

報告

レーザー距離計を用いた鋼板接着補強 RC 床版のたわみ計測

八ッ元仁*, 鈴木威*, 中山昭二**, 前川敬彦***, 飛ヶ谷明人****

*阪神高速道路株式会社, 技術部技術開発課 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町 4-1-3)

**株式会社ソーキ, 営業本部大阪営業所 (〒550-0025 大阪市西区九条南 4-2-4)

***内外構造株式会社, 技術開発部技術開発課 (〒541-0082 大阪市中央区南船場 4-7-15TAG 南船場ビル)

****阪神高速道路株式会社, 建設事業本部大阪建設部企画課 (〒552-0007 大阪市港区弁天 1-2-1-1900)

近年の計測技術の進歩により, いわゆる非接触型の変位計であるレーザー距離計が開発されてきており, 実橋を対象とした計測も実施され始めている. 阪神高速では, 従来の高感度変位計(リング式計測)に代わる計測方法としてこのレーザー距離計を用いた非接触型変位計測システム(レーザー計測)を今後用いていくことも視野に入れている. しかし, レーザー計測の計測精度や実橋への適用性などは未だ不明確な部分もあるため, 実橋床版に載荷荷重を与えた場合の計測試験を行うことで, これら不明な点を明らかにしようとした. 計測試験の結果, レーザー計測はリング式計測と比較して計測結果に多少のバラツキがあるものの, その値は小さくリング式計測とほぼ同等の計測精度を有することが確認された.

キーワード: 鋼板接着補強 RC 床版, 床版たわみ, レーザー距離計

1. はじめに

阪神高速における鋼橋の RC 床版においては, 設計年次が古いものについては曲げ耐力・疲労耐久性の向上を目的に下面から鋼板接着を行うことで補強を行ってきた(以下, 鋼板接着補強と呼ぶ). 阪神高速における RC 床版のおおよそ半数にあたる約 7 万パネルが現在この方法により補強されている. これら鋼板接着補強が行われた RC 床版(以下, 補強済 RC 床版)は古いもので 30 年を超えており, これら古いものを中心に鋼板のはく離や漏水といった損傷が生じ始めている. 佐野らの研究¹⁾によると鋼板のはく離状況と補強済 RC 床版の内部の損傷状態は必ずしも相関関係があるわけでないということが報告されており, 阪神高速では補強済 RC 床版の劣化状態を定量的に評価するために, 別の劣化損傷に伴い生じる現象を捉えることで補強済 RC 床版の劣化度の評価を行うと検討を進めている.

松井らの研究²⁾によると, 補強が行われていない RC 床版については, 床版のたわみ量と劣化損傷度に大きな相関性があることが報告されている. 補強済 RC 床版の大部分が RC 床版で構成されていることや補強済 RC 床版の終局限界状態では圧縮側のコンクリートが破壊状態に至るという点で RC 床版の終局限界状態と類似しているということから, 阪神高速では上述の松井ら研究で提案されている床版のたわみ量から劣化度を評価する手法

を補強済 RC 床版の劣化度評価にも適用できるものと考えている.

補強済 RC 床版のたわみ量による劣化度の評価を行う場合, そのたわみ量の正確な計測が重要となる. 補強済 RC 床版等の床版たわみ量を計測する場合, 一般的には高感度変位計を用いて計測することになるが, この計測手法を用いる場合は足場などの計測上の固定点を必要とするため多大な労力と費用が必要となる. 阪神高速における補強済 RC 床版の保有数を考えると, この計測手法を用いて補強済 RC 床版の劣化度の判定を行っていくことは経済面から考えても現実的でない. たわみ量による補強済 RC 床版の劣化度判定を実現させるには, 精度が高いのはもちろんのこと, 計測が容易でかつ安価な計測手法の存在が必要不可欠と考える.

