

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 improvement of applicability of partial factor design for bridges.

(研究期間 平成 29 年度～令和 2 年度)

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

室 長 白戸 真大
Head SHIRATO Masahiro
主任研究官 餘久保 陽
Senior Researcher YOKUBO Akira
交流研究員 平野 義徳
Guest Research Engineer 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.

〔研究目的及び経緯〕

材料の高強度化や数値解析技術の進歩により、橋の断面の大型化や少部材化が進んでいる。過年度は、桁断面の一部に塑性化を考慮した設計法の開発に向けて、桁の載荷実験等を行ってきた。また、一部の部材が損傷したあとに橋全体として脆性破壊に至る可能性を検証するための荷重組み合わせの設定の基礎資料を得るために、供用期間中に生じることは稀であるものの、生じ得る組み合わせについて、確率的な検討を行うなどしてきた。

これらは、比較的大きな変形を念頭に置いた検討であるが、断面の大型化や少部材化が進むと、断面自体のせん断、そり、ねじりなどの変形に伴う二次応力も無視できなくなる。そこで、本年度は、多様な橋の応答を適確に評価するための荷重組み合わせや荷重係数の設定のための基礎資料を得るために、複雑な曲線線形を有する橋を対象に、断面のせん断変形、そり、ねじりなど二次応力が厳しくなるような作用の組み合わせを検討した。

〔研究内容〕

1. 試算の対象橋梁

試算対象橋を図-1 に示す。PC4 径間連続ポステン箱桁橋であるが、ウェブを鋼材に置き換えることで、コンクリートである場合に比べて死荷重を小さくした。結果的には、断面のせん断、そり、ねじり剛性も小さくなる。また、断面のせん断、そり、ねじりの複雑な挙動が生じやすいように、道路線形は曲線（S 字型）となるようにするとともに、本来ウェブ断面内に配置される PC ケーブルを箱桁内部に配置することで、PC ケーブルを桁断面変形と独立して挙動するようにした。また、隔壁はコンクリート箱桁において一般的に行われるように、支点部及び 40m 程度に一か所の間隔

で設置することを基本とし、加えて外ケーブルの鉛直方向または水平方向への偏向に必要なときには追加で設置した。以上を基本諸元と呼ぶ。

一般的なコンクリート桁であれば、断面に生じる曲げモーメントやせん断力に着目して設計されることが多いが、技術基準である道路橋示方書・同解説では、ウェブに鋼材を用いる場合には、断面の上下だけでなく左右の温度差を考慮すべきであることや、ねじれに対して最も不利になるように活荷重を載荷することの必要性を検討するのがよいことが示されている。そこで、本研究でも、上部構造全体を断面変形が再現できるシェル要素またはソリッド要素でモデル化し、断面の上下左右にそれぞれ温度差を見込んだり、活荷重の偏載荷の影響を見込んだりすることで、断面のせん断変形、そり、ねじりの影響が大きくなるように載荷し、二次応力の発生状況を調べることにした。

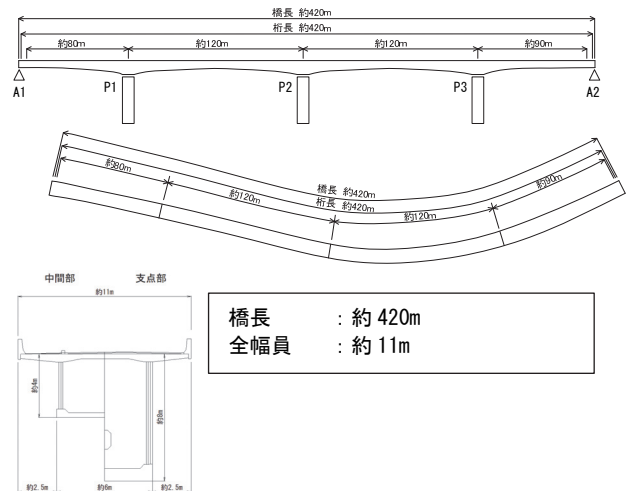


図-1 試算対象

2. 計算結果

解析結果の一例として、P2-P3 径間支間中央部の曲

げモーメントが最大となるようにL荷重を載荷したときの上下床版の軸方向応力度分布を図-2に示す。上下床版ともに桁の左右で応力差が生じている。すなわち、桁にそりが生じている。

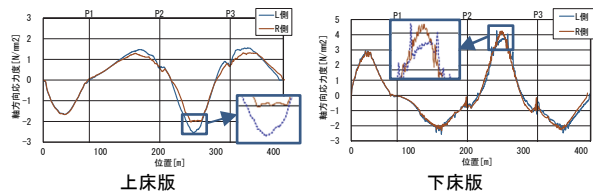


図-2 上下床版の軸方向応力度分布（L荷重載荷時）

また、平面骨組解析で同じ計算をした結果とP2-P3径間支間中央部の軸方向応力度を比較した結果を図-3に示す。平面骨組解析の結果に対し、FEM解析では詳細な位置での応力度の違いが表現され、多くの断面ではFEM解析の応力度が平面解析の応力度を上回っていることが確認された。

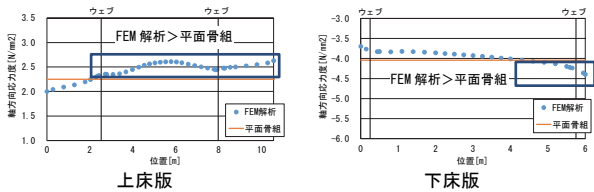


図-3 支間中央部軸方向応力度分布（活荷重単独載荷）

上下温度差と左右温度差の影響度の違いを調べるために、下床版と左ウェブは基準温度である20℃に設定したうえで、上床版のみ基準温度+10℃（コンクリート床版を有する鋼桁橋の一般的な温度差）とした解析と、右ウェブのみ基準温度+15℃（複合構造における計測事例から設定）とした解析を実施した。（図-4）に、それぞれ、隔壁の最大主応力分布を示す。供用環境下で実際に生じうる温度差を与えた場合、上下床版の温度差よりも左右ウェブとの温度差の方が、隔壁の応力度に与える影響が大きいことが分かる。

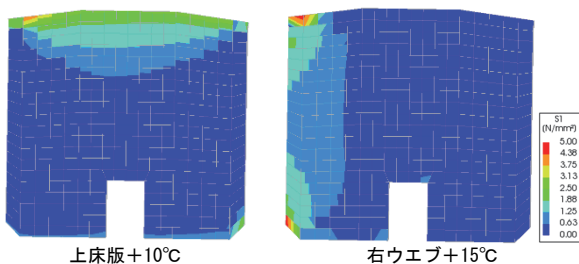


図-4 上下・左右の温度差考慮時の隔壁最大主応力分布

温度変化が隔壁の発生応力に与える影響を調べるため、上下床版の両者を+15℃（コンクリート構造の一般的な温度変化）とした解析と、上下床版を+15℃にするだけでなくウェブも+30℃（鋼構造で考慮する一般的な温度変化）とした解析を実施した。このときの隔壁の最大主応力分布を図-5に示す。最大主応力の発生位置は隔壁と上下床版接合部で大きくなる。そこで、日常の温度差変化により隔壁や上下床版に大きな応力が生じる可能性が疑われる。

隔壁の剛性や設置箇所数が主桁のせん断変形やそり

に与える影響を把握するため、隔壁の剛性と箇所数を増やしたときの計算も行った。P2-P3径間中央部の上床版軸方向応力分布を図-6、上下床版の最大主応力分布を図-7に示す。図-6から、隔壁剛性と箇所数を増加することで、死+活+温度荷重用作用時の左右の応力差が小さくなったことから、そりについては一定程度改善される傾向も見られる。しかし、図-7からは、上下床版と鋼板の接合部周辺の応力分布に大きな差が無く、隔壁を増やしても断面のせん断変形に与える影響は小さい結果となった。

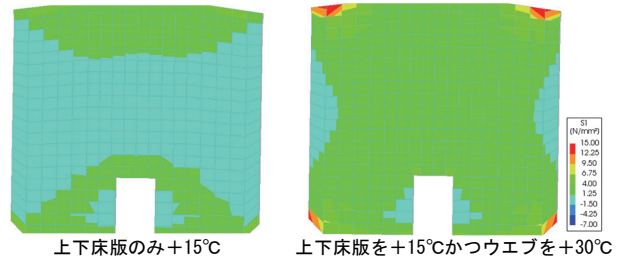


図-5 温度変化考慮時の隔壁最大主応力分布

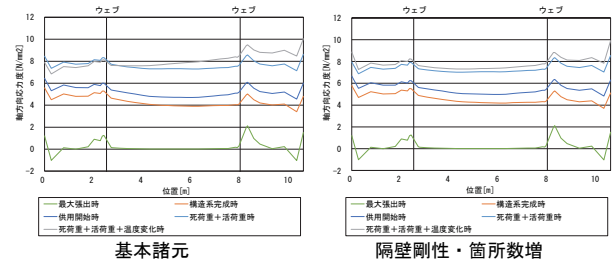


図-6 隔壁剛性と箇所数変更時の上床版軸方向応力度分布

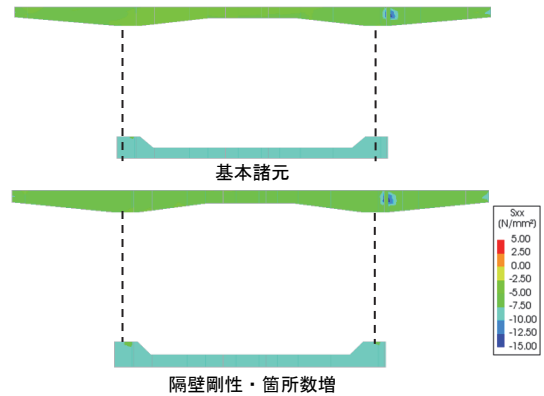


図-7 隔壁剛性と箇所数変更時の最大主応力分布（死荷重時）

以上をまとめると、今後の技術開発の動向を考えると、橋の設計では、主桁断面としての曲げモーメントやせん断力に厳しくなるような荷重状況を再現するような荷重組み合わせだけでなく、断面のせん断変形、そり、ねじりに対しても厳しくなるような荷重組み合わせが重要であることが分かった。活荷重単独で断面のせん断変形、そり、ねじりのそれぞれの厳しくなるような荷重位置を検討するだけでなく、たとえば断面の左右の温度差の影響と組み合わせる必要がある。

【成果の活用】

本研究で得られた成果は、道路橋示方書等、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 令和元年度～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
鎌田 将史
KAMATA Masafumi
鈴木 克弥
SUZUKI Katsuya

High-strength materials are expected to make design more rational. However their stress-strain behavior, durability, and toughness are often different from those of conventional materials, and their costs tend to be more expensive. Accordingly this study tackles to seek effective arrangements of such high strength materials and carries out loading tests to propose design equations with partial factors.

