

橋梁を用いた車両重量計測システムの開発

中谷昌一* 玉越隆史** 中洲啓太*** 石尾真理****

1. はじめに

我が国の道路橋の数は、全長 15m 以上の主要なものだけでも約 14 万橋に達しており、物流のネットワークを構成するインフラとして、有効に活用するとともに、これらの橋梁を適切に維持管理していくことが重要な課題となっている。

こうした中、橋梁の耐久性に重大な影響を及ぼす大型車両の通行実態を把握することは、今後の橋梁設計における基礎的な資料が得られるだけでなく、既設橋梁の効率的な維持管理を図る上でも大きな意味を持っている。

現在、通行車両の重量を測定する場合、マット式ないしは埋込式の軸重計が用いられることが多い。しかしながら、これらの装置は、その設置に多額の費用を要する場合があるなどの課題も多い。

国土交通省国土技術政策総合研究所橋梁研究室では、建設省土木研究所時代より、大型車両の通行実態の傾向や橋梁の保全に必要な情報を簡易に収集

することなどを目的として、図-1 に示すような、橋梁部材のひずみ応答から、橋梁上を通行する車両の重量を測定するシステム (Weigh-in-Motion: 以下、WIM という) の開発を進めてきた。

ここでは、橋梁研究室が開発した WIM の概要および検証試験の結果について紹介する。

2. 既往の研究

橋梁を用いた車両重量計測に関する研究は、国土技術政策総合研究所橋梁研究室以外にも国内外で数多く実施されており^{1)~4)}、算定に用いる指標 (部材のひずみ量、床版のひび割れ開閉量)、測定に用いる部材 (床版、主げた、縦げた、トラス部材)、計算のロジック (影響線の近似式を仮定して実測値との誤差を最小化する方法、影響面積を用いる方法) に関して、様々な方法が提案されている。表-1 に国内における主な研究例を示す。WIM は、測定に用いる部材や計算上の仮定により、適用可能な橋梁形式や交通条件などに制限が