一方で, 近年の計測技術の進歩により, いわゆる非接触型の変位計となるレーザー距離計が開発されてきており, それら計測器を用いた構造物を対象とした計測も実施され始めている(例えば^{3), 4)}. 阪神高速では従来の高感度変位計に替わる計測方法として, このレーザー距離計を用いた非接触型変位計測システム(以下, レーザー計測と呼ぶ)に着目するとともに, 計測手法として実現場に適用できるかどうかを確認するための検討を行い始めている⁵⁾.

そこで本検討では, このレーザー計測の実構造物への適用性を検証するため計測試験を実施するとともに, 計



図-1 対象橋梁の位置とその状況

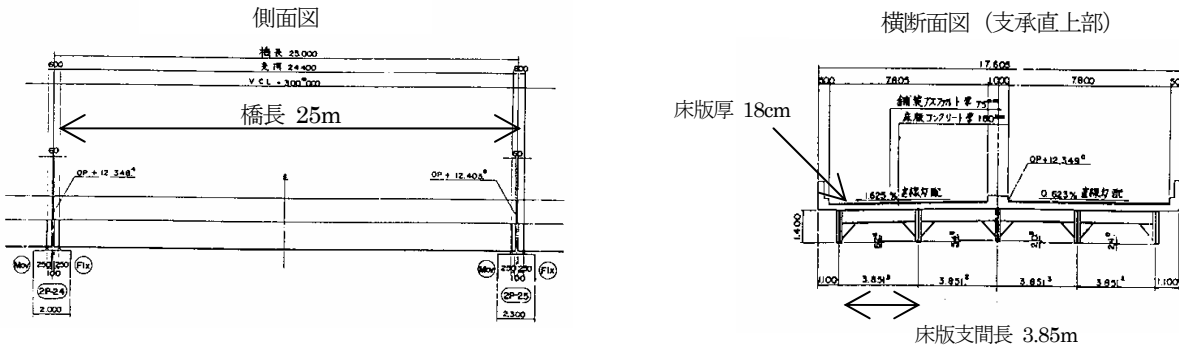


図-2 対象橋梁の構造概要

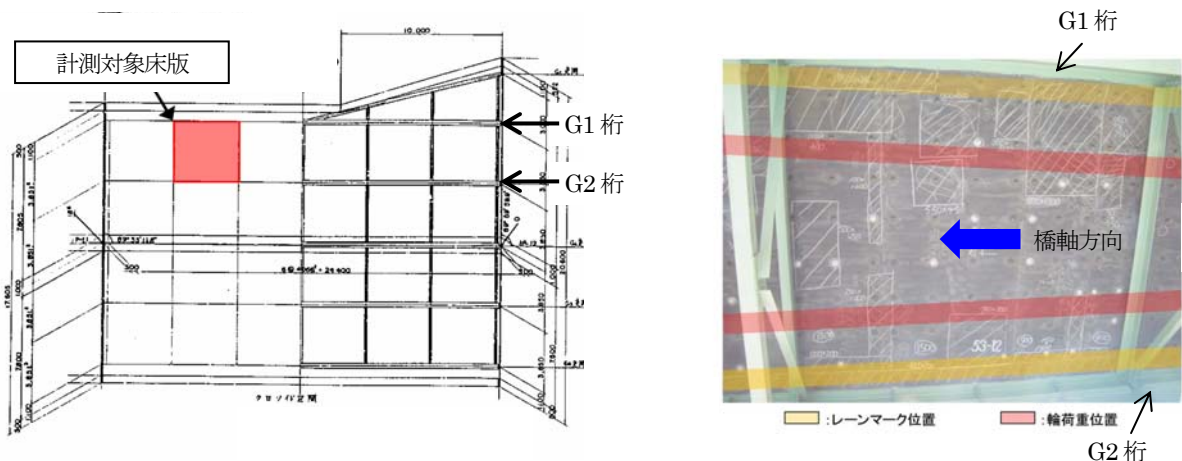


図-3 計測対象床版の位置と下面の状況

測試験から得られた測定結果の分析を行うことで計測精度やその適用性について考察を行った。

2. 補強済 RC 床版のたわみ計測試験

2.1 計測試験の概要

本計測試験では、実橋におけるレーザー計測の精度やその適用性を検証するため、従来の補強済 RC 床版のたわみ計測によく用いられるリング式変位計を用いた計測（以下、リング式計測と呼ぶ）とレーザー計測を行い、その計測結果の比較検証を行った。補強済 RC 床版のたわみについては、試験車両の走行による荷重を与えるこ

