

## 伸縮継手通過時の動的影響を考慮したRC床版の設計曲げモーメント

Design Bending Moment of RC Slabs in Consideration of  
Dynamic Effect Passing Expansion Joint

水口和彦\*, 阿部忠\*\*, 澤野利章\*\*, 木田哲量\*\*, 岩崎正二\*\*\*  
Kazuhiko Minakuchi, Tadashi Abe, Toshiaki Sawano, Tetsukazu Kida, and Syouji Iwasaki

\*博(工), 日本大学助教 生産工学部土木工学科(〒275-8575千葉県習志野市泉町1-2-1)  
\*\*博(工), 日本大学教授 生産工学部土木工学科(〒275-8575千葉県習志野市泉町1-2-1)  
\*\*\*工博, 岩手大学教授 社会環境工学科 (〒028-8551岩手県盛岡市上田4-3-5)

The reinforced concrete (RC) slabs of steel road bridges suffer crack damage caused by load variations when large trucks pass over the expansion joints of the slabs. To cope with this problem, the authors conducted a test on slab test specimens under running vibration loads and proposed an experimental formula for calculating the coefficient of impact as a function of load amplitude. In this study, the authors prepared RC slab test specimens based on the bending moment due to live load to which a dynamic influence coefficient as a function of load amplitude was applied, and conducted a test on the specimens under running vibration loads with a load amplitude of  $\pm 20\%$  and  $\pm 30\%$  to verify the improvement effect of RC slabs. The RC beams and slabs with increased cross-sectional area of reinforcing bars based on the bending moment were improved by approximately 39% and 35%, respectively, and the coefficients of impact were below those prescribed in the Specifications for Highway Bridges of Japan.

*Key words: RC slab, Running vibration load, Live load moment, Dynamic effect, Impact factor, Improvement Effect*

キーワード: RC床版, 走行振動荷重, 活荷重モーメント, 動的影響, 衝撃係数, 改善効果

## 1. はじめに

鋼道路橋鉄筋コンクリート床版(RC床版)のひび割れ損傷は, 伸縮継手や路面の凹凸により発生する大型自動車の動的影響も大きな原因の1つであると考えられる. とくに, 輪荷重が伸縮継手の段差部通過後の床版には大きな荷重変動が生じ, ひび割れ損傷が生じている. これらのことから筆者らは, RC床版の貫通ひび割れ間隔, すなわちはり状化を考慮したRCはりと同様RC床版の1/2モデルで製作したRC床版を用いて, 走行振動荷重が及ぼす動的影響を実験衝撃係数と定義して評価した. その結果, 軸重量(基準荷重)に対して $\pm 20\%$ 以上の荷重変動が発生した場合は, 道路橋示方書・同解説<sup>1)</sup>(以下, 道示とする)Iに規定する衝撃係数  $i$  を上回る結果となった<sup>2), 3), 4)</sup>.

一方, 鋼道路橋RC床版においては, 要求性能を明確にするために性能照査型設計法の構築が進められている. その基本性能は, 安全性, 使用性, 社会・環境への適合性の3つとしている. 安全性に対する耐荷力性能が要求されているが, 耐荷力性能に寄与すると思われる衝撃係数の取り扱いなどに関しては昭和14年に制

定され以来, 改定されていないのが現状である.

そこで本研究は, 伸縮継手通過付近の大型車両の荷重変動に対する耐荷力性能の向上を目的として, 2004年に改定された道示に基づいて, 筆者らが提案した荷重振幅を変数とした動的影響係数<sup>5), 6)</sup>を適用した設計活荷重曲げモーメント式の提案を行うものとする. また, 筆者らは実験解析によって, 荷重振幅 $\pm 21\%$ を超えた場合, 現行示方書の衝撃係数を上回るとの知見を得たことから, 輪荷重の軸重量を基準とする荷重振幅 $\pm 30\% \sim \pm 40\%$ の振動荷重を想定した場合の活荷重曲げモーメントを用いて設計し, その1/2モデルとしたRC床版供試体を用いて, 振動荷重による走行実験(以下, 走行振動荷重実験とする)を行い, たわみ応答値による動的増幅率から実験衝撃係数を評価し, 大型車両の荷重変動に対する改善効果について検証した.

## 2. 大型自動車の荷重変動および伸縮継手付近の損傷状況

## 2.1 大型自動車の荷重変動

独立行政法人土木研究所は, 大型自動車が伸縮継手

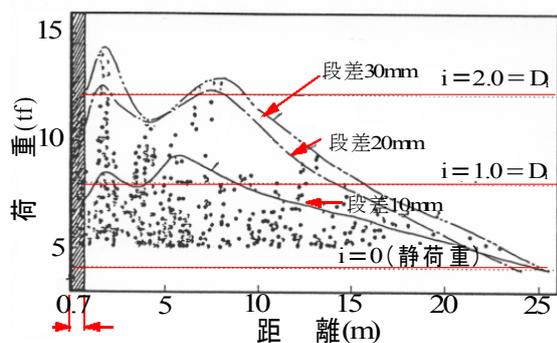
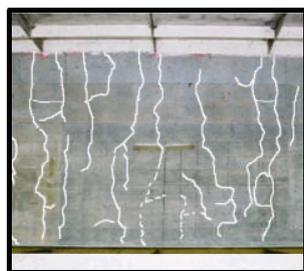
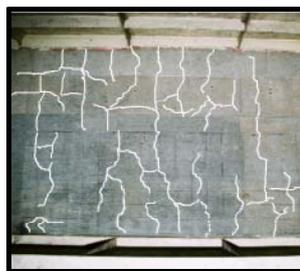