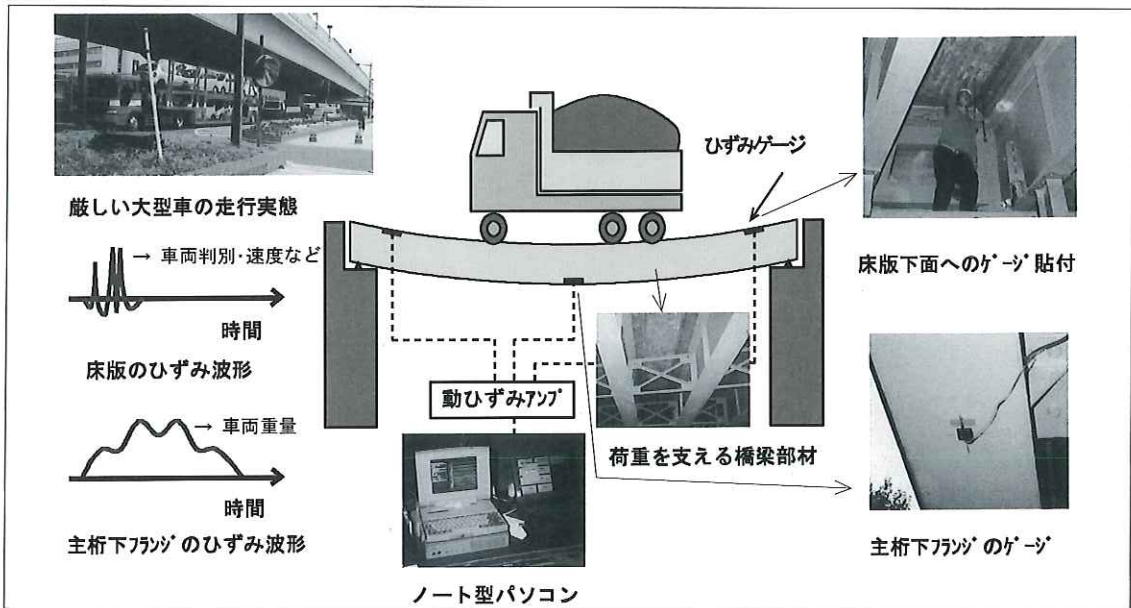


図-1 車両重量計測システム (WIM) の概要

表-1 国内における既往の研究例

研究者	概要
東京工業大学 三木ら	ひずみの影響線を多項式で近似し、影響線を重ね合わせたひずみの計算値とひずみの実測値との誤差を最小化する方法
名古屋大学 山田ら	ひずみ等の応答波形の影響面積が車両総重量に比例すると考える方法
大阪大学 松井ら	RC床版の主鉄筋方向のひび割れ閉閉量が曲げひずみの積分値と等しく、輪荷重と比例関係にあることを利用する方法

ある。したがって、その適用にあたっては、各システムの基本原理を把握し、適用条件に十分な注意を払う必要がある。

3. 開発の経緯と変遷

3.1 開発当初のシステム (Ver.1, 平成4年～)

橋梁研究室が開発を進めている WIM は、目標とする精度や適用範囲、その時々パソコンの性能等に応じて変化してきた。開発当初のシステム (Ver.1) は、異なる車線を走行する車両の影響を考慮できる汎用性の高い方法として、各車線に対応する主げた (N 本) にひずみゲージを貼り付け、ひずみの影響線を多項式で近似し、影響線を重ね合わせたひずみの計算値とひずみの実測値との誤差が最小になるよう、N 主げた分の連立方程式を作成して車両重量を計算するものであった。この方法は、橋軸方向に加え、橋軸直角方向の影響を考慮しているので「影響面」を用いる方法といわれる (図-2 参照)。

しかしながら、当時のパソコンの処理速度には限界があり、N 車線分の影響を考慮したりリアルタイム処理は難しく、Ver.2 においてシステムの簡素化が図られた。

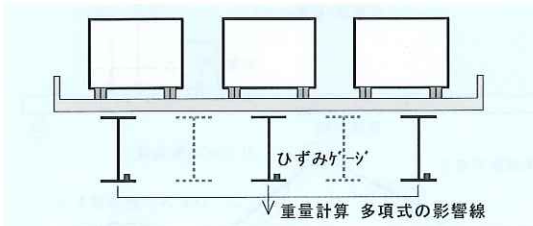


図-2 WIM (Ver.1) の概要

3.2 簡素化されたシステム (Ver.2, 平成5年～)

システムの処理速度の向上を目的として、着目車線の直近の主げた (1 車線につき 1 主げた) 分に限って方程式を解く方法に変更された (Ver.2)⁵⁾。この方法は、橋軸方向のみの影響を考慮するので、

「影響線」を用いる方法といわれる (図-3 参照)。なお、他の車線を走行する車両の影響については、各走行パターンに対し、係数を乗じることで対応を試みたが、橋梁上に複数の車両が存在するときの計算精度の低下が課題として残された。

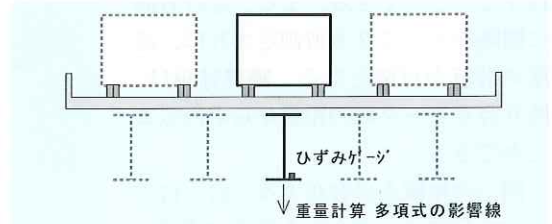


図-3 WIM (Ver.2) の概要

3.3 現在のシステム (Ver.3, 平成13年～)

将来、WIM を実用化し、全国的に展開しようと考えたとき、大型車交通が問題となるような道路は、一般に車線数が多く、大型車の連行や並走状態が頻繁に発生することが予想され、そうした状況にも適切に対応できることが望ましい。最近では、WIM の開発当初と比較するとパソコンの処理速度が飛躍的に向上している。そこで、現在では、各車線に対応する主げた (N 本) にひずみゲージを貼り付け、ひずみの影響線を一次式で近似し、影響線を重ね合わせたひずみの計算値とひずみの実測値の誤差が最小となるように最適化処理を施す方法を採用している (Ver.3, 図-4 参照)⁶⁾。