とたわみを発生させることとした。

計測対象橋梁は、図-1に示す阪神高速15号堺線（1970年建設）の鋼単純合成鉄桁橋とした。図-2に対象橋梁の構造諸元を示す。対象橋梁の橋長は25m、床版支間は3.85m、床版厚は18cmである。

2.2 計測器の設置位置と載荷位置の関係

図-3に計測対象床版の位置と下面の状況を、図-4に計測器の設置位置とその設置状況を示す。

図-3に示す計測対象床版では、下面全面に対して鋼板接着を行ったが、コンクリートと鋼板の接着面に剥離などの再劣化現象が生じている。図中に示す白色のハッ

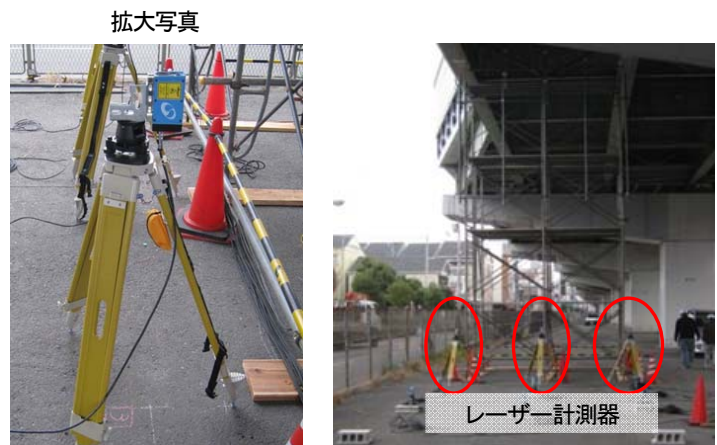
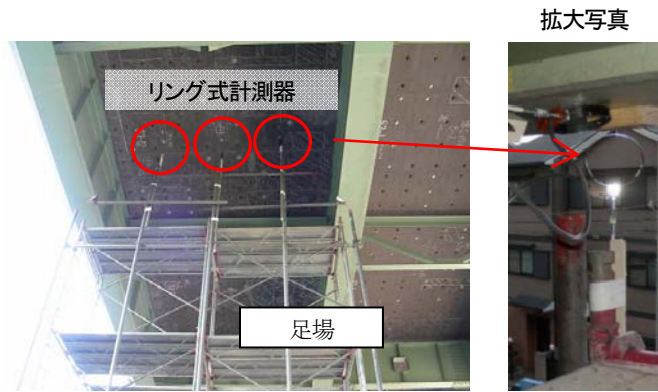
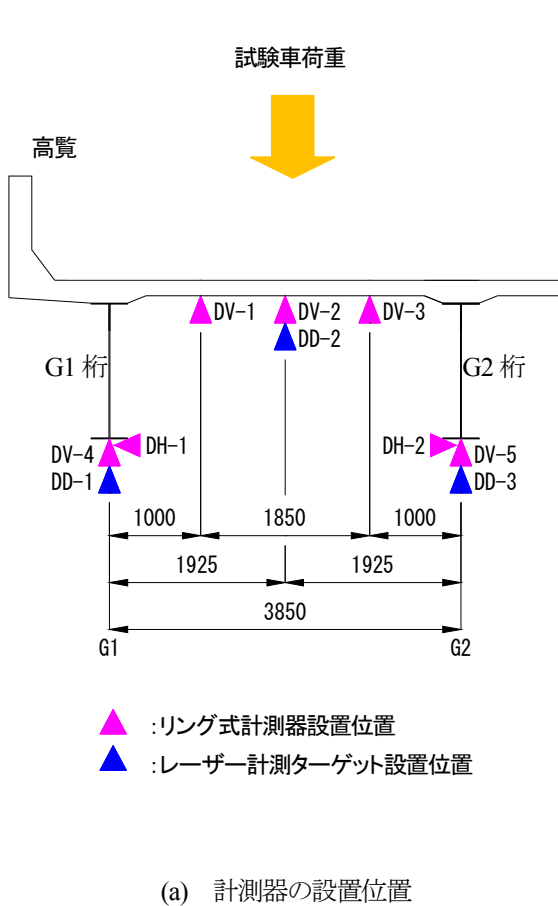


