

領域 4

コスト構造を改革し、道路資産の効率的な形成

道路橋等の性能評価方法の充実・高度化に関する調査検討

Study on the sophistication of performance evaluation method for bridges

(研究期間 令和3年度～令和5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
交流研究員
Guest Research Engineer

白戸 真大
SHIRATO Masahiro
岡田 太賀雄
OKADA Takao
五味 傑
GOMI Takashi

This study aims at improving the standard design methods to evaluate the bridge system performance and reliability, varying from loads and load combinations to the limit states of structural members. This year, we have investigated the load-bearing performance for corrugated steel-plate web PC box girder bridges based on the past bridge inspection reports. The investigation has clarified the needs to study on new design load combinations and the design method for diaphragms and lateral bracing systems for future bridge types expected.

〔研究目的及び経緯〕

平成29年7月に道路橋示方書が改定され、従来の許容応力度法に替えて部分係数法が導入された。この改定は、新形式の橋梁や構造部材の性能の評価を具体的に行う手順のガイダンスにも成り得るものである。たとえば、橋に対する作用の同時載荷状況を反映できるように設計に用いる荷重組合せも刷新された。しかし、新しい形式の橋梁や構造部材の技術は常に進歩しており、断面の大型化や少数部材化など従来とは異なる特性を有する多様な橋に対しても、実績評価を踏まえて的確に性能を評価できるように、性能の評価方法を充実していく必要がある。

平成14年の道路橋示方書の性能規定化以後、新しい形式の一つとして比較的採用数が増えたものに、波形鋼板ウェブPC箱桁橋がある。その多くが供用から10年以上経過しつつある。そこで、本年度は、これらの橋の現在の状態を把握することを通じて、道路橋の現在の性能評価方法の課題を把握することにした。

〔研究内容〕

波形鋼板ウェブPC箱桁橋は、コンクリート箱桁のウェブを鋼材に置き換えることで死荷重を小さくした橋である。結果的に剛性も小さくなっていることから、応答に占める変動作用の寄与分が増加していると考えられる。分析の対象としたのは国が管理する波形鋼板ウェブPC箱桁橋の全数である18橋である。表-1に、18橋の諸元等を整理した結果を示す。これらの橋は平成5年～平成23年の約10年間の間に完成している。完成年によらず、全ての橋で、隔壁、裏打ち、鋼コンクリートの接合部などに顕著なひび割れが見られる。これらの部材・部位は、特に薄肉材料を用いるとき、上部

構造の変形が大きくなるまで断面形状を保持し、断面の破壊形態や耐荷性能の信頼性を担保する上で重要な役割を果たすものである。

写真-1に隔壁のひび割れ事例を示す。波形鋼板ウェブPC箱桁橋では、コンクリート箱桁橋の設計に準じて隔壁等の諸元を決定している場合が多い。桁の平面曲率によらず損傷が生じていることから、活荷重によるねじりやそりは橋の動きにさほど影響していない可能性が考えられる。写真-1(a)では、上角部コンクリートが圧壊している様子が見られる。したがって活荷重だけでなくその他の日々変動する作用との組み合わせによる桁の応答で、図-1に示すように軸方向に断面のせん断変形が生じたり、断面方向にせん断変形が生じ、隔壁上角部に応力集中が生じていることが疑われる。

写真-1(b)では、隔壁下側にあるケーブル偏向部から隔壁板下側固定端、そして側面へ抜けるひび割れも見られる。偏向力による局所応力が影響している可能性もあるが、偏向力の影響だけで有れば局所的なひび割れに留まる可能性も考えられる。しかし、写真-1(c)に示すように、偏向部と壁の接合部にコンクリートの圧壊のような損傷形態も見られ、単に偏向力だけでなく、桁の応答と連動して損傷が生じていることが疑われる。この位置でのひび割れについて、補修記録がある橋が4橋あり、写真-1(d)に示すように補修後に別なひび割れが生じた例もある。持続的に働く偏向力やコンクリートの収縮の影響だけでなく、橋の応答との組み合わせで損傷が生じていることが疑われる。

写真-2に、波形鋼板ウェブとコンクリート下床版の接合部及び橋脚柱頭部のひび割れの例を示す。波形鋼

表-1 分析対象とした波形鋼板ウエブ PC 箱桁橋の諸元等とひびわれ発生状況

名称	A橋	B橋	C橋	D橋	E橋	F橋	G橋	H橋	I橋	J橋	K橋	L橋	M橋	N橋	O橋	P橋	Q橋	R橋
延長(m)	173	306	118	356.5	280	218	211.5	243	754	233.5	565	180	244	220	500	270	688	261
径間数	3連	4連	2連	5連	4連	4連	3連	3連	4連+4連	2連	7連	3連	3連	3連	5連	3連	8連	3連
曲率(m)	1,100	1,200	1,100	4,000	1,500	∞	1,200	1,500	1,500	4,000	5,800	∞	1,300	1,300	3,500	1,300	3,000	∞
桁高変化	有り	有り	有り	無し	有り	無し	有り	有り	有り	有り	有り	有り	有り	有り	有り	有り	有り	有り
ウエブ形状	斜	斜	斜	斜	斜	斜	斜	鉛直	鉛直	鉛直	鉛直	鉛直	鉛直	鉛直	鉛直	鉛直	鉛直	鉛直
ウエブと隔壁の接合	無し	有り	無し	無し	無し	有り	有り	無し	無し	有り	無し	無し	有り	有り	有り	無し	有り	無し
PCケーブル	内+外	外	内+外	外	外	外	内+外	内+外	内+外	内+外	内+外	内+外	内+外	内+外	内+外	内+外	内+外	内+外
柱頭部の接合	ラーメン	ラーメン	ラーメン	支承	ラーメン	支承	支承	ラーメン	ラーメン(P1-P3) 支承(P4-P7)	支承	ラーメン	ラーメン	ラーメン	ラーメン	ラーメン	ラーメン	ラーメン	ラーメン
完成年度	H18	H18	H18	H16	H17	H15	H20	H21	H23	H17	H21	H23	H20	H20	H20	H21	H21	H21
点検年度	H21 H26 R1	H21 H26 R1	H21 H26 R1	H21 H26 R1	H21 H26 R1	H25 H30	H25 H30	H30	H30	H21 H25 H30	H24 H29	H25 H30	H23 H28	H23 H28	H23 H28	H23 H28	H23 H28	H25 H30
ひびわれ補修年度	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	H25	H25	H25	H25	-
ひびわれ発生状況	隔壁	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	裏打ち	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	鋼材とコンクリートの接合部	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

板ウエブとコンクリート下床版の接合部のひび割れは、橋脚位置の近傍で生じている傾向が見られた。コンクリートの乾燥収縮も原因として考えられるが、それだけでなく桁せん断力の大きな断面で波形鋼板ウエブとコンクリート下床版の接合部のひび割れが生じていることも疑われる。

波形鋼板ウエブ橋の調査からは、今後、橋の性能の評価方法の高度化のためにも下記の検討が必要であることが分かった。

- 設計基準では、橋の形式によらず少なくとも考慮すべき荷重組合せが規定されているが、活荷重以外の変動作用の組み合わせの追加の必要性を検討する必要がある。
- 鋼桁やコンクリート桁では隔壁側面が桁ウエブに固定され、充実断面とされるが、波形鋼板ウエブ橋では側面は固定されない場合も多い。したがって、偏向力による局所応力に対して、隔壁が反力を得られていないことが疑われる。換言すれば、隔壁が、上部構造の断面の変形を拘束する効果や影響を適正に反映するために、隔壁に対して厳しい荷重組合せの規定の充実について検討する必要がある。
- 鋼桁でもコンクリート桁でも、現状の隔壁の間隔、厚さ、ウエブとの固定度の決定方法は要求性能との関係が明確でなく、一般には経験的な構造細目によっている。そこで、鋼桁やコンクリート桁においても、橋の条件に応じてこれらを調整・最適化できる設計法を検討する必要がある。

[今後の課題]

今年度は損傷から橋の挙動を推定するに留まっているが、これらの橋のモニタリングなどを通じて、上記の仮説について検証を進める。



(a) 上角部の圧壊 (b) 外ケーブル偏向部からのひび割れ



(c) 偏向部と壁の接合部の圧壊 (d) 下角部の補修後に新たにひび割れ

写真-1 隔壁のひび割れ事例



写真-2 鋼・コンクリート接合部、橋脚柱頭部のひび割れ事例

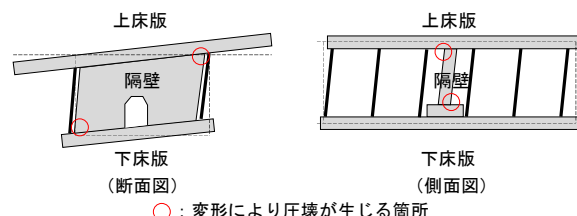


図-1 隔壁の断面方向/軸方向のせん断変形

[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

Research and study 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
佐々田 敬久
SASADA Yukihiro
石尾 真理
ISHIO Mari
佐藤 悠樹
SATO Yuki

The use of high-strength materials is expected to make bridge structures lighter and more rational. However, such materials sometimes are less ductile. In addition, as bridge structural members become thinner, they are subjected to higher variation in stress. Accordingly, more attention should be paid to preventing fatigue. This year, we conducted a cyclic bending loading test for a specimen of the beam-column connection for typical frame-type bridge columns, where a higher yield-stress steel was used. A special structural detail to relax stress concentration on the corner was tested to reduce the potential of fatigue crack. As a result, the tested structural detail worked well to reduce the stress concentration at the corner.

〔研究目的及び経緯〕

高強度材料を活用することで構造の合理化が期待できる。しかし、降伏強度が高くなるほど、降伏比（降伏点／引張り強さ）が高くなり塑性化後の強度の増加が見込めなかったり、伸び性能が小さくなる場合もある。また、一般的な鋼材と同様に、使用される部位や活荷重の変動により、疲労の発生が懸念される。そのため、高強度材料を構造体に適用する場合には、適用箇所の荷重状態を考慮した実験的な検討が欠かせない。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、適用にあたっての検証試験法を提案することを目的としている。

鋼製ラーメン橋脚の隅角部は、せん断遅れの影響で一般部よりも応力が大きくなる。その結果、ラーメン橋脚の板厚は隅角部のみならず、一般部まで板厚が厚くなる傾向がある。そこで、隅角部に高降伏点鋼（以下、SBHS）を適用することで、全体の板厚を抑えることができる可能性がある。一方で、隅角部近傍は応力の伝達が複雑であるため、活荷重の繰返しによる疲労に対しても有効な対策をとる必要がある。そこで、本年度は、鋼製ラーメン橋脚の隅角部に対して、従来の構造用鋼材より降伏点の高い、高降伏点鋼板を使用して、板厚を抑えつつ、フィレット構造を採用することで応力集中を緩和する方法について、その有効性を検証す

ることにした。

〔研究内容〕

写真-1 および図-1 に供試体形状と载荷試験装置図を示す。供試体は隅角部を模しており、470x470mmの矩形断面とし、材質は高降伏点鋼であるSBHS500を用い、板厚は6mmとした。フィレットの形状は、既往の研究成果を参考に決定した。