図-1 段差部通過後の荷重分布および包絡線<sup>3)</sup>

手直前の道路路面に生じる凹凸、供用後に生じる上部工と下部工の相対変位、施工時に生じた施工誤差などにより生じる伸縮継手部の段差通過後に発生する荷重変動と衝撃力に関する実験を行い、その荷重分布と包絡線の関係について図-1のように報告している<sup>3)</sup>。なお、図中左端の斜線部は段差版(70cm)を示したものであり、実験に用いた車両は、総重量205.8kNのタンデム式ダンプトラック(三軸)で、荷重分担は中軸左動質量(以下、軸重量と称す)が37.73kN、後軸左動質量が37.14kNである。これによると、軸重量に対して伸縮継手の段差20mmの場合は約117kN、30mmの場合は132kNの荷重が発生している。また、段差部から2.0m、8.0mの付近で荷重ピークがみられ、段差量20mmの場合の動的係数  $D_i=1.0$  をみると、動的係数が1.0以下、すなわち軸重量程度に減衰される位置は段差部から14m付近にまで及んでいる。また、動的係数*i*は



1)伸縮継手通過付近



2)伸縮継手出口付近

(1)RC床版下面の損傷



1) 伸縮継手通過付近



2) 伸縮継手出口付近<sup>7)</sup>

(2)RC床版上面の損傷

写真-1 伸縮継手通過および手前付近の損傷状況

道示 I に規定する衝撃係数と同記号であることから、動的係数(=最大荷重/軸重量-1)を  $D_i$  として加筆した。

したがって、実橋の伸縮継手を大型自動車が通過するときには、その近傍の床版には大きな荷重変動が生じることになる。

## 2.2 伸縮継手付近の損傷状況

伸縮継手付近のRC床版のひび割れ損傷状態の一例を写真-1に示す。写真-1(1)は、伸縮継手を通過した付近および出口付近のRC床版下面の損傷状況である。写真-1(1), 1)は、伸縮継手通過付近のひび割れ損傷であり、車両が伸縮継手部を通過する時の荷重変動の影響が最も大きい位置に発生し、そのひび割れ間隔は15cm~30cm程度である。写真-1(1), 2)は、出口側の伸縮継手付近であり、伸縮継手通過付近と同等のひび割れが生じ、その間隔も入り口付近同様に15cm~30cm程度で、支持主桁のフランジ位置まで発生している。伸縮継手出口付近のひび割れ損傷は鋼上げたのたわみが支点上では0mmとなることから車両のバネ特性により衝撃荷重が大きくなり損傷したものと考えられる。

次に、写真-1(2)は、塩害・凍害を受けた伸縮継手付近のRC床版上面の損傷状況である。写真-1(2), 1)は伸縮継手の通過付近でありコンクリートは砂利化し、鉄筋が露出している。写真-1(2), 2)は橋梁の出口付近であり、長期に渡り塩害・凍害を受けたことによりほぼ陥没状態となっている<sup>7)</sup>。これらのRC床版は既に撤去されている。これらの損傷状況に見られる多くのRC床版は伸縮装置の段差により大きな荷重変動を受け、ひび割れ損傷に至っている。そこで、筆者ら<sup>5)</sup>は、貫通ひび割れを想定したRCはりおよび実橋RC床版の1/2モデルとしたRC床版を用いて、大型車両が段差量20mmを走行した場合に発生する荷重変動を考慮した輪荷重による走行振動荷重実験を行い、実験衝撃係数を評価した。その結果、荷重振幅±30%の場合は、道示の規定する衝撃係数の1.27倍が生じた。したがって、伸縮継手付近から10m付近までのRC床版の設計曲げモーメントには、伸縮継手通過による大型車両の荷重変動に対する衝撃係数を考慮する必要がある。

## 3. RC床版の活荷重モーメントの解析<sup>8), 9)</sup>

### 3.1 等方性版のたわみ

RC床版の活荷重モーメントの解析は、道示 I に規定される活荷重を適用して、単純版の活荷重曲げモーメントとして算出する。単純版の一般解は、輪荷重をFourier級数展開し、それぞれの境界条件を考慮した等方性版のたわみに関する4次のつり合い偏微分方程式は式(1)として与えられている。

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p(x, y)}{B} \quad (1)$$

ここに、 $w$ ：たわみ、 $p(x, y)$ ：輪荷重強度、 $B$ ：版の曲げ剛度（ $=Et^3/12(1-\mu^2)$ ）、 $E$ ：ヤング率、 $t$ ：版厚、 $\mu$ ：ポアソン比

### 3.2 単純版の $x, y$ 方向に垂直な単位幅あたりの支間曲げモーメント： $M_{Lx}, M_{Ly}$

RC床版の設計活荷重曲げモーメント式は、相対する2辺で支持された等方性無限単純版を対象とした偏微分方程式（式(1)）に三角級数を用いて解析し、支間中央の曲げモーメントを求めたものである。床版の境界条件を考慮した、式(1)の解の $w=w(x, y)$ が得られるならば、 $w$ を微分すると床版の $x, y$ 方向に垂直な単位幅断面の曲げモーメントは式(2.1)、(2.2)として与えられる。

$$M_x = -B \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) \quad (2.1)$$

$$M_y = -B \left( \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \mu \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) \quad (2.2)$$

ここに、 $w$ ：たわみ、 $B$ ：版の曲げ剛度（ $=Et^3/12(1-\mu^2)$ ）、 $E$ ：ヤング率、 $t$ ：版厚、 $\mu$ ：ポアソン比

道示 I に規定する大型車両の活荷重（T荷重）は、輪荷重の接地面（50cm×20cm）から、アスファルト舗装厚（5.0cm）も含めた床版全厚の1/2の面まで45°の角度で分布すると仮定する。また、床版の設計支間と最小床版厚の関係は、輪荷重の載荷面に対する荷重強度が床版全厚の関数となることから、式(2.1)、(2.2)における床版厚 $t$ は道示で規定されているRC床版の車道部分の最小全厚とする。本研究では、床版の支間方向が車両進行方向に直角な場合の単純版の最小厚（ $t=40L+110$ 、 $L$ ：T荷重に対する床版の支間(m)）とする。

