

領域 4

コスト構造を改革し、道路資産の効率的な形成

部分係数設計法の適用性向上に関する調査検討

Study on application of partial factor design for existing bridges

(研究期間 平成 29～令和 2 年度)

道路構造物研究部 橋梁研究室
Road Structures Department
Bridge and Structures Division

室 長
Head
主任研究官
Senior Researcher
研究官
Researcher
交流研究員
Guest Research Engineer

白戸 真大
SHIRATO Masahiro
中尾 勝
NAKAO Masaru
大西 諒
ONISHI Ryo
平野 義徳
HIRANO Yoshinori

The performance of a whole bridge system is usually evaluated as individual parts, because there are no standards to evaluate the system reliability considering the evolution of plasticity at parts. This study seeks a standard design method to evaluate the bridge performance as a system including loads and load combinations as well as the limit states of structural members.

【研究目的と経緯】

H29. 7 に道路橋示方書が改定され、従来の許容応力度法が廃止され、部分係数法が導入された。また、限界状態設計法が導入され、部材の塑性域の変形特性を直接的に考慮する設計体系に移行した。新規に橋を架橋するだけでなく、既設橋の拡幅や大規模更新を行うときにもこれらの設計法を用いることで、信頼性を確保しつつ合理的な設計を実現できる可能性がある。特に、橋の設計では、完成後の状態だけでなく、施工中についても応力状態をコントロールする必要があり、既設橋の拡幅や大規模更新においては、既設部分を供用しながら新規の部材の追加をしたり、一部を除去して置き換えたりなどの施工も出てくる。したがって、架設中の設計に用いる荷重組み合わせ等の設定を案件ごとに行うことができればよいが、実際には施工期間等を考慮して決定する必要があるので一概ではない。そこで、今年度は、H29 年道示の適用性を向上させるために、架設時を念頭にしたときの荷重組合せや荷重係数、荷重組合せ係数の試算を行い、期間に応じた調整方法を検討するうえで基礎的なデータを得ることにした。

【研究内容】

1. 試算の方法と対象

試算は、H29 年の道路橋示方書の改定のために当研究室が荷重組合せの試算を行ったものである国総研資料第 1031 号の方法に準じるものとした。以後、荷重シミュレーションという。ある架橋地点を仮定したときに、各種の荷重の当該地点での発生を確率過程としてモデル化し、予め仮定する期間中の同時載荷過程を考慮し、期間中に橋に最も影響を与える荷重の組み合わせや荷

重どうしの比率を評価しようとするものである。各荷重の確率モデルは国総研資料第 1031 号と同じにするが、国総研資料第 1031 号では、複数の橋を対象に、評価期間を 100 年としたときに橋の各部でそれぞれもつとも厳しい断面力を発生される荷重の組み合わせを評価していた。一方で本検討では、図-1 に示すニールセンローゼ橋を対象に、また、評価期間については 1 年と 10 年を対象に荷重組み合わせを評価することにした。

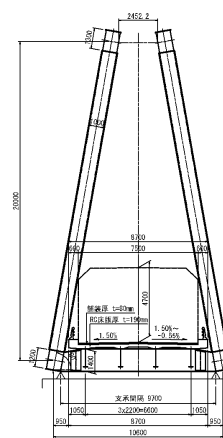
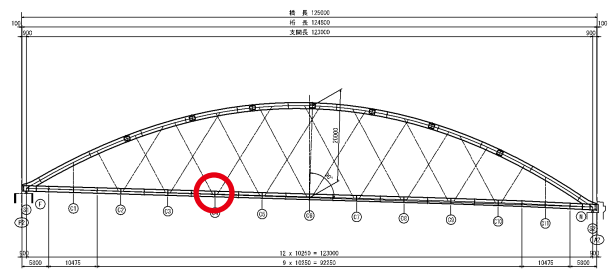


図-1 対象とする補剛桁位置

活荷重や温度変化の影響などは長くても日単位で変動するとも考えられる一方で、温度変化については季節の影響も受けると考えられ、風荷重は季節風や台風など年単位で変動するとも捉えられる。そこで、期間の違いによる荷重組み合わせの違いに特に着目し、風荷重の影響が大きな部材を含むニールセンローゼ橋を用いることにした。たとえば、評価期間が10年であれば、10年間にわたって確率過程として荷重の同時載荷を逐次与え続け、着目断面の最大の断面力とそのときの各荷重の内訳を求める。これを1000回繰り返し、1000個の断面力最大値(1000個の10年極値)から、10年間断面力最大値(極値)分布を作ることができる。本稿では、風荷重の影響が大きい断面として補剛桁の軸力に着目し、整理した結果を示す。

2. 荷重シミュレーション結果

補剛桁の軸力の最大値分布を求めた結果を表-1に示す。各期間について、地震の影響を考慮しない場合、または、考慮する場合のそれぞれについて荷重シミュレーションを行った。

表-1 補剛桁の設計断面力

荷重	設計断面力(kN)	断面力割合
温度変化の影響(TH)	5	0.00
風荷重(W)	4251	0.41
地震の影響(EQ)	6090	0.59
合計値	10346	1.00

これまでの許容応力度法を用いていたときに多く用いられてきた荷重組合せと許容応力度の割増し係数を表-2にまとめた。許容応力度の割増し係数は、複数の荷重が同時に同比率で作用することはまれなことも考慮して、断面力の大きさを補正する役割を有する。そこで、許容応力度法の荷重組合せを載荷したときに計算される断面力を許容応力度の割増し係数で除した値も求めた。

表-2 荷重組合せと割増し係数

本検討の荷重組合せ	①		①/②
	施工時断面力	許容応力度の割増し係数	
(D(死荷重)+) TH	5	1.25	4
(D(死荷重)+) W	4251	1.40	3036
(D(死荷重)+) EQ	6090	1.50	4060

そして、これらが荷重シミュレーションで得られた断面力1年又は10年最大値分布の中でどの程度の確率水準に相当するのかを計算した。結果を表-3に示す。表-1の断面力の確率統計的な位置付けは、評価期間1年の断面力最大値分布の非超過95%相当、又は、評価期間10年の極値となる傾向が見られた。つまり、架設時の状況を想定した荷重組合せや荷重係数は、評価期間を1年とした断面力最大値分布の極値(例えば非超過

確率95%値)を水準とし、キャリブレーションすることが考えられる。

表-3 評価期間別の確率統計的な比較

(a) ケース1: 温度変化の影響、風荷重(季節風・台風)、地震の影響を考慮

評価期間	最大値分布の特性(kN)				施工時断面力の非超過確率	
	平均値	標準偏差	変動係数	95%値	割増し係数考慮有	割増し係数考慮無
10年	5893	1162	0.197	6702	0.0%	84.1%
1年	5021	603	0.120	5698	0.0%	98.7%

注) 割増し係数考慮有は表-2の②/①の値、割増し係数考慮無は表-2の①の値を示す。

b) ケース2: 温度変化の影響、風荷重(季節風)、地震の影響を考慮

評価期間	最大値分布の特性(kN)				施工時断面力の非超過確率	
	平均値	標準偏差	変動係数	95%値	割増し係数考慮有	割増し係数考慮無
10年	2938	1849	0.629	6499	83.5%	94.0%
1年	1237	1110	0.897	2751	98.1%	99.1%

注) 割増し係数考慮有は表-2の②/①の値、割増し係数考慮無は表-2の①の値を示す。

次に、評価期間を1年としたときの荷重シミュレーションから得られた断面力最大値分布の非超過確率95%値周辺の断面力最大値のいくつかに着目して、荷重組合せとそのときの荷重係数(特性値を発生荷重で除した値)を表-4に示す。比較のために、道路橋示方書に示される荷重組合せと荷重係数と荷重組合せ係数の積の例を抜き出して示した。今回の結果から、本体設計の荷重組み合わせと荷重係数等を適用できる可能性も認められる一方で、死荷重(D)と地震の影響(EQ)の組み合わせについては、期間が短い場合には、D+EQの組み合わせに代えて、D+TH(温度の影響)+EQの組み合わせに置き換えられる可能性が確認された。

表-4 評価期間1年の断面力最大値分布における非超過確率95%値周辺の荷重係数との比較

	組合せ	TH	W	EQ
算出結果	(D+) TH+W	0.09~0.61	1.33~1.35	—
H.29 道示	D+W	—	1.25	—
H.29 道示	D+TH+W	0.75	0.94	—
算出結果	(D+) TH+EQ	0.06~0.63	—	0.42~0.53
H.29 道示	D+EQ	—	—	1.0
H.29 道示	D+TH+EQ	0.5	—	0.5