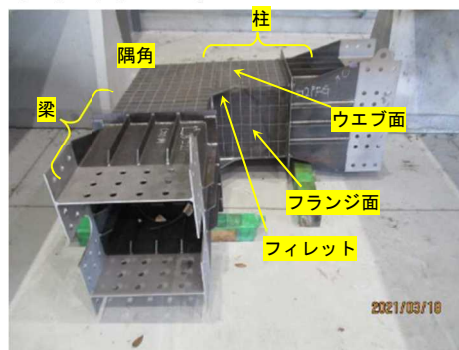


写真-1 供試体形状

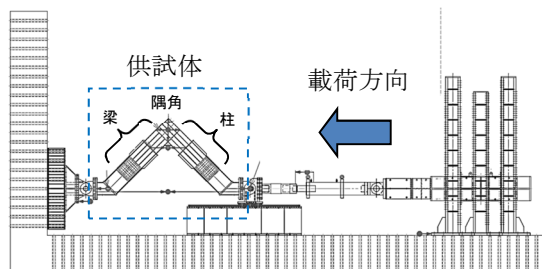


図-1 载荷試験装置図

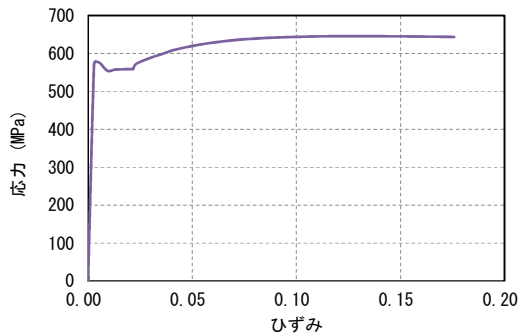


図-2 応力-ひずみ関係

今回使用した SBHS500 の応力-ひずみ関係を図-2 に示す。明確な降伏点、降伏棚が現れているとともに、降伏比は、0.90 となっている。荷重は、図-1 に示す荷重装置を用い、一方向の繰り返し荷重を与えた。荷重試験状況を写真-2 に示す。

【研究成果】

図-3 に荷重荷重が 0.5Py のときの、隅角部の三線交差部 (図-4 参照) から 20mm の位置にあるフランジの応力分布を示す。ここに、Py は、図-4 に示す計測点においてフランジが降伏に達する荷重、実験値の応力は計測されたひずみにヤング率を乗じたもの、また、応力は降伏応力 (σ_y) で無次元化したものである。また、奥村・石沢の方法で計算されるせん断遅れを考慮した応力に対応する計算値も示した。既往の研究により、フィレットが無い隅角部の応力分布は、奥村・石沢の方法でせん断遅れを考慮した応力の計算値と概ね一致することが分かっているが、実験値は、せん断遅れを考慮した計算値よりも小さく、フィレットの効果によりせん断遅れが低減されたことが確認できる。

フィレットは隅角部の強度を増加するためのものではなく、大きな荷重を受けたときに損傷が生じることを許容することも可能であるが、供用中に度々変形してしまうことは維持管理上避けるべきである。そこで、降伏荷重 Py に対して、安全率 2 程度をとることを想定し、0.5Py の荷重・除荷の繰り返しを 3 回実施した。繰り返し荷重によるフランジのひずみ分布の変化を図-5(a) に、フィレットの面外変位の変化を図-5(b) に、それぞれ示す。3 回という少ない繰り返しではあるが、荷重点、除荷点のいずれについてもひずみの変化は見られず、形状が維持されることが分かった。

以上より SBHS500 のような高強度鋼とフィレットを隅角部に適用することで、従来よりも合理的な隅角部の断面を設計できる可能性が確認出来た。



写真-2 荷重試験状況

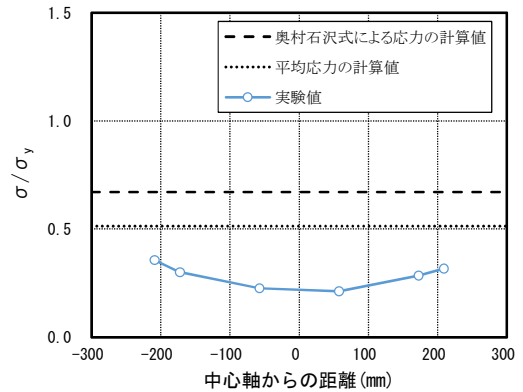


図-3 荷重荷重が 0.5Py のフランジの応力分布

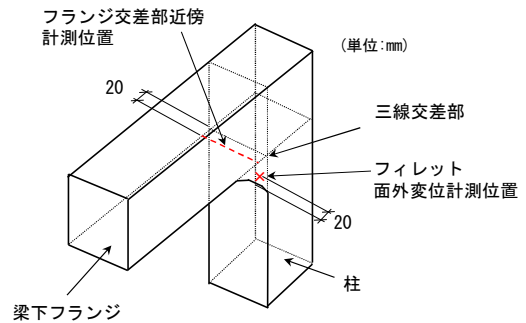
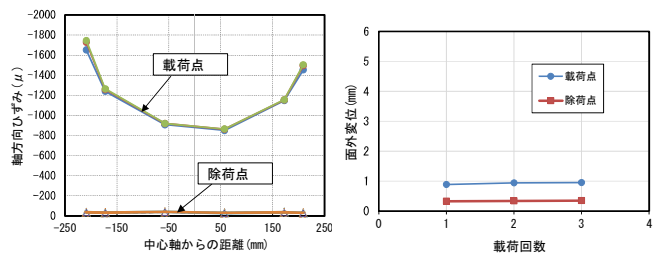


図-4 計測位置



(a) フランジのひずみ分布 (b) フィレットの面外変位
図-5 3 回繰り返しの伴う、フランジのひずみ分布およびフィレット面外変位の推移

【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。

橋台背面アプローチ部等の土工性能検証項目等の調査検討

Research on items to verify performance of earthworks at back approaches of bridge abutments

(研究期間 令和2年度～令和4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 宮原 史
Senior Researcher MIYAHARA Fumi
研究員 山田 薫
Research Engineer YAMADA Kaoru
交流研究員 岡崎 貴斎
Guest Research Engineer OKAZAKI Takayoshi

Performance verification methods for structures other than normal embankments used for the back approaches of road bridges have not been established. In this study, the performance verification items and test methods for the structures other than the normal embankment are investigated. In this fiscal year, dynamic centrifuge model tests were conducted to investigate the behavior of reinforced soil walls in the direction perpendicular to the bridge axis. As a result, it was confirmed that there was no obvious difference in the earth pressure affecting on the back of the abutment compared to the normal embankment. In addition, field measurements of earth pressure were carried out.

〔研究目的及び経緯〕

道路橋の背面アプローチ部（以下、「アプローチ部」）には、荷重軽減や用地制約への対応の観点から、通常の盛土以外の新技术が用いられる場合がある。道路橋示方書（以下、「道示」）IV下部構造編では、アプローチ部から橋台への作用が明らかであることが求められている。通常の盛土を求められる場合は、道示の規定に従うことで橋としての性能が確保される一方、それ以外の構造を用いる場合は、橋台への作用等を個別に検証する必要がある。しかしながら、橋台への作用以外の条件も含め、アプローチ部の構造の性能検証方法は確立されていない。

そこで本研究では、新技术導入促進のため、アプローチ部に通常の盛土構造以外の構造を用いる場合の橋台への作用の明確化と、性能検証項目や標準的な試験方法の確立に向けた検討を行う。今年度は、アプローチ部に補強土壁を有する盛土（以下、「補強土壁」）を用いた場合の地震時の挙動とそのメカニズムについて、通常の盛土を用いた場合との比較により評価するために、橋軸直角方向に地震動を入力する動的遠心模型実験を行った。また、両条件における常時の土圧の実態を把握するため、土圧の現場計測を行った。

〔研究内容〕

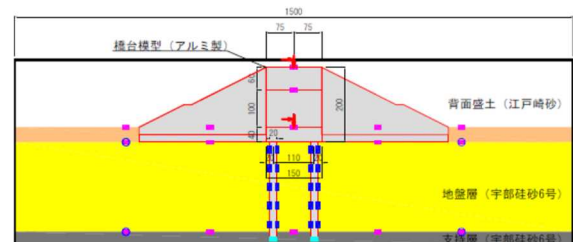
1. 橋軸直角方向に地震動を入力する動的遠心模型実験
アプローチ部に通常の盛土を構築した場合と補強土壁を構築した場合それぞれの縮尺 1/50 倍の模型を構築し、表-1 に示すケースで橋軸直角方向に地震動を入力する動的遠心模型実験を実施した。

実験模型及び計測器配置を図-1 に示す。実験では、

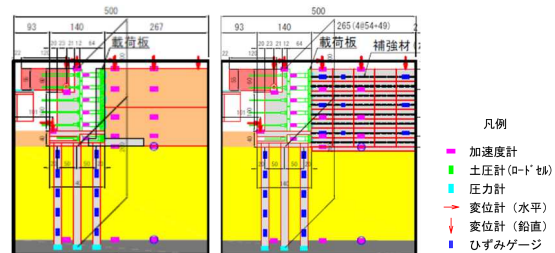
表-1 実験ケース

実験ケース	構造条件	
	背面構造	表層地盤
ケース1	通常の盛土	砂質土地盤
ケース2	補強盛土	

道示V耐震設計編に規定されるレベル1地震動（以下、「L1」）とレベル2地震動（以下、「L2」）を基盤面に引き戻した基盤波を土槽底面に入力した。さらに、設計において考慮する地震動の規模を超える地震動が作用した場合の挙動を把握することを目的に、振幅を300gal及び400galに調整したsin波を入力した。



(a)側面図（ケース1）



(b)断面図(ケース1) (c)断面図(ケース2)

図-1 遠心模型図及び計測器配置

2. 常時の土圧の現場計測

表-2 に示す箇所に土圧計を設置し、計測を行った。

表-2 計測現場の条件

	背面構造	計測箇所
現場 1	通常の盛土	橋台背面 8 箇所(4 深度×2 側線)
現場 2	補強土壁	橋台背面 4 箇所(4 深度×1 側線) 補強土壁 4 箇所(4 深度×1 側線)
現場 3	通常の盛土	カルバート側壁背面 6 箇所 (3 深度×2 側線)
現場 4	補強土壁	橋台背面 4 箇所(4 深度×1 側線) 補強土壁 6 箇所(3 深度×2 側線)

[研究成果]

1. 橋軸直角方向に地震動を入力する動的遠心模型実験

図-2 に、L1 入力時の土圧合力の大きさ上位 5 位までの土圧合力の比較を示す。土圧合力は補強土壁の場合は通常の盛土の場合よりも一貫して小さかった。この傾向は、L2 以上の地震動入力時も同様であった。補強土壁を用いた場合は補強材と壁面材の効果により通常の盛土と比較してアプローチ部が崩れにくくなったことにより、橋軸直角方向に地震動を入力した本実験の条件においては橋台に大きな土圧が作用しなかった可能性が考えられる。