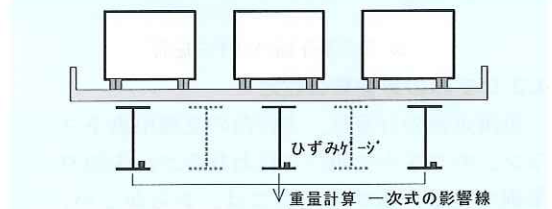


図-4 Ver.3 の概要

以下では、連行、並走状態への対応を図った現在のシステム (Ver.3) の概要と検証試験の結果を示す。

4. 車両重量の計算方法

4.1 個々の車両の判別

一台一台の車両の重量を正確に測定するためには、測定時にどの車線に何台の車両が存在しているのか、正しく把握することが必要である。

通行車両 (車軸) の有無は、図-5 に示すように車

軸の存在に対し、鋭く尖った影響線形状となる輪荷重走行位置の床版下面の橋軸方向のひずみ応答から判別する。この測定を各車線に対して行うことにより、各車線における車軸の有無を把握することができる。また、走行方向に間隔をおいて2カ所測定すれば、速度の計算が可能となる。隣接軸距は、隣り合うピーク間の距離から求めることができる。

同一の車線上に存在する一台一台の車両の分離は、実在する車両の諸元を広範に分析し⁷⁾、例えば、隣り合う軸間距離が10.5m以上ならば別の車両としたり、6軸車は末尾の3軸、4軸車は末尾の2軸が近接していることが多いというパターンを取り込んだ個々の車両を分離するロジック(以下、一台判別ロジックという)を使用する。図-6に一台判別ロジックのフローを示す。

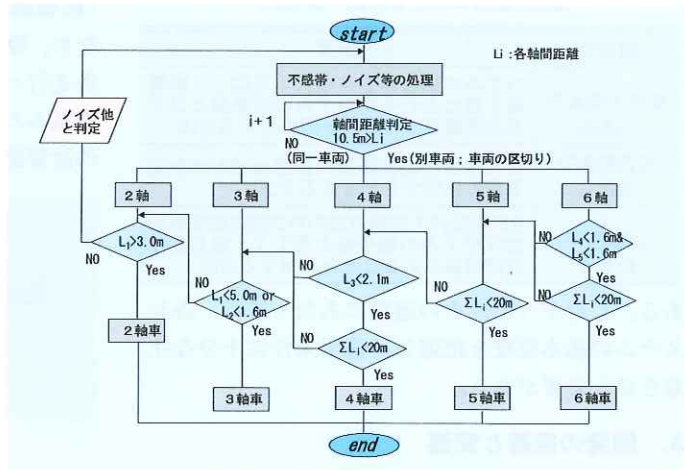


図-6 一台判別のロジックのフロー

$$\Sigma \{ \Sigma \varepsilon_i (K, P_i, x) - Y \} \rightarrow \text{最小} \quad (2)$$

図-7に荷重車による影響線設定の考え方を示す。

4.3 車両重量の計算

重量が未知の車両については、未知の軸重 P_i と荷重車を用いて求めたひずみの影響線を重ね合わせたひずみの計算値とひずみの実測値 Y との誤差を最小化するように未知の軸重を計算する。

$$\Sigma \{ \Sigma \varepsilon_i (K, P_i, t, V) - Y \} \rightarrow \text{最小} \quad (3)$$

この考え方は、橋梁上に存在する車両数に関係なく適用される。連行・並走状態の場合でも、橋梁上に存在するすべての軸重を上記の計算で求めておき、一台判別ロジックにより分離された各車両ごとに軸重を合計して総重量が求められる。なお、車両間の走行速度の違いに対応できるように、