次に、RC床版の活荷重曲げモーメントの解析において、床版の着目点における設計活荷重曲げモーメントは、床版上に輪荷重（T荷重100kN）を載荷し、曲げモーメントが最大となるように、幅員方向には台数に制限なく載荷した。これらの条件により、支間中央の $x, y$ 方向に垂直な単位幅あたりの曲げモーメントを支間2.0mから50cmごとに支間6.0mまで解析し、その結果を図-2に示す。なお、本解析では道示 III における曲げモーメントの割増係数の適用支間が6mであることや新材料・構造の開発、橋梁部材の構造形式の合理化、例えば少数主桁構造に伴う長支間化を考慮し支間6.0mまでを解析範囲とした。図-2に示した $M_x, M_y$

（図中△）は支間中央の $x, y$ 方向に垂直な単位幅あたりの曲げモーメントであり、 $M_{x(1+i)}, M_{y(1+i)}$ （図中▲）

は道示 I に規定する衝撃係数 $i$ （ $=20/(50+L)$ 、 $L$ ：設計支間）を含む活荷重曲げモーメントである。これを支間 $L$ を関数とした線形近似式として、衝撃係数 $i$ を含まない場合を式(3.1)、(3.2)、衝撃係数 $i$ を含む場合は式(4.1)、(4.2)として与えられる。

#### (1) 解析式

・衝撃係数 $i$ を含まない場合

$$M_x = (0.078L + 0.045)P \quad (3.1)$$

$$M_y = (0.069L + 0.017)P \quad (3.2)$$

・衝撃係数 $i$ を含む場合

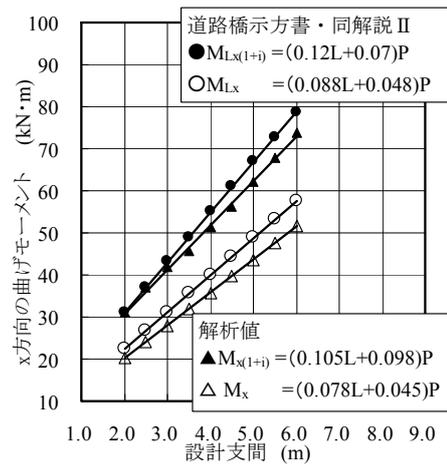
$$M_{x(1+i)} = (0.105L + 0.098)P \quad (4.1)$$

$$M_{y(1+i)} = (0.092L + 0.031)P \quad (4.2)$$

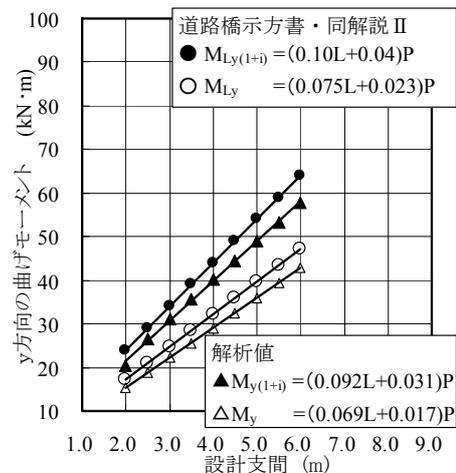
ここで、 $P$ ：T荷重の片側荷重(kN)（ $=100$ kN）、 $L$ ：床版支間（m）

#### (2) 道示 II

道示 II の規定に基づいて算出した衝撃係数 $i$ を含む活荷重曲げモーメント（図中●）を図-2に示す。RC床版の $x, y$ 方向の衝撃係数 $i$ を含む活荷重曲げモーメン



(1) x方向



(2) y方向

図-2 解析値と道示 II の規定による活荷重曲げモーメント

ト ( $M_{Lx(i+i)}$ ), ( $M_{Ly(i+i)}$ ) は, 式(5.1), (5.2)として与えられている. なお, 曲げモーメントの割増係数は道示 II, IIIの規定に準じて適用する.

$$M_{Lx(i+i)} = (0.12L + 0.07)P \quad (5.1)$$

$$M_{Ly(i+i)} = (0.10L + 0.04)P \quad (5.2)$$

ここで, P: T荷重の片側荷重(kN) (=100kN), L:床版支間 (m)

本解析値における衝撃係数を含む活荷重曲げモーメントの線形近似式(4.1), (4.2)と道示 II に規定されている衝撃係数を含む活荷重曲げモーメント式(5.1), (5.2)の結果とを比較すると, 道示 II の場合が11~17%程度上回っている. これは, 理論式や施工時の誤差などに対する安全性を考慮しているからである. そこで, 本提案式においては, 施工時の安全性を考慮している道示 II に規定する衝撃係数*i*を含む活荷重曲げモーメント式(5.1), (5.2)を基に, 衝撃係数*i*を除いた活荷重曲げモーメント $M_L$  (図-2中の○)を各支間長ごとに計算して, 支間長Lを関数とした線形近似式を得る. この活荷重曲げモーメントに対して活荷重Pが伸縮継手を通過するとき発生する振動荷重の影響を考慮して, 筆者の提案する動的影響係数 $\alpha$ を適用して割り出したものを活荷重曲げモーメントとする. よって, 道示 I に規定する衝撃係数*i*を除いた床版の支間方向が車両進行方向に直角な場合のx, y方向の活荷重曲げモーメント ( $M_{Lx}$ ), ( $M_{Ly}$ )は, 式(6.1), (6.2)として与えられる.

$$M_{Lx} = (0.088L + 0.048)P \quad (6.1)$$

$$M_{Ly} = (0.074L + 0.023)P \quad (6.2)$$

ここで,  $M_{Lx}$ : x方向に垂直な単位幅あたりの活荷重曲げモーメント(kN・m/m),  $M_{Ly}$ : y方向に垂直な単位幅あたりの活荷重曲げモーメント(kN・m/m), L:設計支間(m), P: T荷重の片側荷重(kN) (=100kN)