【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限界状態設計法と部分係数法の組み合わせで設計することにされた。これより、新しい材料を道路橋に適用する場合の耐荷性能の検証項目の最低限の事項が示され、材料としての信頼性、そして、それを部材に適用したときの限界状態や再現性を明らかにすることが求められるようになった。そこで、本研究は、高強度材料を活用し、部材等の設計の合理化を図るための基礎的な試験結果等を得ること、また、新しい材料の適用にあたっての検証例を作ることを目的に研究を行っている。

本年度は、従来の構造用鋼材より降伏点の高い、橋梁用高降伏点鋼板(以下、SBHSとする)を、せん断を受ける部位に適用するにあたっての適用性を調べた。従来鋼材とSBHS材の桁試験体を比較し、降伏後の挙動を含め耐荷性能を明らかにするために、様々な条件で載荷試験を行った。

【研究内容】

桁試験体は、従来鋼のSM490Yと高降伏点鋼であるSBHS500を用いた2体を製作した。そして、載荷試験を行い、ウェブの面外座屈の発生、及び、その後の挙動を比較した。また、座屈後の強度におけるせん断耐力の評価式の適用性について検討を行った。

(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

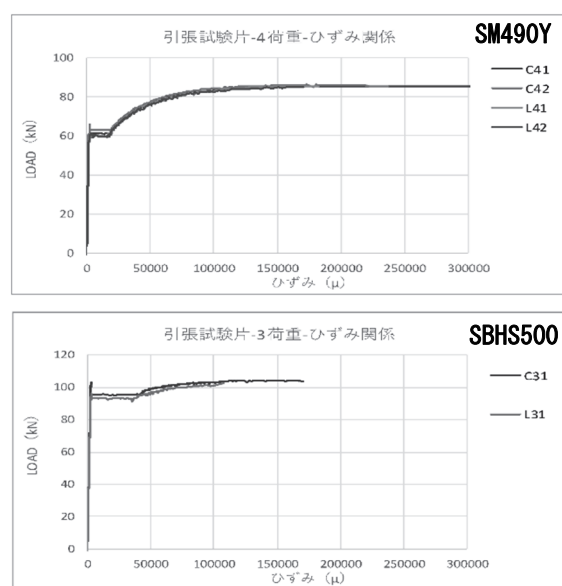


図-1 荷重ひずみ曲線

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。したがって、ウェブ面外座屈発生後の桁の耐荷力性状が異なる可能性がある。

(2) 桁試験体

桁試験体は、フランジの幅を十分広くすることにより、せん断座屈破壊を確実に発生させるプロポーシオンとした。載荷は、一方向の繰り返し載荷であ

り、最大荷重後も荷重が極端に下がるまで行った。

【研究成果】

各桁試験体の荷重試験結果を図-2 に示す。以下、 1δ は計算で求めたせん断耐荷力に荷重が達した時の桁の変形量を指す。せん断耐力は Basler 強度評価式を用いて、鋼材の強度は実強度を用い、水平補剛材の上下のパネルでそれぞれ算出した耐力の合計とした。

(1) 荷重・鉛直変位関係

従来の鋼材 (SM490Y) を使用した試験体 A の荷重変位曲線を見てみると、計算により算出したせん断強度程度まで荷重が増加し、その後荷重がほとんど低下することなく 3δ 程度まで変形し、その後荷重が徐々に低下したものの、 4.5δ 程度でも、まだ最大荷重の 85% 以上の耐力を有した。一方、SBHS500 を使用した試験体 B の荷重変位曲線を見てみると、計算により算出したせん断強度を若干上回るまで荷重が増加し、その後若干荷重が下がりながら 3δ 程度まで変形した。その後荷重が徐々に低下したものの、 5.0δ 程度でも、まだ最大荷重の 80% 以上の耐力を有した。結果として、今回の 2 つの材料を用いた梁では挙動に大差はなかったが、これは、ウェブの面外変形という幾何学的な軟化と材料の降伏後の硬化特性という両者が関係することで、今回の材料では差が出にくかったためと考えられる。

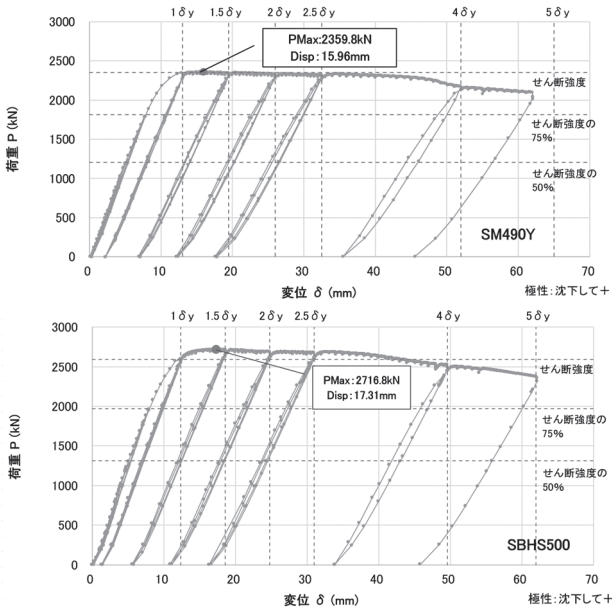


図-2 荷重変位曲線

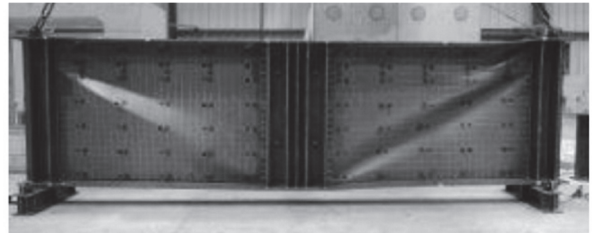
(2) せん断耐力

写真-1 にそれぞれの供試体の試験完了後の変形を示す。写真からも分かるように、せん断耐力の比較をするうえで、腹板の座屈挙動が重要となるため、面外の変形に対する荷重変位曲線を図-3 に示す。なお、変位計は 4.0δ の段階で計測を終了している。

面外変形は最大荷重までは荷重の増加とともに増加し、最大荷重を超えてからの変位の増加が最も大きく、その後変形量は比較的少なくなるものの増加し続けた。これより最大耐力は腹板の座屈により決定していると推測される。

また、降伏時および 4δ せん断耐力について、座腹板の座屈強度を表す Basler 式で求めたせん断耐力と今回の最大荷重時のせん断強度を比較した場合、最大荷重時のせん断耐力は Basler 式のせん断耐力とほぼ一致し、SBHS 材でもせん断耐力は Basler 強度評価式を使用できることが示唆された。

SM490Y



SBHS500

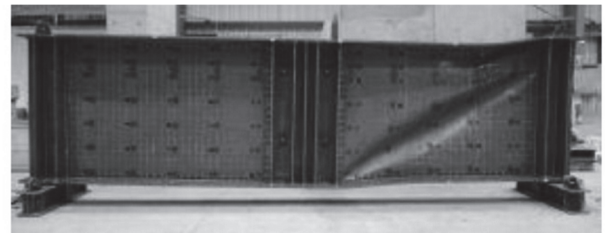


写真-1 試験体状況 (試験後)

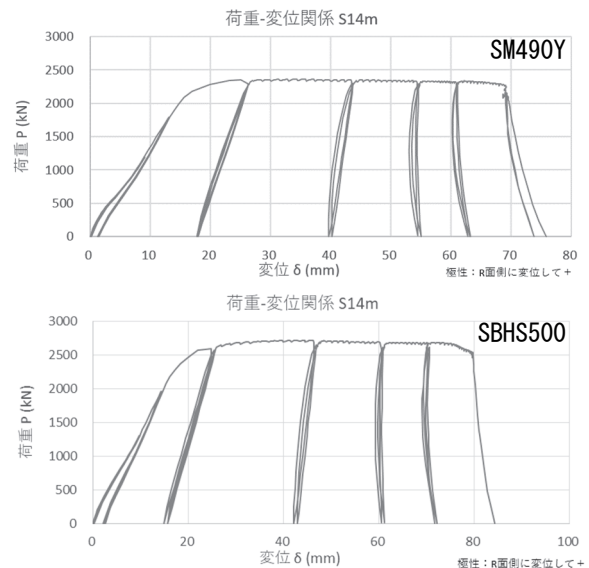


図-3 荷重変位曲線 (腹板中央)

【成果の活用】

得られた成果は、道路橋示方書の改定等に反映する予定である。

土工構造物等の要求性能に対応した信頼性設計に関する調査検討

Study on deformed state evaluation according to required performance and reliability design of earthwork structure

(研究期間 令和2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

In this study, the authors analyzed and organized the initial deformation by collapse mechanism focusing on large-scale cut slopes with complicated deformation. Furthermore, the authors examined how to utilize aviation LP data for various initial deformations.

【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、崩壊機構別の初期変状の分析整理を行い、それらに対する航空LPデータの活用手法について調査・整理を行うものである。

【研究内容】

本研究では、切土法面の崩壊事例と点検結果から崩壊機構別の初期変状の分析整理を行い、法面の初期変状の推定と変状種別毎の留意点を整理した。また、航空LPやMMS（モバイルマッピングシステム）などにより取得した点群データについて法面変状に関連した精度確認を行い、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. 切土法面の崩壊機構別の初期変状の分析整理

切土法面131件の崩壊データを崩壊規模・形態別に事前の変状（初期変状）の発生状況について分析した。分析結果をもとに、航空LP等の点群データを活用した初期変状把握方法について整理した。

(1) 崩壊データの整理

131件の崩壊事例については「切土上端部の表層土」の崩壊が57件と最も多く、切土法面最上部で崩積土や劣化した岩盤が厚く残存している斜面に留意する必要があることが示唆された（図-1）。検討結果から、崩壊規模・形態別の留意すべき現場状況（表-1）を整理した。

(2) 土工構造物（切土）点検の初期変状の整理

H30, R1道路土工構造物点検結果から、切土のり面を対象に、判定Ⅲ（早期措置段階のもの（変状が確認され次回点検までにさらに進行することが想定され構造物の崩壊が予測される）・判定Ⅳ（緊急措置段階）に該当するものに着目し、崩壊発生の予兆となるような変状として図-2のとおり分類し、それぞれ変状把握の留意点を整理した（例：表-1）。崩壊発生の予兆となるような変状として頻度が高いものは、水路工の不備、脆弱な地山、構造物の変状、法面地山の劣化などであった（図-2）。

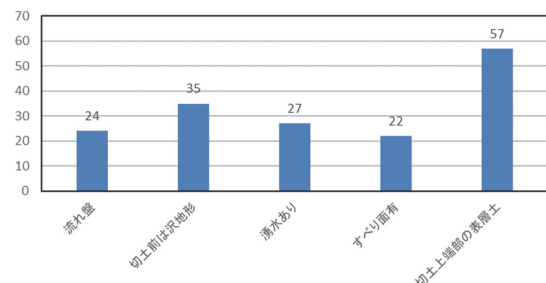


図-1 131件の崩壊データの崩壊要因

表-1 崩壊規模・形態別の留意すべき現場状況

崩壊規模・形態	留意すべき特性	想定される初期変状
落石・侵食等	a ※今回該当なし	—
表層崩壊等	b 切土上端部の表層土の分布	法肩部のクラック・陥没 最上段法面の変状
	切土前の沢地形や湧水等、地下水位の影響	法面からの湧水や異状出水
	地質構造的な弱線	構造物に連続的に発生する亀裂や押し出し等 (事例としては少ない)
	花崗岩や火山岩の分布 脆弱な地質の劣化	表層土の劣化(マサ化等)や水 抜きパイプ等からの土砂流出
	法面周辺部の地形改変 倒木等植生に起因するもの	法面外からの排水系統の変化 倒木による根返り(今回該当なし)
大規模崩壊・ 地すべり性崩壊	c 切土前の沢地形や湧水等、 地下水位の影響	法面からの湧水や異状出水 (bに比べると少ない)
	地質構造的な弱線	構造物に連続的に発生する亀裂や押し出し等