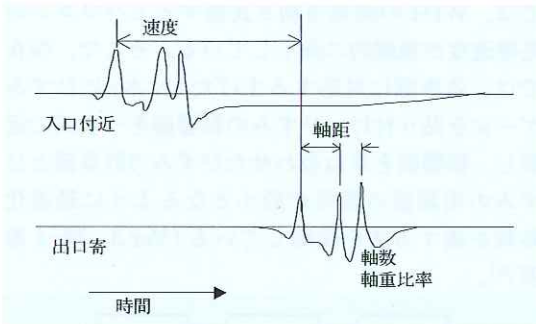


図-5 床版下面のひずみ応答

4.2 ひずみの影響線の設定

車両重量の計算は、主げたの支間中央下フランジのひずみを用いて行われるが、未知の車両の重量を求めるためには、あらかじめ、重量等の諸元が既知の車両(以下、荷重車という)を用いて、単位荷重入力に対するひずみの応答値(影響線)を求めておく必要がある。

軸重 P_i によるひずみの応答値 ε_i は、桁の曲げ剛性にあたる未知量 K 、軸重 P_i 、位置 x の関数であり、

$$\varepsilon_i = \varepsilon_i (K, P_i, x) \quad (1)$$

と表され、荷重車の各軸分を重ね合わせたひずみの計算値 $\Sigma \varepsilon_i$ と実測値 Y の差が最小になるようにひずみの影響線を設定する。

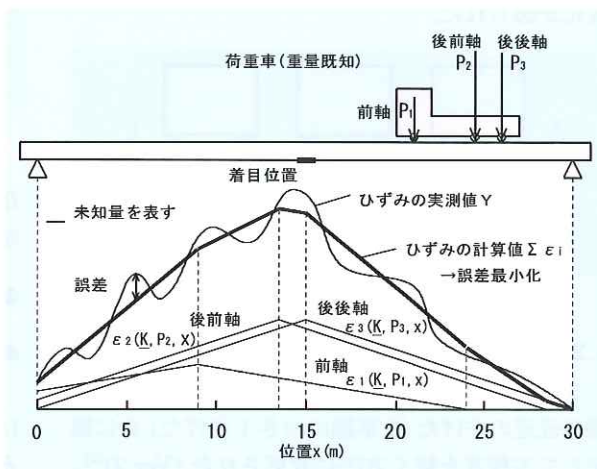


図-7 荷重車による影響線の計算

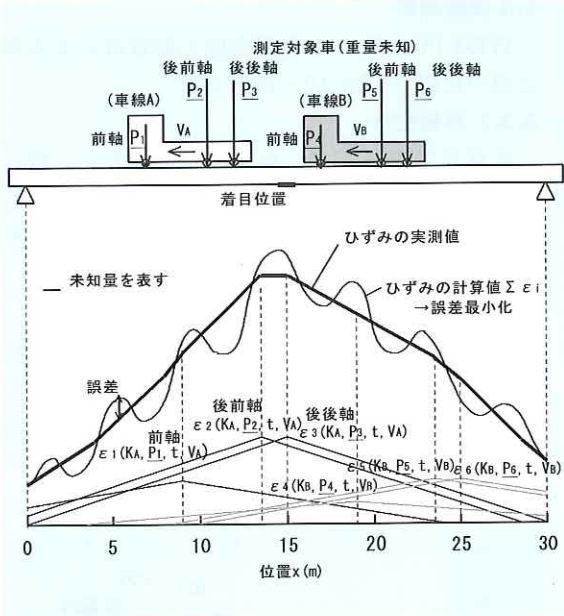


図-8 車両重量の計算

計算は位置 x の代わりに時間 t を用いて行う。車両重量計算の考え方を図-8 に示す。

5. 適用性の検証

5.1 試験橋梁

大型車の連行、並走状態への対応を目的として改良された WIM (Ver.3) の適用性を検証するため、独立行政法人土木研究所が所有する試験橋梁において、実車を用いた重量測定を実施した。表-2 に試験橋梁の諸元、図-9 に試験橋梁の断面図、図-10 に計測器の取付位置を示す。