図-3 に、土圧合力最大時の土圧分布と、道示Vに基づく設計土圧を示す。計測された土圧はケース 1,2 とも設計土圧の範囲内に収まっている。この結果は、L2 以

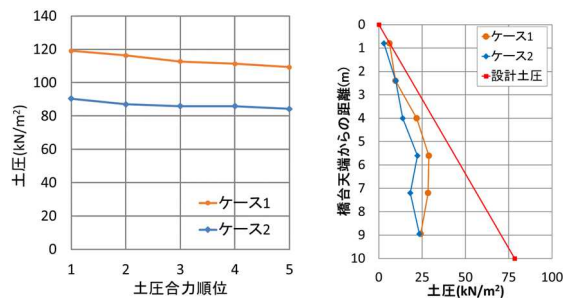
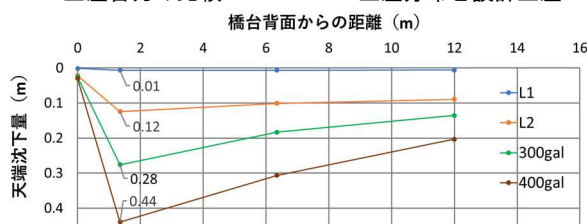
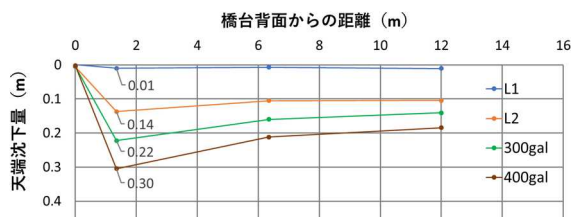


図-2 土圧合力上位 5 位の比較



(a) ケース 1



(b) ケース 2

図-4 加振後の残留沈下量の比較

上の地震動入力時も同様であった。

図-4 に、加振後の背面盛土の残留沈下量を示す。L1 入力時はケース 1,2 とも 10mm 程度であったものの、L2 以上の地震動入力時はケース 2 の沈下量がケース 1 よりも小さかった。補強土壁を適用した場合、L2 以上の地震動を受けた場合に補強材の効果により通常の盛土と比較して沈下が抑制されることが分かった。

2. 土圧の現場計測

図-5 に土圧の現場計測値と計算値（道示に基づく主働土圧）の比較を示す。ほとんど全ての計測値が計算値よりも小さかった。

また、現場計測値を計算値で除した値の統計量を算出した結果を表-3 に示す。平均値に着目すると、補強土壁の方が通常の盛土よりも土圧が小さかった。これは、補強材の効果により通常の盛土と比較してアプローチ部の自立性が高い可能性が考えられる。変動係数は両者に明確な差はみられなかった。

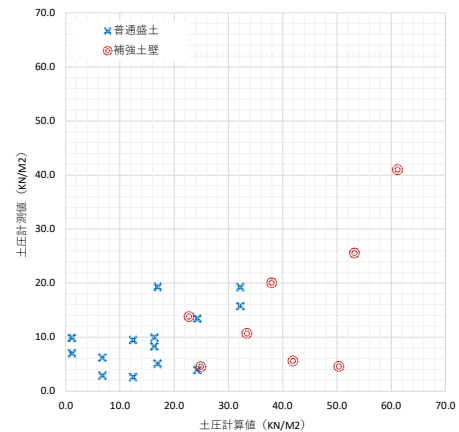


図-5 土圧の現場計測値と計算値の比較

表-3 土圧の現場計測値/計算値の統計量

	通常の盛土	補強土壁
データ数	12	8
平均値	0.56	0.38
変動係数	0.49	0.56

[まとめ]

アプローチ部に補強土壁を用いた場合の、橋軸直角方向に地震動が作用した時の挙動について以下のことを確認した。

- ・橋台に作用する土圧合力は補強土壁の場合は通常の盛土の場合よりも小さいこと
- ・L2 を超える地震後の沈下量は通常の盛土と比較して抑制されること

また、常時の土圧の実態について基礎的なデータを取得した。

[成果の活用]

本研究の成果は、道路橋示方書の改定及び道路土工構造物技術基準の改定に反映する予定である。

動的耐震照査法の信頼性向上に関する調査

Study on reliability improvement of dynamic seismic verification method

(研究期間 令和3年度～令和5年度)

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

部 長 福田 敬大
Director FUKUDA Yukihiro
研 究 官 石井 洋輔
Researcher ISHII Yosuke

The purpose of this study is to propose a dynamic seismic verification method that can reasonably meet the required reliability. In this study, the detailed behavior of the entire bridge system and the vibration characteristics of the bridge were calculated using the measured behavior observation data of the entire bridge system.

[研究目的及び経緯]

橋の耐震設計は、橋全体を構成する部材の耐荷性能を動的な解析で照査することが一般的である。道路橋示方書・同解説に示される動的耐震照査に用いる設定値は、不確実性を踏まえて安全余裕を考慮して設定しているものが存在し、設定値の説明性や照査手法の信頼性のさらなる向上が求められている。それを踏まえ、本研究では、所要の信頼性を合理的に満たすことができるような動的耐震照査法を検討している。

従前は橋全体系の詳細な挙動を確認できていなかったが、近年、国土技術政策総合研究所では、橋全体系の挙動観測を目的として一つの橋に地震計を密に配置し、加速度を多点で連続観測している。橋全体系の挙動をきめ細やかに観測することで、実測結果が少ない減衰特性などの橋全体系の振動特性や地震応答特性の分析が可能になる。

本研究は、科学的な根拠に基づいて、現行基準で示される設定値を検証することを目的とした。令和3年度は、まず、従前観測できていなかった橋全体系の挙動観測記録を確認し、それぞれで得られた観測記録の振動特性を検証した。また、実測した橋全体系の挙動観測データを用いて、橋全体系の振動特性を算出し、設計モデルで用いられている設定値と比較した。

[研究内容]

1. 橋全体系の挙動観測記録の検証

地震時と常時の違い、周波数特性、振動の経時特性、振動の伝達距離を検証するため、観測記録のフーリエスペクトル、フーリエスペクトル比(観測点/基盤)、コヒーレンス、群遅延時間を算出した。

2. 実測記録から求めた橋の振動特性の評価

挙動観測記録より対象橋の振動特性(周波数特性、減衰特性)を算出した。観測記録より振動特性を算出する方法には、**図-1**に示すシステム同定手法を用いた。

システム同定は、**図-2**の橋を対象とした場合、**図-3**のように対象橋と周辺地盤を一つのシステムとして考え、**図-1**のフローを基に、それぞれの観測記録を同定することで対象の振動特性(固有振動数、減衰特性)を推定する手法である。本検討では、システム同定で算出した振動特性と、設計モデルで適用されている振動特性を比較し、対象橋の振動特性を検証した。なおシステム同定は、レベル1地震動より小さい加速度を対象記録としているため、比較対象の設計モデルは線形状態としてモデル化する場合のものを用いた。

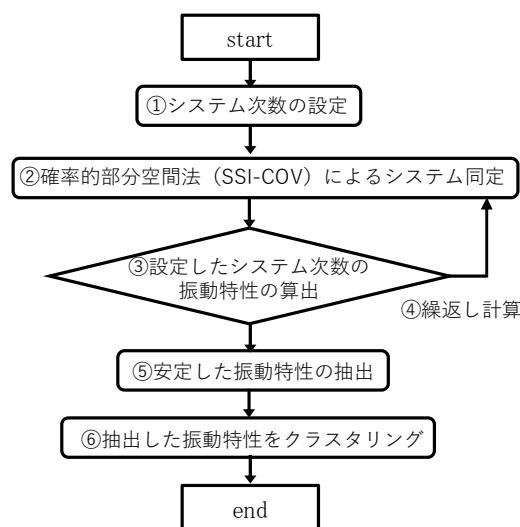


図-1 システム同定のフロー図

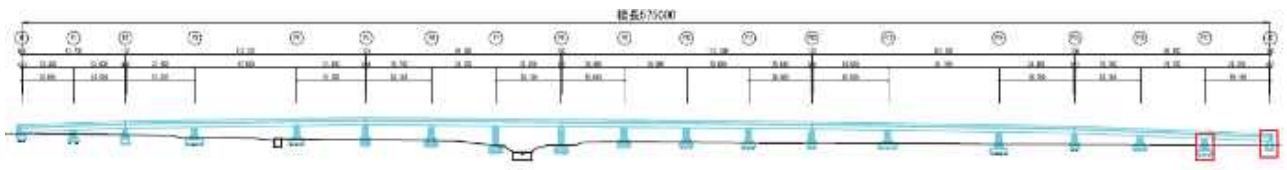


図-2 対象橋の例

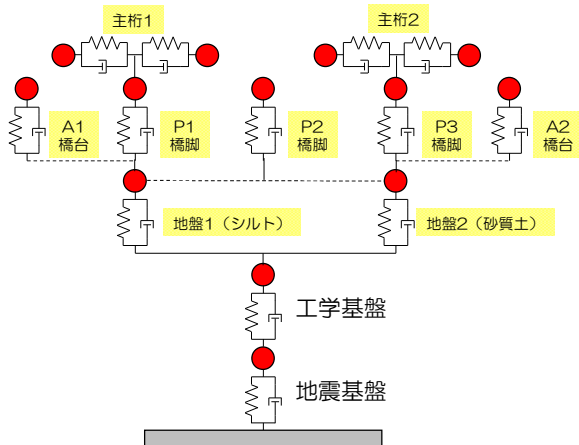


図-3 対象構造物のイメージ図

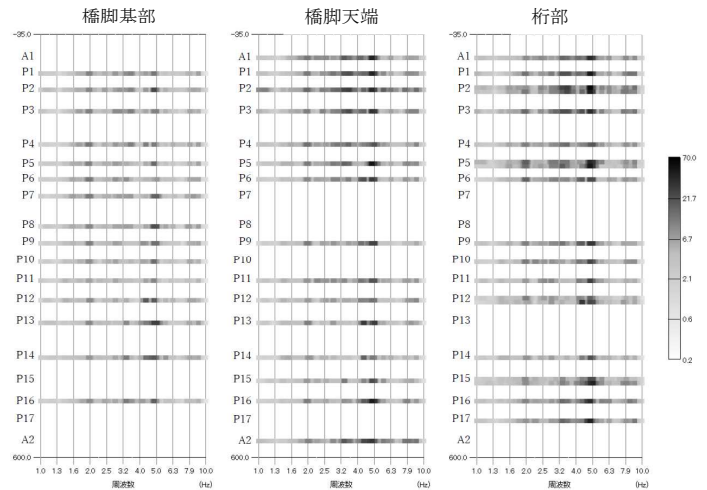


図-4 観測波形のフーリエスペクトル比
(それぞれの観測点/工学的基盤)

[研究成果]

1. 橋全体系の挙動観測記録の検証

本項では代表して、図-2 に示す対象橋（18 径間連続鈹桁橋）のフーリエスペクトル比（それぞれの観測点/工学的基盤）による周波数特性を示す。図-4 に 2021/11/1 06:14 に発生した地震を観測した対象橋の挙動観測記録のフーリエスペクトル比（観測点/工学的基盤）のコンター図を示す。なお、フーリエスペクトル比は対数で表示であり、コンター図が濃くなるほど大きい値となり、卓越周期を示している。

図-4 より、観測記録のフーリエスペクトル比は、橋脚基部、橋脚天端、桁部の順に全体的に色が濃くなり、上部構造に伝達するにつれて振動が増幅される傾向がみられる。また、それぞれの橋脚で卓越周期がみられ、橋を構成する部材それぞれで固有周期をもっていることが確認できる。これらより、現在の観測システムで橋の振動特性を観測できることを確認した。

2. 実測記録から求めた橋の振動特性の評価

本項では代表して、同橋（図-2）のシステム同定結果を示す。図-5 にシステム同定と設計モデルの固有値解析で得られた固有振動数と減衰定数およびレーリー減衰を示す。

図-5 より、システム同定と固有値解析で算出されたそれぞれの固有周波数は概ね同等であった。一方、システム同定で算出された減衰定数は、設計モデルと比較して小さくなった。今後、他の構造形式の橋で