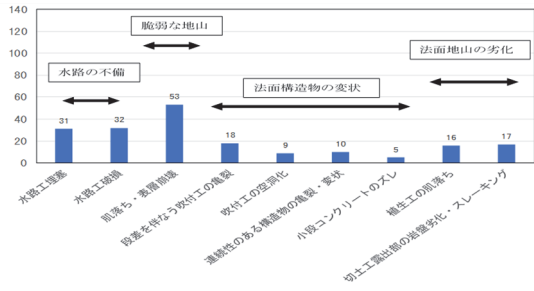


図-2 崩壊発生の予兆となるような変状

表-2 初期変状把握の留意点と各種レーザ測量の適用性の整理例

初期変状に関連する進行要因	進行に伴い発生する変状	航空レーザ	UAVレーザ
(1) 水路工の不備 (無いより悪い欠陥水路)	・落葉落枝や土砂堆積による水路工の閉塞 ・外圧による水路工の破損 ・オーバーフロー等による、水路工周辺部の洗掘や陥没の発生	× 点群が粗く把握不能	△ 植生や水路工の傾斜により精度が確保できない場合がある
(2) 脆弱な地山	・集水地形や脆弱な土質といった、そもそも崩壊耐性が低い地山において、十分な対策工を実施していないことによる法面構造物のクラックや亀裂の発生 ・安定勾配が確保されていないことによる、法面構造物のクラックや亀裂の発生	× 点群が粗く把握不能	× 点群による亀裂把握は不能

(3) 点群データを活用した初期変状把握方法の整理

各種レーザ測量データの初期変状把握に関する適応性を整理した(表-2)。これらの結果航空レーザ測量等の精度では、水路工の不備などまで、確認できないという結果を得た。

(4) 切土法面の表層崩壊に対する安定計算の試算による要因分析

表層崩壊を対象として、一般的な土質定数を用いた安定計算により、各種の切土法面の安定性を評価した。安定計算式は、スウェーデン式分割法により、法高、法勾配、地下水条件などの要素を変化させ試行円弧すべり計算を実施した。試算結果からは、概ね安全率 1.0 を上回る結果が得られたが、切土法面の地下水の有無が安全率へ大きく影響する結果となり、現場での把握方法と合わせ設計手法への反映方法を検討していく必要がある。

2. 航空 LP データのデータベース化手法の整理

(1) 航空レーザ測量に関する整理

航空レーザ測量データの特徴を整理するとともに、近年直轄国道事務所が実施した航空レーザ測量の概況及び公開状況について整理した。

(2) 航空レーザ測量のデータベース化手法の整理

令和元年度を中心に直轄国道事務所取得しているデータは、国道沿いの一定範囲であるため、広域地形を把握する基盤地図情報や防災情報に関連する各種 GIS 情報について取扱方法などを整理した。

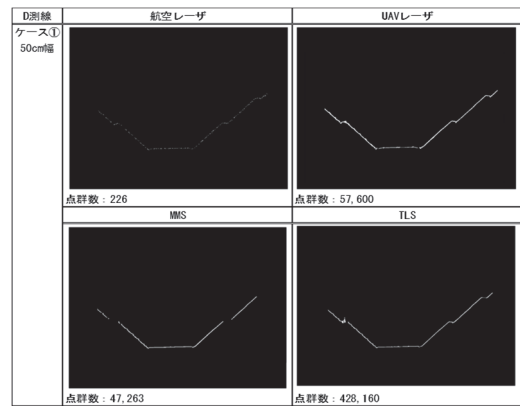


図-3 各種点群データから作成した横断面図

また、2 時期差分図の作成例や、国土交通データプラットフォーム整備計画への導入課題について整理した。

3. 航空 LP データ精度と法面点検等への留意点

(1) 切土法面現場での各レーザ測量の適用性の検証

唐津伊万里道路の切土区間において実施された各種レーザ測量の点群データを整理し、法面点検等に活用する場合の計測精度、取得範囲などの課題を整理した。

その結果、例えば道路横断方向におけるレーザ計測状況の確認(図-3)では、航空レーザ測量では点群数が疎のため、点検に活用できるような横断面図の作成が困難であるなどの知見を得た。

(2) 既往文献資料からのレーザ測量精度の整理

各種計測手法によるレーザ測量に関する研究を収集し、対応範囲や点群密度などの特性について確認し切土法面や自然斜面などへの活用について整理した。

4. 今後の課題

全国の崩壊事例のデータを今後も収集整理することにより、初期変状分析の精度向上が期待できる。

一方で、計測技術の精度やコスト低減された新技術の開発などが、急速に進んでおり、切土法面の変状を確認できる技術の適応性を継続的に確認していく必要がある。また、点群データのみでは把握できない部分について、画像を同時に観測・解析する技術は、既に存在するため、これらをどのように変状の初期把握に取り込んでいくか検討や検証を進めていく必要がある。

【成果の活用】

道路土工構造物の性能確保に向けた技術基準類や防災点検要領、道路土工構造物点検要領への改定に反映する予定である。

道路構造物としての舗装の要求性能に関する調査検討

Research on required performance of pavement as a part of road structure

(研究期間 令和元年度～令和3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
研究官
Researcher

渡邊 一弘
WATANABE Kazuhiro
桑原 正明
KUWABARA Masaaki
若林 由弥
WAKABAYASHI Yuya

In 2001, the "Technical Standards for Pavement Structure" was announced by the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism. This standard introduced the idea of not limiting the materials, design methods, construction methods, etc. by defining the required "performance" in the design and construction of pavement. The current technical standards stipulate the required performance of the pavement structure itself, but it is also necessary to consider the performance from the viewpoint of protecting the underlying structure such as bridge decks. The authors investigated the construction data, etc. for the pavement repair work on the bridge that was carried out in recent years, and analyzed the relationship between the damage to the bridge deck and the damage to the pavement.

〔研究目的及び経緯〕

平成13年に国土交通省道路局より「舗装の構造に関する技術基準」(以下、「技術基準」という)が発出され、道路舗装については要求される「性能」を規定することで使用する材料や設計法、施工法等を限定しない性能規定化の考え方が導入された。技術基準は、舗装の構造物単体としての性能について疲労破壊や塑性変形などに対する性能指標を定めたものであるが、一方で舗装は様々な道路構造物や原地盤の上に構築されるものである。近年、橋梁上の舗装のひび割れ等から浸入した水により床版上面が土砂化し損傷するなどの事例が多く確認されており、下部の構造物を保護するという観点からも、改めて道路舗装における性能の整理が求められている。

本研究では、近年実施された橋梁上の舗装修繕工事を対象に工事データ等を収集し、橋梁床版の損傷と舗装の損傷の関係性について分析した。

〔研究内容〕

平成29年度から令和元年度までに実施された、直轄国道における橋梁上の舗装修繕工事例について、工事成果品や関連する設計業務の報告書、直近の点検調査等のデータなどを収集し、これらを分析して舗装と床版との損傷に関する関係性の分析を行った。表-1に橋梁の一覧を示す。本研究で分析の対象とした橋梁は合計24橋で、実施された修繕工事のほとんどが舗装の打換えと断面修復、ひび割れ注入であった。

分析にあたり、既往の文献等から橋梁上の舗装の損傷形態やその要因について整理した。表-2に整理した損傷形態の一覧を示す。このうち、雨水の浸入などにより床版に影響を与えると考えられる舗装の損傷は主

表-1. 分析対象橋梁の一覧

橋梁	都道府県	橋梁形式	舗装厚※	修繕工事内容	大型車交通量(台/日)	架設年
A橋	北海道	3径間連続非合成版桁橋 他	7.0cm	舗装の打換え、断面修復	3,383	1979
B橋	北海道	2径間連続PC+スリ中空床版橋	7.0cm	舗装の打換え、断面修復	700	1966
G橋	北海道	単純合成版桁橋	7.0cm	舗装の打換え、断面修復	761	1978
D橋	山形県	3径間連続非合成版桁橋	5.0cm	舗装の打換え、部分打換え	1,441	1979
E橋	青森県	3径間連続非合成版桁橋 他	(7.4cm)	舗装の打換え、断面修復	3,157	1973
F橋	茨城県	3径間連続RCI桁橋	(5.0cm)	舗装の打換え、断面修復	3,262	1950
G橋	群馬県	RCアーチ橋単純合成版桁橋	(10.0cm)	舗装の打換え、断面修復	508	1963
H橋	石川県	3径間連続非合成版桁橋	8.0cm	舗装の打換え、断面修復	4,650	1988
I橋	富山県	単純非合成版桁橋 他	8.0cm	舗装の打換え、断面修復	5,632	1985
J橋	新潟県	単純PCプレテンT桁橋	6.5cm	舗装の打換え、断面修復	16,278	1973
K橋	三重県	単純非合成版桁橋 他	5.0cm	舗装の打換え、部分打換え	25,017	1965
L橋	滋賀県	単純鋼(ハット)非合成版桁橋	不明	舗装の打換え、主桁の修復	3,998	1951
M橋	和歌山県	2径間連続PC+レフト桁橋2連 他	7.5~7.7cm	舗装の打換え、断面修復	1,189	1984
N橋	福井県	3径間連続鋼合成版桁橋3連 他	(5.0cm)	舗装の打換え	5,645	1973
O橋	京都府	3径間連続非合成版桁橋	(7.5cm)	部分打換え(補強)	1,380	1980
P橋	京都府	単純合成版桁橋7連	5.0cm	舗装の打換え、断面修復	1,380	1971
Q橋	鳥取県	3径間連続非合成版桁橋2連	7.0cm	舗装の打換え、断面修復	3,048	1979
R橋	広島県	単純合成版桁橋3連	5.0cm	舗装の打換え、断面修復	874	1967
S橋	高知県	単純非合成H桁橋	5.0cm	床版の増厚	1,339	1964
T橋	愛媛県	単純合成版桁橋	6.0cm	舗装の打換え、断面修復	2,200	1971
U橋	愛媛県	単純PC+レフト中空床版橋	(10.0cm)	舗装の打換え	621	1972
V橋	大分県	単純鋼合成版桁橋2連 他	5.0cm	舗装の打換え、部分打換え	1,862	1973
W橋	大分県	鋼単純合成版桁橋 他	5.0cm	舗装の打換え、断面修復	1,458	1974
X橋	沖縄県	単純鋼レフト桁橋(合成不明)	7.0cm	舗装の打換え、部分打換え	3,910	1952

※()は切削厚さからの推定値

表-2. 橋梁上の舗装における損傷形態

部位	損傷の例	損傷の状況、考えられる原因等	主な発生位置
ひび割れ	線状	大型車の走行によるわだち掘れ	走行軌跡部
	亀甲状	床版のたわみによる縦方向の線状ひび割れ	鋼床版の縦リブ主桁上
	亀甲状	混合物の劣化、床版防水層と混合物の接着不良、コンクリート床版の破損によるもの	走行軌跡部から発生し、舗装面全体へ
舗装表面	わだち掘れ	混合物の耐流動性不足による塑性変形、床版防水層の種類による可能性もある	走行軌跡部
	平坦性の低下	混合物の強度、締固め不足によるさざなみ状の舗装面のしわ、こぶ状のより、床版の凹凸、床版防水層と混合物の接着不良によっても起こる	走行軌跡部
	段差	伸縮装置と舗装の剛性の違い、伸縮装置取り付け部の混合物の締固め不足	伸縮装置
	すべり抵抗性の低下	アスファルト過多混合物によるフラッシュ、骨材のポリッシング	走行軌跡部
	すれ	床版防水層と混合物の接着不足、タックコートの過多による	主に走行軌跡部・排水不良箇所
	ポットホール	混合物の強度不足により生じた舗装表面の穴水の流入による骨材のはく離、亀甲状のひび割れを伴う場合有り	ひび割れ部・排水不良部
ブルスタリング	コンクリート床版の乾燥不足と緻密な混合物の使用、鋼床版のクレン不良		
目地の開き	目地部の接着不良、混合物の締固め不足	施工継目部	

