

荷重変動を考慮した RC 床版の動的影響に対する改善効果

木田哲量, 阿部 忠, 澤野利章 (土木工学科) 水口和彦 (P.D)

1. はじめに

鋼道路橋 RC 床版は、伸縮継手部や路面の凹凸によって発生する大型自動車の荷重変動、すなわち走行振動も大きな原因の 1 つであると考えられる。筆者らは、伸縮継手の段差によって発生する荷重変動^{1)~3)}に着目し、走行振動荷重が RC 床版に及ぼす影響に関する実験解析を行い、走行振動荷重が及ぼす動的影響を実験衝撃係数として評価してきた。

本論文では、筆者らが提案する荷重振幅を関数とする動的影響係数を適用した活荷重曲げモーメントで設計した RC 床版供試体と現行示方書⁴⁾に基づいた曲げモーメントで設計した RC 床版供試体の 2 種類を用いた走行振動荷重実験から動的影響に関する検討を行ない、RC 床版の動的影響に対する改善効果に関する検証を行った。

2. 荷重振幅と動的係数の関係

2.1 実験衝撃係数評価式

筆者らは道示 I の規定に基づいた 1/2 モデルの RC 床版に対する走行振動荷重実験を行って、その動的影響を評価した⁵⁾。その結果、荷重振幅 V_k を関数とした実験衝撃係数 I は、式(1)として与えられる。

$$I = 0.050V_k^{0.675} \quad (1)$$

ここに、 I ：実験衝撃係数、 V_k ：荷重変動率(%)

2.2 基準荷重振幅

伸縮継手部を通過することによって発生する大型車両の荷重変動を考慮する場合は、式(1)を適用した活荷重曲げモーメントの割増が必要であると考えられる。その場合、道示 I に規定される衝撃係数 i と実験衝撃係数 I との境界となる基準荷重振幅 K_k は、支間 L を変数とする式(2)で得られる。

$$K_k = -0.20L + 20.8 \quad (2)$$

ここで、 K_k ：基準荷重振幅、 L ：設計支間長(m)

2.3 動的影響係数の適用

基準荷重振幅 K_k (式(2)) 以上の荷重変動率 V_k が発生する場合は活荷重モーメントを割増する必要がある。

そこで、文献 5) では、実験衝撃係数 I と支間 L を関数とする道示 I に規定される衝撃係数 i を考慮した衝撃係数を動的影響係数 α_I と定義して、式(3)として与えられている。

$$\begin{aligned} V_k < K_k : \alpha_I &= i \\ K_k \leq V_k : \alpha_I &= 0.050V_k^{0.675} \end{aligned} \quad (3)$$

ただし、

$$K_k = -0.20L + 20.8, \quad i = 20 / (50 + L)$$

ここで、 α_I ：動的影響係数、 V_k ：荷重変動率(%)、 K_k ：荷重変動率(%), i ：道示 I の規定による RC 床版の衝撃係数、 L ：支間(m)

2.4 動的影響を考慮した設計曲げモーメント式の適用

伸縮継手部を通過するとき発生する荷重変動は、橋梁の両端部支点付近で軸重量に対して $\pm 45\% \sim 48\%$ 生じている^{1)~2)}。そこで、伸縮継手の段差による荷重変動およびバネ下振動が減衰されるまでの区間に対するひび割れ損傷問題の解決策のひとつとして、走行振動荷重の動的影響係数 α_I ：式(3)を用いた設計活荷重モーメント式を式(4)として与える。

$$M_{L(\alpha_I)} = M_L \cdot (1 + \alpha_I) \quad (4)$$

ここで、 $M_{L(\alpha_I)}$ ：RC 床版の動的影響係数を含む設計活荷重モーメント (tf·m)、 M_L ：RC 床版の設計活荷重モーメント (tf·m)、 α_I ：動的影響係数