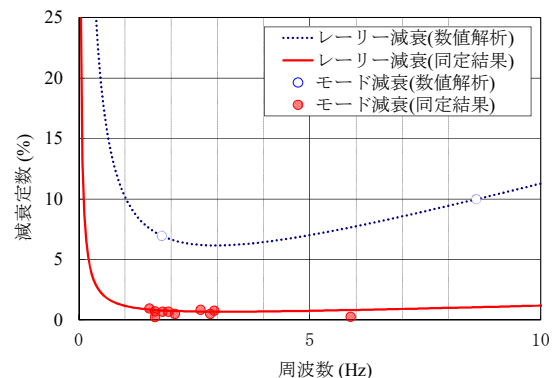


図-5 システム同定結果と設計モデルの固有値解析
で得られた振動特性の比較

も観測記録より振動特性を算出し、定量的な評価を実施する。

なお、システム同定で算出された減衰特性が小さくなった原因として、システム同定に地盤と構造物の相互作用などが考慮されている影響が考えられる。今後、地盤震動特性が橋の振動特性へ与える影響も検討していく。

[成果の活用]

基準に記載されている動的耐震照査の設定値の検証結果等を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 平成 31 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	星野 誠
Head	NAKASU Keita	Senior Researcher	HOSHINO Makoto
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	木村 泰	研究官	森本 恵美
Researcher	KIMURA Yasushi	Researcher	MORIMOTO Emi
交流研究員	林 基樹	交流研究員	木地 稔
Guest Research Engineer	HAYASHI Motoki	Guest Research Engineer	KIJI Minoru
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（品確法）」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 月の品確法改正により、工事の性格、地域の実情に応じて、多様な入札契約方式を適用する考え方が示された。国土技術政策総合研究所は、多様な入札契約方式の適用支援、フォローアップを継続し、改善手法の研究を行っている。

本稿は、技術提案・交渉方式、事業促進 PPP（事業監理業務）、工事・業務の入札・契約方式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4年3月現在、国土交通省直轄工事では、28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・交渉方式の適用工事における、リス

ク対処事例、適用効果（①プロセス改善効果、②施工者提案技術活用効果、③リスク低減効果、④施工条件改善効果、⑤ICTを活用しやすい体制構築）を把握・整理した。

また、調査の結果、技術協力・施工タイプにおいても、設計の一部を施工者が担うことにより、効率的に設計できる場合があることや、大規模な事業においては、全工区の技術協力、設計完了前から段階的に工事契約することにより、工事の早期着手、完了が可能になる場合があること、これらをガイドラインに明示的に示すことのニーズがあることを把握した。

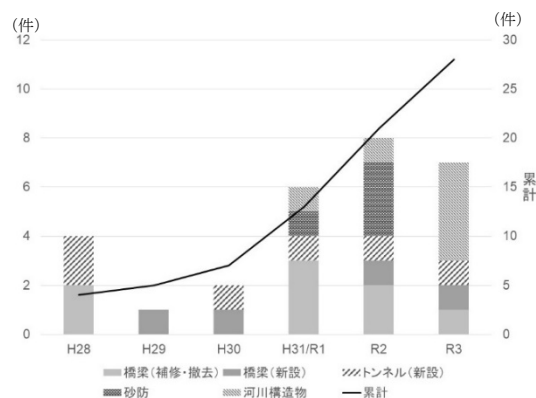


図-1 技術提案・交渉方式の実施状況

(2) 事業促進 PPP (事業監理業務)

事業促進 PPP (事業監理業務) については、CM/PM 業務等を含む事業監理に関する業務 19 業務を対象に、発注図書等から、参加要件、業務内容等を整理するとともに、発注者、受注者それぞれにヒアリング調査を実施した。調査した結果、マネジメント業務に求められる能力を把握した(表-1)。これらを分析し、計画、調査・設計、施工等の各段階におけるマネジメント能力を整理した。

また、事業監理に関する業務の事例整理、発注者(調査職員)へのヒアリングを通じて、BIM/CIM、管理段階の業務等への対応等、事業の特性や事業段階に応じた多様な発注ニーズへ対して事業促進 PPP の枠組みを拡張することで対応できる余地があることを把握した。

表-1 事業促進 PPP で求められる能力の例

		発注者意見	受注者意見
受注者側	共通	<ul style="list-style-type: none"> 行政の手續、立場、考え方を理解 人間関係を構築 コミュニケーション力 発注者に遠慮せず必要な意見を言う 全体を見ながら行動 	<ul style="list-style-type: none"> 事業の流れ、予算の流れを理解 人間関係を構築 調整力、コミュニケーション力 受け身にならず行動 フェーズ間(設計・施工等)の橋渡し
	管理技術者	<ul style="list-style-type: none"> 受発注者が一体となって行う業務において、課題等に関し、無数のシナリオを想定 他社の技術者をまとめるリーダーシップ 様々な状況をリアルタイムで把握・管理 	<ul style="list-style-type: none"> 事業全体を俯瞰してマネジメント 発注者と対等に渡り合う 若手の指導、教育
	主任技術者	<ul style="list-style-type: none"> 発注者意図を理解し、専門的立場から助言 多数の関係者、業務受注者との調整 発注者に意見・催促できる関係構築 	<ul style="list-style-type: none"> 専門分野に精通 他分野の技術者とも広くコミュニケーション 担当技術者等への指導力
	担当技術者	<ul style="list-style-type: none"> 指示事項を理解し、迅速に実施 業務受注者への的確な指示 情報交換や情報共有を密に行う 	<ul style="list-style-type: none"> 広範な実務知識 発注者ニーズに即して対応 周囲の意見をよく聞き、連携する協調性
発注者側調査職員	<ul style="list-style-type: none"> 発注者が柱となり、速やかな判断が必要 受注者の知識・経験を吸収しスキルアップ 言いたいことを言い合える環境作りが重要 	<ul style="list-style-type: none"> 判断力、技術力を持った職員であるべき 受注者を職員の一部のように捉える 風通しのよい情報交換が重要 	

(3) 総合評価落札方式(工事)

総合評価落札方式を適用した工事を対象に、発注図書、工事完成図書等から、工事種別、工事価格、競争参加者数、契約後の施工条件変更の有無に関する事項、競争参加者数が少ない工事における工事特性等に関する内容を整理・分析した(表-2)。また、競争参加者数と工事難易度の関係を分析するため、工事難易度評価表の該当項目数を整理した結果、一般土木工事等において、競争参加者数が少ない工事は、工事難易度評価表の項目に該当する特性を有する例が多い傾向にあることを把握した。

表-2 競争参加者の少ない工事に見られる特性の例

		橋梁補修工事の特性(例)
不確定要素への対処	他工期調整	<ul style="list-style-type: none"> 他工期調整により施工内容を変更 他工事で設置した仮設を共用
	施工時期・時間帯	<ul style="list-style-type: none"> 行楽期等の現道工事抑制が工期に影響
	交通規制	<ul style="list-style-type: none"> 一般交通との事故の危険性が高い
	処分地・受入地	<ul style="list-style-type: none"> 廃棄物の種類を分別不可能等で変更 受け入れ条件が合わず処分先を変更
	支障物、埋設物	<ul style="list-style-type: none"> 既設工作物が多い施工条件 地下埋設物、支障物移設の影響を受ける
	関連調査、設計	<ul style="list-style-type: none"> 補修対象の性状(損傷、材質)や範囲が設計時の想定と大きく変わる
関係機関協議	<ul style="list-style-type: none"> 鉄道等の関係機関協議を伴う 	

(4) 業務の入札・契約方式

調査・設計業務については、地域特性の理解が重要な業務の入札・契約方式の検討を目的に、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、発注図書等を整理・分析した。地域特性を踏まえた検討が必要な業務を特定し(表-3)、その実施状況、入札・契約方式と成果品質等との関係を整理・分析した。

業務特性、技術評価項目を分析した結果、これらの業務の評価テーマについては、類似の現場での知見や一般的な知見に基づく評価テーマの設定が多く、当該現場固有の環境や条件に関する特性を評価テーマの設定にあたり考慮する余地があることを把握した。

表-3 地域特性を踏まえた検討が必要な業務の例

		業務内容(例)
現地作業が必要となる業務	<ul style="list-style-type: none"> 現場作業において、地域住民への配慮、関係行政機関との調整が必要となる業務 河川・道路) ○○調査業務、○利用状況調査、○台帳作成業務、被災状況調査 	
地域課題を踏まえた対策検討が必要となる業務	<ul style="list-style-type: none"> 渋滞対策、事故対策等、地域課題を踏まえた検討が必要となる業務 道路) ○○渋滞対策検討業務、○交通安全対策検討業務 	
地域特有のリスクに関する知見が必要となる業務	<ul style="list-style-type: none"> 防災・構造物点検、自然条件等、地域特有のリスクに関する知見が必要となる業務 河川・道路) ○○防災点検業務、○構造物点検業務、○リスク検討業務 河川) ○○水系流量観測業務(洪水痕跡調査) 	
地元及び関係行政機関等との協議・調整が必要となる業務	<ul style="list-style-type: none"> 計画や設計にあたり、地元及び関係行政機関等との協議・調整を適切に行うことにより、成果品の品質や、後工程への引き継ぎの改善につながる業務 河川・道路) ○○設計業務、○協議会資料作成業務、○施工計画検討業務、 	
地域の特色や意向を踏まえた検討が必要となる業務	<ul style="list-style-type: none"> 事業の計画・評価において、地域の特色や意向を踏まえた検討が必要となる業務 河川・道路) ○○利活用検討業務、○地域連携調査業務、○効果整理業務 	

【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。今後は、各種ガイドラインに成果を反映し、現場での活用を予定している。

道路整備等の生産性向上に資する ICT を活用した施工及び維持管理 の高度化に関する調査

Survey on advancement of using ICT on construction and maintenance that contributes to
productivity improvement such as road construction

(研究期間 令和3年度～令和5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
研究官
Researcher
交流研究員
Guest Research Engineer

山下 尚
YAMASHITA Hisashi
小塚 清
KOZUKA Kiyoshi
荻原 勇人
OGIHARA Hayato
日出山 慎人
HIDEYAMA Shinto
農添 允之
NOHZOE Masayuki
池田 和敏
IKEDA Kazutoshi

In this research, our research team have improved the standards for road earthwork that has been standardized for ICT utilization work, and have devised a measure to improve the efficiency of maintenance of road-related equipment by utilizing the 3D data used for construction.