表-3 床版と舗装の損傷整理結果の一例

	舗装	床版上面	床版下面
A橋		写真無し	
C橋			
H橋		写真無し	
I橋			
Q橋		写真無し	
T橋			写真無し

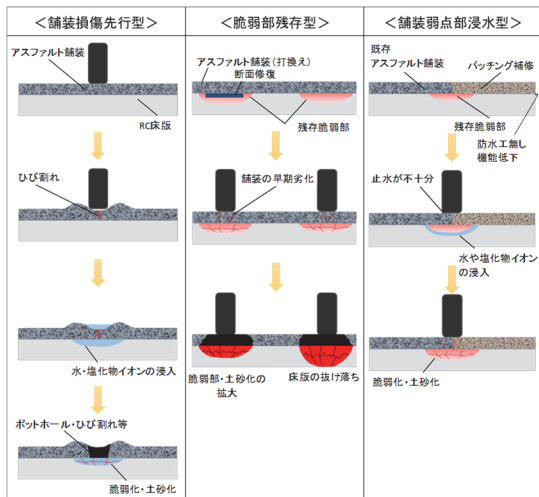


図-1 床版の損傷発生メカニズムの類型

としてひび割れとポットホールであると考え、これら2つの損傷に着目して事例の分析を行った。

[研究成果]

舗装打換え前データや舗装打換え工事結果について橋梁毎に台帳にてとりまとめ、舗装と床版のそれぞれの損傷の位置関係や損傷の程度について整理した。表-3に整理結果の一例を示す。

続いて、その整理結果をもとに、床版に損傷が生じているときに舗装に顕在化する損傷と特徴についてとりまとめた。従来、床版が損傷している場合には、多くの場合舗装に亀甲状のひび割れや蜘蛛の巣状のひび割れが生じていると考えられてきたが、線状のひび割れであっても、土砂が噴出している場合には床版が土砂化している事例が認められた。このため、舗装のひび

割れが軽微であっても土砂の噴出が認められた場合には床版上面の損傷を想定する必要がある。また、ポットホール発生箇所については過去の点検データ等と照らし合わせた結果、補修が短期間に繰り返されており、こうした場合には床版が損傷している可能性が高く、詳細調査により確認する必要がある。

さらに、調査結果から推察された、舗装の損傷と関連する床版の損傷発生メカニズムについて、舗装損傷先行型、脆弱部残存型、舗装弱点部浸水型の大きく3つに分類した。図-1に分類した損傷発生メカニズムのイメージを示す。

舗装損傷先行型の床版の劣化は、車両の制動荷重が作用する停止線付近等の、舗装の損傷が進行しやすい箇所において生じる場合が多い。橋梁上のアスファルト舗装では、わだち掘れの進行やバインダーの劣化等によりひび割れが生じ、コンクリート床版に水分が供給され、水分を含んだコンクリート床版に輪荷重が作用することにより脆弱化が進行し、コンクリート床版が土砂化の状態に至るまで劣化が進行する。舗装に亀甲状のひび割れが発生しており、土砂の噴出が見られる場合はこの劣化メカニズムに該当する。

脆弱部残存型は、舗装損傷先行型で発生した舗装および床版の損傷に対して、床版の脆弱部を十分に除去しないまま切削オーバーレイなどで修繕した結果、脆弱化したままの床版の影響で当該箇所について局所的に舗装が早期に損傷し、床版のさらなる損傷につながるものである。舗装を打ち換えた後に早期に舗装に亀甲状のひび割れが発生していた場合はこの損傷が進行している可能性が高いと考えられる。

舗装弱点部浸水型は、パッチング跡の境界面や施工継ぎ目において止水が不十分な場合に床版へ水が浸入した結果、パッチング跡の境界等から土砂の吹き出しが確認されるものである。前述のとおり舗装面に亀甲状のひび割れ等が生じておらず、線状のひび割れから土砂の噴出跡が見られるような場合にはこのケースに該当する場合が多いと考えられる。

なお、本検討においては、床版と舗装の両方に損傷が生じている場合を対象として検討を行った。一方、床版に損傷(特に床版下部の漏水、遊離石灰を伴うひび割れ)が生じているにもかかわらず舗装に損傷が認められない場合も多く確認された。引き続き、舗装と床版の損傷の関係性について分析を進め、床版を保護する観点で舗装に求められる性能について検討を進めていく必要がある。

[成果の活用]

本調査結果は、橋梁上の舗装の点検上の留意点として、舗装点検要領などに反映するとともに、橋梁上の舗装に求められる性能について検討するための基礎データとして活用する予定である。

地盤-橋全体系の耐震設計に用いる地盤震動特性の評価手法の検討

Study on evaluation method of ground shaking characteristics used for seismic design of soil-bridge system

(研究期間 平成 30 年度～令和 2 年度)

道路構造物研究部 道路地震防災研究室
Road Structures Department
Earthquake Disaster Management Division

室 長 増田 仁
Head MASUDA Hitoshi
研究官 石井 洋輔
Researcher ISHII Yosuke

The purpose of this research is to propose the evaluation method of ground shaking characteristics that contributes to the improvement of seismic design of bridges. The evaluation method of the strength performance of bridges considering the reduction effect of the earthquake motion is verified using the damage reproduction analysis and the earthquake observation record of the highway bridges.

【研究目的及び経緯】

橋の基礎構造物の耐震設計および耐震補強設計は、地盤との相互作用を性能照査に取り入れることで、合理的な設計が可能となるものがある。これは、橋の基礎構造物に地震動が作用する際、基礎構造物と周辺地盤の相互作用の働きで地震動が低減する効果を期待するものである。

地盤等の影響による低減効果の現象は不確実性が多く、設計に取り入れるのは困難である。そのため、本研究の目的は、現行の動的耐震照査の応答のばらつきを整理した上で、実測記録を基に地震動の低減効果を検証し、合理的な照査手法の提案を行うことである。

本研究は、現行の耐荷性能照査で用いる動的解析モデルに対して位相特性の異なる地震動を入力し、算出される応答のばらつきを静的解析の結果と比較して整理するとともに、実測記録を用いて地盤および構造物の振動特性を評価し、低減効果を動的解析で検証した。

【研究内容】

1. 耐荷性能照査で用いるモデルの応答のばらつき

対象橋（2 橋）の橋全体系の解析モデル（図-1）を用いて地震応答解析を行い、入力地震動の違いによる橋全体系の地震応答特性を算出し応答のばらつきを比較した。本研究は、入力地震動としてレベル 1 地震動相当の波形を 5 波、レベル 2 地震動タイプ I 相当の波形を 8 波、レベル 2 地震動タイプ II の波形を 8 波（2 橋合計 42 ケース）とした。本項では代表して、対象橋の一つである道路橋示方書の地盤種別の分類で I 種地盤に架設されている橋の入力地震動を表-1 に示す。

2. 実測記録から求めた地盤・橋の振動特性の評価

国総研が地震応答観測を実施している 1 橋を対象に、橋桁、橋脚天端、フーチング上面で実測された加速度波形（2 地震で得られた記録）を基に、橋の構造

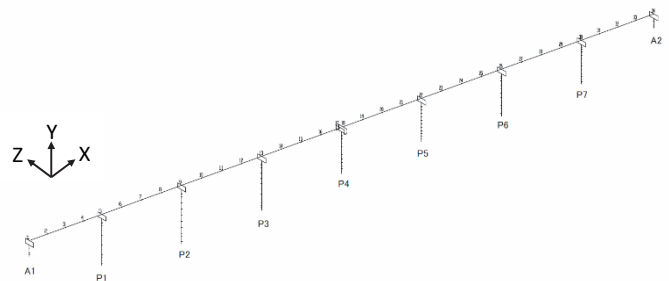


図-1 橋全体系の解析モデル

表-1 対象とする入力地震動

波形No.	L1-I	L2T I-I	L2T II-I
1	IWT0050807240026	十勝沖地震 (磐広河川事務所Y方向)	兵庫県南部地震 (神戸海洋気象台NS方向)
2	IWT0020807240026	東北地方太平洋沖地震 (一関出張所EW方向)	鳥取県西部地震 (KiK-net 日野NS方向)
3	HDXH020309260450	東北地方太平洋沖地震 (關北橋EW方向)	新潟県中越地震 (K-NET 小千谷EW)
4	MYGH060806140843	東北地方太平洋沖地震 (K-NET 小川NS方向)	胆振東部地震 (KiK-net 追分NS方向)
5	道示標準波 L1-I	東北地方太平洋沖地震 (K-NET 高萩)	鉄道標準L2specII_G1
6	-	道示標準波 L2T I-I-1	道示標準波 L2T II-I-1
7	-	道示標準波 L2T I-I-2	道示標準波 L2T II-I-2
8	-	道示標準波 L2T I-I-3	道示標準波 L2T II-I-3

部材及び地盤の減衰特性を評価し、減衰定数の違いによる地震応答特性を検証した。減衰定数は、RD 法を適用し、支承、橋脚、基礎、地盤の実測に基づく値を算出した。

各構造部材の減衰定数の算出方法を表-2 に示す。RD 法を用いて減衰定数を算出する際には、橋の固有振動数を観測記録のフーリエスペクトルやフーリエスペクトル比から判読し、着目する振動数を確認した上で実施した。

さらに、減衰定数をパラメータとして、道路橋示方書より設定したモデルと RD 法より算出した減衰定数で設定したモデルに対して動的解析による地震応答解析を行うことで、減衰定数の違いによる橋の地

表-2 本研究で設定した減衰定数算出の考え方

構造部材	減衰定数の算出方法
上部構造	鉛直方向の相対加速度からRD法により設定
支承	桁と橋脚天端の橋軸方向の相対加速度からRD法により設定
橋脚	橋脚天端とフーチング上面の橋軸方向の相対加速度からRD法により設定
基礎 (集約ばね)	①基礎を含めた橋梁全体の減衰定数を桁、橋脚天端、フーチング上面の加速度記録からRD法により設定
	②橋梁全体の集約ばねモデルで固有値解析を行い、ひずみエネルギー比例減衰が①で設定した値となるように、基礎の減衰定数を調整することでフィッティング
基礎 (一体モデル)	集約ばねモデルで設定した値
地盤	入力地震動を作用させた際のSHAKEによる収束物性値を設定

震応答特性を把握した。解析モデルは、①上部構造～基礎構造系の解析モデル、②橋全体の解析モデル、③地盤と橋全体を一体とした解析モデルの3モデルとし、入力地震動は、各モデルに対してレベル1地震動相当の波形を3波形入力した。

【研究成果】

1. 耐荷性能照査で用いるモデルの応答のばらつき

本項では、I種地盤に架橋されている橋を対象にレベル2地震動タイプI相当の波形を入力した場合の応答塑性率および残留変位を代表して示す(図-2)。応答塑性率は1波目と3波目は道示標準波の3波平均よりも大きい。これに対して、2波目、4波目、5波目は、道示標準波の3波平均よりも小さい。また、エネルギー一定則より算定した応答塑性率よりも動的解析より算定した応答塑性率の方が小さい。残留変位は応答値のばらつきが大きく、道示標準波の3波平均に対する大小関係も橋脚によって異なっていた。また、エネルギー一定則より算定した残留変位よりも、動的解析より算定した残留変位の方が小さい。