図-4 計測器の設置位置とその設置状況

チング部分は、たたき点検により検知した鋼板の剥離箇所を示している。

図-4の断面図に示すように、リング式計測 (OU-10 ; (株) 東京測器研究所), レーザー計測 (DD ターゲット ; (株) ソーキ) とともに計測床版の下面とその床版を支持する桁の変位量を計測した。床版に活荷重が加わると床版とともに桁もたわむことから、桁自体のたわみ量も計測し、式(1)に示す計測値の補正を行うことで床版自体のたわみ量 (実たわみ量) を算出した。

$$DV_i = \delta_{Vi} - \{ \delta_{G1} - (\delta_{G1} - \delta_{G2}) \cdot L_{Vi} / L \} \quad (1)$$

ここに、

DV_i : 測点 V_i の床版たわみ量 (実たわみ量)

δ_{Vi} : 測点 V_i の鉛直変位

δ_{G1} : G1 主桁の変位

δ_{G2} : G2 主桁の変位

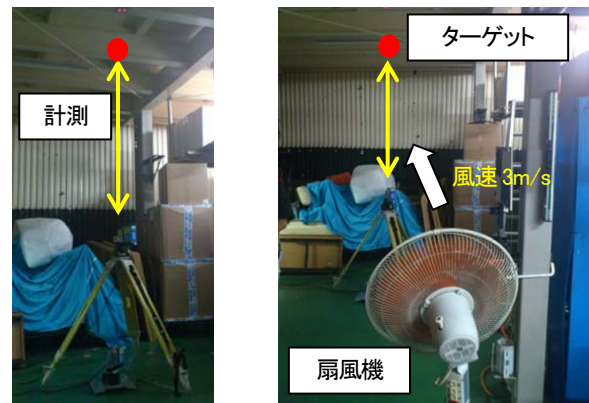
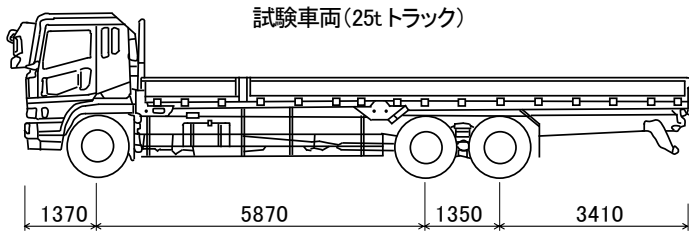


写真-1 風による影響の検証実験の様子

L_{Vi} : G1 主桁から測点 V_i までの距離

L : 床版支間 (3.85m)

リング式計測器の計測精度は 1×10^{-3} ひずみ/mm, レーザー計測器の計測精度は 0.1mm となっている。なお、レーザー計測については、計測対象面にレーザーを反射させるためのターゲット (以降、ターゲットと呼ぶ) を設置して計測を行う。レーザーそのものについては、風の



試験車両(25tトラック)

(単位: kg)

| | |
|---------|--------|
| 前輪重量 | 7,350 |
| 後輪重量(前) | 9,070 |
| 後輪重量(後) | 8,250 |
| 合計 | 24,670 |