〔研究目的及び経緯〕

国土交通省では、建設現場の生産性を向上させ、魅力ある建設現場の実現を目指す i-Construction を推進している。この i-Construction のトップランナー施策の一つである「ICT の全面的な活用」については、平成28年度の土工への活用を皮切りに、舗装工（新設・維持修繕）、土工周辺構造物工について、ICT 建設機械を用いた情報化施工に必要な基準類を順次整備してきたところであるが、更なる建設現場の生産性向上を実現するためには、これらの工種における ICT 活用工事の施工実態を調査し、生産性向上のための課題を明らかにし、この結果に基づき、基準類の改善を進める必要がある。本研究では、ICT 活用工事の基準化が行われた道路土工を対象に、基準類の改善を行った。

また、施工に用いた 3 次元データ等を維持管理段階へ効果的に活用すること等により、道路関係設備の維持管理を効率化する必要がある。本研究では、施工に用いた 3 次元データ等を活用し道路関係設備の維持管理を効率化する方策を立案した。

〔研究内容・研究成果〕

1. ICT 活用工事（土工）の基準類改善（無人航空機（UAV）の多様な飛行・撮影方法の基準類への反映）のための検証

(1) UAV の等対地高度撮影の要領化に向けた検証
平成28年3月に制定された「空中写真測量（無人航空機）を用いた出来形管理要領（土工編）（案）」においては、UAV は等高度で飛行し撮影することを前提とし、標定点・検証点の設置、精度確認方法など各種規定が定められていた。一方、地表面の高度差が大きい現場においては、等高度撮影では飛行経路により画素寸法に差異が生じるため、複数回の飛行を要すること、撮影写真を点群化するための画像処理に多大の時間を要することなどが発生し、生産性向上の阻害となっていた。

近年、UAV 飛行の自動制御技術の向上等により多様な飛行・撮影が可能になった。その一環として、対地高度を一定とする飛行による撮影（以下、「等対地高度撮影」という。：図-1 参照）を行うことが可能となり、UAV の飛行時間・回数や撮影枚数の削減などの効果が期待できることが明らかとなった。本検証においては、等対地高度撮影の有効性を確認し、基準類の改正につなげることを目的とした。

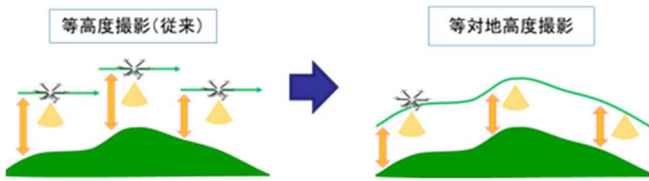


図-1 UAVの等対地高度撮影のイメージ

検証においては、UAVの等対地高度撮影による計測値が土工の出来形に要求される精度を満足しているか否か、等対地高度撮影により出来形管理の手間がどの程度削減（生産性向上の程度）されるかに着目して行った。

1) 等対地高度撮影による出来形計測精度の確認

高低差があり等高度での飛行では画素寸法に大きな変化が生じる試験場にて、「オーバーラップ率や地上画素寸法が同一になるように2回に分けた従来の撮影手法」と、「等対地高度飛行での撮影手法」による計測を行った。撮影条件は、既存要領の規定に準拠し、地上画素寸法を10mm/Pixel、進行方向のラップ率（オーバーラップ）は90%、隣接コースとのラップ率（サイドラップ）は60%に設定した。検証点を14点設置し、画像解析により生成した点群上の検証点座標と、現場内に設置された基準点を用いてTS（トータルステーション）で測量した検証点座標（真値）との差分が土工の出来形計測に要求される精度（±50mm以内）を満足するか否かすることにより実施した。

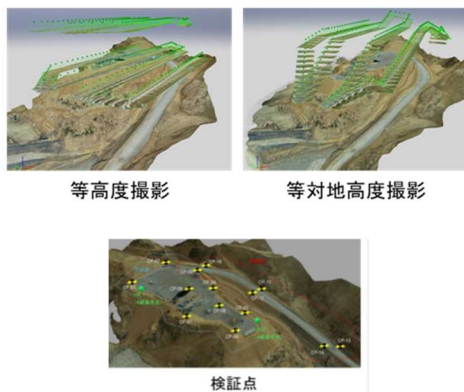


図-2 飛行ルート及び検証点設置状況

表-1 精度検証結果

	等高度撮影			等対地高度撮影		
	ΔX	ΔY	ΔZ	ΔX	ΔY	ΔZ
最大値(差)	0.050	0.029	0.023	0.045	0.034	0.033
最小値(差)	0.021	0.006	-0.001	0.014	0.014	-0.009
平均値	0.030	0.020	0.010	0.025	0.026	0.012
ばらつき	0.009	0.007	0.007	0.008	0.006	0.012

単位: m N=14

結果を表-1に示す。どちらの撮影手法も14点の検証点すべてにおいてICT土工における空中写真測量を用いた3次元出来形計測における要求精度±50mm以内を満足した。従って、等対地高度撮影による出来形

管理は土工へ適用可能であることを確認した。

2) 等対地高度撮影による生産性向上効果

両手法による飛行回数、延べ撮影枚数、延べ撮影時間を比較した。結果を表-2に示した。加えて、画素寸法の画像解析時間の短縮も可能となるため、本手法による生産性向上への一定の寄与が認められた。

表-2 生産性向上効果の計測結果

	等高度飛行	等対地高度飛行
飛行回数	2回	1回
延べ撮影枚数	257枚	186枚
延べ撮影時間	11分	8分

2. ICTの活用による道路関係設備の維持管理の効率化に関する検討

(1) BIM/CIMモデル参照情報の作成・更新手法

国土交通省では、機械設備の維持管理を効率化するためBIM/CIMの導入を図っているが、BIM/CIMモデルの参照情報の作成労力が課題となっている。

道路関係設備の点検情報は、地方整備局が整備を進めているデータベース（以下「DB」）に蓄積されている。DBからのデータ抽出は、DBのクエリ機能やAPIにより行うことが一般的である。道路関係設備は設備数と点検回数が多いため、データの抽出手間が大きい。そこで、職員のデータ抽出作業を大きく省力でき、かつ抽出するデータを自由に選ぶことができる機能を開発するための方策について調査を行った。

DBを改変せずデータ抽出が可能なEAI（Enterprise Application Integration）には、ICTスキルを有さない人でも機能を開発できるノーコードの製品が存在していた。そこで、ノーコードのEAIの技術情報を収集し検討したところ、データ抽出機能を職員が問題なく作成できることを確認した。（図-3参照）

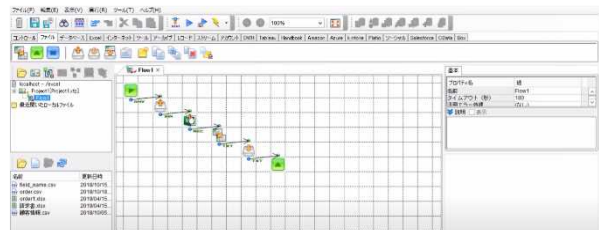


図-3 ノーコードによる機能開発（イメージ）

【成果の活用】

施工における成果は、3次元計測技術を用いた出来形管理要領（案）へ反映され、令和4年3月に改正要領が公表された。今後とも各工種において検証を進め、基準類の改善を継続する予定である。

また、道路関係設備のBIM/CIMモデルにおける参照情報の作成・更新手法では、EAIによるBIM/CIMモデルの参照情報作成・更新機能の構築に取り組みながら、地方整備局において試行を実施する予定である。

橋台背面アプローチ部等の土工性能検証項目等の調査検討

Research on items to verify performance of earthworks at back approaches of bridge abutments

(研究期間 令和2年度～令和4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 宮原 史
Senior Researcher MIYAHARA Fumi
研究員 山田 薫
Research Engineer YAMADA Kaoru
交流研究員 岡崎 貴斎
Guest Research Engineer OKAZAKI Takayoshi

Performance verification methods for structures other than normal embankments used for the back approaches of road bridges have not been established. In this study, the performance verification items and test methods for the structures other than the normal embankment are investigated. In this fiscal year, dynamic centrifuge model tests were conducted to investigate the behavior of reinforced soil walls in the direction of the bridge axis. As a result, it was confirmed that there was no obvious difference in the earth pressure affecting on the back of the abutment compared to the normal embankment.

〔研究目的及び経緯〕

道路橋の背面アプローチ部（以下、「アプローチ部」）には、荷重軽減や用地制約への対応の観点から、通常の盛土以外の新技术が用いられる場合がある。道路橋示方書（以下、「道示」）IV下部構造編では、アプローチ部から橋台への作用が明らかであることが求められている。通常の盛土を求められる場合は、道示の規定に従うことで橋としての性能が確保される一方、それ以外の構造を用いる場合は、橋台への作用等を個別に検証する必要がある。しかしながら、橋台への作用以外の条件も含め、アプローチ部の構造の性能検証方法は確立されていない。

そこで本研究では、新技术導入促進のため、アプローチ部に通常の盛土構造以外の構造を用いる場合の橋台への作用の明確化と、性能検証項目や標準的な試験方法の確立に向けた検討を行う。令和2～3年度は、アプローチ部に補強土壁を有する盛土（以下、「補強土壁」）を用いた場合の地震時の挙動とそのメカニズムについて、通常盛土を用いた場合との比較により評価するために、橋軸方向に地震動を入力する動的遠心模型実験を行った。

〔研究内容〕

アプローチ部に通常の盛土を構築した場合と補強土壁を構築した場合それぞれの縮尺1/50倍の模型を構築し、表-1に示すケースの動的遠心模型実験を実施した。なお、背面盛土の有無が橋台の挙動に与える影響を把握するため、背面盛土を構築しないケースも実施した。

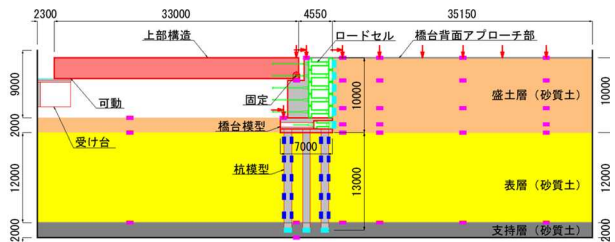
実験模型及び計測器配置を図-1に示す。杭基礎形式の逆T式橋台、アプローチ部、上部構造及び上部構造

表-1 実験ケース

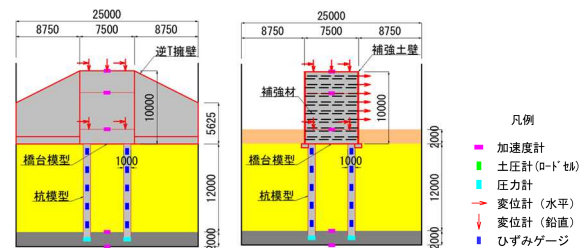
実験ケース	構造条件	
	背面構造	表層地盤
ケース1	通常の盛土	砂質地盤
ケース2	補強土壁	
ケース3	通常の盛土	粘性土地盤
ケース4	補強土壁	

の支点を想定した受け台を設置した。上部構造の支持条件は橋台側を固定、受け台側を可動とした。

実験では、道示V耐震設計篇に規定されるレベル1地震動（以下、「L1」）とレベル2地震動（以下、「L2」）を基盤面に引き戻した基盤波を土槽底面に入力した。



(a) 側面図 (ケース1)



(b) 断面図(ケース1) (c) 断面図(ケース2)

図-1 遠心模型図及び計測器配置

※本報告は令和2年度から令和3年度へと継続して実施した研究の成果を令和3年度研究成果としてまとめたものである。

さらに、設計において考慮する地震動の規模を超える地震動が作用した場合の挙動を把握することを目的に、振幅を 300gal 及び 400gal に調整した sin 波を入力した。

背面盛土に補強土壁を用いた場合の橋台への作用の大きさのみならずメカニズムも把握するため、土圧に加えて橋台と背面盛土のフーリエスペクトル比、加速度、変位の位相にも着目して考察することとした。

【研究成果】

本稿ではケース 1,2 の結果と得られた成果を示す。

(1) レベル 1 地震動入力時

ケース 1,2 において L1 を作用させたときのフーリエスペクトル比に着目すると、両ケースとも橋台と背面盛土の固有周期のピークは 0.3s に現れたことから、橋台と背面盛土が概ね一体として挙動していることが確認された。橋台単独で加振した場合のピークが 0.2s であることから、橋台が背面盛土に同調して挙動したと推察される。