2. 実測記録から求めた地盤・橋の振動特性の評価

表-3に本項で設定した減衰定数を示す。RD法で減衰定数を算出する場合は、2つの地震で得られた値の平均値を設定値とした。なお、上部構造は観測記録からの算出が困難であったため、本検討では道路橋示方書の標準値を設定した。表-3より、観測記録より算出した減衰定数は、道示の標準値と比較して小さい値となった。基礎の減衰は、道示の標準値と比べて1/10程度と小さな値となった。

表-3で設定した減衰定数より、各モデルにおける固有値解析結果に基づいて設定したレーリー減衰および設定した減衰と道路橋示方書の減衰定数での解

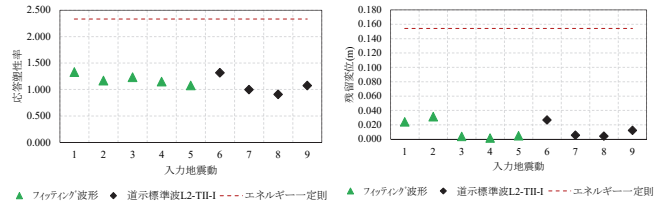


図-2 それぞれの入力地震動で得られた応答塑性率(左図)、残留変位(右図)

表-3 本研究で設定した減衰定数

構造部材	道示モデルの減衰定数	本検討で設定した減衰定数			備考
		11/22の地震の観測記録	12/30の地震の観測記録	設定値	
上部構造	0.02			0.020	
支承	0	0.018	0.021	0.020	平均値
橋脚	0.05	0.022	0.024	0.023	平均値
基礎	0.2			0.030	

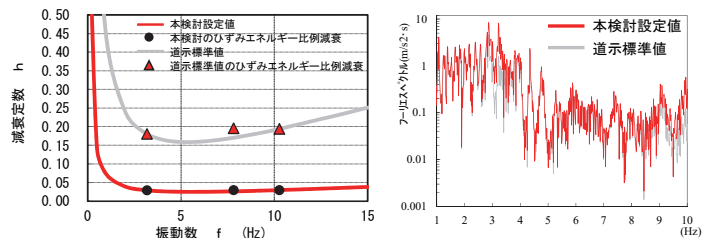


図-4 減衰定数の変化による橋脚天端の応答の比較(上部構造～基礎構造系解析モデル)

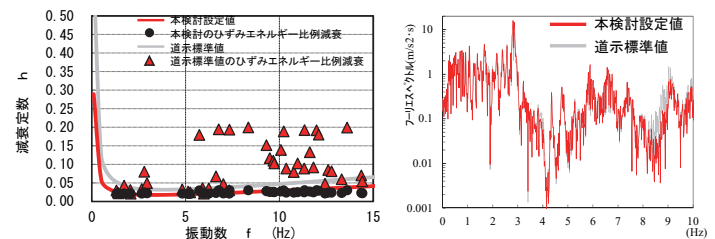


図-5 減衰定数の変化による橋脚天端の応答の比較(橋全体の解析モデル)

析結果の比較図を図-4、-5に示す。図-4、-5より、減衰特性は、RD法で算出した比例減衰の値が異なり、減衰の影響が小さく評価される特性となっている。橋脚天端の応答は、それぞれの結果は、RD法で設定した結果が比較的大きい振幅を示している。

本研究では、耐震設計された橋の地震応答のばらつきを整理し、動的解析で考慮する減衰特性を実測記録に基づく解析より検証した。本検討を基に、今後、構造物や地盤の影響による減衰効果等について引き続き検討し、耐震設計法の合理化・高度化へ向けた検討を実施する。

【成果の活用】

モデル化手法や地盤に起因する地震動の低減効果等を取りまとめ、構造物に関する技術基準類に反映し、耐震設計の一層の合理化に貢献する。

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 令和元年度～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	OHSIRO Hideaki	Senior Researcher	MITSUTANI Yuki
研究官	井星 雄貴	研究官	森本 恵美
Researcher	IBOSHI Yuki	Researcher	MORIMOTO Emi
交流研究員	林 基樹	交流研究員	大野 琢海
Guest Research Engineer	HAYASHI Motoki	Guest Research Engineer	OONO Takumi
交流研究員	秋元 佳澄		
Guest Research Engineer	AKIMOTO Kasumi		

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, comprehensive evaluation tender method and other methods.

【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。平成26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、技術提案・交渉方式、事業促進PPP等の多様な入札契約方式の導入が進んでいる。これらの多様な入札契約方式は、導入実績が少なく、受発注者双方の負担が大きくなりやすいことから、国土技術政策総合研究所では、これらの入札契約方式の実用性、実効性を向上させるため、適用支援及び適用状況のフォローアップを行い、改善手法を検討している。

【研究内容・研究成果】

(1) 技術提案・交渉方式

令和3年2月現在、国土交通省直轄工事では、21工事で技術提案・交渉方式が適用されている（図-1）。施工に着手している工事（9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・交渉方式の効果・課題を整理した。技術提案・交渉方式の適用により、例えば図-2に示す、プロセス改善の効果、リスク低減の効果等の効果があることを把握した。また、施工が完了した4工事について、実施状況を確認し、4工事とも手戻りとなるような大きな事象は発生しておらず、遅延なく、概ね見込んでいた工事費の範囲内で完了していることを確認した。

また、技術協力時に優先交渉権者から予備設計で想定していない提案があった場合に、新たな追加調査や検討が必要となり、設計期間が延びる等の課題が生じた。技術協力の円滑な実施のためには、予備設計等の調査・計画の段階から、技術提案・交渉方式の適用を想定した検討が重要であることを把握した。

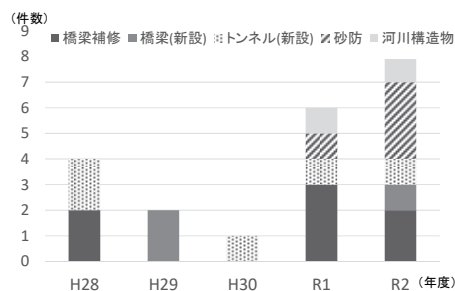


図-1 技術提案・交渉方式の実施状況

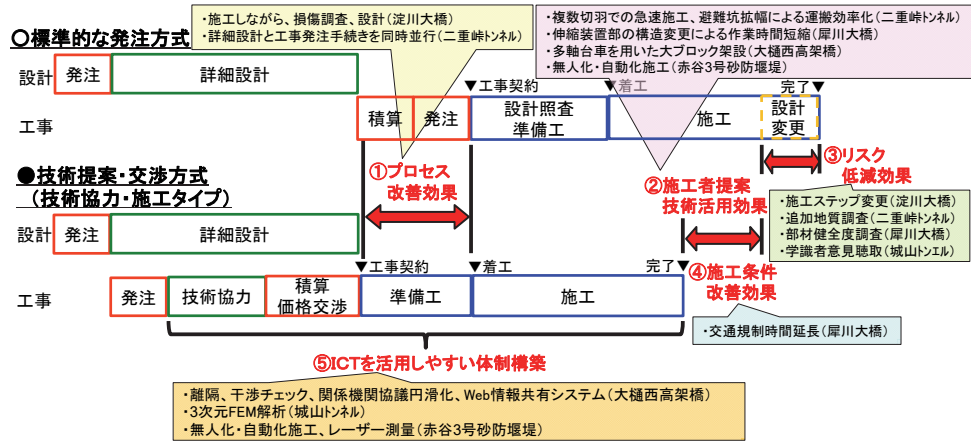


図-2 技術提案・交渉方式の適用効果

(2) 災害時の入札契約方式

近年の主要災害（平成 28 年熊本地震、平成 29 年九州北部豪雨、平成 30 年西日本豪雨、令和元年東日本台風）において、公表されている入札契約データの整理、地方整備局へのヒアリングにより、国土交通省が発注した業務・工事の入札契約方式の適用状況を整理した。

その結果、応急復旧段階には随意契約が適切に適用される一方で、本復旧段階では、随意契約の適用を迷う例が多いことを把握した。仮堤防のように構造物が本来有すべき機能・性能を回復するまでは、わずかな降雨でも住民が避難を余儀なくされ、住民生活に著しい支障がある。そのため、構造物が有すべき機能・性能を回復するまでは、本復旧工事でも随意契約を適用できる考え方を明確にした（図-3）。

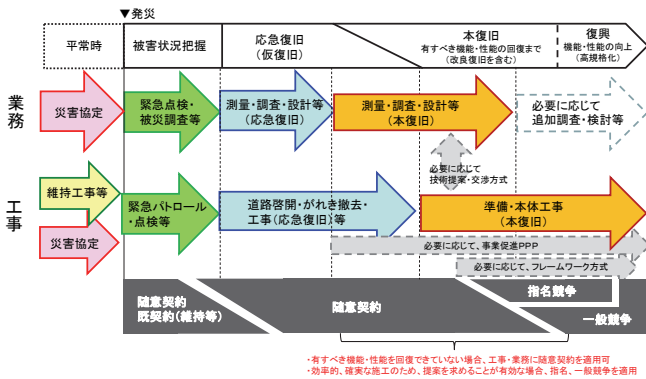


図-3 災害復旧における入札契約適用の考え方

(3) 工事の入札・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、工事の不確実性等に関する内容を整理した。

工事種別、競争参加者数等の分析の結果、仕様及び仕様の前提条件が確定しており、リスクの少ない総合評価落札方式（技術提案評価型 S 型等）において、技術評価方法等の運用改善のため、生産性向上のテーマを

求めるニーズがあることを把握した。

工事の不確実性に関する整理の結果、目的物の変更を伴わない提案を求める技術提案評価 S 型、中小規模の工事に多く適用される施工能力評価 I・II 型の工事では、図書不整合（現場状況の相違等）、作業用道路・ヤード、地質・土質条件の順に多く発生していることを確認した（図-4）。

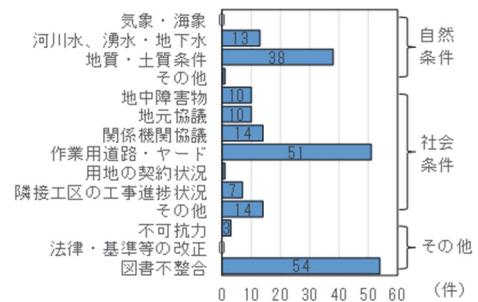


図-4 工事の不確実性に関する分類整理

(4) 業務の入札・契約方式

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た。

その結果、発注方式選定表では、プロポーザルを適用する区分の業務でも、運用を続けるうちに総合評価落札方式の適用割合が増える例があった。また、成果品質への影響には、入札時の技術評価結果より、過去の業務成績との相関性が高いことを把握した。これら知見を踏まえ、業務の入札・契約方式の選定、改善にあたっての留意事項を競争性、効率性等の多様な観点から整理した。

【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、ガイドライン改正等に反映された。

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 年度～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 2015 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。

本報では、道路土工構造物のうち現行指針適用範囲外の大型カルバートの耐震性能照査に用いる解析モデルについて、既往の実験結果及び地震の影響を受けた実カルバートの再現解析により検討を行うとともに、この解析モデルを用いて各種条件で試設計を実施し、耐震設計法導入の影響について評価した結果を示す。

[研究内容及び研究成果]

1. 実験結果との比較解析

耐震設計手法は、静的な耐震設計法の一つである応答変位法を用いることとした。解析モデルは、カルバートの躯体を線形の梁要素、周辺地盤をばね要素（地盤ばねとジョイント要素を考慮）とした（図-1）。