表-2 試験橋梁の諸元

形式	鋼単純I桁
橋長	30.8m
支間	30.0m
幅員	9.7m
桁高	1.6m

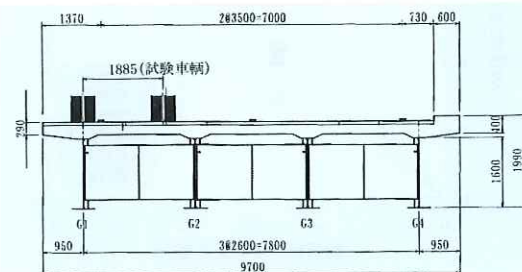


図-9 試験橋梁断面図

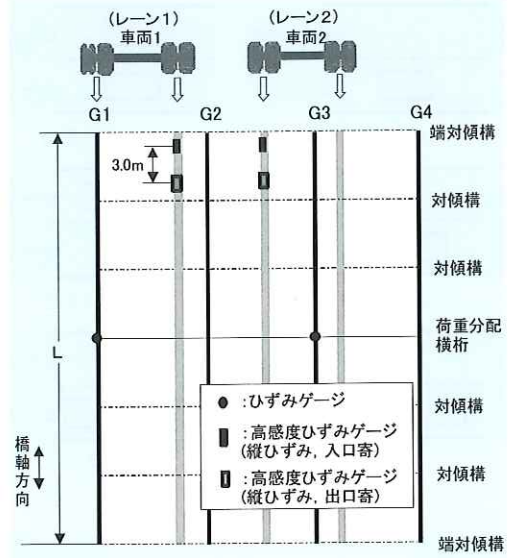


図-10 計測器の取り付け位置

5.2 試験車両および走行パターン

試験車両は、表-3 に示す 6 種類とした。車両の走行パターンは、①単独、②並走、③連行の 3 種類とし、連行、並走状態については、車両 1 および 2 を使い、走行方向の位置関係をそれぞれ 2~3 通り変化させた。写真-1 に検証試験の様子、図-11 に車両走行パターンを示す。

表-3 試験車両の種類

番号	軸数	総重量	備考
1	3	15.13t	トラック
2	3	25.01t	トラック
3	4	33.62t	2軸トラクタ+2軸トレーラ
4	5	41.81t	2軸トラクタ+3軸トレーラ
5	5	42.05t	2軸トラクタ+3軸トレーラ
6	6	44.22t	3軸トラクタ+3軸トレーラ



写真-1 検証試験の様子

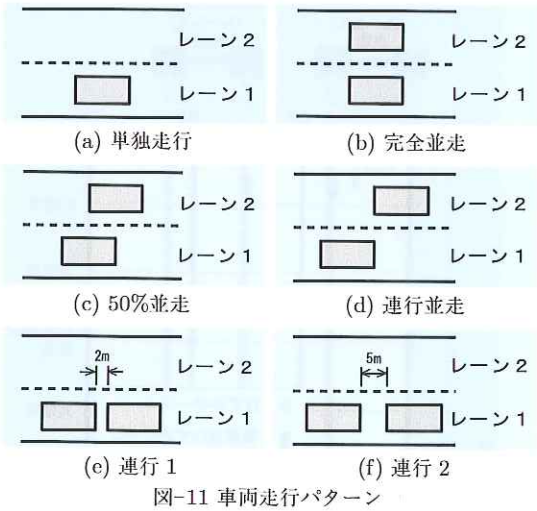


図-11 車両走行パターン

5.3 試験結果

WIM (Ver.3) による測定値と軸重計による測定値の比較を、図-12~15に示す。

5.3.1 単独走行

総重量については、車軸数に関係なく、概ね5%以内の誤差となっており、精度よく測定できることが確認できた。一方、軸重については、車軸数が多くなると精度が下がる傾向がある。