3. 動的影響を適用した単純版の曲げモーメント

3.1 解析条件

本研究では、道示 II に規定する活荷重曲げモーメント式に、動的影響係数 α_I (式(3)) を適用して、荷重振幅を考慮した場合の設計活荷重曲げモーメントを道示 I、II の規定に基づいて解析する。なお、道示 II における RC 床版の設計支間は 4.0m までと規定されているが、近年の少数主桁化へ対応するために、支間長 12m 以上まで解析されている⁶⁾。そこで、道示 III では、プレストレストコンクリート橋 (PC 橋) の最大支間は 6.0m とされていることなどを考慮して、本解析における床版の設計支間長は 6.0m まで拡張することとした。また、解析では荷重変動率を 20%、30%、40% の 3 段階を設定した。

3.2 動的影響を考慮した場合の曲げモーメント式

式(4)より、走行振動荷重による動的影響を考慮した活荷重曲げモーメントを算出した結果を図-1 に示す。

図-1(1)に示した床版支間方向の活荷重曲げモーメントは、①活荷重の場合、②荷重変動率 20% の場合、③荷重変動率 30% の場合、④荷重変動率 40% の場合、の活荷重曲げモーメントである。また、この活荷重曲げモーメント ($M_{L(\alpha_I)}$) に道示 II が規定する主鉄筋方向の曲げモーメントの割り増し係数 K_a を乗じた結果を I、II、III として図-1 中に併記した。また、図-1(2)における②、③、④も同様に振動荷重 $\pm 20\%$ 、 $\pm 30\%$ 、 $\pm 40\%$ の場合の活荷重曲げモーメントである。なお、主鉄筋方向の曲げモーメントの割り増し係数 K_a は、式(5)として与えられている。

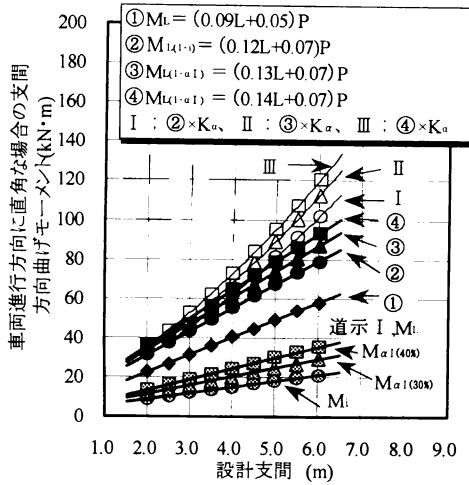
$$L \leq 2.5\text{m} : K_a = 1.0 \quad (5.1)$$

$$2.5 < L \leq 4.0\text{m} : K_a = 1.0 + (L - 2.5) / 12 \quad (5.2)$$

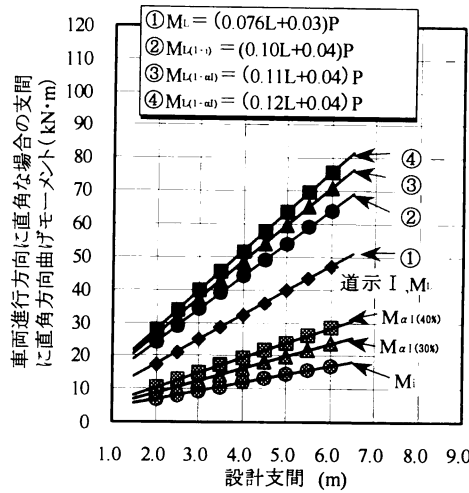
$$4.0 < L \leq 6.0\text{m} : K_a = 1.125 + (L - 4.0) / 26 \quad (5.3)$$

ここで、 K_a ：主鉄筋方向の曲げモーメントの割り増し係数、 L ：床版支間長

走行荷重の動的影響を考慮した場合の活荷重曲げモーメントは荷重変動率 K_v (%) ごとに支間方向と車両進行方向に直角な場合の単位幅当たりの曲げモーメントとして式(6)、(7)で与えら