図-2 に土圧合力の大きさ上位 5 位までの土圧分布及び土圧合力の比較を示す。(a)(b)に示すように、補強土壁と通常の盛土で分布形状に大きな差はない。また、上位 5 位までの土圧合力は補強土壁の場合は通常の盛土の場合よりも 1~2 割程度小さかった。

図-3 に、土圧合力最大時の土圧分布と、橋台背面盛土の応答加速度から算出した土圧及び道示 V に基づく設計土圧を示す。計測された土圧は補強土壁の天端付近を除き設計土圧と同程度であり、応答加速度から算出した土圧の範囲内に収まっている。天端付近で計測

された土圧が大きくなったのは、前方変位をした際に、壁面材に作用する慣性力が影響したためと推察される。なお、土圧合力は橋台と背面盛土がいずれも前方に変位したタイミングで最大となっていた。しかし、土圧合力が上位 2~5 位となる時刻にも着目したところ、挙動は必ずしも同じでないことが分かった。このことは、ケース 1 も同様であった。

(2) レベル 2 地震動入力時

フーリエスペクトル比から、(1)の L1 入力時と異なり、橋台と背面盛土は独立して挙動していること、橋台は背面盛土に同調せず自らの振動特性で挙動したことが推察された。

土圧合力上位 5 位までの土圧分布形状(図-4)は(1)と比較してばらつきが大きかった。ケース 1,2 間での土圧合力の大小関係も一定では無く、挙動もばらばらであった。また、土圧合力最大時の土圧分布(図-5)は、補強土壁の天端付近を除き設計土圧と同程度であり、応答加速度から算出した土圧の範囲内に収まっていた。土圧合力は(1)と異なり橋台と背面盛土がいずれも後方に大きく変位したタイミングであった。なお、図-5 は図-3 と比較してばらつきが大きい中での比較であるため、必ずしもこのような土圧合力の大小関係にはならない点に注意が必要である。

(3) sin 波入力時

土圧計測値は L2 入力時に比べて大きかったものの、補強土壁と通常の盛土で土圧分布形状に大きな違いは見られなかった。また、土圧合力の大小関係は L2 と同様になんてはなかった。

【まとめ】

アプローチ部に補強土壁を用いた場合の地震時の挙動について以下のことを確認した。

- ・L1 時は橋台と背面盛土が概ね一体として挙動し、土圧分布や土圧合力は通常の盛土と比較して明らかな違いはないこと

- ・L2 時及びこれを超える地震時は橋台と背面盛土が独立して挙動し、土圧分布や土圧合力のばらつきが大きくなるものの、このことは通常の盛土においても同様であり、土圧の大きさも同程度であること

【成果の活用】

本研究の成果は、道路橋示方書の改定及び道路土工構造物技術基準の改定に反映する予定である。

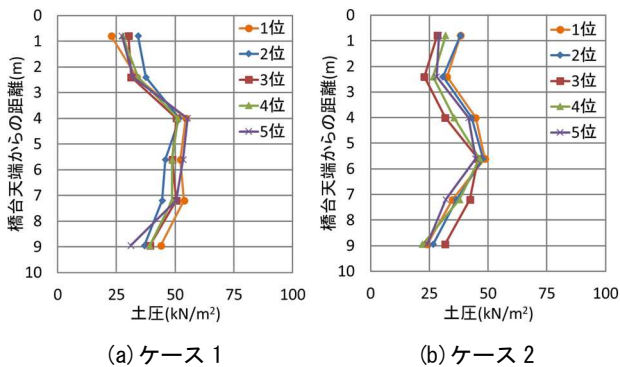


図-2 土圧合力上位 5 位の土圧分布 (L1 地震動入力時)

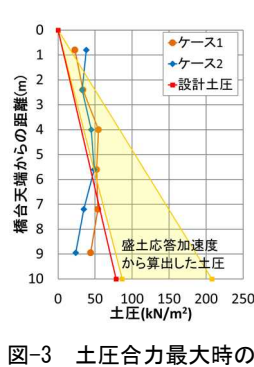


図-3 土圧合力最大時の土圧分布 (L1 地震動入力時)

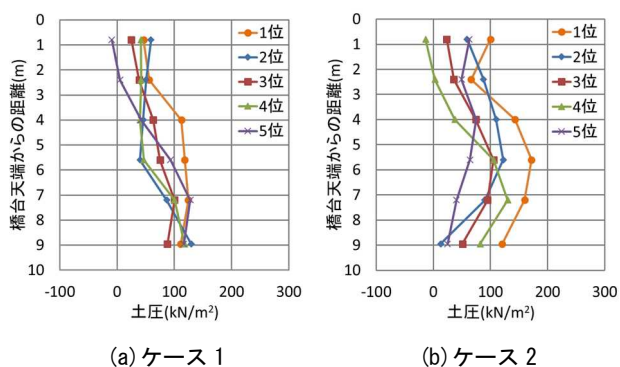


図-4 土圧合力上位 5 位の土圧分布 (L2 地震動入力時)

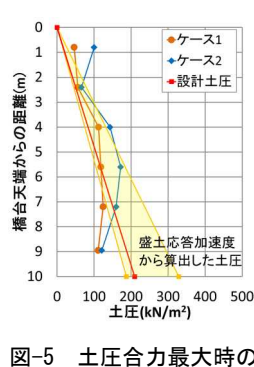


図-5 土圧合力最大時の土圧分布 (L2 地震動入力時)

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 reliability design of earthwork structures and other structures to meet performance requirements

(研究期間 令和2年度～令和3年度)

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

室長 七澤 利明
Head NANAZAWA Toshiaki
主任研究官 谷 俊秀
Senior Researcher TANI Toshihide
研究員 山田 薫
Researcher YAMADA Kaoru
交流研究員 栗原 勇太
Guest Researcher KURIHARA Yuta

Although technical standards for road earthwork structures were established in 2014 and the required performance was indicated, specific verification methods corresponding to the required performance are not sufficient. This paper presents the results of analyses of the effects of the interconnection structure of the precast culverts and the longitudinal slope on the longitudinal action of precast culverts, both under normal and seismic conditions.

〔研究目的及び経緯〕

道路土工構造物については平成26年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十分ではない。

国総研では道路ネットワーク機能を確保するための道路を構成する各道路構造物の統一的な要求性能の確保を目的に調査検討を行っている。道路土工構造物の一つである大型のカルバートに関しては、プレキャストカルバート（以降、「PCa」と称す。）活用に向けた環境整備が進められているものの、カルバートのプレキャスト化に対応した具体的な設計法は不明確となっている。

本報では、PCaの縦断方向への作用に対する常時・地震時の解析を行い、PCaの各ブロック相互の連結構造や縦断勾配等の影響について整理した結果について示す。

〔研究内容〕

1. ブロックの連結数に関する解析

連結数等の違いによる躯体の縦断方向変位や連結部材の発生断面力等への影響の確認を行うため、躯体規模の異なる4ケースに対し、ブロックの連結数を変化させた各5ケース（合計20ケース）の2次元FEM解析を実施した（表-1参照）。解析モデルは図-1に示すとおり、継手部（PC鋼棒、止水ゴム）に非線形ばねを付与した連結ブロック数の異なるカルバートモデルとした。このモデルに対し、縦断方向に単位荷重Pを与え、躯体挙動の確認を行った。躯体に作用させる縦断方向荷重は、各ブロックの頂版上面に一律与え漸増荷重することとし、荷重の最大の大きさは連結しているPC鋼棒が降伏に至らない最大荷重とした。ケース4の2パターン解析結果を図-2に示す。

表-1 連結数に関する解析ケース

ケース	躯体高.m	ブロック長.m	ブロック連結数.個 (各5パターン)	想定土被り厚.m
1	3.00	1.5	1, 2, 3, 4, 5	3
2	4.50		1, 2, 3, 4, 6	3
3	5.70		1, 2, 4, 6, 8	3
4	6.80		1, 2, 4, 6, 9	3

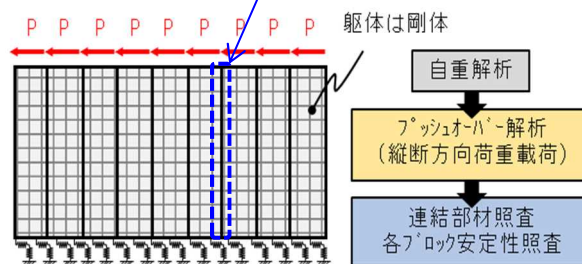
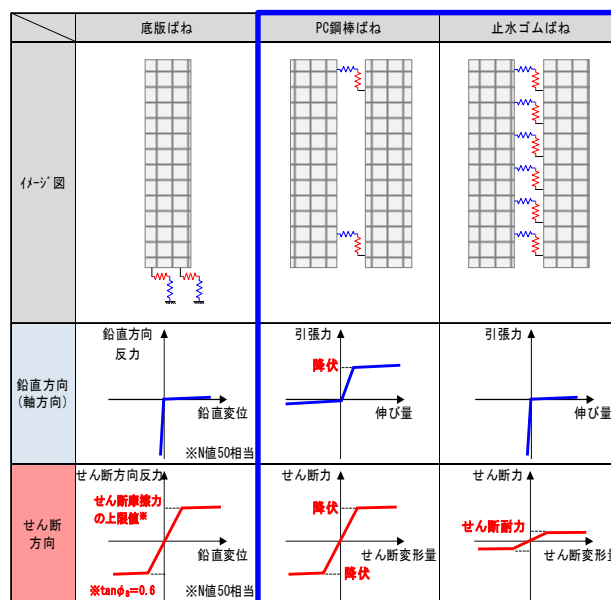


図-1 2次元FEM解析モデル

※本報告は令和2年度から令和3年度へと継続して実施した研究の成果を令和3年度研究成果としてまとめたものである。

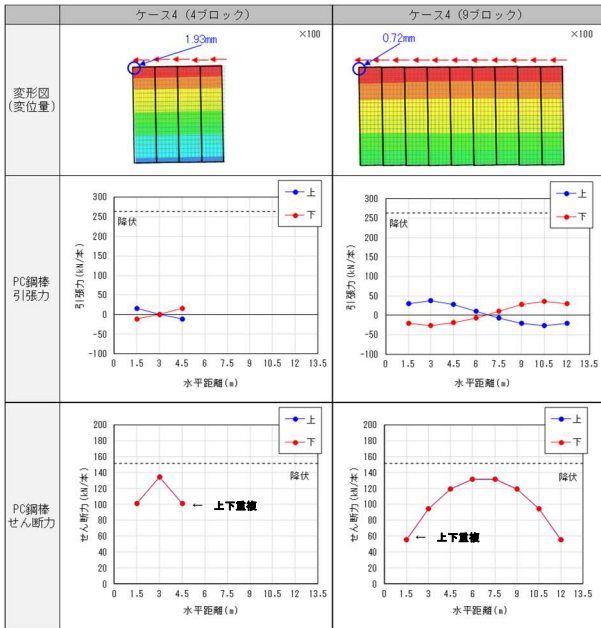


図-2 連結数に関する解析結果

躯体に荷重を作用させると、縦断方向へ倒れ込み、ブロック連結部材のPC鋼棒における発生断面力は、引張力に比べせん断力が卓越する結果となった。

各ケースの縦断方向変位量と躯体縦横比の関係に着目すると、PCaの延長が躯体高さを越えたところから変位量が小さくなる傾向を確認した。連結するブロック数が多くなる（縦断方向の延長が延びる）程、縦断方向変形量が小さくなっていると考えられる。以降の解析では、連結するブロックは9ブロック、内空高6.0mを基本に解析を行うこととした。