### 3.3 動的影響係数を考慮した単純版の活荷重曲げモーメント

伸縮継手の段差によって発生する荷重変動の影響は次のように考慮した. すなわち, 荷重振幅 $K_v$ が基準荷重振幅 $K_i$ 以下の場合には道示 I に規定する衝撃係数*i*を適用し, 荷重振幅 $K_v$ が基準荷重振幅 $K_i$ 以上となった場合は, 筆者らが提案した動的影響係数 $\alpha$ を適用する. したがって, 動的影響係数 $\alpha$ を適用した単純版の活荷重 $P_{L(i+\alpha)}$  は, 式(7)として与えられている<sup>5)</sup>.

$$P_{L(i+\alpha)} = P(1+\alpha) \quad (7)$$

ただし,

$$K_v \leq K_i; \alpha = i$$

$$K_i < K_v; \alpha = 0.050K_v^{0.675}$$

$$K_i = -0.20L + 20.8$$

$$i = 20 / (50 + L)$$

ここに,  $P_{L(i+\alpha)}$ : RC床版の動的影響係数を含む設計荷重(kN), P: 設計活荷重(=100kN),  $\alpha$ : 動的影響係数,

$K_v$ : 荷重振幅 ( $\pm 30\%$ ,  $\pm 40\%$ ),  $K_i$ : 基準荷重振幅, L: 床版設計支間,  $i$ : 道示 I に規定する衝撃係数

動的影響係数 $\alpha$ を適用した場合の曲げモーメントは式(6.1), (6.2)に式(7)より得た活荷重 $P_{L(i+\alpha)}$ を適用することとする. よって, x, y方向の活荷重曲げモーメント( $M'_{x(i+i)}$ ), ( $M'_{L(i+i)}$ )は, 式(7.1), (7.2)として与えられる.

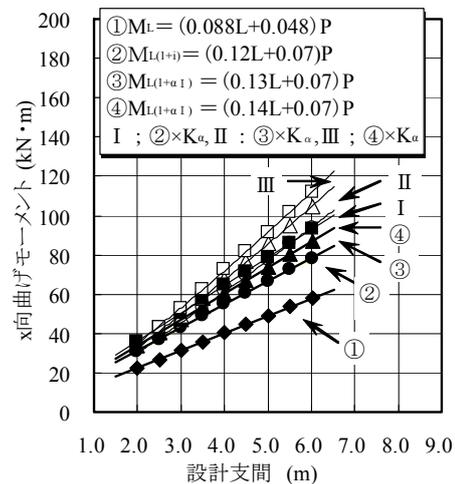
$$M'_{x(i+i)} = (0.088L + 0.048)P_{L(i+\alpha)} \quad (7.1)$$

$$M'_{L(i+i)} = (0.075L + 0.023)P_{L(i+\alpha)} \quad (7.2)$$

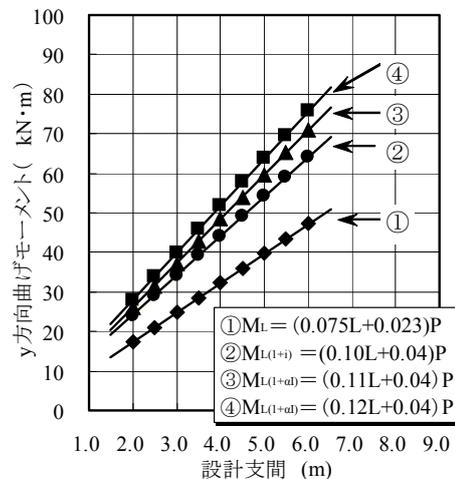
ここに, L: 設計支間,  $P_{L(i+\alpha)}$ : 動的影響係数を含む活荷重 (式(7))

### 3.4 支間方向が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: $M_{L(i+\alpha)}$ (kN・m/m)

支間方向が車両進行方向に直角な場合の単位幅当たりのx方向およびy方向の活荷重曲げモーメントの解析結果を図-3に示す. 図-3の①は式(5.1), (5.2)より



(1) x方向



(2) y方向

図-3 動的影響を適用した活荷重モーメント

算出し、②は道示Ⅱ、Ⅲに規定する式(6.1)、(6.2)より算出した結果である。また、③は振動荷重±30%を考慮し、④は振動荷重±40%を考慮した場合の活荷重曲げモーメントをプロットしたものである。なお、図中Ⅰは②、Ⅱは③、Ⅲは④に、それぞれ道示Ⅱ、Ⅲに規定する床版支間に対する軸直角方向の曲げモーメントの割増係数を乗じた結果である。よって、③、④の結果より支間2.0mから6.0mまでの支間中央の活荷重モーメントを支間Lを関数とした線形近似式とした、x方向（以下、主鉄筋方向とする）およびy方向（以下、配力筋方向とする）の活荷重曲げモーメント ( $M_{L(i+y)}$ ) は、式(8.1)、(8.2)として与えられる。

$$\left. \begin{aligned} &1) \text{単純版の主鉄筋方向の曲げモーメント (kN}\cdot\text{m)} \\ &\quad K_v \leq \pm 20\% ; M_{L(i+y)} = (0.12L + 0.07)P \\ &\quad \pm 20\% < K_v \leq \pm 30\% ; M_{L(i+y)} = (0.13L + 0.07)P \\ &\quad \pm 30\% < K_v \leq \pm 40\% ; M_{L(i+y)} = (0.14L + 0.07)P \end{aligned} \right\} (8.1)$$

$$\left. \begin{aligned} &2) \text{単純版の配力筋方向の曲げモーメント (kN}\cdot\text{m)} \\ &\quad K_v \leq \pm 20\% ; M_{L(i+y)} = (0.10L + 0.04)P \\ &\quad \pm 20\% < K_v \leq \pm 30\% ; M_{L(i+y)} = (0.11L + 0.04)P \\ &\quad \pm 30\% < K_v \leq \pm 40\% ; M_{L(i+y)} = (0.12L + 0.04)P \end{aligned} \right\} (8.2)$$