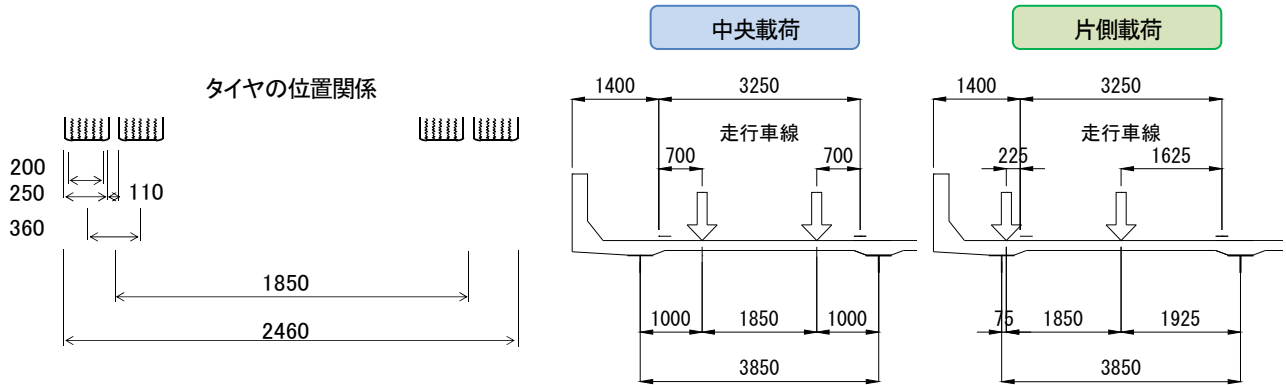
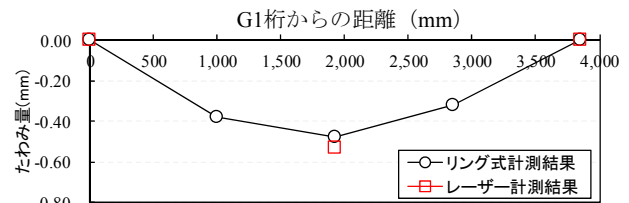


図-5 試験車両を用いた載荷の概要

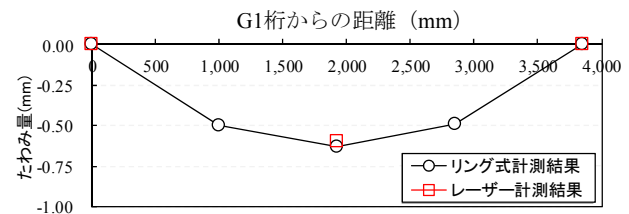
影響を受けることはないと考えられるが、ターゲットやレーザー計測器を支持する脚立は風による影響を受ける可能性があると考えられる。そのため、本検討では別途実験を行うことでその影響の確認を行った。写真-1に示すとおり、別途実験は室内で実施しており、ターゲットの設置やレーザー計測器を支持する脚立の設置は、実橋での試験時の状況を模擬した。実験では、風を人工的に発生させた場合と、無風の場合の2ケースの実験を行い、計測結果の比較を通して風による影響を確認した。実験の結果、風速3m/s以下という条件下では風が計測結果に与える影響はないことがわかった。計測試験時の環境下では、風速3m/sを超えるようなことは無かったため、計測試験結果については風による影響を受けていないものと判断した。

2.3 載荷方法

図-5に載荷方法の概要を示す。計測対象床版への載荷については、図中に示すとおり総重量25tの試験車両(3軸トラック)を用いた。載荷の際には走行車線の直下にあたる計測対象床版に隣接床版の影響が及ばないように、追い越し走行車線を規制したうえで試験車両による載荷を行った。計測試験では、試験車両を計測点の直上で静止させてたわみ量を計測する静止載荷と、試験車両を時速2~3km/h程度で走行させて計測する低速走行載荷の2種類の載荷を行った。また、試験車両の載荷位置については、図中に示すように、試験車両の重心位置と床版支間中央が一致するように載荷する中央載荷と、試験車両の後輪片側位置が版支間中央と一致するに