5.3.2 並走条件

総重量については、完全並走時に20~50%程度の誤差を生じているが、50%並走、連行並走と並走車両の重複長さが短くなるほど、精度が改善されている。軸重についても、完全並走時に20~70%程度の誤差を生じているが、50%並走、

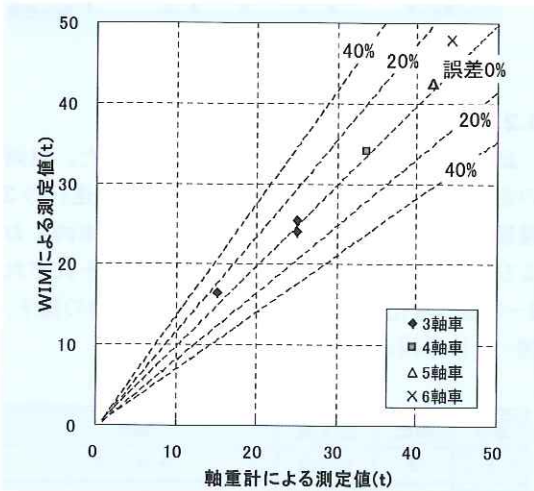


図-12 総重量の測定結果比較 (車軸数の影響)

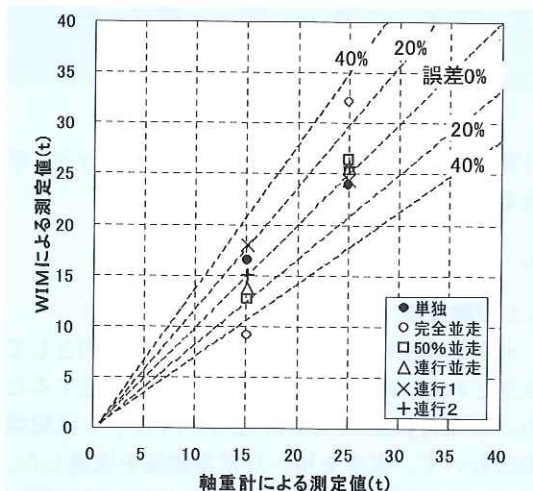


図-14 総重量の測定結果の比較 (走行パターンの影響)

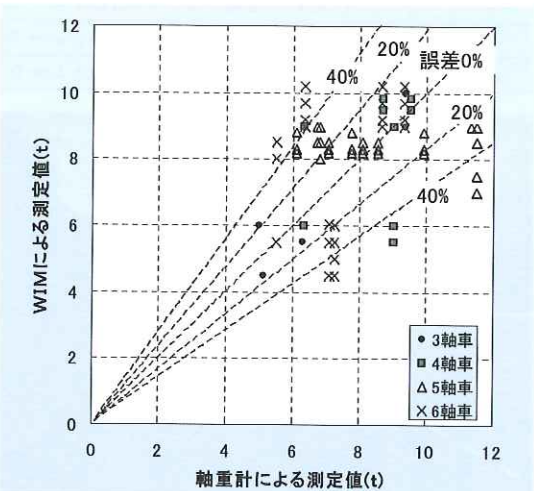


図-13 軸重の測定結果の比較 (車軸数の影響)

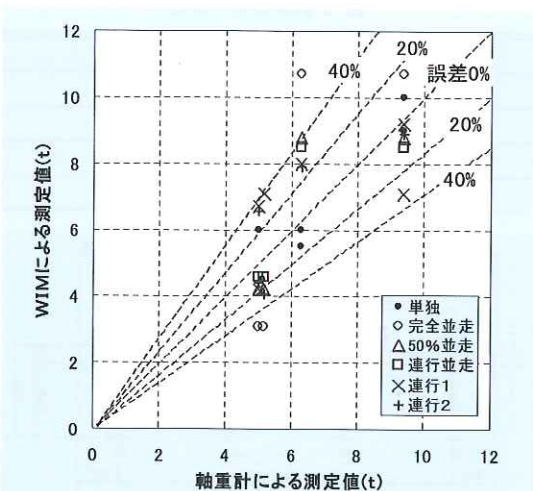


図-15 軸重の測定結果の比較 (走行パターンの比較)