今後試算を追加することで、架設期間と架橋位置の特性に応じた橋の安全性評価方法設定の可能性について、さらに検討を進めたい。

【成果の活用】

道路橋示方書や補修補強に関する技術資料等の技術基準改定のための基礎資料として活用する予定である。

高強度材料の活用による橋梁構造の合理化に関する調査検討

Investigation on rationalization of bridge structure by utilizing high-strength materials

(研究期間 令和元～令和4年度)

道路構造物研究部 橋梁研究室
Road Structures Department
Bridge and Structures Division

室長
Head
主任研究官
Senior Researcher
研究官
Researcher
交流研究員
Guest Research Engineer

白戸 真大
SHIRATO Masahiro
中尾 勝
NAKAO Masaru
大西 諒
ONISHI Ryo
鈴木 克弥
SUZUKI Katsuya

In order to use high-strength steel for road bridges, it is necessary to establish a more rational design method using the partial coefficient method. In this study, we carry out load-bearing tests and analyze on girder and pier by changing the material, shape, stiffener arrangement, etc., to clarify the load-bearing characteristics, and propose a rational design method.

【研究目的及び経緯】

2017年に道路橋示方書（以下、道示とする）が改定され、設計法が許容応力度設計法から部分係数設計法へと変更された。部分係数設計法ではより合理的で信頼性の高い設計が可能となるが、今回の改定では、鋼桁の曲げ耐荷力についての基本的な基準耐荷力曲線などは踏襲されている。

一方、橋梁用高降伏点鋼板（以下、SBHS）の耐荷力に関する具体的な規定が盛り込まれ、今後はSBHSが広く道路橋に使用されることが期待される。部分係数設計法においては、基準耐荷力曲線を見直すことにより、より合理的な設計が可能となるため、実験や解析により耐荷力特性を把握することが不可欠である。

【研究内容】

本研究では、今後の基準耐荷力曲線改定の根拠となる基礎資料を収集するべく、SM490Y、SBHS500を用いた鋼I桁を製作し、曲げのみおよび曲げとせん断を同時に受ける鋼I桁の静的載荷試験を実施した。また、ウェブの面外座屈に起因する耐力の低下を把握し、桁の耐荷力を規定するために、ウェブの面外変位にも着目し、耐荷力との関係性について考察した。

(1) 材料特性

今回使用した鋼材のSM490YとSBHS500の荷重ひずみ曲線を図-1に示す。最大荷重/降伏荷重は、SM490Yでは1.3～1.4倍程度であるのに対し、SBHS500では1.02～1.08と極めて低い、つまり

SBHS500は降伏荷重到達後、ほとんど荷重の増加がないまま、急激にひずみが増加することがわかる。

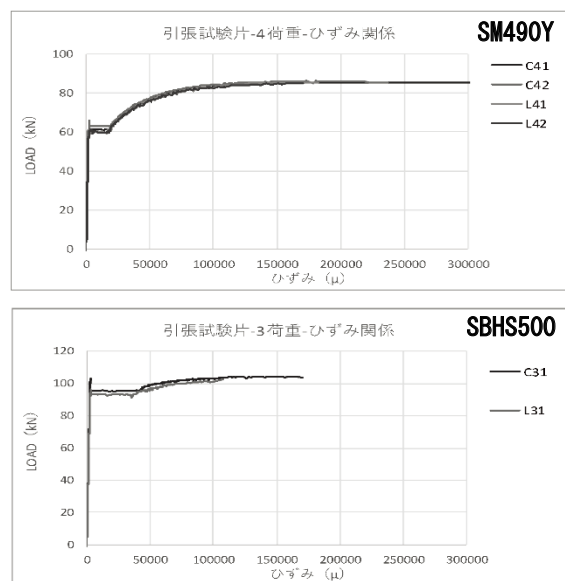
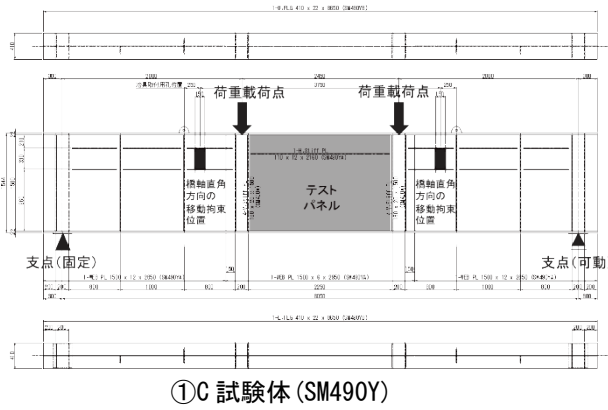


図-1 荷重ひずみ曲線

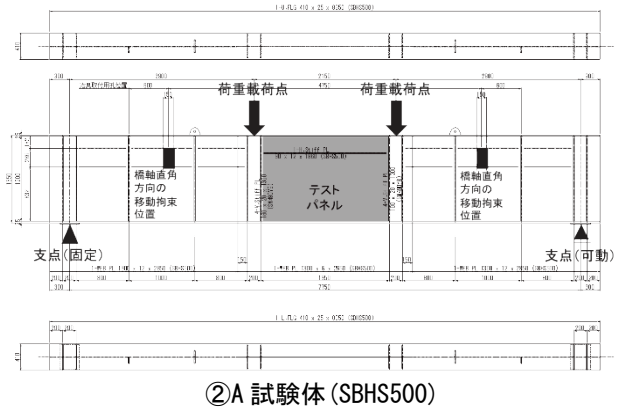
(2) 桁試験体

今回比較のために用意した試験体の形状を、図-2に示す。

試験体は材質以外のパラメータの考え方は同様としている。具体的には、フランジの幅は十分広くすることにより、桁の曲げ破壊を確実に発生させるプロポーションとしたうえで、腹板の幅厚比を道示の最小から緩和（1.2倍）している。載荷は曲げ載荷として最大荷重まで繰り返し載荷としている。



①C 試験体 (SM490Y)



②A 試験体 (SBHS500)

図-2 試験体図

【研究成果】

各桁試験体の荷重試験結果図-3 に示す。

従来の鋼材 (SM490Y) を使用した、試験体 C の荷重変位曲線を見てみると、降伏荷重から終局荷重まで約 55% 程度荷重が増加している。また、降伏後の変形についても、実験では破壊までいたってはいないものの、急激な荷重低下がおこらない範囲で $3\delta_y$ 以上あることが分かる。

一方、SBHS500 を使用した、試験体 A の荷重変位曲線を見てみると、降伏荷重から終局荷重まで約 15% 程度しか荷重が増加してしない。また、降伏後の変形についても、 $1.5\delta_y$ 程度で支持荷重が降伏荷重程度まで落ちている。

一方で、ウェブの面外変形を見てみると、試験体 C は最大荷重時ですでに大きな面外変形が発生しており、最大荷重後は急激に増加していることが分かる、このことより、試験体 A は最大荷重後の挙動として構造的に安定していると言える。

これは (1) で示したように、材料自体の特性が影響しており、従来の鋼材をそのまま SBHS に置き換えた場合、降伏強度は材料特性通りに高くなるが、降伏後の挙動を考慮して部分係数等を適切に設定する必要があることを示唆する。

【考察】

上述のように、部材の終局状態までを考慮する場合、桁の材料として、SBHS 材を使用すると変形性能は低くなるものの、面外変形が抑制され、安定した挙動が得られるというメリットがある。

一方で、設計上基本的に降伏を許さない部材 (鋼製橋脚の隅角部、桁の補剛材) に採用することにより、合理的な設計が可能となることが期待できる。

具体的には、鋼製橋脚の隅角部の場合、従来の鋼材を用いて設計を行うと、非常に板厚が厚くなり、死荷重増加、製作性の低下、輸送時の問題が発生するが、こういった箇所の母材およびリブに SBHS 材を用いることにより、上記の問題を解決する一つの方法となりうる。