(1) 支間方向の活荷重曲げモーメント



(2) 支間直角方向の活荷重曲げモーメント

図-1 床版の支間方向が車両進行方向に直角な場合

れる。なお、式(6)、(7)は床版支間長の影響による割り増し係数を含まない場合の主鉄筋方向の曲げモーメント式である。

(1) 支間方向の活荷重曲げモーメント： $M_{L(1+\beta)}$

$$K_v \leq \pm 20\% ;$$

$$M_{L(1+\beta)} = (0.12L + 0.07)P \quad (6.1)$$

$$\pm 20\% < K_v \leq \pm 30\% ;$$

$$M_{L(1+\alpha)} = (0.13L + 0.07)P \quad (6.2)$$

$$\pm 30\% < K_v \leq \pm 40\% ;$$

$$M_{L(1+\alpha')} = (0.14L + 0.07)P \quad (6.3)$$

(2) 支間直角方向の活荷重曲げモーメント

$$K_v \leq \pm 20\% ;$$

$$M_{L(1+\beta)} = (0.10L + 0.04)P \quad (7.1)$$

$$\pm 20\% < K_v \leq \pm 30\% ;$$

$$M_{L(1+\alpha)} = (0.11L + 0.04)P \quad (7.2)$$

$$\pm 30\% < K_v \leq \pm 40\% ;$$

$$M_{L(1+\alpha')} = (0.12L + 0.04)P \quad (7.3)$$

ここで、 $M_{L(1+\alpha)}$ ：活荷重曲げモーメント(kN·m/m)、 K_v ：荷重変動率(%)、 T ：荷重の片側荷重(kN)(=100kN)、 L ：床版支間(m)

道示IIで規定する衝撃を含む活荷重曲げモーメントは、本実験により得られた動的影響係数を適用した活荷重曲げモーメント式より求めることができる。なお、床版の支間方向が車両進行方向に直角な場合の活荷重曲げモーメントは、荷重変動率 $\pm 20\%$ の場合は道示Iに規定する衝撃係数*i*を適用することから、道示IIの活荷重曲げモーメントと同様である。しかし、荷重変動率 $\pm 30\%$ 、 $\pm 40\%$ の荷重の場合は動的影響係数が道示の衝撃係数*i*を上回ることから、動的影響係数を考慮した活荷重曲げモーメント式で算出すると、荷重変動率 $\pm 30\%$ で9.0%、 $\pm 40\%$ で17.0%の割り増しが必要となる。

4. 供試体の材料および寸法

4.1 使用材料

供試体のコンクリートには普通ポルトランドセメント、粗骨材は最大寸法20mmの骨材を使用した。また、鉄筋はSD295A、D10とD13を使用した。ここで、材料特性値を表-1に示す。

4.2 供試体寸法および鉄筋の配置

RC床版は、複鉄筋配置とし、4辺単純支持とする。なお、床版寸法は実験装置の車輪幅が道示Iに規定するT荷重の1/2モデルであることから、道示Iに規定する支間2.4mで、大型車両の計画交通量が1日1方向500台未満を想定した単純RC床版を設計し、寸法および鉄筋量をその1/2としたモデルである。供試体寸法および鉄筋の配置を図-2に示す。

(1) 鉄筋D10のRC床版供試体

供試体の支間長を120cm、

供試体の張り出し部は13.5cm

とした全長147cmで、床版の全厚は11.0cmである。鉄筋は複鉄筋配置とし、引張側の主鉄筋すなわち軸直角方向の鉄筋にはD10を10cm間隔で配置し、有効高さは9.0cmとした。また、配力筋すなわち軸方向にはD10を12cm間隔で配置し、有効高さは8.5cmとした。また、圧縮側の鉄筋配置は、軸直角方向および軸方向ともに引張鉄筋量の1/2とし、軸直角方向には20.0cm、軸方向が24.0cm間隔でそれぞれ配置した。