(a) 静的載荷-片方載荷ケース



(b) 静的載荷-中央載荷ケース

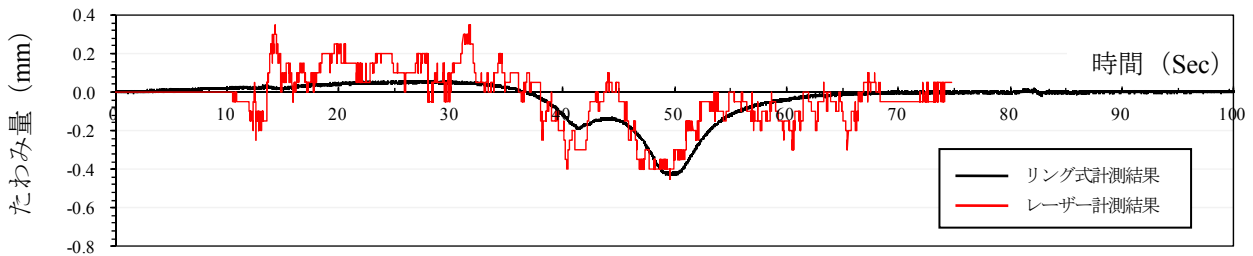
図-6 たわみ計測結果(静的)

ように載荷する片側載荷の2ケースの載荷を実施した。

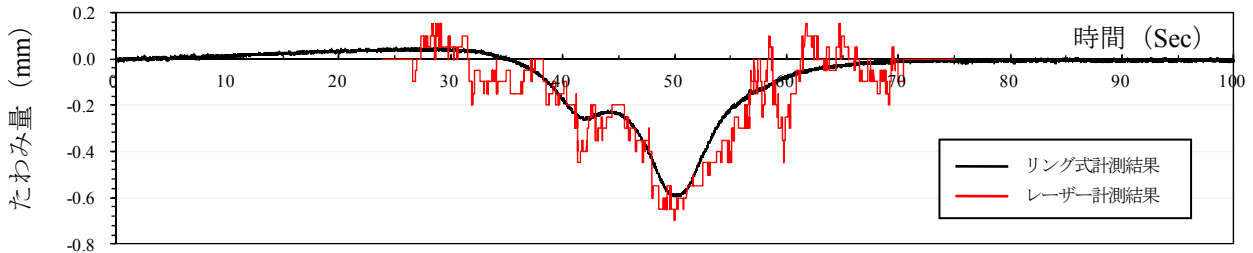
載荷回数については、静止載荷における中央載荷で7回、片側載荷で6回、低速載荷における中央載荷で13回、片側載荷で8回として、載荷毎にリング式計測とレーザー計測の両計測を実施した。

3. 計測結果

図-6に静的載荷における代表的なたわみ計測結果を、図-7に動的載荷における代表的なたわみ計測結果を示す。図-4に示すように、リング式計測では主桁の水平



(a) 低速走行載荷一片方載荷ケース



(b) 低速走行載荷中央載荷ケースのたわみ挙動

図-7 たわみ計測結果 (低速走行)

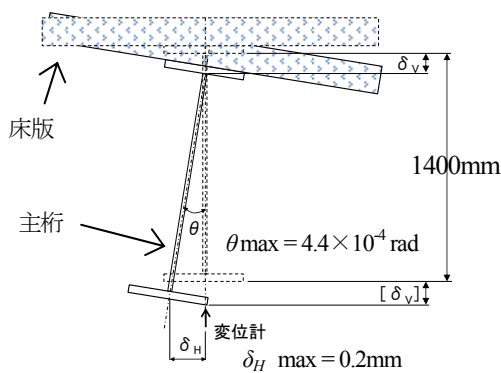


図-8 主桁の変形時の概要図

方向の変形についても計測を行っている。これは図-8の主桁の変形概要に示すように、主桁に水平方向の変形が生じるとたわみ量にも影響が生じることが予想される。しかし、今回の計測では、図中に示すように、水平変形量から推定した主桁の回転角は非常に小さく、この回転角から求まる主桁の回転を要因とする主桁のたわみ量は 10^{-5} のオーダーであることが確認された。このため、本試験では計測結果で得られたたわみ量に対しては補正を行わず、そのまま計測結果として整理を行った。