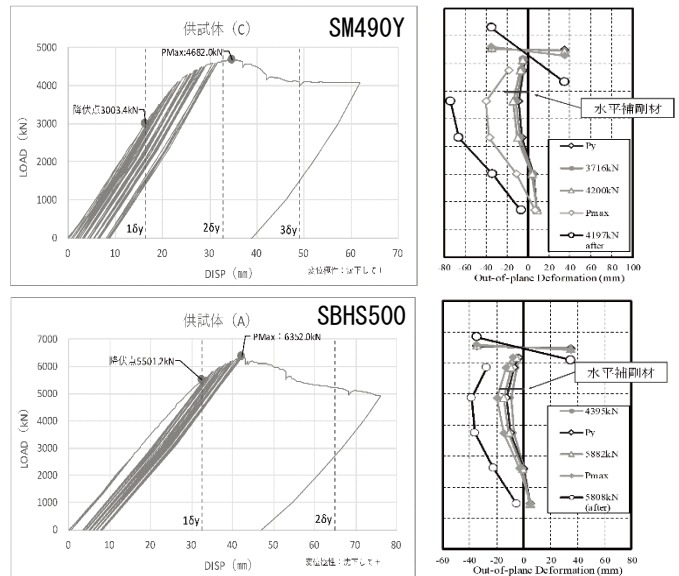


図-3 荷重変位曲線およびウェブの面外変形

また、桁やアーチの圧縮材の補剛材として、SBHS を使用することにより、桁が降伏した後も補剛材が降伏しないため、桁の座屈強度が高まることも期待できる。

しかし、これらの材質を組み合わせた断面は実験結果も少なく、どのような荷重変位履歴をたどりどのような終局状態に至るかは、不明な点が多いため、今後実験で検証を進める必要がある。

【成果の活用】

桁の耐力に関しては、引き続きパラメータを変えた試験をおこない。ハイブリット化やディテールの改善により、残留変形が小さく、降伏後の残存耐力、変形性能が確保される構造の提案を目指す。

また、鋼製橋脚についても、SM580 や SBHS 材の使用時の、具体的な挙動を実験により確認することで、鋼製橋脚への高強度材の使用方法を明確にすることを目指す。

これらの成果は、示方書の改定時に新たな知見として用いることができる。

土工構造物等の要求性能に対応した変状評価、性能向上に関する調査検討

Study on deformed state evaluation according to required performance and performance improvement of substructures
(研究期間 平成 29～令和元年度)

道路構造物研究部 道路基盤研究室
Road Structures Department,
Pavement and Earthworks Division

室長
Head
主任研究官
Senior Researcher

渡邊 一弘
WATANABE Kazuhiro
藤原 年生
FUJIHARA Toshio

Focusing on the cut method surface irregular form of the existing road earthwork structure is unclear, the odd grasp method, based on the latest technical trends, to organize the applicability and variation grasping method of the technology.

【研究目的及び経緯】

道路土工構造物の地震や豪雨による被害が依然として多い。平成 27 年に「道路土工構造物技術基準」が制定されて要求性能を求めているが、定性的な表現が多くなっており、既設構造物の損傷形態の解析や性能評価手法の確立が急務となっている。本年度は、既設の道路土工構造物のうち変状形態が複雑である大規模切土法面に着目し、変状の把握方法について、最新の技術動向を踏まえて、技術の適用性や変状把握方法について整理するものである。

【研究内容】

本研究では、切土法面の点検方法と新技術の整理を行い、法面変状のうち「はらみだし」に着目して検出できる技術を整理し、点群データを活用する技術を抽出した。また、導入上の課題検証のため MMS (モバイルマッピングシステム) を主体に法面の変状の精度確認や一連区間での適用性の確認を行い、点群密度や計測方法の精度確認と留意点を整理した。

【研究成果】

1. 長大切土法面の点検方法と新技術の整理

長大切土法面点検の実施項目ごとに新技術の適用性を整理し、「はらみだし」に着目して、技術の適用性を整理した。

(1) 新技術の適用性

道路土工構造物点検要領や道路防災点検の手引き等のマニュアル類を参考にレーザー測量による点群取得技術の適用にあたっての点検フローと実施内容を個別に整理した。また、点検方法の「事前準備」、「現地調査」、「点検結果とりまとめ」、「維持管理の検討や次回点検」の各場面における課題と解決方法も整理した。

(2) 変状状況 (はらみだし) に着目した点検方法

変状のうち目視では捕らえにくい「はらみだし」に着目して、適応する技術の整理を行った。また、点検技術の技術的特徴、データ密度、精度解像度等の目安、適用可能な部位、制約条件、主な活用例、コストなどについて整理した。

2. 大規模切土法面の変状検出技術の課題検証

(1) 実現場でのデータ取得

1. を踏まえ、西九州自動車道(唐津伊万里道路)の大規模切土法面(法枠工、モルタル吹付)を対象に現場検証を行うこととし、現地計測(MMS計測、TLS(地上レーザースキャナ)計測)と既存 UAV 計測データを整理した。写真-1 にそれぞれで計測したデータを示す。

(2) MMS による計測範囲の検証

MMS による計測では、切土法面高さ 12.0m 程度まで再現することができるが、小段のある 5.0m 付近については、点群データ欠損部があるため、細部形状が再現できない部分がある。

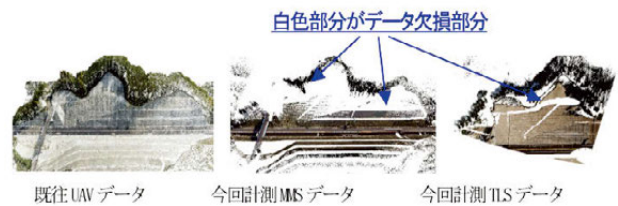


写真-1 点群データの全体図

表-1 UAV・TLSとMMSの比較

機材	データ取得範囲	データ精度	計測コスト	解析コスト	備考
UAV	◎	△	△	○	<ul style="list-style-type: none"> データ取得範囲が最も優れている 機器の特性上、点群密度が低い(地物の細かな形状は点群で再現できない) 事前に飛行許可を得る必要がある 計測時間は約1時間である 解析時間は約1時間である
TLS	○	◎	△	○	<ul style="list-style-type: none"> オクルージョン(他の地物の死角)による点群欠損が一部みられるが、データの取得範囲は大きい 点群密度が高く、地物の細かい形状が点群で再現できる 道路上に機器を設置するため、道路使用許可申請が必要 計測時間は約3時間である 解析時間は約1時間である
MMS	△	○	◎	○	<ul style="list-style-type: none"> 計測位置から約20mの範囲までしか点群を取得できない 点群密度が高く、地物の細かい形状が点群で再現できる 計測するに当たり、特別な許可は不要 計測時間は約1時間である 解析時間は約1時間である

(3)MMS を補足する TLS・UAV の計測

MMS は通常の車両走行で高精度なデータを短時間で低コストに取得が可能である。しかし、前述のとおり小段部や法面上部では点密度が低下することから、調査対象の範囲や規模、法面形状などに応じて、TLS や UAV での補足が必要である。

UAV は、広範囲なデータ取得が必要な現場においては有効である。しかし、点群密度が比較的粗いことや飛行許可等に留意が必要である。

TLS のデータ取得範囲は、UAV と MMS の中位に位置する。遮蔽物などによる点群欠損が一部みられるが、高精度で MMS の計測範囲より広いデータ取得が可能である。道路上への機器設置条件、計測時間、コストなどに留意が必要である。表-1 に UAV・TLS と MMS の比較を示す。

(4)点群表示システム

点群データを有効に活用するツールとして、点群を詳細かつ高速で閲覧できるシステムの汎用版が既に開発されている。これらのシステムを活用することにより、MMS 点群、カメラ画像を一元的に確認できるため、計測時点の法面の詳細な形状の表示が可能になり、法面点検時に法面の状況を迅速、的確に把握できる。

(5)はらみだしの模擬検証

MMS で取得したデータにより、基準面解析を利用したデータ解析を行った。MMS 計測で 2cm 程度のはらみ出しの検出に適用できることを確認した。図-1 にはらみだしの抽出結果を示す。

計測した点群データを活用することにより、目視で把握できない変状を把握できるようになれば、点検精度の向上や作業の効率化に寄与すると考える。

なお、基準面解析の特性より、対象法面の形状や基準面の選択方法が抽出精度に影響を及ぼすため、他の法面形態に対する同手法の適用については個別の検討が必要である。

(6)2 時期点群データの解析手法の検証

2 時期の点群データの差から、法面の変状（はらみだし）の検出精度の確認と計測方法の組み合わせについて、現場での作業効率や、解析の効率、変状の抽出精度の整理と評価を行った。