(2) 鉄筋D13のRC床版供試体

支間長、張り出し長、全長および床版の全厚は床版鉄筋にD10を用いた供試体と同様である。鉄筋は複鉄筋配置とし、引張側の主鉄筋すなわち軸直角方向の鉄筋にはD13を10cm間隔、軸

表-1 供試体の材料特性値

供試体	コンクリート 圧縮強度 N/mm ²	鉄筋 (SD295A)		
		降伏強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	ヤング係数 kN/mm ²
D10	32.0	346	511	200
D13	30.0	368	516	200

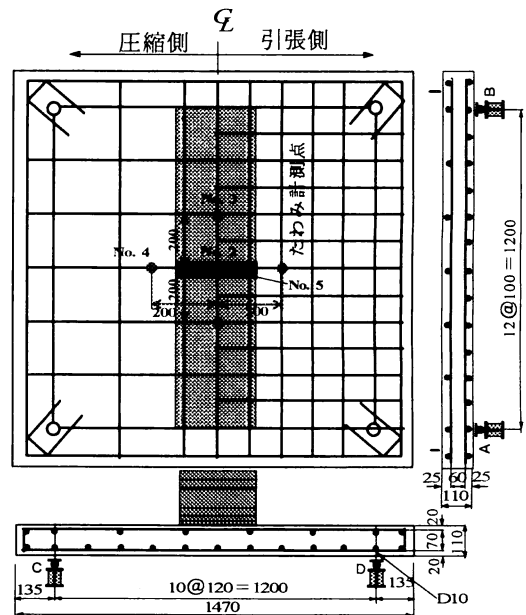


図-2 RCはり供試体寸法および鉄筋の配置

方向には D13 を 12cm で配置し、有効高さはそれぞれ 9.0cm と 8.5cm とした。また、圧縮側の鉄筋配置は、軸直角方向および軸方向ともに引張鉄筋量の 1/2 とした。なお、本実験は走行振動荷重±20%、±30%で実験衝撃係数を評価するが、荷重振幅±30%の場合、文献5)による動的係数を適用した活荷重曲げモーメント式(6)より算出すると、約 10%の鉄筋量の割り増しが必要となる。しかし、本実験では D13 を軸直角方向および軸方向に配置することから、鉄筋量の割り増しは約 17%となっている。

5. 実験装置の概要および実験方法

5.1 走行振動荷重載荷装置の概要

本実験に用いた走行振動試験装置は、鋼製反力フレーム(400 kN)のほりに、車輪(幅=25cm、直径=40cm)と油圧式の振動疲労試験機を固定し、供試体を設置した台車をモーターとクランク・アームにより水平方向へ往復運動させて荷重の走行状態を実現するものである。

5.2 衝撃係数の算定法

本研究では、RC 床版供試体に走行車両の荷重変動を振動荷重として作用させた場合の実験衝撃係数を評価する。衝撃係数は、たわみ応答値による動的増幅率から実験衝撃係数として得るものとする。たわみ応答による動的増幅率は、DAF (Dynamic Amplification Factor) より評価されている。

(1) 動的増幅率 DAF の概念

動的増幅率 DAF は、最大静的たわみ値を基準に、その値と最大動的たわみ値の差を最大静的たわみで除したものと定義され、式(8a)として与えられる。なお、道路橋の DAF による衝撃係数は、走行実験による動的増幅率から 1 を引いた値と定義し、式(8b)で与えている。

$$DAF = 1 + \frac{y_{d,max} - y_{s,max}}{y_{s,max}} \quad (8a)$$

$$I = DAF - 1 \quad (8b)$$

ここに、DAF: 動的増幅率、 $y_{d,max}$: 最大動的たわみ、 $y_{s,max}$: 最大静的たわみ、I: 衝撃係数

(2) 走行振動荷重実験(供試体名: V)

