震が発生した際の対象地点における地震動の加速度応答スペクトルおよび群遅延時間の平均と分散を推定し、それらの推定値に適合する時刻歴波形(模擬地震動)を作成することができる。ここでは例として、図-3 のように 523 の小断層からなり 9 つのアスペリティをもつ東南海・南海連動地震 ($M_w 8.6$) を対象に、大阪湾岸の 1 地点の時刻歴波形を作成した結果を、既往の研究(土木学会提供波)と比較して図-4 に示す。

図-4 は、それぞれの小断層 ($M_w 7$ 程度の地震に相当) から発生する 523 の地震動を作成して重ね合わせた場合と、 $M_w 8.6$ の単一断層から発生する地震動を作成した場合の 2 ケースの結果を示している。どちらのケースでも最大振幅の誤差は 6% 程度、継続時間は 200 秒を超えており、既往の研究とよく一致する結果が得られている。ただし、単一断層のケースでは 120 秒以降で周期 5 秒程度の長周期の揺れが卓越しており、推定式を M_w に関して外挿して用いたことが影響していると考えられる。

[成果の活用]

設計地震動の設定に関する参考資料の作成に反映。

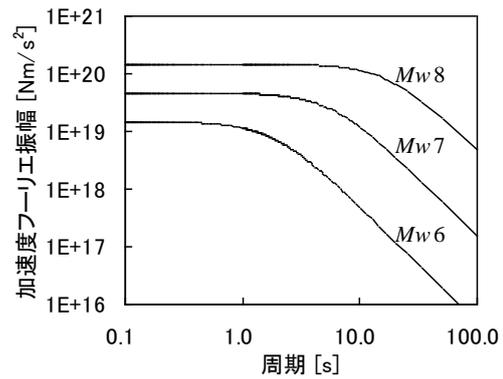


図-1 加速度震源スペクトル

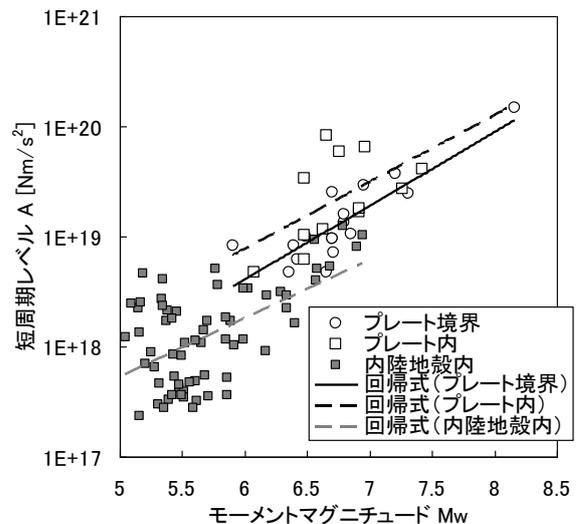


図-2 モーメントマグニチュードと短周期レベルの関係

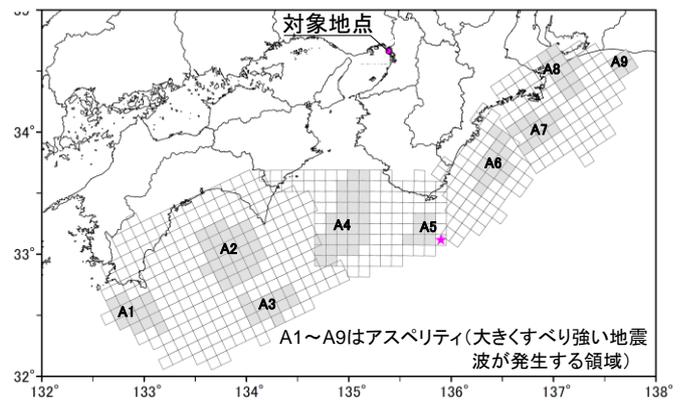


図-3 東南海・南海連動地震の震源モデル

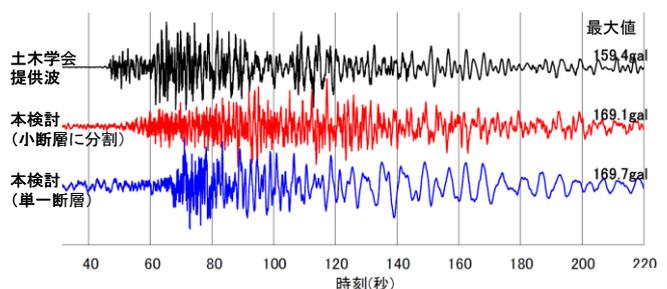


図-4 土木学会提供波と推定地震動の比較