図に示す静的載荷の結果については、計測位置でのたわみ量の最大値を示している。図中に示すとおり、片方片方載荷、中央載荷のいずれのケースにおいても、各計測点でのリング式計測の結果とレーザー計測の結果がほとんど一致していた。

一方、低速載荷の結果については、図中に示すとおり、レーザー計測結果についてはたわみ値の時刻歴曲線が階段上の線となりリング式計測におけるたわみ曲線のように滑らかなものでないことがわかる。これはレーザ

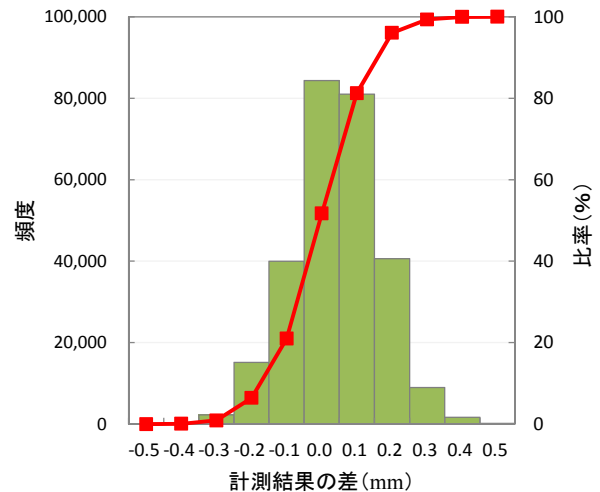


図-9 計測結果の差の分布

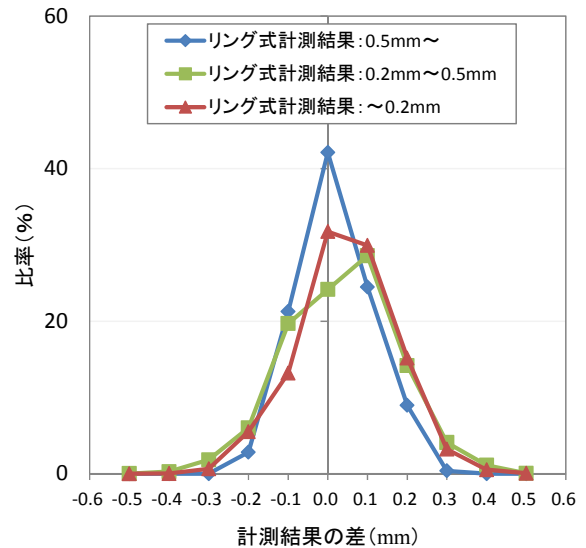


図-10 計測結果の差の分布

表-1 リング式計測値の大きさ毎のバラツキ

| リング式計測結果の大きさ | 計測結果の差 | |
|--------------|---------|---------|
| | ±0.1%以内 | ±0.2%以内 |
| 0.5mm～ | 87.9% | 99.6% |
| 0.2mm～0.5mm | 72.4% | 92.6% |
| ～0.2mm | 74.9% | 95.5% |

一計測の最小計測単位が 0.1mm であり 0.1mm より小さいたわみ量を認識できないために生じたものである。片方載荷におけるレーザー計測結果とリング式計測結果の差が若干見られるものの、リング式計測で得られたたわみ挙動の傾向をレーザー計測でも捉えていることがわかる。また、中央載荷のケースについては、両計測結果の差が片方載荷のケースに比べて小さく、さらに精度よくレーザー計測がリング式計測で得られているたわみ挙動を把握できていることがわかる。