走行振動荷重実験では、振動荷重を供試体の支点間を一往復走行させ、最大動的たわみを計測する。また、荷重の増加は一走行毎に 10kN ずつ供試体が破壊するまで増加させる。

1) 作用荷重振幅

本実験の振動荷重は、大型車両が伸縮継手を通過した後の荷重変動をモデルとする。独立行政法人土木研究所は、大型自動車伸縮継手の段差部を走行する際に発生する荷重変動および衝撃力に関する実験を行っている^{1)~3)}。タンデム式ダンブトラックの総重量は中軸で 37.73kN、後軸で 37.14kN であり、この軸重量に対して 2.77 倍~2.86 倍の荷重変動となっている。したがって、荷重振幅は、中軸の最大荷重を上限荷重、後軸の軸重量を下限荷重とすると、橋梁の両端部支点付近の荷重振幅は基準荷重に対して±45~±48%となる。また、支間中央付近では、中軸で±10%、後軸で±20%程度生じている^{2)~3)}。そこ

で、本実験の荷重振幅は、基準荷重に対して±20%、±30%とした。これは、段差 10mm~20mm の範囲の荷重振幅である。

2) 作用振動数

タンデム式のダンブトラックの荷重変動および大型車両が段差量 20mm を通過した場合のバネ下振動数は 13Hz~18Hz である。また、この車両の場合は中軸、後軸が交互に作用するものとして、橋梁の支間長を走行速度と振動数で除して、1m あたりの波長を求めた。本実験の振動数は、この 1m あたりの波長を用いて支間長と走行速度から決定した。

3) 実験衝撃係数

荷重変動が RC 床版に及ぼす動的影響は、たわみ応答による動的増幅率(DAF)から求めた実験衝撃係数で評価するものとする。したがって、走行振動荷重の場合のたわみと一定走行荷重の場合の最大静的たわみを実験から得るものとする。そこで、振動荷重による走行実験の過程で、走行一定荷重実験を行い、両者のたわみの関係から実験衝撃係数を求める。

実験衝撃係数を求める荷重は、一定荷重で走行することによる残留たわみを最小限にするために、走行一定荷重実験における引張鉄筋の荷重とひずみ関係から弾性域の 2 つの荷重値、すなわち 50kN、60kN を設定し、実験衝撃係数を得るものとする。

本実験における実験衝撃係数の算出には式(8a)、(8b)を適用する。そこで、動的増幅率から衝撃係数を算出する場合は、走行振動荷重の場合の最大たわみを最大動的たわみ($y_{d,max}$)とし、走行一定荷重の場合の最大たわみを最大静的たわみ($y_{s,max}$)とする。

6. 結果および考察

6.1 最大耐荷力

実験より得られた各供試体の最大耐荷力を表-2 に示す。同表より、鉄筋 D10 の供試体の荷重振幅±20%の場合、供試体 V20-10 は 135.5kN、鉄筋 D13 の供試体の荷重振幅±20%の場合、V20-13 は 146.8kN である。したがって、D13 を用いた場合は 1.08 倍に耐荷力が大きい。同様に、荷重振幅±30%の場合は D10 の供試体 V30-10 で 133.5kN、D13 の供試体 V30-13 で 146.5kN となり、D13 を用いた場合は 1.10 倍耐荷力が大きい。また、荷重振幅の違いによる最大耐荷力の比較を行うと、D10、D13 供試体ともに比較的近似した値となっている。したがって本研究の範囲内では、荷重振幅の大きさは耐荷力に大きな影響を及ぼさない結果となった。なお、破壊状況は各供試体ともに荷重が走行中に床版中央付近で押抜きせん断破壊となった。