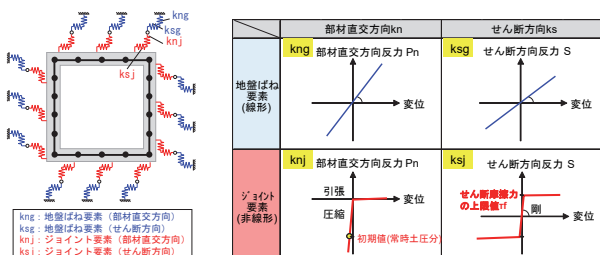


図-1 躯体及び地盤のモデル化の概要

上述の解析モデルを用いて、表-1 に示す既往の 2 事例の遠心模型実験結果との比較解析を行った。なお、精度のよい解析モデルとする上で、躯体周辺部のせん断摩擦力の上限値の設定が重要になることから、2 事

例とも、3 ケース変化させて検討を行った（表-2）。

表-1 模型実験の事例

事例	盛土材	内空断面幅(m)	連数	土被り厚(m)	検討ケース数
1	細粒土	14m	1連	0.5m	3ケース
2	細粒土	14m	1連	10m	3ケース

表-2 検討ケース

検討ケース	周面せん断力の上限値 (頂版・側壁)	周面せん断力の上限値 (底板)	備考
1	$c + \sigma \tan \phi$	$c + \sigma \tan \phi$	※1: H24 連系 IV (摩擦角: 土とコンクリート)
2	$\sigma \tan(2/3 \phi)$ 【※1】	$\sigma \tan(2/3 \phi)$ 【※1】	※2: H24 連系(ケーソン基礎の最大周面摩擦力度)
3	$0.5(c + \sigma \tan \phi)$ 【※2】	$\sigma \tan(2/3 \phi)$ 【※1】	

解析結果の例として、図-2 に事例 2（ケース 3）のカルバートの各部材の実験と解析結果の最大曲げモーメントを比較した図を示す。周面せん断力の上限値を低減しないケース 1 に対して、低減したケース 2、3 とともに、実験で得られた躯体の最大曲げモーメントとよく合う結果となった。

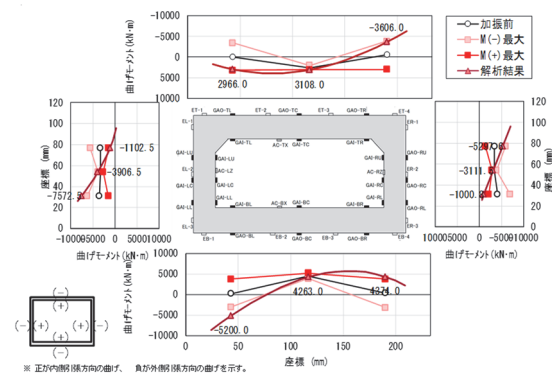


図-2 曲げモーメント図（事例 2：ケース 3）

2. 地震の影響を受けた実カルバートとの比較解析

1. で検討した解析モデルを用いて、地震の影響を受けた実カルバートを対象として解析を実施し実被害状況との比較を行うことで、提案したモデルの妥当性を

※本報告は令和元年度から令和 2 年度へと継続して実施した研究の成果を令和 2 年度研究成果としてまとめたものである。

検証した。なお、躯体は、実カルバートの材質を考慮し非線形(M~φ)の梁要素とした。

被災事例として、兵庫県南部地震(1995年)における大開駅、被災無し事例として、熊本地震(2016年)における九州道の横断カルバートを対象とする。対象カルバート位置における一次元の地盤モデルを構築し、等価線形解析により地盤変位を求めた。一次元等価線形解析における入力地震動は、対象カルバート近傍での観測記録に基づき、大開駅は神戸大学観測波形、九州道はKMMH16益城を使用した。また、躯体周辺部のせん断摩擦力の上限値は、以下のとおり設定した。

[頂版・側壁] $\tau f = 0.5 (C + \sigma \tan \phi)$

[底板] $\tau f = \sigma \tan \phi$ $\tan \phi$ は擁壁工指針より設定
一次元等価線形解析の結果、カルバート頂版と底板位置における地盤の最大変位は、大開駅で約2cm、九州道は約3cmとなった。

(1) 被災事例(大開駅)

大開駅の被災は、中柱の損傷が特徴的で、最も損傷が激しい区間は、ほとんどの中柱が崩壊し、上床版が崩落した。試算結果では、中柱を中心にせん断照査がOUTとなり、概ね実被害状況を再現した結果となった。

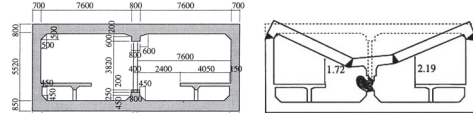


図-3 大開駅断面図(被災前後)

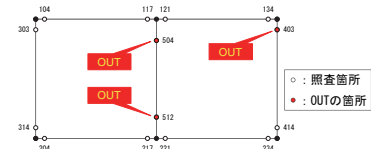


図-4 大開駅解析結果(せん断耐力照査)

(2) 被災無し事例(九州自動車道横断カルバート)

震度7を計測した位置に設置されているカルバートを対象としたが、継手の開き以外は躯体に目立った損傷は確認されていない。試算結果では、全ての照査項目を満足し、実被害を再現した結果となった。

3. 表層及び盛土層の剛性条件の違いによる比較

表層及び盛土層のせん断波速度の低減係数 C_v 及び盛土層のせん断波速度 V_s の違いによる影響を把握するため、1.及び2.で検討した解析モデルを用いた試設計を行った。具体的には、図-5に示す地盤モデルを設定し、この地盤モデルに対して、 C_v 及び V_s の値を変化させ(表-3)、H29道路橋示方書に示されるレベル2(タイプII)の動的解析用標準加速度波形を表層地盤上面から基盤層まで引き戻しを行った上で盛土層を含む表層地盤に入力し、モード解析により地盤の変位を算出して、応答変位法による入力値を設定した(図-6)。図-7にカルバートの応答値(曲げモーメント)の比較を示す。II種地盤に設置されるカルバートの応答値は

$C_v=0.4$ のケースが大きくなる傾向となったが、 V_s は200m/s、250m/sとも同程度となった。

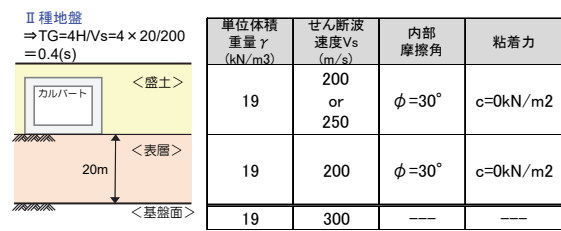


図-5 地盤モデル(II種地盤の例)

表-3 試設計の検討ケース(II種地盤の例)

内空幅	内空高	表層地盤及び盛土層のせん断弾性波速度の低減係数	盛土層のせん断弾性波速度	地盤条件
6.5m	5.0m	$C_v=0.2$	$V_s=200\text{m/s}$ $V_s=250\text{m/s}$	II種地盤相当
		$C_v=0.4$	$V_s=200\text{m/s}$ $V_s=250\text{m/s}$	
		$C_v=0.8$	$V_s=200\text{m/s}$	
			$V_s=250\text{m/s}$	

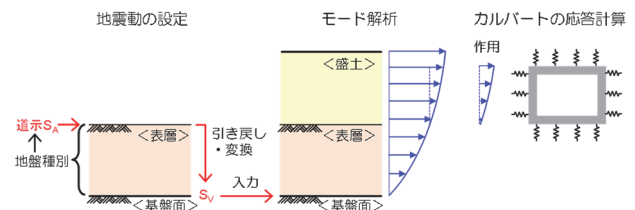
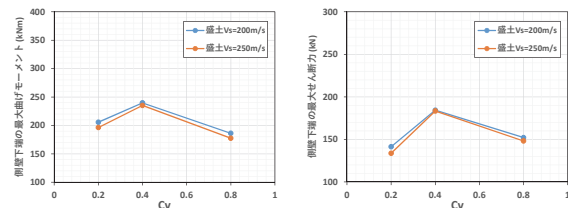


図-6 耐震設計手法の流れ(イメージ)



(最大曲げモーメント)

(最大せん断力)

図-7 C_v 、 V_s の違いによる応答値の比較(II種地盤)

4. 従来設計手法との比較

内空幅、内空高、土被り厚等を変化させ、常時荷重に基づく従来の設計法により構造諸元を決定したカルバートに対して、地盤条件を変化させ、1.~3.で検討した解析モデルを用いた試設計を行った。試設計の結果、従来型のカルバートに加え従来型の適用範囲を超えるカルバートにおいても各照査項目で全て満足となる結果となった。

5. まとめ

実験結果及び地震の影響を受けた実カルバートとの比較解析を行い、実現象と整合する解析モデルを明確化した。また、提案した解析モデルを用いて、内空断面等の条件を変化させ、試設計を行い、従来型カルバートに加え従来型の適用範囲を超えるカルバートにおいても構造諸元に変更が生じないことを確認した。

[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。

道路構造物としての舗装の要求性能に関する調査検討

Research on required performance of pavement as a part of road structure

(研究期間 令和元年度～令和3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
研究 官
Researcher

渡邊 一弘
WATANABE Kazuhiro
桑原 正明
KUWABARA Masaaki
若林 由弥
WAKABAYASHI Yuya

In order to efficiently manage the pavement of a huge stock with a limited budget and road managers, it is important to select an appropriate pavement type in consideration of the life cycle cost. In fact, in Japan, after 2013, the common specification has indicated that the pavement type should be selected in consideration of life cycle costs, etc. In this study, authors analyzed the trends of concrete pavement construction carried out after 2013 by pavement type and construction site. In addition, a damage survey was conducted on the sections that were analyzed and that had deteriorated early.

〔研究目的及び経緯〕

膨大なストックを有する道路舗装について、技術者が不足する中限られた予算で効率よく管理していくためには、舗装種別の適切な選択等を通じて、ライフサイクルコストを低減させていく必要がある。国土交通省では、平成24年の技術基本計画にて、「コンクリート舗装等耐久性の高い素材の採用等によるライフサイクルコストの縮減を目指す」ことを戦略的な維持管理・更新に資する技術研究開発の一環として挙げており、これを受け平成25年以降の設計業務等共通仕様書では、「基盤条件、環境条件、走行性、維持管理、経済性（ライフサイクルコスト）等を考慮し、舗装（アスファルト舗装／コンクリート舗装等）の比較検討のうえ、舗装の種類・構成を決定し、設計する」旨が示されている。

本調査では、近年施工されたコンクリート舗装の供用性を確認することを目的に、平成25年度以降に施工されたコンクリート舗装工事データを整理し、施工箇所や施工条件等の傾向について分析を行った。ま

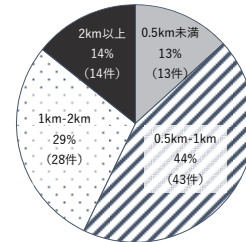


図-1 工事道路延長の内訳

た、この中から実際に早期に劣化している区間を対象に損傷調査を実施した。

〔研究内容〕

1. 近年施工されたコンクリート舗装の実態調査

平成25年度以降に着工し平成30年度までに完成したコンクリート舗装工事のうち、明かり部延長が含まれる工事を分析対象とした。表-1に、収集した工事事例の件数及び施工延長を示す。工事件数は98件で、道路延長は約128kmであった。