次に、レーザー計測の計測精度の評価を行うために、図-9、図-10に示すようにリング式計測結果とレーザー計測結果の差について統計分析を行った。本試験では同時刻にリング式計測とレーザー計測を行っていることから、各載荷ケースにおける計測データをすべて直接比較することができた。そのため、ここではリング式計測結果からレーザー計測結果を引き、その差分を計測結果の差とした。計測結果の差のデータ数は 274、340 個であることから、統計分析を行う母数としては十分なデータ数であると判断している。両計測結果の差の分布を図-9に示す。分析の結果、両計測データ間の差の平均は 0.04mm、標準偏差は 0.12mm となった。図-10、表-1には、リング式計測結果の大きさ毎の計測結果の差の分布を示す。測定結果の差のほとんどが±0.1mmの範囲内に収まっており、最大でも±0.2mmの範囲内にあることがわかる。また、リング式計測結果の大きさ毎に見てみると、リング式計測結果の大きさが 0.5mm を超えるとバラツキが若干小さくなる傾向を示しているものの、リング式計測結果の大きさの間ではそれ程大きな差がないことが確認された。

このように、レーザー計測とリング式計測とでは、計測結果に差があり、その差の平均は±0.1mm程度であることがわかった。この±0.1mmという値そのものの大きさに対する評価については、計測の目的によっても変わると考えられる。文献1)の中にも示すように、鋼板接着RC床版の劣化が大きく進展すると数mm単位のとわみ量が生じると考えられる。このような劣化が大きく進展した状況下にある鋼板接着RC床版のとわみ量を計測す

る場合や劣化が大きく進展していく過程を把握するために使用する場合は、リング式と比べて 0.1mm 程度の差を有するレーザー計測であっても十分に用いることができると考えられる。

4. まとめ

本試験では、補強済 RC 床版を対象に活荷重を与えた場合の床版のたわみ挙動をレーザー計測およびリング式計測を用いて計測した。両計測結果について比較を行うことで、レーザー計測の計測精度について評価を行った。本試験で得られた結果を以下にまとめる。

- レーザー計測については、補強済 RC 床版の動的なたわみ挙動についても十分に把握することができる。
- レーザー計測はリング式計測に比べると計測値に 0.1mm 程度のバラツキを有するが、その計測精度は高く実橋梁における補強済 RC 床版のたわみ計測に十分用いることができる計測精度を有している。

謝辞

本検討については、阪神高速道路株式会社鋼板接着RC床版の維持管理に関する検討会（松井繁之委員長（大阪大学名誉教授）、堀川都志雄委員（大阪工業大学名誉教授）、河野広隆委員（京都大学大学院教授）をはじめとする各位）から貴重なご意見を頂きました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 佐野正, 山下幸生, 松井繁之, 堀川都志雄, 久利良夫, 新名勉: 浮きを有する鋼板接着補強 RC 床版の疲労耐久性および樹脂再注入の評価, 土木学会論文集 A1, Vol.67, No.1, 27-38, 2011
- 2) 松井繁之, 前田幸雄: 道路橋 RC 床版の劣化度判定法の一提案, 土木学会論文集, 第 374 号/I-6, pp.419~426, 1986.
- 3) 大島 義信, 小曲満, 長谷川伸二: レーザー距離計を用いた橋梁振動の簡易計測手法に関する研究, 構造物の安全性・信頼性 Vol.6 JCOSSAR2007 論文集, 日本学術会議, 365-370, 2007.6
- 4) 島 拓造, 尾山 達己, 田中 玲光, 赤木 淳: 橋梁モニタリングによる鉄道高架橋の維持管理, 土木学会第 63 回年次学術講演会, 71-72, 2008.9
- 5) 中山昭二, 飛ヶ谷明人, 佐々木一則, 前川敬彦, 久利良夫: レーザ距離計を用いた鋼板接着補強 RC 床版のたわみ計測手法の検討, 土木学会第 67 回年次学術講演会, V-67, pp.133-134, 2012.9