よって、伸縮継手通過付近から大型車両のバネ下振動が減衰される付近までのRC床版の設計には、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を適用する必要がある。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、荷重振幅±20%では道示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。したがって、荷重振幅±20%以下の場合には動的影響係数を考慮する必要はない。荷重振幅±30%、±40%を許容した場合は、動的影響係数が道示に規定する衝撃係数*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から算出する必要がある。この場合、動的影響を適用した活荷重曲げモーメント式から算出すると、道示Ⅱに規定される活荷重曲げモーメント式より算出した値に比して、荷重振幅±30%で9.0%、±40%で17%上回る結果となった。また、床版の支間方向が車両進行方向に平行な場合も支間方向が車両進行方向に直角な場合と同様の結果となった。

#### 4. 動的影響を考慮したRC床版の実験衝撃係数

##### 4.1 RC床版および改善RC床版の供試体概要

伸縮装置付近の床版は、床版の連続性がたたれることや路面の不陸により、けた端部の床版には大きな衝撃力が作用することから道示Ⅱでは、けた端部の床版について規定されている。例えば、床版を端床げた等で支持しない場合はけた端部から床版支間の1/2の間の床版部は、T荷重（衝撃を含む）による設計曲げモー

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 <sup>2</sup>	鉄筋 (SD295A)		
		降伏強度 N/mm <sup>2</sup>	引張強度 N/mm <sup>2</sup>	ヤング係数 kN/mm <sup>2</sup>
S-D10	30.0	346	511	200
S-D13	27.0	368	516	200

メント値の2倍としている。また、けた端部以外の中間支間の床版は必要鉄筋量の2倍の鉄筋を配置し、けた端部の車道部分の床版は、床版厚さをハンチ高だけ増している。しかし、図-1に示した段差部通過後の荷重分布では支点から10m前後に大きな荷重が作用している。そこで、この区間の床版設計には本提案する動的影響係数を考慮した活荷重モーメントを考慮するものとする。したがって、本実験に用いる供試体は、道示Ⅱの規定による活荷重モーメント、すなわち式(8.1)、(8.2)における $K_v \leq \pm 20\%$ の活荷重曲げモーメントから設計し、RC床版供試体を1/2モデルとした供試体S-D10を製作した。次に、荷重振幅±30%～±40%を考慮した式(8.1)、(8.2)における $\pm 30\% < K_v \leq \pm 40\%$ の活荷重曲げモーメントで設計し、改善RC床版供試体をその1/2モデルとしたRC供試体S-D13を製作した。以下、改善RC床版供試体とする。両供試体を用いて走行振動荷重実験を行い、たわみ応答による動的増幅率から実験衝撃係数を評価し、衝撃係数を適用したRC床版の設計曲げモーメントによる改善効果を評価する。

##### 4.2 RC床版の使用材料

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、RC床版供試体の鉄筋はSD295A、D10を用いた。次に、走行振動荷重による荷重振幅±30%～±40%を考慮した改善RC床版供試体の鉄筋はSD295A、D13を使用した。本供試体に使用した材料特性値を表-1に示す。

##### 4.3 供試体寸法および鉄筋の配置

RC床版は、複鉄筋配置の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であることから、道示Ⅱ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1/2とした。供試体寸法および鉄筋の配置を図-4に示す。

RC床版供試体S-D10の寸法は、支間長を120cm、張り出し部を13.5cmとした全長が147cmである。床版の全厚は11.0cmである。鉄筋は複鉄筋配置とし、引張側の主鉄筋は10cm間隔で配置し、有効高さは9.0cmとした。また、配力筋は12cm間隔で配置し、有効高さは8.0cmとした。また、圧縮側の鉄筋は軸直角方向および軸方向ともに引張鉄筋配置量の1/2とし、軸直角方向は

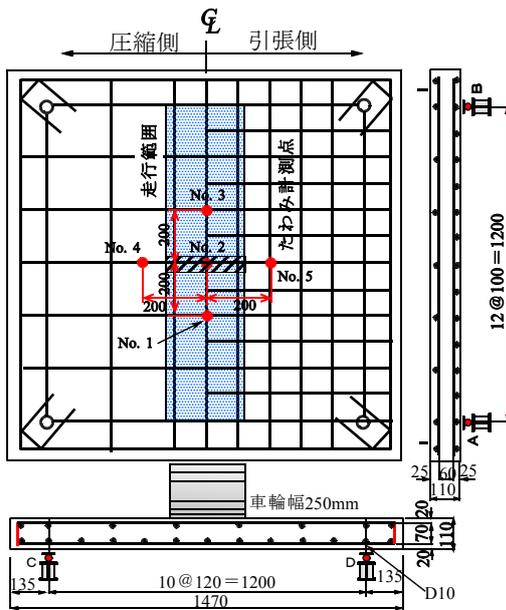


図-4 RC床版供試体寸法および鉄筋の配置

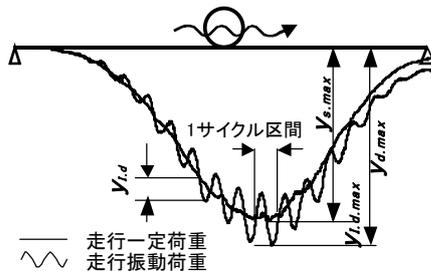


図-5 動的増幅率(DAF)