地域別にみると、東北が工事件数・延長ともに最も多く、逆に関東では、明かり部を含むコンクリート舗装工事が行われていなかった。東北でのコンクリート舗装工事が多い理由は、東日本大震災後の道路整備として、新設工事件数が多かったためと考えられる。図-1に工事道路延長の内訳を示す。500m未満の工事件数は全体の13%程度であり、比較的延長の長い工事にコンクリート舗装が適用されていることが分かった。

これらのデータを対象に舗装種別や施工箇所についての傾向分析を行った。

2. 早期に劣化したコンクリート舗装の損傷調査

1. で分析したコンクリート舗装について、車両からのビデオカメラで撮影した路面画像により路面の損傷状況を確認し、損傷が確認された区間を対象に現地調

表-1 分析の対象とする工事

地域	工事件数	工事道路延長合計 (km)		
		明かり部	トンネル部	計
北海道	1	0.10	3.00	3.10
東北	32	19.86	36.69	56.55
関東	0	-	-	-
北陸	10	7.36	11.98	19.34
中部	11	8.84	0.50	9.34
近畿	4	1.12	5.47	6.59
中国	11	7.98	3.00	10.98
四国	5	3.18	0.59	3.77
九州	24	15.39	3.28	18.67
計	98	63.83	64.50	128.33

※本報告は令和元年度から令和2年度へと継続して実施した研究の成果を令和2年度研究成果としてまとめたものである。

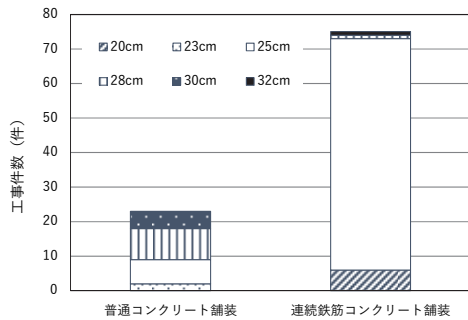


図-2 舗装種別および Co 版厚別の件数

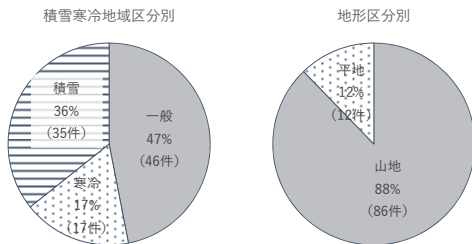


図-3 施工地域別の施工件数

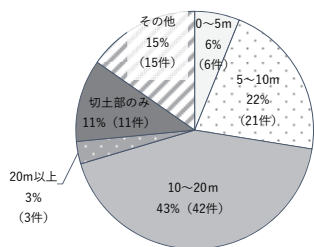


図-4 最高盛土高別の施工件数

査を行った。

【研究成果】

1. 近年施工されたコンクリート舗装の実態調査

初めに、舗装種別および舗装構成に関する傾向について分析した。図-2 に舗装種別および表層コンクリート版厚別の施工件数を示す。まず、舗装種別については、普通コンクリート舗装よりも連続鉄筋コンクリート舗装の工事が多いことが分かった。これは、連続鉄筋コンクリート舗装が横目地を設けない構造であることから、横目地部での振動・騒音について道路管理者が配慮したためと考えられる。表層コンクリート版厚については、連続鉄筋コンクリート舗装のほとんどが版厚 25cm で、普通コンクリート舗装のコンクリート版厚は、25cm または 28cm が多い傾向にあった。一方、連続鉄筋コンクリート舗装、普通コンクリート舗装いずれの場合もコンクリート版厚が 23cm 以下のものは少なく、コンクリート舗装が交通量の多い箇所でも適用されていることが推察される。

続いて、施工条件に関する整理を行った。図-3 に積雪寒冷地域区分別および地形区分別の施工件数の内訳を示す。まず、積雪寒冷地域区分において、積雪地域や寒冷地域での施工が多いことが分かった。次に地形別



図-5 横断構造物上に発生した横断ひび割れ

表-2 横断構造物上のひび割れ発生状況

Co版No.	No.17	No.43	No.80	No.147
ひび割れ本数	上下線各3本	上下線各1本	0本	上りのみ1本
最大ひび割れ幅	1.5mm	0.8mm	-	0.35mm
横目地間隔	4.8m	10m	7.5m	5.0m
鉄網	D6 二重	D6 一重	上り D6 二重 下り D13 二重	D13 二重
盛土高	最大10m程度	最大19m程度	(切土区間)	最大7~8m
土被り厚	1m程度	6m程度	0m	2m程度
路床改良	無し	無し	有り	有り

にみると、山地での施工が多いことも分かった。平地部での施工が少ない理由については、都市部において掘り返し等の理由からアスファルト舗装が選ばれやすいためと考えられる。

図-4 に、施工箇所における最高盛土高別の施工件数の内訳を示す。一般的にコンクリート舗装は、圧密沈下が発生する可能性がある軟弱地盤や盛土上で施工した場合、コンクリート版が剛体で沈下に追従しないため、版の割れや段差が発生しやすいと考えられているが、今回分析した工事のうち、半数程度は 10m 以上の盛土区間が存在する箇所に施工されていることが明らかになった。

2. 早期に劣化したコンクリート舗装の損傷調査

1. で分析を行った区間を対象に走行車両上からビデオで路面画像を撮影し、ひび割れなどの損傷の発生状況について確認した。ほとんどの区間では目立った損傷は発生していなかったが、幅の大きいひび割れが複数箇所にわたり発生した区間が 1 路線だけ存在し、当該路線について現地で損傷状況を確認した。

図-5 に実際に発生していたひび割れの一例を示す。ひび割れはいずれもカルバート等の横断構造物上に施工されたコンクリート版に生じていた。表-2 にひび割れの発生状況を示す。ひび割れが最も多く発生していたコンクリート版は、横断構造物との距離が最も近く、構造物背面の盛土が十分に締め固められていない可能性が考えられる。この事例のように横断構造物上はコンクリート舗装が壊れやすく、有効な設計法や施工法について他の工事の分析なども行いながら進めていく予定である。

【成果の活用】

本調査結果は、コンクリート舗装の損傷事例として技術図書にとりまとめるとともに、引き続き調査を進めた結果について、設計および施工上の留意点を技術図書に反映する予定である。

地盤-橋全体系の耐震設計に用いる地盤震動特性の評価手法の検討

Study on evaluation method of ground shaking characteristics used for seismic design of soil-bridge system
(研究期間 平成 30 年度～令和 2 年度)

道路構造物研究部 道路地震防災研究室
Road Structures Department
Earthquake Disaster Management Division

室長 片岡 正次郎
Head KATAOKA Shojiro
研究官 大道 一步
Researcher OOMICHI Kazuho
研究員 石井 洋輔
Research Engineer ISHII Yosuke

The purpose of this research is to propose the evaluation method of ground shaking characteristics that contributes to the improvement of seismic design of bridges. The evaluation method of the strength performance of bridges considering the reduction effect of the earthquake motion is verified using the damage reproduction analysis and the earthquake observation record of the highway bridges.

[研究目的及び経緯]

橋の基礎構造物の耐震設計および耐震補強設計は、地盤との相互作用を性能照査に取り入れることで、合理的な設計が可能となるものがある。これは、橋の基礎構造物に地震動が作用する際、基礎構造物と周辺地盤の相互作用の働きで地震動が低減する効果を期待するものである。

本研究は、橋の耐震設計基準の合理化に資する地盤震動特性の評価手法を確立するため、現行の動的耐震照査の応答のばらつきを整理した上で、地盤震動特性による低減効果を考慮することで合理的な性能照査手法を提案することを目的としている。

令和元年度は、現行の耐荷性能照査で用いる動的解析モデルに対して位相特性の異なる地震動を入力し、算出される応答のばらつきを静的解析の結果と比較して整理するとともに、実務でも活用されている地盤と橋を一体とした解析で考慮している地盤震動特性を検証した。

[研究内容]

(1)耐荷性能照査で用いるモデルの応答のばらつき

現行の耐荷性能照査で用いる動的解析モデルに対して、位相特性の異なる地震動をそれぞれ入力して、静的解析結果と比較した。

まず、地盤種別および道路橋示方書 V 耐震設計編(以下、道示)に規定される地震動のタイプ毎に、表-1 に示す地震で観測された波形を 10 波形ずつ(計 90 波形)用意し、振幅調整により道示の標準加速度応答スペクトルにフィッティングした。本研究では、フィッティングによるばらつきも検討するため、フィッティングの際の繰返し計算の回数を変化させ、

各波形に対して 3 ケース実施し、計 270 波作成した。作成した波形及び道示の標準加速度波形(計 291 波形)を用いた 1 自由度系の非線形動的解析を実施し、それぞれの最大応答塑性率を確認した。そして、RC 橋の解析モデル(表-2)に対して非線形動的解析を行い(97 波×9 モデル=873 ケース)、ばらつきを整理した。

(2)地盤と橋を一体とした地震応答特性

国総研が地震応答観測を実施している 2 橋を対象に、地盤と橋を一体としたモデル(図-1)で解析をする際に見込んでいた地盤震動特性を検証した。まず、解析対象橋で観測された波形を用いて、観測結果と解析結果の違いを確認し、解析結果が観測結果と近似するように、解析モデルを作成した。このモデルに対し、観測波形 5 波と道示の I 種地盤の標準加速度

表-1 解析に用いた対象地震

	I1地震動	I2地震動II	I2地震動III
I 種地盤	昭和53年宮城県沖地震 など	平成15年十勝沖地震 平成23年東北地方太平洋 沖地震	平成7年兵庫県南部地震 平成12年鳥取県西部地震 平成16年新潟県中越地震 平成30年胆振東部地震
	II 種地盤	昭和43年日向灘地震 など	平成15年十勝沖地震 平成23年東北地方太平洋 沖地震
III 種地盤		昭和58年日本海中部地震 など	平成15年十勝沖地震 平成23年東北地方太平洋 沖地震

表-2 RC 橋の解析モデル

橋梁名	A	B	C	D	E	F	G	H	I
地盤種別	III種	III種	III種	III種	III種	II種	II種	II種	I種
固有周期(s)	1.01	0.9	1.11	0.53	0.68	1.64	1.84	1.23	0.82
橋脚	RC橋脚								
着目方向	橋軸						直角		橋軸
支承条件	分散			固定		免震		固定	
基礎構造	杭基礎								直接基礎

※本報告は令和元年度から令和 2 年度へと継続して実施した研究の成果を令和 2 年度研究成果としてまとめたものである。

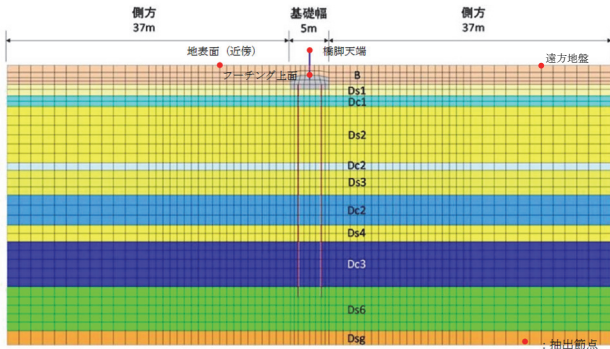


図-1 地盤と橋を一体とした解析モデル

波形(7波)を耐震設計上の基盤面($V_s=300\text{m/s}$ 相当)から入力し、応答の変化を確認した。

【研究成果】

(1)耐荷性能照査で用いるモデルの応答のばらつき
 まず、レベル2地震動タイプIIにフィッティングした地震動を対象に1自由度系の非線形動的解析を実施した結果を図-2に示す。図-2は20回の繰返し計算でフィッティングした波形に対し、道示に示される標準加速度波形の3波形での平均(以下、道示3波平均)の応答塑性率との比を示している。図-2より、それぞれの波形は道示3波平均の0.8~1.2倍程度の範囲であり、全体的にばらつきは大きくないことが分かった。