解析手法の初期値は TLS などにより高密度な点群を取得し、初期値に対する比較データは MMS で点群を取得し、自動で誤差を補正する方法が最も効率よく、抽出精度も高いことが明らかとなった。なお、TLS で広範囲の点群データを整備するには、コスト面などに課題がある。

なお、変状規模が大きい場合は、変状の抽出精度に対する高い要求性能が求められないと考えられるため、経済的なデータの取得方法を選択できる可能性がある。

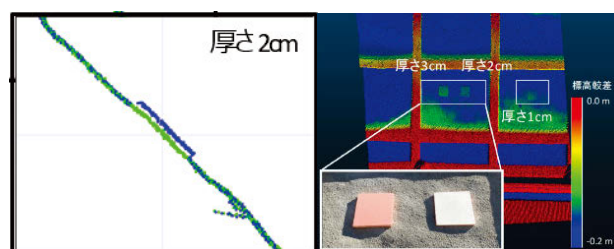


図-1 模擬はらみだしの抽出結果

3. 一連区間の点検における点群データの適用性

一連の区間(IC 間)の定期点検を想定した効率的な MMS や TLS などの点群データの取得方法や点群データの重ね合わせを行う上での課題を整理した。

(1)一連区間の法面現況と定期点検計画の把握

唐津伊万里道路をフィールドとして、区間内の長大切土法面において MMS などにより点群データを取得して、点検計画の策定上の留意点などを整理した。

(2)有効な点検手法の提案

実証現場での一連区間では、切土 3 段未満は MMS で計測し、その他は目視点検かあるいは TLS 計測することが、コスト面等から当面活用できる範囲と考えられ、切土法面の約 3.9 万㎡のうち 2.5 万㎡ (64%) がカバーできると想定された。また、調査対象が盛土法面の場合については、MMS 計測で法面部のデータ取得が困難であるため、TLS 計測の路面部のデータ解析手法の改善や UAV 計測の実施(広域の盛土の場合、上空利用が可能な場合あり)または従来点検による目視等の効率化の検討が必要である。

4. 今後の課題

・点群データ処理のあり方

点群データは、異なる手法で取得した場合や 2 期間で取得した場合など、結合処理にデータ補正等が必要であり、これらの点群データの処理方法の効率化が課題である。手動や自動補正など手法の統一が必要である。また、取得方法や点密度、精度も個別の法面点検に適した仕様を検討していく必要がある。

・点群データ取得・取扱上の留意点

レーザーの特性から水たまりなどでは乱反射し、データに歪みや欠損が生じることに留意が必要である。

点群データは、法面のほかトンネルや橋梁などの施設点検などにも活用され始めているため、路線としてのデータ管理の方法が課題である。

【成果の活用】

道路土工構造物の維持管理に必要なデータの蓄積方法と設計条件等への反映の基礎データの取得方法についての具体的な提案

デバイスを用いた道路橋の耐震対策技術に関する調査検討

Research on seismic design for road bridges using seismic control device

(研究期間 平成30～令和元年度)

道路構造物研究部 構造・基礎研究室 Road Structures Department Foundation, Tunnel and Substructures Division	室 長 Head	七澤 利明 NANAZAWA Toshiaki
社会資本マネジメント研究センター 熊本地震復旧対策研究室 Research Center for Infrastructure Management Kumamoto Earthquake Recovery Division	室 長 Head 主任研究官 Senior Researcher	西田 秀明 NISHIDA Hideaki 宮原 史 MIYAHARA Fumi

Seismic control devices can be used for seismic design of road bridges. However, performance requirements of seismic control devices are not specified concretely in Specifications for highway bridges. In recent earthquakes, it was observed that some seismic control devices could not show its performance required in design stage. Therefore, it is needed to specify performance requirements of seismic control devices to utilize the devices appropriately.

This report considered performance requirements, items to verify the performance, and test method to verify the performance of seismic control devices.

【研究目的及び経緯】

道路橋示方書（以下、道示）では、橋の耐荷性能の照査に用いる橋の限界状態を、橋を構成する部材等の限界状態によって代表させる場合には、それぞれの限界状態を適切に設定し、組み合わせなければならないことが規定されている。これを受けて、鋼部材やコンクリート部材に対しては具体的な要求性能が規定されている。しかし、地震動により生じる橋の振動の増幅や持続の抑制・低減を図ることを目的として用いる制震デバイスに対しては具体的な要求性能は規定されておらず、道路橋に制震デバイスを用いる場合、開発者が個別に行った検証内容を踏まえて、設計者が当該橋への適用方法を個別に判断している。また、近年の地震においては、設計で想定した挙動と実際の挙動の乖離に起因する損傷事例も発生している。例えば熊本地震では、耐震補強として端支柱等の斜材に軸降伏型の制震デバイスが取り付けられた鋼アーチ橋において、作動痕跡が確認されないまま端支柱下端の接合ボルトが全て破断する損傷が生じた。

以上の背景から、道路橋の耐震性向上に資する制震デバイス技術が適切に適用されるよう、要求性能と、性能の検証手法を提示する必要がある。そこで本研究では、制震デバイス技術の要求性能、性能を確認するための検証項目、性能検証試験法を検討した。

【研究内容】

1. 制震デバイス技術の実態に関する調査

2. と 3. の検討の基礎資料を得るため、制震デバイス

を用いた耐震補強が行われることが想定される構造形式の一つとしてアーチ橋に着目して制震デバイス技術の実態を調査した。調査は、1995年以降に耐震補強を目的に制震デバイスが用いられた国管理国道のアーチ橋35橋を対象とした設置状況調査、及び同年以降に発行された土木学会論文集等の文献調査により行った。

2. 制震デバイス技術の要求性能及び性能を確認するための検証項目の検討

1. で調査する実態を踏まえ、制震デバイス技術の要求性能と、性能を確認するための検証項目を検討した。検討にあたっては、制震デバイス技術の特性を踏まえ、道示の体系と整合するように、材料、品質、設計、施工、維持管理の観点から要求性能及び性能を確認するための検証項目を検討した。

3. 制震デバイス技術の性能検証試験法の検討

2. で検討する制震デバイス技術の要求性能のうち、上部構造や下部構造を構成する斜材として制震デバイスを設置する場合の減衰性能の検証を想定した性能検証試験法を検討した。1. で調査する実態を踏まえ試験装置を試設計した上で3次元FEMによる数値解析を行い、性能検証試験を行う上での留意点を整理した。

【研究成果】

(1) 制震デバイス技術の実態に関する調査

設置状況調査の結果から、アーチ橋に用いられる制震デバイスとしては架構構造に斜材として設置される軸降伏型ダンパー（図-1左）と上下部構造間を接続する粘性ダンパー（図-1右）が多いことが確認された。

また、軸降伏型ダンパーの取付部のガセットプレート
の設計は、道示に示される通常の斜材を想定した設計
法が適用されることが多く、地震時の破壊順序までは
考慮されていないことが分かった。文献調査の結果か
ら、アーチ橋への適用を想定して開発された制震デ
バイス技術には軸降伏型ダンパーが多いことが確認さ
れた。また、軸降伏型ダンパーに対して開発者が行っ
ている性能検証は単軸載荷試験と斜め載荷試験による
ものが多いこと、主な性能検証項目は変位-抵抗力特性
と、速度や温度等に対する依存性であることが確認さ
れた。

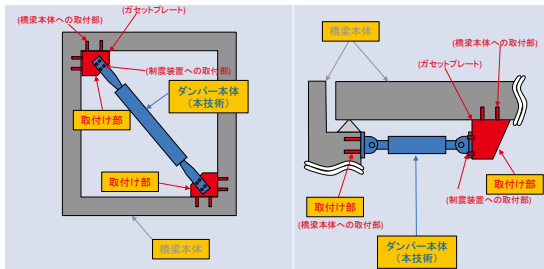


図-1 アーチ橋に設置されるダンパーの例

(2) 制震デバイス技術の要求性能及び性能を確認するための検証項目の検討

制震デバイス技術には多種多様な制震原理や使われ
方等が想定されるが、本研究では道路橋の「上部構造」
「下部構造」「上下部接続部」の少なくともいずれかを
構成する部材として使用することを前提としたものを
対象に検討を行った。このように扱うことができる部
材を対象にしていることから、制震デバイスの要求性
能は、道示に規定される設計の基本理念に照らして、
耐荷性能、耐久性能、使用材料、設計、施工、維持管
理の各観点から特性が明らかであることと整理した。
そして、1. で調査した実態を踏まえ、要求性能の各観
点から性能を確認するための検証項目を表-1 に示す
とおり整理した。整理は、「上部構造」「下部構造」「上
下部接続部」のいずれを構成する部材として使用する
か、制震原理、性能を保证する前提となる条件が明ら
かにされることを前提に、制震原理に依存せず普遍的
な検証項目となるよう行った。