20.0cm, 軸方向は24.0cm間隔で配置した。

次に、改善RC床版供試体S-D13の寸法は、基本的に供試体S-D10と同様であるが、鉄筋にD13を用いた。主鉄筋の配置間隔は10cm間隔、配力筋は12cm間隔とし、有効高さはそれぞれ9.0cmと8.4cm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。

#### 4.4 実験衝撃係数の算定法

実験衝撃係数を検討する場合は、応力あるいは曲げモーメント応答を基にした動的増幅率で評価すべきである。しかし、RC床版のように走行振動荷重を直接受ける場合は、ひび割れの発生によりコンクリートおよび主鉄筋の引張ひずみが非線形的に増加するので、適切な衝撃係数とはならない場合が考えられる。また、応力測定のためにひずみゲージを橋梁部材に貼り付けることは困難であることも多いため、動的増幅率は変位計を用いて測定したたわみ応答に基づいて算出する場合が多い<sup>10)</sup>。そこで、本実験では、たわみ応答値による動的増幅率DAF (Dynamic Amplification Factor) から実験衝撃係数を評価するものとする。な

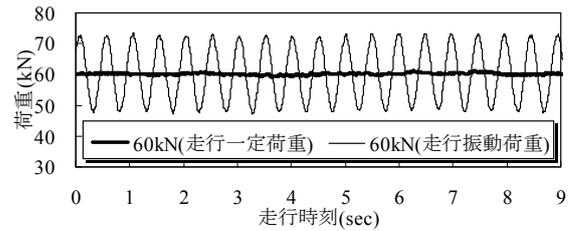


図-6 走行一定荷重および走行振動荷重の一例

お、単純桁に走行荷重が作用した場合の支間中央における動的増幅率を図-5に示す。動的増幅率は、図-5に示す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し、式(9.1)で与えられる。なお、道路橋RC床版のDAFによる実験衝撃係数は、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(9.2)として与える。

$$DAF = 1 + \frac{y_{d,max} - y_{s,max}}{y_{s,max}} \quad (9.1)$$

$$I = DAF - 1 \quad (9.2)$$

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：実験衝撃係数

#### 4.5 走行振動荷重実験方法<sup>5)</sup>

走行振動荷重実験は、荷重変動を想定した荷重、すなわち振動荷重が供試体の支点間を一往復を走行させるものである。荷重は一往復走行ごとに10kNづつ増加させる段階荷重載荷とし、供試体が破壊するまで荷重の増加と走行を繰り返す。なお、道示Iに規定する衝撃係数は、床版の支間方向と走行方向が直角な場合と平行な場合ともに同一な式 ( $i = 20 / (50 + L)$ ) を適用している。そこで、本実験におけるRC床版は、図-4に示す供試体の上面を軸方向に走行させるものとする。

##### (1) 作用荷重振幅

本実験の振動荷重は、基準荷重に対して±20%、±30%の荷重振幅とした<sup>5)</sup>。これは、図-1に示した動的係数が $D_d = 1.0 \sim 2.0$ の範囲の段差量10mm～20mmに相当する。本実験のRC床版における一往復の走行一定荷重および走行振動荷重の一例を図-6に示す。

##### (2) 作用振動数

独立行政法人土木研究所では、タンデム式ダンプロック(三軸)が伸縮継手段差部を通過した際の車両のバネ下振動数に関する実験を行い、段差量20mmを通過した場合の車両バネ下振動数は13Hz～18Hzであると報告している<sup>2)</sup>。これより、タンデム式の場合は中軸、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。実験供試体の振動数は、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。本実験では、1往復2.4mを9secで走行し、振動数は2.0Hzとした。なお、両試験体とも片振り荷重とする。本実験における走行振動荷重および一定な荷重で走行した場合の荷重（以下、走行一定荷重とする）と走行時刻の関係を図-6に示す。

実験衝撃係数は、走行振動荷重が作用した場合のたわみ応答による動的増幅率(DAF)による式(9.1), (9.2)より評価するものとする。よって、実験より走行振動荷重実験における最大動的たわみ( $y_{d,max}$ )と走行振動荷重実験の過程で走行一定荷重による最大静的たわみ( $y_{s,max}$ )を計測し、両者のたわみの関係から実験衝撃係数を求める。また、走行振動荷重実験による段階荷重載荷の過程で実験衝撃係数を評価する荷重は、道示Iに規定する活荷重(100kN)に衝撃係数*i*を含む設計荷重とするが、本実験装置の輪荷重幅(25cm)が道示Iに規定するT荷重幅(50cm)の1/2であることから道示Iに示す活荷重の1/2付近(=100×0.380/2=69kN)である荷重60kNと70kNとする。

## 5. 結果および考察

### 5.1 実験耐荷力および破壊モード

本実験で得られたRC床版の耐荷力を表-2に示す。

本実験における最大耐荷力とは、走行振動荷重実験における載荷条件下で、1往復走行を維持した最大荷重とする。また、走行振動荷重実験は基準荷重に対して±20%と±30%の振動荷重を正弦波形で走行することから基準荷重を軸重量*P*とし、上限荷重*P<sub>u</sub>*を最大耐荷力として表-2に示した。

RC床版の走行振動荷重±20%の場合の供試体S-D10-V20の最大耐荷力の平均は135.5kNであり、走行振動荷重±30%の場合の供試体S-D10-V30の最大耐荷力の平均は133.5kNである。走行振動荷重±30%の場合の耐荷力がやや下回っているもののほぼ近似した値となっている。

次に、改善RC床版供試体における走行振動荷重±20%の場合の供試体S-D13-V20の最大耐荷力の平均は149.8kNであり、また、走行振動荷重±30%の場合の供試体S-D13-V30の最大耐荷力の平均は146.5kNである。