2. 土被り厚及び縦断勾配を変化させた解析

土被り厚や縦断勾配の変化による影響を確認するため、以下の①～②の手順で解析を行った。

①表-2に示す各ケースで土被り厚及び縦断勾配を変化させた場合における、PCaの躯体外周面（頂版及び側壁）に作用する縦断方向荷重等を算定するために、躯体を含む盛土（土被り厚）をモデル化した3次元FEM（図-3参照）を用いてレベル2地震動（タイプI及びタイプII）に対する応答解析を実施した。その際、連結部材による縦断方向の変形のし易さを表現するために躯体モデルでは継手等をモデル化せず（連続体とする）、別途算出した換算躯体剛性を設定した。

②表-2に示す各ケースで①3次元FEMによって得られた縦断方向荷重等を用いて1章で実施した躯体のみの2次元FEMモデル（図-1参照）を用いて、躯体の安全性及び安定性の照査を実施した。なお、解析時の連結部のばね長さは2ケース（5mm、100mm）想定しモデル化を行った。

3次元FEM解析のケースIとケースIIIの比較結果を図-4に示す。軸方向摩擦力は、躯体全体に一樣に作

用しており、土被り厚が大きい程、軸方向摩擦力が大きくなるのがわかった。

2次元FEM解析結果の各ケースにおける、連結部材が降伏に至らない必要鋼材量の関係を図-5に示す。

常時及び地震時において、土被り厚が高い程、また、縦断勾配の傾斜が大きい程、必要鋼材量が増える傾向であることが分かる。これは、①の解析結果に示したとおり、土被り厚が大きい程、軸方向摩擦力が大きくなっているためと考えられる。

表-2 土被り厚及び縦断勾配を変化させたケース

	ケース	躯体高.m	ブロック連結数	土被り厚.m	縦断勾配.%	地震動レベル
①土被り厚を変化させた解析	I	6.80	9	0.5	0.0	レベル2
	II		9	3.0	0.0	
	III		9	6.0	0.0	
②縦断勾配を変化させた解析	IV	6.80	9	6.0	2.0	レベル2
	V		9	6.0	4.0	
	VI		9	6.0		
	VII		4	6.0	10.0	
	VIII		9	3.0		レベル1
	IX		9	6.0	0.0	
	X		9	6.0	2.0	

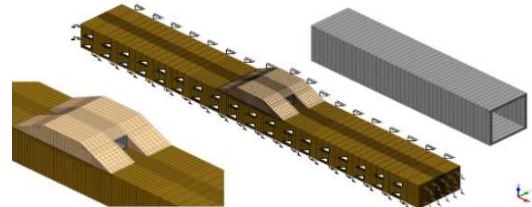


図-3 3次元FEM解析モデル

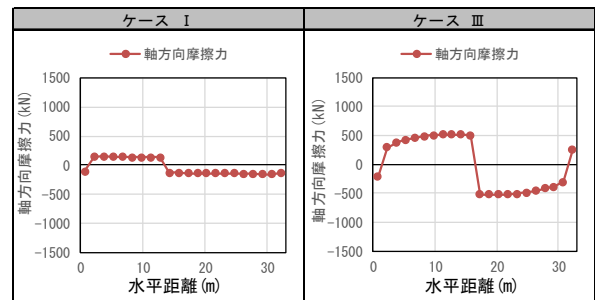


図-4 3次元FEMによる応答解析結果（地震時）

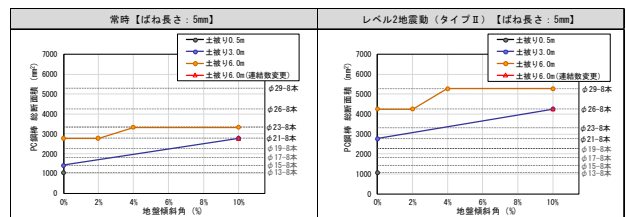


図-5 2次元FEM解析結果（必要鋼材量）

【まとめ】

令和2～3年度の研究では、PCa縦断方向荷重を与えた際に発生する躯体の縦断方向変位や連結部材の発生断面力を確認した。また、3次元FEM解析等により、土被り厚や縦断勾配が変化した場合の地震時における必要鋼材量の確認等を行った。

今後、モデル化の妥当性の検証や構造特性の異なるPCaの検討等を実施していく予定である。

【成果の発表】 国総研資料や各種論文で発表予定

【成果の反映】 各種基準類へ反映予定

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 3 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
研究官
Researcher
交流研究員
Guest Research Engineer

山下 尚
YAMASHITA Hisashi
小塚 清
KOZUKA Kiyoshi
日出山 慎人
HIDEYAMA Shinto
大岩 憲史
OOIWA Kenji

In this research, our research team verified the application method to the finished form management of earthwork using the construction history data of “machine-guidance roller”.

〔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 年度からの ICT 土工開始以降、様々な工種へ適用を拡大している。これら ICT 活用工事では、3 次元起工測量、3 次元設計データ作成、ICT 建機による施工、3 次元出来形管理等の施工管理、3 次元データの納品の各段階で ICT を活用することとしている。

このうち「3 次元出来形管理等の施工管理」の段階においては、UAV 写真、レーザースキャナなど、面的な計測が可能な計測機器に対応した基準類を順次整備しているところであるが、建設機械が記録する施工履歴データを適用することにより、従前より実施されていた施工者による自主管理の結果をそのまま出来形管理へ活用できることとなり、計測頻度、時間の大幅な縮減が期待できる。本研究では、土工の出来形管理において、これまで可能であった ICT バックホウ・ブルドーザの施工履歴（刃先履歴）データに加え、マシンガイダンスローラ（以下、「MG ローラ」という）の施工履歴データを活用することが可能か否かを確認するため、試験ヤード等における検証を行った。

〔研究内容・研究成果〕

1. 施工履歴データの出来形管理への活用の課題と対応方針

施工履歴データは、ICT 建設機械から取得できる作業機軌跡や車体位置などのログデータを用いて出来形を計測する技術である。ICT 建設機械の作業装置の位置情報の算出過程では、測位技術を用いた建設機械の

位置情報と建設機械の動作によって変化する作業装置の位置情報を用いており、位置情報を取得する機材毎に生ずる誤差要因が累積される。そのため、計測機器を用いた計測よりも計測精度は低くなる傾向にある。また、ICT 建設機械の位置情報取得には衛星測位が多く用いられており、衛星の配置による測位の揺らぎや機械の摩耗等による精度劣化が懸念される。以上を踏まえ、施工履歴データの出来形管理への活用の可否を判断するにあたっては、①作業装置の位置情報精度の確認、②出来形計測値としての信頼性の確認、③既存の出来形計測手法との整合性の確認が必要となる。

2. MG ローラの作業装置位置の測定精度の確認

MG ローラの作業装置位置の測定精度を確認するため、施工開始前に静止状態での精度確認を実施した。

MG ローラを任意の場所（平坦/傾斜）で静止させ、ローラの鉄輪左右接地点のシステム出力座標を取得し、同時に TS 等光波方式で計測し、これを真値とした。その後、MG ローラを任意の場所に移動し、同様の計測を各 10 地点で実施した（図 - 1）。

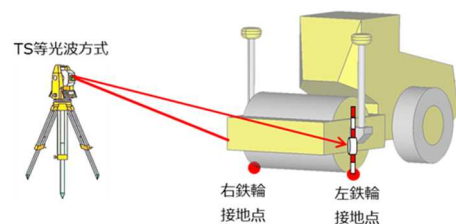


図-1 MG ローラの TS 等での測定箇所

※本報告は令和 2 年度から令和 3 年度へと継続して実施した研究の成果を令和 3 年度研究成果としてまとめたものである。

鉄輪接地点の水平・鉛直方向 (Δx 、 Δy 、 Δz) の計測誤差を図-2に示した。計測誤差は土工の出来形管理における要求精度である $\pm 50\text{mm}$ 以内となり、本システムの鉄輪接地点座標の精度が基準値以内であることを確認できた。

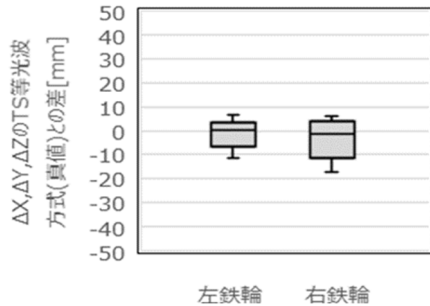


図-2 MGローラとTS等光波方式との計測誤差

3. MGローラの出来形計測値としての信頼性の確認

試験ヤードは実際の転圧作業を想定して5%程度の勾配を設けた。精度確認試験は、システムから出力する施工履歴データとTS等光波方式で計測した座標との較差を算出し、バックホウやブルドーザによる施工履歴データを活用した出来形管理で求めている精度と同等のものである水平・鉛直方向 (Δx 、 Δy 、 Δz) $\pm 50\text{mm}$ 以内であるか否かを確認することとした。また、TS等光波方式による計測座標については、鉄輪の両端及びセンターの座標を1m間隔で60点(右端部20点、左端部20点、センター20点)計測するとともに、施工履歴システム出力座標はTS等光波方式で取得した座標の平面的な近傍点を使用することとした。(図-3、図-4、図-5参照)。

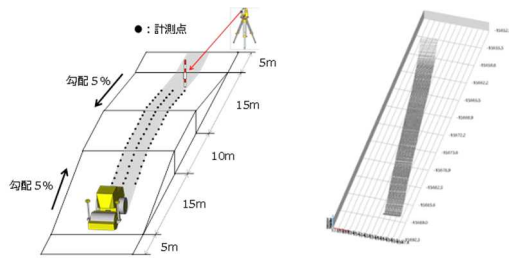


図-3 施工履歴データの計測箇所

図-4 点群データ



図-5 試験風景

精度確認結果を図-6に示す。全計測箇所における水平・鉛直方向の各誤差範囲は、 Δx : $-20 \sim 19 \text{mm}$ 、 Δy : $-21 \sim 23 \text{mm}$ 、 Δz : $-34 \sim 11 \text{mm}$ となり、誤差の「平均+2 σ 」が出来形計測の要求精度である $\pm 50 \text{mm}$ 以内を満足する結果となった。これにより、MGローラの出来形計測値には一定の信頼性があることを示していると考えられる。

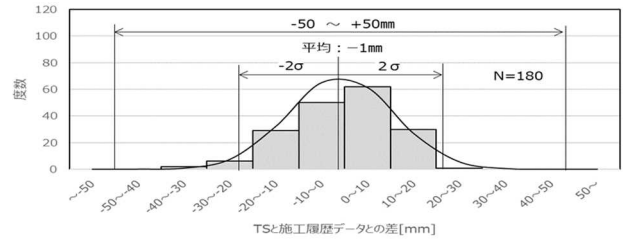


図-6 施工履歴データとTS等光波方式との差分の分布

4. MGローラの施工履歴を用いた出来形計測と既存の出来形計測手法との整合性の確認

同一のフィールドにおいて、MGローラの施工履歴による出来形と、既に要領化されているTLS(地上設置型レーザースキャナ)による出来形評価結果とを比較した。出来形評価の比較は、3次元設計データと施工履歴データ、TLSそれぞれによる出来形評価用データとの標高較差により行った。結果を表-1に示す。