連行並走の順に精度は改善されている。

5.3.3 連行走行

総重量については、20%以内の誤差で比較的精度よく測定できた。連行車両間の距離が離れるほど、精度は良くなっている。軸重については、40%程度の誤差を生じている場合もある。

6. 実交通の測定事例

橋梁研究室では、WIM の開発を手がけた当初より、当システムを用いて実際の道路で活荷重の実態調査を実施している。図-16 は国土技術政策総合研究所に近い国道 408 号線の蓮沼橋のものである。調査の結果、過積載の取り締まりが強化された平成 8 年には、大型車の割合が減少しており、車両重量のモニタリングと適切な指導を組み合わせることにより、活荷重を適切に管理できる可能性が示された。平成 12 年の調査によると、その後、活荷重実態は改善しておらず、早急に活荷重実態をモニタリングできる体制を整備する必要があることを示唆している。

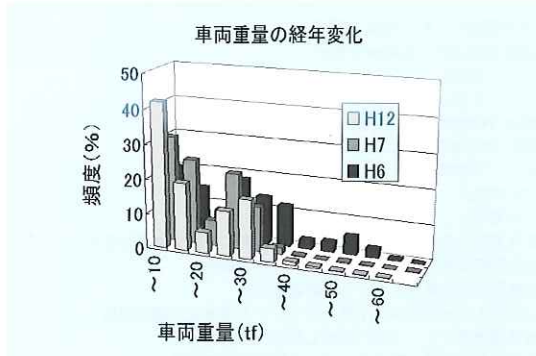


図-16 車両重量計測結果の例

7. おわりに

ここでは、標準的な鋼単純桁を用いた WIM の検証試験により、様々な車軸数や車両走行パターンに対して、精度よく総重量および軸重を測定できる条件を明らかにした。

現在、鋼箱桁橋、連続橋など異なる橋梁形式への適用性の調査を進めながら、計算過程における誤差要因を抽出、改良し、さらなる精度向上に努めている。本年度中には、マニュアル類を整備し、実用化させる予定である。

参考文献

- 1) Fred Moses ; Weigh-in-Motion System Using Instrumented Bridges, Transportation Engineering Journal, 1979.5
- 2) 三木千寿、米田利博、村越潤、吉村洋司：走行車両の重量測定、橋梁と基礎、1987.4
- 3) 小塩達也、山田健太郎、小林直人、深津伸：鋼 1 桁橋を用いた Bridge Weigh-in-Motion による自動車荷重のモニタリング、橋梁振動コロキウム'01 論文集
- 4) 松井繁之、Ahmed EL-HAKIM：RC 床版のひびわれの閉閉量による輪荷重の測定に関する研究、構造工学論文集、1989.3
- 5) 西川和廣、村越潤、宮崎和彦：橋梁を用いた車両重量計測システムの開発、土木技術資料、1996.1
- 6) 石尾真理、中谷昌一、玉越隆史、中洲啓太：影響線の重ね合わせを用いた WIM システムについて、第 57 回土木学会年次学術講演会、2002.9
- 7) (社) 自動車技術会：1999 年版自動車諸元表

中谷昌一*



国土技術政策総合研究所
道路研究部橋梁研究室長
Syoichi NAKATANI

玉越隆史**



同 道路研究部橋梁研究
室主任研究官
Takashi TAMAKOSHI

中洲啓太***



同 道路研究部橋梁研究
室研究官
Keita NAKASU

石尾真理****



同 道路研究部橋梁研究
室研究員
Mari ISHIO