表-2に示す解析モデルに対し、レベル2地震動タイプIIにフィッティングした波形を入力した結果を図-3に示す。図-3より、道示3波平均は、静的解析であるエネルギー一定則による応答塑性率、および検討した10波の平均と比較して同程度であることが分かった。また、フィッティング回数によるばらつきは小さいことが分かった。

(2)地盤と橋を一体とした地震応答特性

本稿では、対象橋の2橋のうち1橋の結果を示す。

対象橋は、橋脚天端、地盤、フーチング上面、基盤面で地震応答観測をしており、実測記録に基づいて解析モデルを作成している。耐震設計上の基盤面で観測された記録を入力し、解析結果と橋脚天端およびフーチング上面で観測された記録を比較して、観測記録に近づくよう解析モデルを作成した。

道示に示されるレベル2地震動タイプIIの1波形を入力した際の結果を図-4に示す。なお、フーリエスペクトルは、周期2秒以上でフィルター処理をしている。図-4では、フーリエスペクトルの0.2秒付近で、構造物の影響がない遠方の地盤よりフーチング面の地震動の方が小さくなっており、地盤震動特性による低減効果が確認され、本検討に用いた解析

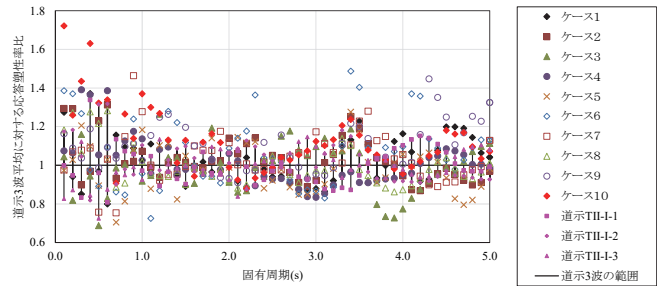


図-2 道示3波平均との応答塑性率比

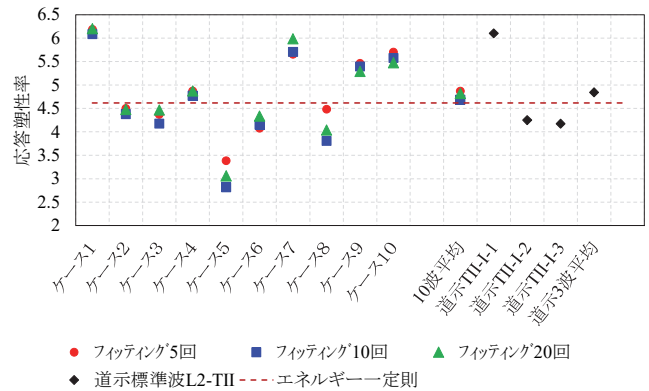


図-3 静的解析と動的解析での応答塑性率の関係

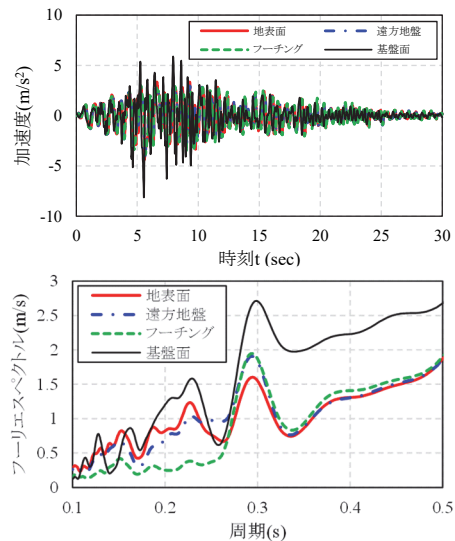


図-4 地盤と橋を一体とした解析結果の比較
 (上段：波形，下段：フーリエスペクトル)

の低減効果は、0.1~0.3秒付近の極短周期帯で2倍程度であることが分かった。

今後、地盤と橋を一体としたモデルで考慮している地盤震動特性による低減効果を整理し、現行耐震設計より合理的な解析手法を検討する。

【成果の活用】

モデル化手法や地盤に起因する地震動の低減効果等を取りまとめ、構造物に関する技術基準に反映し、耐震設計基準の合理化に貢献する。

道路整備等の生産性向上に資するロボット及び ICT 技術の利活用に関する調査

Survey on utilization of robot and ICT technology that contributes to productivity improvement of road construction.

(研究期間 平成 28 年度～令和 2 年度)

社会資本マネジメント研究センター
社会資本施工高度化研究室
Research Center
for Infrastructure Management
Advanced Construction
Technology Division

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

山下 尚
YAMASHITA Hisashi
小塚 清
KOZUKA Kiyoshi
大槻 崇
OHTSUKI Takashi
金森 宗一郎
KANAMORI Soichiro
畑迫 勇太
HATASAKO Yuta
天野 克己
AMANO Katsumi

In this research, our research team tested verification method of the accuracy in order to utilizing machine as-built data to calculate the yield of earthwork and prototyped a viewer for supervision and inspection that complies with the standard for exchanging control data for embankment compaction.

〔研究目的及び経緯〕

国土交通省では、i-Construction 施策として、平成 28 年度から ICT 土工を、平成 29 年度から ICT 舗装工を導入している。これら ICT 活用工事では、①3 次元起工測量、②3 次元設計データ作成、③ICT 建機による施工、④3 次元出来形管理等の施工管理、⑤3 次元データの納品の各段階で ICT 技術を活用することとしている。

本研究では、上記の④に関し、「3 次元計測技術を用いた出来形管理要領 (案)」等に規定した精度確認試験方法の検証を通じ、精度確認試験を実施する際の手引き作成等のための資料整理を行った。また、監督・検査の合理化を検討する目的で、「TS・GNSS による盛土締固め管理データ交換標準 (案)」に対応した監督・検査での使用を想定したビューワの改良を行った。

〔研究内容・研究成果〕

1. ICT 施工により取得される施工履歴データの出来形への活用を想定した精度確認方法の安全かつ効率的な実施に向けた検証

(1) 法面での精度確認試験方法の検証

令和 3 年 3 月 29 日改定「3 次元計測技術を用いた出来形管理要領 (案)」で、油圧ショベルの施工履歴データの盛土法面等の出来形管理にも適用可能となっ

た。平面を用いた精度確認でも適用判定は可能であるが、法面を用いて精度確認を行う際の課題整理に向けた検証を実機にて行った。検証の状況を図-1 に示す。



図-1 法面での刃先精度検証の試験

実験の結果、法面での精度確認試験における安全確保上の課題と対応策を確認した。

(2) 刃先履歴データ等の IoT データ改竄防止策検討

施工時の油圧ショベルの刃先位置の移動履歴を出来形の推定値に用いる際には、取得データが改竄されていないことが重要となる。今まで、UAV 写真測量や締固め回数管理においては、センサーが取得した生データのログを出来形管理データのバックデータとして提出することとし、改竄によるメリットよりも改竄手間がかかることで改竄を防ぐ、いわば、ブルー・オ

※本報告は令和元年度から令和 2 年度へと継続して実施した研究の成果を令和 2 年度研究成果としてまとめたものである。

ブ・ワークの考え方に基づいた対策が取られている。一方で、今後、コンピュータ能力の飛躍的向上で、生データを含めた改竄が容易になる可能性もあり、更なる改竄防止策の検討を進めておく必要がある。

最新セキュリティ技術専門家ヒアリング等を進めた結果、工事の施工者と独立して、データ保存サービスを提供する事業者が、準リアルタイムで一定時間内に生成された先履履歴データ等のハッシュ値をタイムスタンプと共に記録し、そのハッシュ値とタイムスタンプを工事発注者に提出することで、データの改竄の有無を後からも確認できる手法の有効性を確認した。

2. TS・GNSSによる盛土締固め管理データ交換標準(案)に対応した監督・検査での使用を想定したビューワの改良

(1)ビューワ機能の変更検討

過年度開発の「TS・GNSSによる盛土締固め管理データ交換標準(案)」に対応する監督・検査での使用を想定したビューワに関し、リアルな施工環境を再現したデータチェックに関する要望が多数上がった。(表-1)

表-1 主な意見・要望

No	意見・要望
1	時系列で全層分の走行軌跡、回数分布の情報を重ね合わせて見られると、監督作業の効率化につながる。 現在は5分単位で閲覧しているため、ここを動画で確認できるとよい。
2	3次元のボクセルをクリックして、実際の転圧回数を確認できる機能があると良い。
3	出来形を3次元表示する機能があると良い。
4	データチェック画面の要素/属性は右側に、データの内容を左側に表示したほうがよい。
5	建設機械が走行するに従い、メッシュが塗られていくのが時系列で確認できるとよい。
6	背景図面を3次元オブジェクト上に表示する機能があると良い。

そこで、開発コンセプトを、「施工結果を確認する」から、提出データをデジタルツインによる表示で確認することに変更した。

(2)ビューワの開発

デジタルツインによる表示とは、現実の世界に似た環境を、コンピュータによる表示において実現することを指す。主要要素は、①リアルなベースマップ(背景地図)、②表示したい物の3次元データでの重ね合わせ表示、③それらの動画展開を実現するのが一般的であり、要望の実現にも沿ったこれらの実現を目指した。

ベースマップには、国土地理院が公開している「地理院タイル」を活用し、上空から撮影した写真とそれに高さを与える数値地図を組み合わせて用いている。

重ね合わせ表示と動画表示には、オープンプラットフォームとして多数活用されている「Cesium」を採用し、3Dグラフィクスに特化したJavaScriptライブラリの「Three.js」を組み合わせて用いた。

図-2が開発したデジタルツイン動画表示から切り抜いた表示である。図-3に示す過年度開発の走行軌跡を2Dで表示する画面と比較すると、現実感が高い施工状況表示が再現出来ていることが分かる。これにより、軌跡を表すGNSSのログデータの中に不整合のあるデータ混在が無いかを確認する場合、提出データ自体を動画表示し、その動作の視覚的チェックにより行える等の確認労力の削減メリットが確認できた。



図-2 デジタルツインでの動画表示

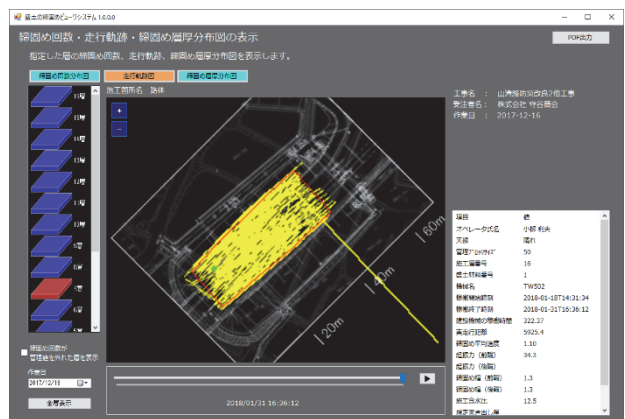


図-3 過年度開発の走行軌跡の2Dでの一括表示

[成果の活用]

施工履歴データの精度検証方法の試行結果は、要領にかかる施工会社等からの問い合わせ対応に活用していく。ビューワは、広く活用可能となるよう、対応データフォーマットの拡充の検討と改良等を行い、今後、地方整備局へ提供する予定である。