6.2 RC 床版の実験衝撃係数

本実験より得られた実験衝撃係数 I を表-2 に示す。

(1) 鉄筋 D10 の RC 床版の実験衝撃係数

D10 を用いた RC 床版の荷重振幅±20%、±30%の場合の実験衝撃係数 I は、図-2 に示した軸方向の 3 点、軸直角方向の 2 点の合計 5 箇所計測を行い、各測定点で求めた実験衝撃係数を荷重振幅ごとに平均して求めた結果である。

実験衝撃係数の平均値は、荷重振幅±20%の場合に供試体 V20-10-1、2 で、それぞれ 0.380、0.382、荷重振幅±30%の場合に供試体 V30-10-1、2 で、それぞれ 0.491、0.480 である。

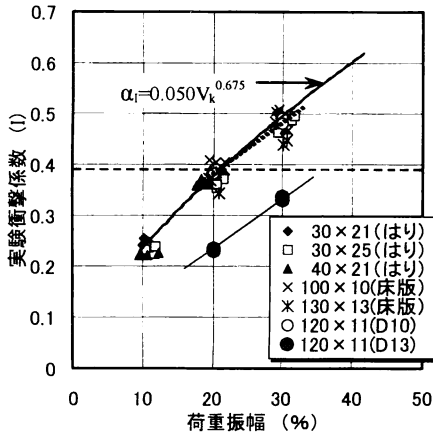


図-3 実験衝撃係数と荷重振幅の関係

いずれの場合も与えた荷重振幅率（±20%：0.200，±30%：0.300）以上の衝撃係数となっている。なお、本実験供試体は、床版支間長が2.4mとして設計し、その1/2モデルであることから、供試体の衝撃係数*i*は0.382（ $i = 20 / (50 + 2.4)$ ）である。したがって、荷重振幅が±20%の場合は道示Iに規定する衝撃係数と同程度の結果となったが、荷重振幅±30%の場合は、1.27倍の衝撃係数が生じる結果となった。

(2) 鉄筋D13のRC床版の実験衝撃係数

D13を用いたRC床版の実験衝撃係数は、荷重振幅±20%の供試体V20-13-1, 2で、それぞれ0.231, 0.235となっており、D10を用いた供試体に比してD13を用いた場合が約40%衝撃係数の低減が見られる。また、荷重振幅±30%の供試体V20-13-1, 2で、それぞれ0.336, 0.333となり、D10を用いた供試体に比してD13を用いた場合が約31%の低減が見られた。次に、これらの実験衝撃係数と道示Iに規定する衝撃係数を比較すると、荷重振幅±20%の場合は0.61となり、道示Iに規定する衝撃係数を大幅に下回る結果となった。また、荷重振幅±30%の場合の比は0.87となり、13%減少した。したがって、走行振動荷重が及ぼす動的影響による衝撃係数の増大問題は、動的影響を考慮した活荷重曲げモーメントを用いて鉄筋量を増大することによって改善されることが明らかとなった。

6.3 実験衝撃係数と荷重振幅の関係

実験衝撃係数*I_L*と荷重振幅*K_v*の関係を図-3に示す。

(1) D10のRC床版

図-3より、D10を用いた供試体の場合は、3タイプのRCはりおよび2タイプのRC床版を用いた既往の実験結果⁵⁾とほぼ近似している。文献5)に示した動的係数は式(1)として与えられているが、本供試体の場合もほぼ近似している。

(2) D13のRC床版

図-3より、D13を用いた供試体の場合の実験衝撃係数はD10供試体に比して大幅に減少している。また、道示Iに規定する衝撃係数と比較すると、荷重振幅が±35%までの荷重変動に対応できる結果となった。これは、鉄筋量を割り増しすることでたわみが抑制され、実験衝撃係数が減少したためである。したがって、荷重変動の大きい支点部付近では活荷重モーメントの割り増しを行うこと、すなわち鉄筋量を割り増しすることが衝撃係数を抑制する方法として有効であると考えられる。