各種の依存性に関する評価項目については、1. で調

表-1 制震デバイス技術の性能を確認するための検証項目 (案)

項目名	内容	
耐荷性能に関する項目	変位-抵抗力の特性	変位-抵抗力曲線の定義が明確となっており、またその再現性が制御できていること
	速度依存性	振幅速度が減衰効果の特性値に及ぼす影響度が明らかであること
	温度依存性	外気温が減衰効果の特性値に及ぼす影響度が明らかであること
	振動数依存性	振動数が減衰効果の特性値に及ぼす影響度が明らかであること
	変位依存性	変位が減衰効果の特性値に及ぼす影響度が明らかであること
	繰返し載荷回数による依存性	繰返し回数が減衰効果の特性値に及ぼす影響度が明らかであること
	荷重載荷方向の変化による依存性	載荷方向の違いにより生じる2次応力などが減衰効果の特性値に及ぼす影響度が小さい又は評価可能で対処方法が明らかであること
耐久性能に関する項目	本技術の耐久性の確保の方法が明らかであること	
材料に関する項目	材料の機械的性質・力学的特性・化学的性質	減衰性能や、減衰性能を確保するために求められる耐久性の確保のために用いる材料の特性が明らかであること
品質管理に関する項目		出荷される製品すべてに対して本技術の減衰性能に係る品質が担保されることを確認できる管理方法が明らかであること
設計に関する項目	解析モデルに関する項目	橋の動的解析を行うにあたって、減衰力に係る解析モデル設定に必要な情報が明らかであること
	取付部に関する項目	保証する性能を発揮するために、橋の設計者が取付部の設計を行うにあたって考慮する必要がある条件等が明らかであること
施工に関する項目	施工方法に関する項目	橋の設計にあたって考慮する必要がある、橋本体への追加(新設橋、既設橋とも)や、既設部材との交換に関する施工の条件等が明らかであること
維持管理に関する項目	点検・診断に関する項目	橋の設計にあたって考慮する必要がある、橋の性能の前提とする維持管理の条件が明らかであること
	維持方法に関する項目	橋の設計にあたって考慮する必要がある、橋の性能の前提とする維持管理のための行為が明らかであること
その他	その他の留意事項	本技術の道路橋での使用に際し、上記以外で考慮する必要がある重要性の高い事項が明らかであること

査した実態から開発者毎に提示する様式が異なること
が想定されたため、検証データを取りまとめる際の様
式も具体的に提示した。取付部の設計に関する評価項
目では、当該技術が保証する性能を発揮するために、
橋の設計者が取付部の設計を行うにあたって考慮する
必要がある条件等が明らかであることを要求した。

(3) 制震デバイス技術の性能検証試験法の検討

制震デバイスの性能検証を目的とした試験では、取
付部が制震デバイスに先行して破壊しないことが求め
られる。本研究では、図-2 に示すように斜材として設
置した軸降伏型制震デバイスを水平方向に繰返し載荷
して減衰性能を検証する試験を対象に、3次元FEMに
よる試験体及び試験装置の変位漸増解析を実施し、試
験目的に沿った破壊形態となるか確認を行った。なお、
性能検証試験装置は、長さ約3m、降伏軸力750kNの軸
降伏型ダンパーを斜めに設置し、降伏軸力の1.5倍ま
で水平載荷が可能となるよう設計した。

解析結果(最大荷重時の変形)を図-2に示す。制震
デバイスが降伏した後、取付部の腹板が降伏し、最終
的に腹板に局部座屈が生じた。最大荷重時の制震デ
バイスの降伏ひずみは終局ひずみを超過しており、取
付部が先行して破壊することなく減衰性能を検証し得
ることが確認された。一方、この基本ケースに対して、
制震デバイスの諸元、取付部の諸元、面外方向の初期
変位等のパラメータを変化させたケースの解析結果か
らは、これらのパラメータに応じて損傷順序が変わり
得ることを確認した。このことから、性能検証試験に
あたっては、制震デ
バイスが挙動を保証
する範囲を明らかに
するとともに、その
挙動を保証する取付
部の設計を適切に行
う必要がある。

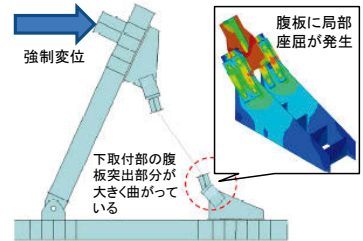


図-2 解析結果(最大荷重時変形)

【成果の活用】

本調査結果は、
新技術活用システム(NETIS)の技術公募への活用や道
示等の技術基準類へ反映予定である。

道路事業における入札・契約方式の実用性・実効性向上に関する研究

Study on improvement of practicality and effectivity on the bidding and contracting system

(研究期間 令和元～令和3年度)

社会資本マネジメント研究センター 社会資本マネジメント研究室

Research Center for Infrastructure Management

Construction and Maintenance Management Division

室長	中洲 啓太	主任研究官	吉野 哲也
Head	NAKASU Keita	Senior Researcher	YOSHINO Tetsuya
主任研究官	大城 秀彰	主任研究官	光谷 友樹
Senior Researcher	OHSHIRO Hideaki	Senior Researcher	MITSUTANI Yuki
研究官	井星 雄貴	研究官	鈴木 貴大
Researcher	IBOSHI Yuki	Researcher	SUZUKI Takahiro
交流研究員	石本 圭一	交流研究員	大野 琢海
Guest Research Engineer	ISHIMOTO Keiichi	Guest Research Engineer	OONO Takumi
交流研究員	小林 靖典		
Guest Research Engineer	KOBAYASHI Yasunori		

In order to improve the quality and productivity of public works, NILIM is carrying out study on cross staging construction and maintenance management system from survey, planning to management. The objective of this study is to improve diverse procurement methods such as the technical proposal and negotiation method and Public Private Partnership for project acceleration.

【研究目的及び経緯】

「公共工事の品質確保の促進に関する法律」の成立を契機に、国土交通省発注の工事では、平成17年度より総合評価落札方式を拡大し、また、調査・設計等業務においても、平成20年度より発注方式の1つとして同方式を本格導入している。令和元年6月に公布・施行された「公共工事の品質確保の促進に関する法律の一部を改正する法律（令和元年法律第三十五号）」を踏まえ、国土技術政策総合研究所では、工事の性格、地域の実情等に応じた多様な入札契約方式に関する研究を行っている。

本稿は、技術提案・交渉方式に関する検討結果、事業促進 PPP、維持工事の実施状況、工事・業務の入札・契約方式の適用状況に関する調査結果について報告する。

【研究内容・研究成果】

(1) 技術提案・交渉方式

令和2年2月現在、国土交通省直轄工事では、表-1の13工事で技術提案・交渉方式が適用されている。施工に着手している工事について、詳細設計や技術協力の報告書等により技術協力、工事の実施状況を確認するとともに、発注者、設計者、施工者にヒアリングを行い、技術提案・交渉方式の課題、及び課題への対応策

を整理した。本稿では、手順・役割分担、技術協力等の期間について報告する。

表-1 技術提案・交渉方式の実施状況

No	公告月	地整	契約タイプ	工事件名
1	H28.5	近畿	設計交渉・施工	国道2号淀川大橋床版取替他工事
2	H28.7	九州	技術協力・施工	熊本57号災害復旧二重峠トンネル(阿蘇工区)工事
3		九州	技術協力・施工	熊本57号災害復旧二重峠トンネル(大津工区)工事
4	H28.12	北陸	技術協力・施工	国道157号犀川大橋橋梁補修工事
5	H29.9	中国	技術協力・施工	国道2号大樋橋西高架橋工事
6	H30.1	中部	技術協力・施工	1号清水立体八坂高架橋工事
7	H30.5	近畿	技術協力・施工	名塩道路城山トンネル工事
8	R1.6	近畿	技術協力・施工	赤谷3号砂防堰堤工事
9	R1.8	九州	設計交渉・施工	隈上川長野伏せ越し改築工事
10	R1.9	四国	技術協力・施工	国道32号高知橋耐震補強外工事
11	R1.9	九州	技術協力・施工	鹿児島3号東西道路シールドトンネル(下り線)新設工事
12	R1.10	東北	技術協力・施工	国道45号新飯野川橋補修工事
13	R1.12	九州	技術協力・施工	国道3号千歳橋補修工事