表-1 履歴データとTLSの出来形評価結果の比較

設計データとの標高較差/面管理規格値 ($\pm 50\text{mm}$)	全データに占める該当データ数の割合	
	施工履歴データ データ点数 : 1798	TLS データ数 : 1837
100% ($\pm 50\text{mm}$) 以内	100%	100%
80% ($\pm 40\text{mm}$) 以内	99%	100%
50% ($\pm 25\text{mm}$) 以内	77%	70%
40% ($\pm 20\text{mm}$) 以内	60%	50%
30% ($\pm 15\text{mm}$) 以内	37%	33%
20% ($\pm 10\text{mm}$) 以内	20%	19%
10% ($\pm 5\text{mm}$) 以内	8%	8%

標高較差ランク別の出来形評価用データ数の分布をみると、TLSと施工履歴との間で同等の結果が得られた。従って、施工履歴を用いた出来形管理データの信頼性が十分であるとの結論を得た。

【成果の活用】

上記の結果を踏まえ、MGローラによる施工履歴データの精度確認方法、出来形管理の具体的な手順等を、「3次元計測技術を用いた出来形管理要領(案)土工編」の改正版としてとりまとめ、令和4年3月に公表したところである。

今後、本要領を活用した実際の工事において検証を実施し、生産性の向上を意識した要領の改善を実施する予定である。

大型車が橋梁に与える影響に関する調査

Survey on negative influence of large vehicles on bridges

(研究期間 令和2年度～令和3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 岡田 太賀雄
Senior Researcher OKADA Takao
研究官 伊原 岳宏
Researcher IHARA Takehiro

The Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism is working to strengthen logistics functions, such as relaxing the upper limit on the total weight of large vehicles. Road bridges need to be designed and maintained to ensure strength and fatigue durability, and regular confirmation of the traffic conditions of large vehicles is required. Therefore, in this study, we measured the vehicle weight and axle load of passing vehicles on a road bridge. In result, it was confirmed that changes in the traffic permit system may affect the safety and fatigue durability of road bridges.

【研究目的及び経緯】

物流は社会経済活動を支える不可欠なものである。国土交通省では、物流の効率化の観点から、総重量の一般的制限値を20tから25tに緩和した重さ指定道路を指定したり、平成30年からは、重要な道路を重要物流道路として大臣が指定し、たとえば国際海上コンテナを運搬するセミトレーラ連結車の通行許可申請を不要とするなど、道路の物流機能の強化に取り組んでいる。道路橋は道路本体の一部であり、交通流への大型車の混入・連行の状況に応じた強度と疲労耐久性が確保されるよう、設計及び維持管理を行う必要がある。そのためには、大型車の通行の現状や将来の動向を定期的に把握し、必要に応じて道路橋の設計基準等を見直すことが求められる。

そこで、本研究では、大型車の通行頻度が高いと思われる道路橋において通行車両の車重・軸重（以下活荷重と呼ぶ）の計測を行った。

【研究内容及び研究成果】

1. 対象橋梁の選定と計測の方法

国総研では、最近では、平成15年から平成16年に全国の複数の橋で活荷重計測を行い、国土技術政策総合研究所資料第295号にまとめている。前回計測から今回までの間に、国土交通省では、国際海上コンテナを運搬するセミトレーラ連結車を始めとする連結車両8車種について特殊車両としての通行を許可するにあたり、エアサスペンションを装着するなど特別な保安基準に適合することを条件に駆動軸の軸重を11.5t（通常は10t）に、総重量の上限を44tに緩和する措置を行っている（図-1）。そこで、今回は、車種別の比率や各車両の総重量や軸重を比較できるように、前回の活荷重計測された橋の中でも大型車通行台数の多かった国道357号の美浜大橋を対象とした（表-1）。

計測は、全橋梁部材のひずみ応答から通行車両の重量等を測定するシステムBWIM（Bridge Weigh-in-

Motion、国総研資料第188号）を用いて、72時間行った。BWIMは、橋梁部材をいわばセンサーとして計測しているため、車両毎の重量の変換誤差が存在することや、乗用車のような軽量車両の応答がノイズと区別できなかつたり、渋滞時には車種の区別が困難になったりなどの課題もあり、この点に注意して結果を活用すれば、大型車両の通行実態の傾向を多数の橋で簡易且つ安価に把握するためには適する計測方法である。

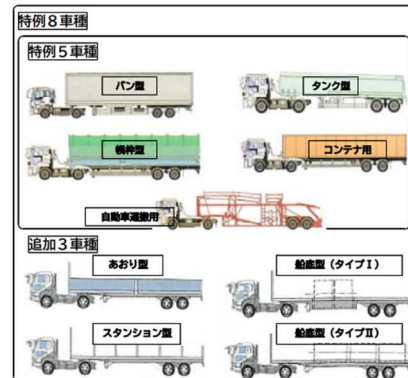


図-1 総重量の緩和の対象車両

表-1 計測対象橋梁（美浜大橋）の基本情報

名称	美浜大橋
橋長	262.9m
形式	8径間(PC中空床版+連続鋼鉄桁+PC中空床版)
車線	4車線(上下線分離 片側2車線)
路線	国道357号
場所	千葉県市川市塩浜
計測期間	上り:令和3年11月24日(水)から連続3日間 下り:令和3年12月1日(水)から連続3日間
大型車通行量*	H11:17,340(台/日/方向)、H27:14,539(台/日/方向)
大型車混入率*	H11:45.2%、H27:44.4%

*H11:平成11年度 全国道路交通情勢調査より
H27:平成27年度 全国道路・街路交通情勢調査より



※本報告は令和2年度補正予算「ITS技術の活用による道路交通サービスの高度化に向けた検討」について令和3年度へと継続して実施した研究の成果を令和3年度研究成果としてまとめたものである。

2. 計測結果

美浜大橋の上り線の計測結果について、付近の信号により渋滞が生じたため、車両により生じたひずみの正確な検出ができなかった。そのため、本調査では、美浜大橋の下り線の計測データについて比較することとした。下り線について平成16年及び令和3年における総重量の台数分布を比較した結果を図-2に示す。平成16年及び令和3年とも同じ72時間の計測結果である。計測した全体の車両通行台数が減少しているが、トレーラー連結車を始めとする連結車両である総重量36t以上の車両台数が増加している(図-3)。これは、平成15年からの特殊車両の許可制度の変更が影響している可能性が考えられる。大型車の並走・連行などの同時乗荷の確率は変化している可能性があり、現在の設計活荷重の信頼性水準について今後詳細な検討が必要と考えられる。

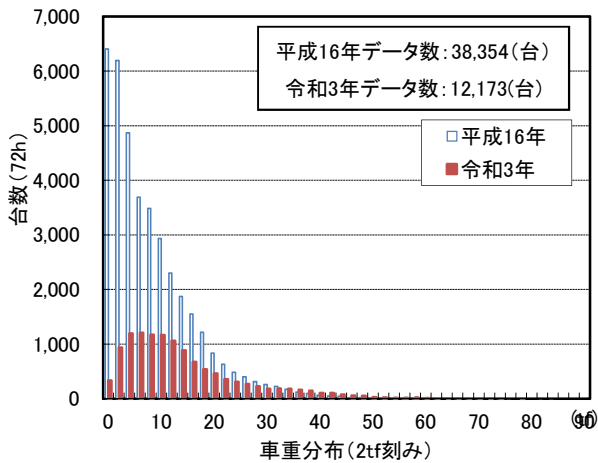


図-2 総重量の台数分布の比較

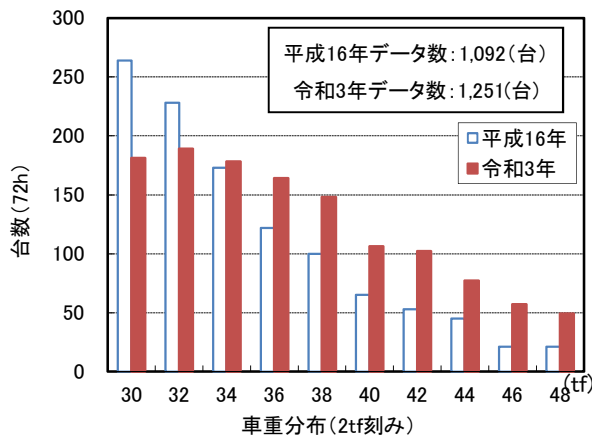


図-3 総重量 36t 以上の台数分布の比較

鋼部材の疲労耐久性については、重量が大きい車両の単純な増加台数の比較だけで考察するのではなく、疲労耐久性に及ぼす影響が一般に作用応力の3乗に比例することを考慮する必要がある。したがって、総重量の計測結果に対して、図-4に示すように計測車両重量を3乗し、車両台数分を乗じた疲労損傷度(車重損傷度)の分布で比較する必要がある。平成

16年及び令和3年における疲労損傷度の分布を図-5に示す。コロナ禍での計測のため、各階級の車両通行台数は従前の計測結果と単純に比較できない可能性があるが、それでも、令和3年の計測結果では、36t~44tの車両が疲労耐久性に与える影響は大きくなっている。コロナ禍の収束に伴う18tから34tの車両の通行量の回復具合によっては、平成16年時点よりも、疲労耐久性にとって厳しい活荷重の載荷状況になることも想定される。今後も全国で計測を行い、大型車の通行特性を把握するとともに、定期点検結果の分析等も行い、道路橋への疲労耐久性への影響について、検討して行く必要がある。

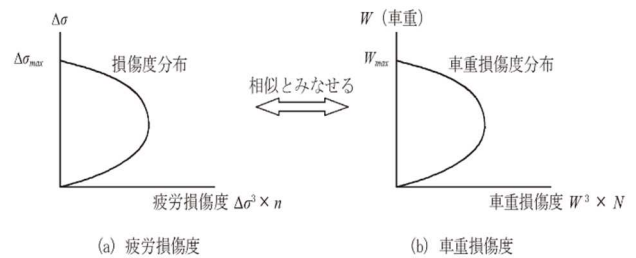


図-4 鋼部材の疲労損傷度と車重損傷度の関係

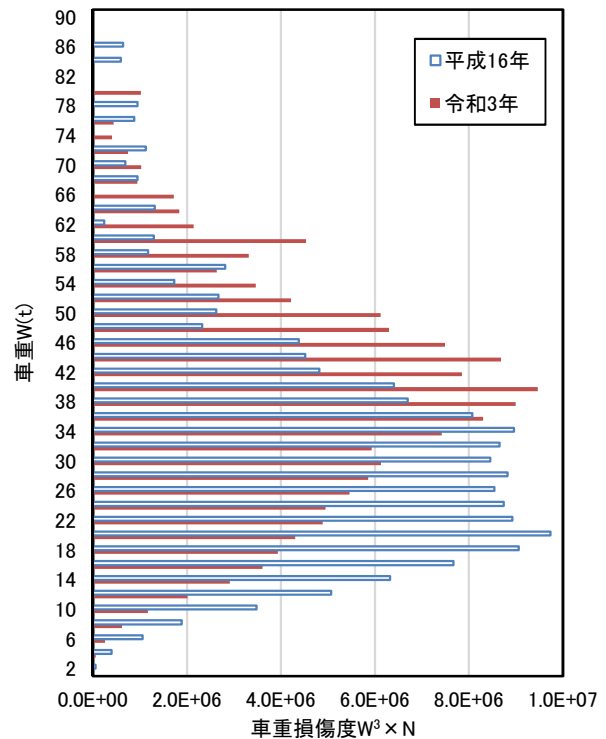


図-5 車重損傷度の分布の比較

[成果の活用]

今回の活荷重計測により得られた大型車の車重や台数等の通行特性に関するデータは、道路橋の設計基準の改定に反映される予定である。