なお、今回の実験では供試体の鉄筋径をD10からD13とし

表-2 RC床版の実験衝撃係数

供試体	最大荷重 (kN)	最大荷重の平均(kN)	実験衝撃係数					平均値	平均値	
			計測荷重	No.1	No.2	No.3	No.4			No.5
V20-10-1	132.3	135.5	50kN	0.357	0.401	0.386	0.362	0.383	0.380	0.381
			60kN	0.354	0.372	0.388	0.397	0.400		
V20-10-2	138.6		50kN	0.381	0.374	0.387	0.372	0.386	0.382	
			60kN	0.372	0.378	0.392	0.385	0.391		
V30-10-1	130.2	133.5	50kN	0.491	0.485	0.482	0.475	0.486	0.491	0.485
			60kN	0.517	0.480	0.502	0.481	0.508		
V30-10-2	136.7		50kN	0.473	0.463	0.500	0.468	0.461	0.480	
			60kN	0.487	0.477	0.492	0.481	0.498		
V20-13-1	149.2	146.8	50kN	0.220	0.230	0.246	0.230	0.218	0.231	0.233
			60kN	0.250	0.250	0.223	0.222	0.224		
V20-13-2	144.3		50kN	0.236	0.234	0.226	0.222	0.235	0.235	
			60kN	0.248	0.245	0.233	0.237	0.231		
V30-13-1	149.6	146.5	50kN	0.339	0.342	0.334	0.322	0.328	0.336	0.333
			60kN	0.327	0.343	0.353	0.336	0.338		
V30-13-2	143.3		50kN	0.321	0.328	0.346	0.312	0.316	0.329	
			60kN	0.347	0.329	0.335	0.332	0.328		

たことから、設計活荷重モーメントによる鉄筋の割り増し量9%に対して、鉄筋量を17%割り増した供試体による評価であるが、十分に汎用性のあるものと考えられる。

7. まとめ

本研究は、荷重振幅を関数とする衝撃係数を適用した活荷重曲げモーメントからRC床版供試体に荷重振幅±20%、±30%の走行振動荷重実験を行い、走行荷重の動的影響に対するRC床版の改善効果の検討を行い、以下の結論を得た。

- ①走行振動荷重が作用した場合の最大耐荷力は荷重振幅による差異は小さく、鉄筋径D10, D13RC床版供試体ともに比較的近似した値となっていることから、本研究の範囲内では荷重振幅は耐荷力に大きな影響を及ぼさない。
- ②道示Iに規定する衝撃係数は、鉄筋量を割り増しすることによって、荷重振幅が±35%までの荷重変動に対応できる。これは、鉄筋量を割り増しすることでたわみが抑制され、実験衝撃係数が減少したためである。
- ③動的影響係数を適用した活荷重曲げモーメントで設計したRC床版の改善効果を検証した結果、鉄筋量を割り増しすることは衝撃係数を抑制する方法として有効であるものと考えられる。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所構造研究室：橋梁設計動荷重に関する試験調査報告書(VII-1985), 土木研究所資料, No.2258, 1985
- 2) 建設省土木研究所構造研究室：橋の衝撃荷重に関する試験調査報告書(I-1987), 土木研究所資料, No.2426, 1987
- 3) 建設省土木研究所構造研究室：橋の衝撃荷重に関する試験調査報告書(I-1987), 土木研究所資料, No.2508, 1987
- 4) 日本道路橋会：道路橋示方書・同解説I, II, III, 2002.3
- 5) 阿部忠, 木田哲量, 星埜正明, 加藤清志, 徐銘謙：走行振動荷重を受けるRCはり・床版の耐力および動的影響に関する実験研究, 土木学会論文集, No.808/I-74, pp.33-45, 2006
- 6) 内田賢一, 西川和廣, 神田昌幸：輪荷重走行試験装置による道路橋床版の疲労試験, 土木学会第51回年次学術講演会, pp.998~999, 1996