1) 設計・技術協力業務の手順・役割分担

設計・技術協力業務は、設計業務（設計者が実施）と技術協力業務（施工者（優先交渉権者）が実施）を発注者が柱となり三者（発注者、施工者（優先交渉権者）、設計者）の情報・知識・経験を融合させ進めることが重要である。三者から、技術提案・交渉方式が初めての経験で、設計・技術協力業務の初期段階で何から着手してよいかわからないといった意見が多くあった。また、発注者から、設計・技術協力の手順や役

割分担の理解が進んでいない結果、受身の姿勢になっているとの意見があった。一方、技術協力業務の初期段階で実施した前提条件や不確定要素の整理、追加調査や協議が手戻りを回避するために有効であったとの意見があった。これらの意見を踏まえ、表-2 に示す初期の対応を充実させた設計・技術協力業務の進め方、役割分担を整理した。

表-2 設計・技術協力業務の役割分担（初期対応抜粋）

項目	発注者	優先交渉権者	設計者
前提条件及び不確定要素の整理	・前提条件等の不明点及び不確定要素の確認	・前提条件等の不明点、不確定要素の提示	・前提条件等の不明点及び不確定要素の整理(資料作成)
優先交渉権者の技術提案の適用可否の検討	・技術提案の適用可否の判断及び設計者への指示	・技術提案に関する技術情報(機能・性能、適用条件、コスト情報等)の提出	・技術提案の内容の確認 ・設計に反映する上での課題の有無や内容の整理
追加調査	・追加調査の必要性の判断、優先交渉権者、設計者への指示 ・追加調査の実施	・追加調査の提案 ・追加調査の実施	・追加調査の提案 ・追加調査の実施
地元及び関係行政機関との協議	・地元及び関係行政機関との協議の必要性の判断 ・優先交渉権者、設計者への資料作成等の指示 ・協議の実施	・地元及び関係行政機関との協議支援(資料作成、同行等)	・地元及び関係行政機関との協議支援(資料作成、同行等)
学識経験者への意見聴取	・学識経験者への意見聴取の必要性の判断 ・優先交渉権者、設計者への資料作成等の指示 ・意見聴取の実施	・学識経験者への意見聴取の支援(資料作成、同行等)	・学識経験者への意見聴取の支援(資料作成、同行等)

2) 設計・技術協力業務の期間の設定

設計・技術協力業務の期間について、提案の自由度を広げず、設計変更の考え方を発注者間で合意することで、短い設計期間に対処した工事があった。一方で、十分な期間を確保した工事では、追加調査や協議の実施、比較的自由度の高い提案の設計への反映が可能になっていることが確認された。これらを踏まえ、工事の緊急度、提案の自由度等の工事特性を踏まえた、設計・技術協力の設定期間の例を整理した。

(2) 事業促進 PPP

近年、国土交通省直轄の大規模災害復旧・復興事業、大規模事業において、調査・設計等の上流段階から官民双方の知識・技術・経験を融合させることにより、効率的な事業マネジメントを行う事業促進 PPP の適用が広がっている。必要な時に速やかに事業促進 PPP を導入しやすい環境を整えるため、事業促進 PPP を導入する際に参考となる実施方法や業務内容等を明確にした「国土交通省直轄の事業促進 PPP に関するガイドライ

ン(国土交通省、平成 31 年 3 月)」が策定されている。ガイドライン策定後、実際に提出された「業務記録簿」のデータ集計・分析により事業促進 PPP の具体的な業務内容を整理した。ガイドライン策定により技術的知見を必要とする業務へと業務内容がシフトしていること、業務によっては受注インセンティブ向上につながる常駐・専任の緩和等の可能性があることを把握した。

(3) 維持工事

国土交通省直轄(北海道開発局、沖縄総合事務局を含む)で平成 30 年度契約中の維持工事のうち、河川・道路の日常的管理に関する工事(緑化、照明、清掃作業のみは除く)を対象にアンケートを行い、維持工事の実施状況を把握した。道路事業においては 1 者応札が約 6 割と高い割合を占めていること、連続して受注している割合が比較的高いこと、維持工事受注者の災害協定締結状況等を把握した。また、これら実施状況を踏まえ、包括・個別二段階契約の実施手法を提案した。

(4) 工事・業務の入札・契約方式

工事については、総合評価落札方式を適用した工事を対象に、工事種別、工種、工事価格、競争参加者数、契約後の条件変更の有無に関する事項、工事の不確実性に関する内容を整理し、規模に比して競争参加者数が多い、または少ない工事の特徴を把握した。

調査・設計業務については、地方整備局等がプロポーザル方式・総合評価落札方式・価格競争で発注した業務を対象に、発注方式選定表に示された発注方式との適合率、入札・契約方式と成果品質との関係を経年的に整理し、業務内容に応じた適切な発注方式選定のための現状、課題を整理した。発注方式の違いが成果品質に及ぼす影響は必ずしも大きいものではなく、発注方式の選定は、手続きの効率性の観点を含め、総合的に検討される必要があることを確認した。

【成果の活用】

本研究の成果は、発注者責任を果たすための今後の建設生産・管理システムのあり方に関する懇談会の資料等に反映された。

また、技術提案・交渉方式の検討成果は、国土交通省直轄工事における技術提案・交渉方式の運用ガイドライン(令和 2 年 1 月)に反映された。

CIM 展開のための 3 次元データ利活用の高度化に関する調査

Research on advanced utilization of 3D data for CIM development

(研究期間 平成 29～令和元年度)

社会資本マネジメント研究センター	室 長	池田 裕二
社会資本情報基盤研究室	Head	IKEDA Yuji
Research Center for Infrastructure Management	主任研究官	青山 憲明
Information Platform Division	Senior Researcher	AOYAMA Noriaki
	主任研究官	井上 直
	Senior Researcher	INOUE Tadashi
	研究 官	郭 栄珠
	Senior Researcher	KWAK Young-Joo
	研究 官	寺口 敏生
	Researcher	TERAGUCHI Toshio
	交流研究員	坂藤 勇太
	Guest Research Engineer	SAKAFUJI Yuta

To improve the quality of infrastructure maintenance work and to prevent design errors on the Building / Construction Information Modeling, Management (BIM/CIM) at the design stage, our division developed the prototype of the 3D simulation for construction inspection and modified standard documents of the BIM/CIM utilizing in a practical research application. This report proposed the basic perspective of data management on the BIM/CIM utilizing based on 3D model for dissemination of BIM/CIM.

【研究目的及び経緯】

国土交通省では、インフラの安全安心と建設生産性の向上を図るために、3次元データを活用した建設生産システムを構築し、公共調達の品質向上、コスト縮減、維持管理の高度化を達成することを目標として、BIM/CIMの導入普及に取り組んでいる。また、計画・設計から維持管理に至る全体の建設生産プロセスにおいて、3次元モデルを基軸とする ICT 基盤の建設生産・管理システムの開発に取り組んでいる。

本調査では、建設生産プロセス全体で3次元データ利活用の高度化に向けた技術開発のため、点検シミュレーションの機能要件の整理と維持管理における施工及び点検記録結果等の一元管理（登録、参照）方法を開発することを目指している。

【研究内容】

1. 設計段階における BIM/CIM を活用した点検シミュレーションのプロトタイプの開発

(1) 点検シミュレーションの機能要件に関する調査

設計段階で「橋梁を確実に近接目視できる」「支承を確実に交換できる」こと等を確認するため、「点検シミュレーション」に必要な機能要件と有効な場面を明らかにする。そのために、どのようなシミュレーションを実施し、実際の設計の品質向上や点検計画立案に役立つのかを検討し、必要な機能要件を整理する。

(2) BIM/CIM を活用した点検シミュレーションの評価

整理した利用場面及び機能要件をもとに、プロトタイプを開発し、その機能の有効性を評価する。道路管理者、点検業者、橋梁診断者を対象に点検シミュレーションの利用シナリオ案を作成し、ヒアリング調査に伴うデモンストレーションを実施し、点検シミュレーションの有効性の評価を行う。