表-2 実験耐荷力および破壊モード

供試体	最大耐荷力(kN)			最大耐力の平均	破壊モード
	上限荷重 <i>P<sub>u</sub></i>	軸重量 <i>P</i>	下限荷重 <i>P<sub>l</sub></i>		
S-D10-V20-1	132.3	110.3	88.2	135.5	押抜きせん断破壊
S-D10-V20-2	138.6	115.5	92.4		
S-D10-V30-1	130.2	100.2	70.1	133.5	押抜きせん断破壊
S-D10-V30-2	136.7	105.2	73.6		
S-D13-V20-1	149.2	124.3	99.5	149.8	押抜きせん断破壊
S-D13-V20-2	150.3	125.3	100.2		
S-D13-V30-1	149.6	115.1	80.6	146.5	押抜きせん断破壊
S-D13-V30-2	143.3	110.2	77.2		

S-:床版、D10-、D13-:鉄筋D10、D13、V20-、V30-:荷重振幅20%、30%、1、2:供試体番号

最大耐荷力は走行振動荷重±30%の場合がやや低下するもののほぼ近似している。D10を用いたRC床版供試体とD13を用いた改善RC床版供試体との耐荷力を比較すると、D13を用いた供試体の方が約1.1倍となったが、鉄筋量に比して大幅な耐荷力の向上はみられない。これは、RC床版の場合の破壊モードは押抜きせん断破壊であり、押抜きせん断耐荷力はコンクリートの圧縮強度の影響が顕著となることから鉄筋配置による剛性の向上のみが図られる結果となった。

破壊モードは全供試体ともに輪荷重が走行中に押抜きせん断破壊となった。破壊モードを表-2に併記した。

### 5.2 RC床版および改善RC床版の実験衝撃係数

実験衝撃係数は、図-4に示すように軸方向に3箇所、軸直角方向に2箇所の合計5箇所計測し、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。本実験より得られたRC床版の実験衝撃係数を表-3に示す。また、実験衝撃係数を評価する荷重は、走行開始から終了までを動的に計測した荷重波形から、上限荷重*P<sub>u</sub>*および下限荷重*P<sub>l</sub>*を得て、その中間の荷重を軸重量*P*(基準荷重)とし、基準荷重に対する荷重振幅の計算値( $(P_u/P-1) \times 100$ )を表-3に示した。

#### (1) RC床版の実験衝撃係数

RC床版の実験衝撃係数の平均値は、荷重振幅±20%の供試体S-D10-V20-1, 2で、それぞれ0.380, 0.382, ±30%の供試体S-D10-V30-1, 2で、それぞれ0.491, 0.480である。いずれの場合も与えた荷重振幅(±20%:0.200, ±30%:0.300)以上の実験衝撃係数となっている。なお、本実験供試体は、床版支間長は2.4mで設計し、その1/2モデルとしたことから、供試体の衝撃係数*i*は0.382(=20/(50+2.4))である。そこで、道示Iに規定する衝撃係数と本実験より得た実験衝撃係数を比較すると、荷重振幅が±20%の場合の供試体は道示Iに規定する衝撃係数と同程度の結果となった。また、荷重振幅±30%の場合には、道示の規定する衝撃係数の1.27倍となった。

#### (2) 改善RC床版の実験衝撃係数

改善RC床版の実験衝撃係数の平均は、荷重振幅±20%の供試体S-D13-V20-1, 2で、それぞれ0.231, 0.235となった。よって、D10を用いたRC床版供試体との比較行くと、本提案式を用いて活荷重モーメントを算出し設計した改善RC床版供試体は、約39%衝撃係数が低減している。また、荷重振幅±30%の場合には供試体S-D13-V30-1, 2で、それぞれ0.336, 0.329となり、D10を用いた供試体に比して改善RC床版供試体は約31%の低減が見られた。ここで、実験衝撃係数と道示Iの規定より算出した衝撃係数*i*=0.382(=20/(50+2.4))を比較すると、荷重振幅±20%の場合には0.61となり、道

表-3 RC床版の実験衝撃係

供試体	計測荷重			$(P_U/P-1) \times 100$ (%)	実験衝撃係数:I					平均値	平均値	
	$P_U$	P	$P_L$		1	2	3	4	5			
S-D10-V20-1	72.3	60.1	47.8	20.4	0.357	0.401	0.386	0.362	0.383	0.380	0.381	
	83.4	69.7	56.0	19.6	0.354	0.372	0.388	0.397	0.400			
S-D10-V20-2	71.8	60.1	48.5	19.4	0.381	0.374	0.387	0.372	0.386	0.382		
	86.7	71.8	56.8	20.8	0.372	0.378	0.392	0.385	0.391			
S-D10-V30-1	77.0	59.7	42.4	29.0	0.491	0.485	0.482	0.475	0.486	0.491		0.485
	92.1	70.7	49.4	30.2	0.517	0.480	0.502	0.481	0.508			
S-D10-V30-2	78.5	60.2	41.8	30.6	0.473	0.463	0.500	0.468	0.461	0.480		
	91.0	69.8	48.7	30.3	0.487	0.477	0.492	0.481	0.498			
S-D13-V20-1	72.4	60.2	48.2	20.3	0.220	0.230	0.246	0.230	0.218	0.231	0.233	
	84.8	70.5	56.2	20.3	0.250	0.250	0.223	0.222	0.224			
S-D13-V20-2	71.6	59.7	47.8	20.0	0.236	0.234	0.226	0.222	0.235	0.235		
	84.3	70.3	56.3	19.9	0.248	0.245	0.233	0.237	0.231			
S-D13-V30-1	78.4	60.1	41.8	30.5	0.339	0.342	0.334	0.322	0.328	0.336		0.333
	93.6	71.8	50.0	30.5	0.327	0.343	0.353	0.336	0.338			
S-D13-V30-2	78.6	60.3	42.0	30.3	0.321	0.328	0.346	0.312	0.316	0.329		
	91.9	69.9	47.9	31.5	0.347	0.329	0.335	0.332	0.328			