2. 3次元モデルを活用した施工及び点検記録の一元管理方法

(1) 施工及び点検記録等を BIM/CIM 上に登録する方法の検討

本調査では、維持管理で必要な情報と、その利用頻度を明らかにする。次に、維持管理における施工及び点検記録の管理方法と、3次元モデル上の検索・参照方法を検討する。また、施工及び点検記録の属性として BIM/CIM 上で効率的に管理する方法（データの紐付け方式、ファイル管理方式）を検討する。調査の対象は、「橋梁点検」とする。

(2) BIM/CIM を活用した施工及び点検記録等の管理（登録、参照）の有効な利用場面の調査

施工管理および点検データを3次元モデルに登録し活用する有効な利用場面を検討する。有効な利用場面として、点検業者が点検結果等を BIM/CIM 上に登録して管理者が参照する一連の作業を点検業者及び管理者の視点で抽出する。

紐付け方式（直接・間接参照）、データ管理方式（構造全体、構成要素単位、各部材、ピンおよびテキストチャ単位等）、ファイル管理方式（フォルダ形式、ファイル名詳細設定、オブジェクトストレージ管理）等の計 80 通りの組み合わせうち、ニーズが高い利用場面（表-1）のデータ登録および参照にかかる手間やデータ検索の容易さ等の時間を計測する試行シナリオを作成し、実データを用いて候補となる計 13 通りの有効な利用場面案を試行する。

表-1 施工及び点検管理の有効な利用場面

	有効な利用場面	対象情報
点検管理	①画像からひび割れを検出して CAD データを自動的に作成し、時系列で比較	点検時の写真、点検調査書（損傷図）
	②点検結果を条件に色分け表示等で描画し、修繕計画の要否や修繕範囲を判断	点検調査書
	③対象部材の変状が進展しているかを確認するため、過去の変状図を並べて比較	点検調査書（変状図）
	④劣化の進行度の高い構造物の点検結果推移を確認	点検調査書
施工管理	①施工時の状況を確認	工事写真
	②鋼橋の各種試験結果に問題がないか確認	鋼橋製作結果(ミルシート等)
	③生コンクリートおよびコンクリート二次製品の品質記録表（骨材）を確認	生コンクリート品質記録表（骨材）
	④問題が発生した橋梁と同じ骨材を用いている橋梁を検索	生コンクリート品質記録表（骨材）

【研究成果】

(1) 点検シミュレーションの機能の有効性の評価

点検シミュレーションが具備すべき機能について、確認項目と確認方法から「画面上の機能」と「内部処理の機能」に大別し、維持管理への配慮事項、点検方法（直接目視の確認）、点検箇所へのアプローチ等の利用場面の有効性を評価した。

有効と評価される内、既存ソフトウェアの機能に新規機能を追加することで、実現可能な点検シミュレーションのプロトタイプを開発した（図-1 を参照）。開発した新規機能の利用のため、現場点検で利用することを想定した利用者マニュアルにとりまとめた。



図-1 点検シミュレーションの適用事例のプロトタイプ一部の画面（点検車両の干渉確認）

(2) 橋梁の施工及び点検モデルの評価

施工及び点検記録データは、土木工事における資料

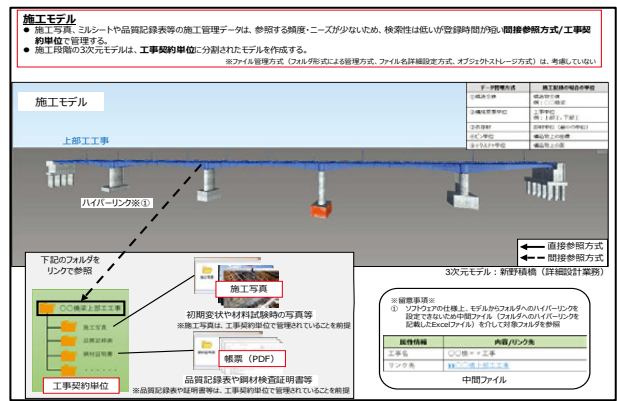


図-2 橋梁構造物の点検記録等を BIM/CIM 上に登録する施工モデルのイメージ

管理の業務効率化と維持管理に関する資料管理の効率性に寄与するか、巡回等に併せて日常的に行われる点検で使いやすいか、データ作成者の手間、データ検索のしやすさの観点で定量的に評価した。具体的な評価は以下の通りである。

施工記録データ（工事写真、ミルシートや品質記録表等）の管理方法は、損傷があった場合の原因究明に必要な情報であるが、参照回数は低いので、手間をかけずに紐づける方法で一元管理するのがよいと評価した。そこで、工事写真、品質記録表、ミルシートや品質記録表等は、検索性は低いが登録時間が短い間接参照方式を選定し、工事契約単位で管理することがよいと評価した。図-2 は、工事契約単位に分割された施工モデルに工事写真（帳票）と品質記録を間接参照方式のデータとして管理するイメージを示した。

点検記録データ（写真・損傷図等）は、前回の記録を参照するなど参照回数が多く、3次元モデル上で点検対象の構造体が損傷のある場所で紐づけて管理されると、検索・参照し易くなる。前回の記録の撮影位置と撮影写真を確認する手間がかかっているため、モデル上で撮影位置と撮影写真を確認可能な間接参照方式/ピン単位で管理することがよい。また、点検調査は、検索性は低いが登録時間が短い間接参照方式/径間単位で管理する。さらに、時系列で損傷が見られれば尚良い。

しかし、本調査に基づいた BIM/CIM 上で活用可能な維持管理モデルのデータ作成作業は、ソフトウェア環境に依存するため、関連ツール開発業者と継続的に調整していく等の中長期的な取り組みに推進していく必要がある。

【成果の活用】

本調査の成果の一部は、CIM 導入ガイドライン（案）の維持管理における BIM/CIM の利用方法や維持管理のための CIM モデル作成仕様の改定に反映している。また、本調査結果は、現場で試行可能な点検シミュレーションの開発等への活用が期待される。

土工構造物等の要求性能に対応した変状評価、 性能向上に関する調査検討

Study on deformed state evaluation according to required performance and performance improvement of substructures

(研究期間 平成 29～令和元年度)

道路構造物研究部 構造・基礎研究室
Road Structures Department
Foundation, Tunnel and Substructures Division

室長 七澤 利明
Head NANAZAWA Toshiaki
主任研究官 伊藤 浩和
Senior Researcher ITO Hirokazu
研究官 佐々木 惇郎
Researcher SASAKI Atsuo

With regard to road earthworks structure, technical standards were established in 2014 and the required performance was shown, but concrete checking methods corresponding to required performance are not sufficient. In this study, we are investigating and studying for the purpose of preparing the basic data necessary for considering the method of evaluating the function as roads of the section where the road earthwork structure exists.

【研究目的及び経緯】

道路土工構造物については、平成 26 年度に技術基準が制定され要求性能が示されたが、要求性能に対応した具体的な照査手法は明確に示されていない。本研究では道路土工構造物が存する区間の道路としての機能を評価する手法を検討する上で必要となる基礎資料の作成を目的に調査検討を行っている。

本調査では、道路土工構造物のうち従来型カルバートの適用範囲を超えるボックスカルバートの性能照査手法を検討する上で必要となる耐震設計法に関して、応答変位法及び応答震度法の二つの静的照査法による試算を行い、両照査法の比較分析を行った。

【研究内容及び研究成果】

1. ボックスカルバートの常時設計

ボックスカルバートの常時設計計算は、表-1 に示す CASE I～CASEIX の条件に対して実施した。常時設計は部材厚を標準的な厚さで設計した場合とやや厚めに設計した場合と 2 パターンを実施した。

表-1 試算ケース

CASE	内空幅 (m)	内空高 (m)	連数 (連)	土被り (m)	備考
I	6.5	5.0	1	0.5	従来型
II	6.5	5.0	1	1.5	従来型
III	6.5	5.0	1	5.0	従来型
IV	10.0	5.0	1	0.5	
V	10.0	5.0	1	1.5	
VI	10.0	5.0	1	5.0	
VII	14.0	5.0	1	0.5	
VIII	14.0	5.0	1	1.5	
IX	14.0	5.0	1	5.0	

※従来型とは“従来型カルバート”を示す

2. ボックスカルバートの耐震設計法に関する試算

2.1. 検討条件

本調査では、II 種地盤相当の地盤モデルを想定し(図-1)、想定地盤モデルに対し一次元等価線形解析を実施し、算出された地盤の収束せん断剛性を用いて躯体周辺部のばね(応答変位法では節点集中ばね、応答震度法では有限要素の剛性)を設定した。また、各計算手法では等価線形解析において躯体の頂底版間位置の相対変位が最大となる時刻の荷重状態(変位・加速度)を想定した。代表地盤モデルに対し H29 道路橋示方書に示されるレベル 2 地震動を与え、一次元等価線形解析によりカルバートの頂底版位置の相対変位が最大となる 1 波を抽出し、入力地震動として選定している(選定波: T2-I-2)。表-2 に各計算手法における地盤及び躯体の検討条件の概要を示す。

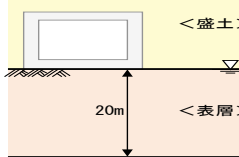
II 種地盤 ⇒TG=4H/Vs=4・20/200 =0.4 (s)	単位体積重量 γ (kN/m ³)	せん断波速度 Vs (m/s)	強度定数	変形特性
	19	150	c=0kN/m ² φ=30°	土木研究所所報 153号 地盤の動的変形特性に関する実験的研究(II)より設定
	19	200	---	
	19	300	---	線形

図-1 地盤モデル

表-2 検討条件概要

耐震計算手法	応答変位法		応答震度法
	モデル化方法	節点集中ばね	平面ひずみ要素
地盤モデル	ばね剛性	収束せん断剛性より設定	収束せん断剛性より設定
	換算載荷幅	10 m	---
ばね特性	部材直交方向	線形 (受働破壊しないため)	躯体周面部にジョイント要素を付加 ※せん断方向は
	部材せん断方向	バイリニア型非線形 (τ f=c+σ tan φ)	バイリニア型非線形 (τ f=c+σ tan φ)
躯体モデル	非線形 (M~φ 型) ※トリリニア型		非線形 (M~φ 型) ※トリリニア型

※本報告は平成 30 年度から令和元年度へと継続して実施した研究の成果を令和元年度研究成果としてまとめたものである。

2.2. 検討結果

2.2.1. 各計算手法の比較

常時設計を実施した中から、12断面を対象にレベル2地震動に対する応答変位法及び応答震度法による耐震計算を実施し、両手法で得られた結果を比較した。

表-3に両計算手法における照査結果概要を示す。曲げ照査では、CASE Iの応答変位法のケースのみOUTで、応答震度法では全てのケースでOKとなった。せん断照査では、ほぼ全てのケースでOUTとなった。層間変形角照査では、土被りが小さいケース（土被り0.5m）のみOUT（構造安全性照査でOUTとなりカルバートの要求性能3を満足しない結果）となった。

図-2に躯体の内空幅と層間変形角との関係を整理した。これより、同一内空幅であれば土被りが大きい程、同一土被りであれば内空幅が大きい程躯体の層間変形角は小さくなる傾向にあることが確認された。

表-3 両計算手法の照査結果概要

	土被り (m)	内空幅 (m)	内空高 (m)	応答変位法				応答震度法			
				部材照査		層間変形角照査		部材照査		層間変形角照査	
				曲げ照査	せん断照査	使用安全性	構造安全性	曲げ照査	せん断照査	使用安全性	構造安全性
CASE I	0.50	6.5	5.0	OUT	OUT	OUT	OUT	OK	OK	OUT	OUT
CASE II	1.50			OK	OUT	OUT	OK	OK	OUT	OK	OK
CASE III	5.00			OK	OUT	OK	OK	OK	OUT	OK	OK
CASE IV	0.50			OK	OUT	OUT	OK	OK	OK	OUT	OK
CASE V	1.50	10.0		OK	OUT	OK	OK	OK	OUT	OK	OK
CASE VI	5.00			OK	OUT	OK	OK	OK	OUT	OK	OK
CASE VII	0.50			OK	OUT	OK	OK	OK	OUT	OK	OK
CASE VIII	1.50			OK	OUT	OK	OK	OK	OUT	OK	OK
CASE IX	5.00	14.0		OK	OUT	OK	OK	OK	OUT	OK	OK
CASE I'	0.50			OK	OUT	OUT	OK	OK	OUT	OUT	OUT
CASE II'	1.50			OK	OUT	OK	OK	OK	OUT	OK	OK
CASE III'	5.00			OK	OUT	OK	OK	OK	OUT	OK	OK

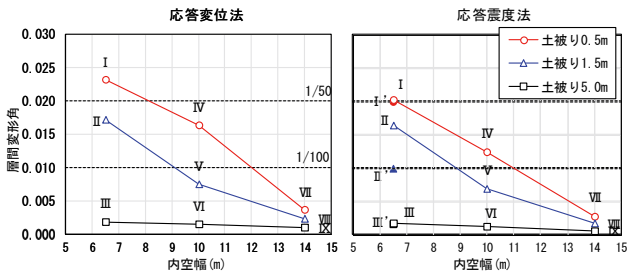


図-2 内空幅と層間変形角との関係

2.2.2. 低土被りカルバートの計算モデルの検討

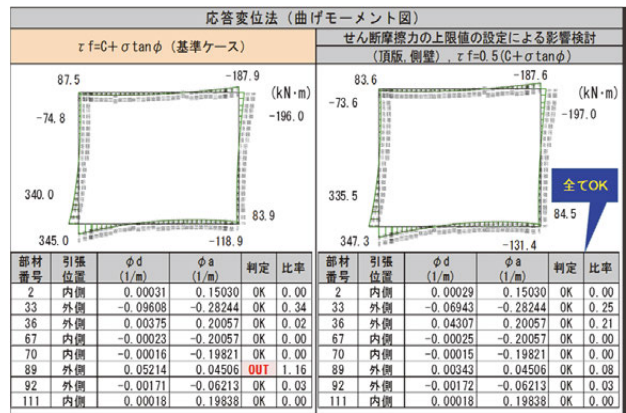
CASE Iは、道路土工カルバート工指針で示される従来型カルバートに該当するものであるが、応答変位法による照査においてOUTの結果が得られた。従来型カルバートの地震時被災事例はほぼないため、この結果は実現象と乖離したものであるといえる。低土被りの場合、地盤からの拘束力が弱く、地震時にカルバート躯体が地盤変形に追従して挙動せず、耐震計算で想定しているような荷重が躯体に作用していない可能性が考えられる。そこで、耐震計算結果と実現象との乖離を解消する手段として、せん断摩擦力の上限値の設定に着目し、せん断摩擦力の上限値の与え方を杭基礎やケーソン基礎の安定計算にて用いられている設定方法を参考にして、下記の2つのパターンで低減させた。

- [1] $\tau f = 1 \text{ N}$ (NはN値を示す)
- [2] $\tau f = 0.5 (C + \sigma \tan \phi)$

表-4にせん断摩擦力の上限値の設定による影響検討結果を示す。せん断摩擦力の上限値を低減させた場合、部材の曲げ照査及び層間変形角の照査がOKとなる結果が得られた。つまり、低土被りのカルバートの場合、せん断摩擦力の上限値の設定が極めて重要であることが確認された。

また、応答変位法の底面の地盤ばねは、当初盛土相当のものを設定していたが、現地盤（表層地盤）相当の設定で計算すると応答震度法とよく合う結果となった。これにより、応答変位法において地盤ばねの値を精度良く設定することにより応答震度法との結果に大きな差異は生じず、実用的な応答変位法も耐震設計法として選択できることを確認した。

表-4 周面せん断摩擦力に対する影響検討結果



3. まとめ

耐震計算を実施する上で、躯体周辺部のせん断摩擦力の上限値の設定により結果が大きく変わることが確認されたことから、この設定方法は非常に重要であると考えられる。一方で、今回検討したほぼ全てのケースで部材のせん断照査がOUTの結果となったが、実カルバートにおいてせん断破壊が生じた事例はほぼ確認されておらず、実現象と乖離した結果となっているため、実カルバートの被災事例との整合を図って行く必要がある。

今後は、実用的な応答変位法を基本として検討を行うこととし、せん断摩擦力の上限値の設定を見直し、既往の遠心模型実験結果や地震の影響を受けた実カルバートの被災事例について再現解析を行い、耐震設計法の検証を進めていく。また、盛土内に構築されたカルバートに対する作用として、盛土部の地震動の作用による変形の算定方法についても検討を行い、大型カルバートの耐震設計法を確立していく。

【成果の活用】

本調査結果は、道路土工構造物技術基準に定められた要求性能に対応した設計法の基礎資料として活用する予定である。