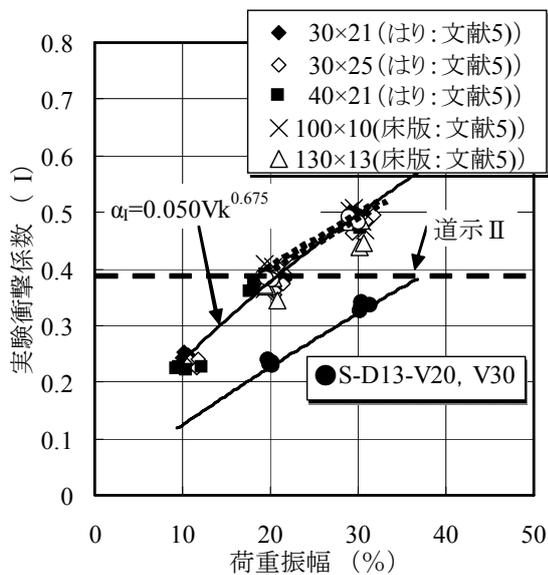


図-7 実験衝撃係数Iと荷重振幅の関係

示 I に規定される衝撃係数を大幅に下回る結果となった。同様に荷重振幅±30%の場合は0.87となり、13%減少した。したがって、走行振動荷重の影響による衝撃係数の増大は、動的影響係数を考慮した活荷重曲げモーメントに対し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。これらのことから伸縮継ぎ手通過付近の床版設計は、本提案の動的影響係数を考慮した設計活荷重曲げモーメントを用いることによって、改善効果が得られたものと判断できる。

### 5.3 実験衝撃係数と荷重振幅の関係

本実験より得られた表-3に示す実験衝撃係数Iと筆者らの既往の研究（以下、文献5）における実験衝撃係数と荷重振幅との関係を図-7に示す。

道示 II の規定に基づいて設計したRC床版の実験衝撃係数は、文献5)に示すRC床版の貫通ひび割れ幅を考慮したRCはりおよび道示 II における大型車両の1日1方向の計画交通量が2000台以上とした場合のRC床版の実験

衝撃係数とはほぼ近似している。改善RC床版の実験衝撃係数は大幅に減少している。文献5)に示す改善前の供試体と本実験による改善後の供試体を比較すると振動荷重±20%、±30%で、それぞれ38%、36%の改善が図られた。いずれも道示 I に規定する衝撃係数を下回る結果となった。これは、鉄筋量を割増しすることたわみが抑制され、動的増幅率が減少したためである。

よって、荷重変動の大きい支点部付近のRC床版の設計には、動的影響を考慮した活荷重曲げモーメントで行うこととして、鉄筋量を割増しすることとする。なお、道示 II におけるけた端部の床版は床版厚の割増しおよび鉄筋量の割増しが規定されているが、これは図-1に示す伸縮継手通過付近（桁端部から床版支間の1/2の間）の荷重変動に対応したものであり、その後の大きな荷重変動が生じる8m~10m付近は考慮されていない。そのために、本実験による動的影響係数を考慮した活荷重曲げモーメントの適用は、図-1に示す支点から8.0m付近を考慮するものである。

## 6. 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を基にRC床版供試体を製作し、これに荷重振幅±20%、±30%の走行振動荷重実験を行い、動的影響に対するRC床版の改善効果についての検討を行い、以下の結論を得た。

①大型車両が伸縮継ぎ手を通ることによって発生する荷重変動に対する動的影響を考慮した設計活荷重曲げモーメント式を提案した。提案式(8.1)、(8.2)における荷重振幅±20%以下 ( $K_r \leq \pm 20\%$ ) の場合は現行示方書に規定する式であり、段差量20mm程度 ( $\pm 20\% < K_r \leq \pm 30\%$ ,  $\pm 30\% < K_r \leq \pm 40\%$ ) を許容した場合について提案した。したがって、伸縮継ぎ手の維持管理における段差量の許容値を設定し、本提案式を適用することによってRC床版の高機能化を図ることが可

能である。

②鉄筋にD10を用いたRC床版とD13を用いた改善RC床版の押抜きせん断耐荷力を比較するとD13を用いた場合、約10%程度の耐荷力の向上がみられた。これは、押抜きせん断耐荷力はコンクリートの圧縮強度が支配的であり、動的影響係数を考慮した活荷重曲げモーメントに対しての鉄筋量の割増しは耐荷力の大幅な向上には繋がらないためである。

③鉄筋にD10を用いたRC床版とD13を用いた改善RC床版供試体の実験衝撃係数を比較すると、改善供試体は振動荷重±20%で39%、±30%で31%減少している。したがって、鉄筋量を割増しすることで衝撃係数は大幅に改善された。

④動的影響係数を適用した活荷重曲げモーメントを用いて設計されたRC床版の改善効果を検証した結果、鉄筋量を割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) 日本道路橋会：道路橋示方書・同解説Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ，2002.
- 2) 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(VIII-1985)，土木研究所資料，No.2258，1985.
- 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) 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.
- 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) 阿部忠，木田哲量，澤野利章，星埜正明，加藤清志：走行荷重および変動荷重を受けるRCはりの耐荷力と動的影響，構造工学論文集，Vol.47A，pp.313-320，2001.
- 7) 三田村浩，佐藤京，本田幸一，松井繁之：道路橋RC床版上面の凍害劣化と疲労寿命への影響，構造工学論文集Vol.55A，pp.1420-1431，2009.
- 8) 中井博，北田俊行：鋼橋設計の基礎，共立出版，pp.85-94，1992.
- 9) 半谷裕彦：平板の基礎理論，彰国社版，pp.9-20，1995.
- 10) 川谷充郎，小松定夫，佐々木孝：走行自動車荷重を受けるプレートガーター橋の動的応答に関する研究，土木学会論文集，No.392/I-9，pp.351-358，1988.

(2009年9月24日受付)