

# 変動荷重を受ける道路橋 RC 部材の動的影響に関する実験研究

日大生産工(P.D)水口 和彦 日大生産工 木田 哲量 阿部 忠 澤野 利章

## 1. はじめに

鋼道路橋 RC 床版のひび割れ損傷は、大型自動車の繰り返し走行が主要因であると考えられているが、伸縮継手や路面の凹凸により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一つであると考えられる。これらのことから筆者らは、伸縮継手の段差によって発生する荷重変動<sup>1)~3)</sup>に着目し、走行振動荷重が RC 床版に及ぼす影響を RC 床版の貫通ひび割れ間隔を想定した RC はりと単鉄筋配置・複鉄筋配置した RC 床版を用いたモデル実験を行い、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。これによると、軸重量(基準荷重)に対して±20%以上の荷重変動が発生した場合には、道路橋示方書・同解説(以下、現行示方書とする。)I<sup>4)</sup>に規定する衝撃係数を上回ることから<sup>5)</sup>、これに対処するために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式を提案した。

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式を用いて設計した RC 床版と現行示方書に規定される曲げモーメント式で設計した RC 床版の2種類の供試体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

筆者らは現行示方書 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<sup>5)</sup>。その結果、基準荷重に対する荷重の変動率を荷重振幅  $V_k$  と定義し、その荷重振幅  $V_k$  を関数とした実験衝撃係数  $I$  を、式(1)として与えている。

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

ここに、 $I$ : 実験衝撃係数、 $V_k$ : 荷重振幅(%)

### 2.2 基準荷重振幅

走行振動荷重が作用する場合の実験衝撃係数は、荷重振幅が 20.4%以上になると現行示方書 I に規定される衝撃係数  $i$  を大きく上回る結果となった。したがって、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。その場合の現行示方書 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  $K_i$  は、支間  $L$  を変数とする式(2)で得られる。

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

ここで、 $K_i$ : 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  $K_i$  (式(2)) 以上の荷重振幅  $V_k$  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  $L$  を関数とする現行示方書 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  $\alpha I$  と定義して、式(3)として与えられている。

$$V_k < K_i; \alpha I = i \\ K_i \leq V_k; \alpha I = 0.050V_k^{0.675} \quad (3)$$

ただし、

$$K_i = -0.20L + 20.8, i = 20 / (50 + L)$$

ここで、 $\alpha I$ : 動的影響係数、 $V_k$ : 荷重振幅(%),  $K_i$ : 基準荷重振幅(kN),  $i$ : 現行示方書 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±45%~48%生じている<sup>1)~2)</sup>。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おけ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  $\alpha I$ : 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。

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

ここで、 $M_{L(1+\alpha I)}$ : 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)、 $\alpha I$ : 動的影響係数

現行示方書 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、荷重振幅±20%の場合は現行示方書 I に規定する衝撃係数  $i$  を適用することから、現行示方書 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%以下の場合は動的影響係数を考慮する必要はない。また、荷重振幅±30%、±40%の荷重の場合は動的影響係数が現行示方書の衝撃係数  $i$  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を算出すると、荷重振幅±30%で 9.0%、±40%で 17.0%の割り増しが必要となる。

## 3. 供試体の材料および寸法

実験に用いる供試体は、現行示方書の規定による供試体と、荷重振幅±30%を考慮した供試体である。供試体の寸法および鉄筋の配置は以下に示すとおりである。

### 3.1 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 および D13 を使用した。材料特性値を表-1 に示す。

### 3.2 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現行示方書に規定する T 荷重の 1/2 モデルであることから、現行示方書に規定する支間 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 としたモデルである。供試体寸法および鉄筋の配置を図-1 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、全長は 147cm である。床版の全厚は 11.0cm である。鉄筋の配置は複鉄筋配置とし、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。鉄筋の配置は複鉄筋配置とし、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。

## 4. 実験装置の概要および実験方法

### 4.1 走行振動荷重装置の概要<sup>7)</sup>

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) のはりに、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。

### 4.2 衝撃係数の算定法

本研究では、RC 床版供試体に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を得るものとする。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。なお、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-2 に示す。

#### (1) 動的増幅率 DAF の概念

動的増幅率 DAF は、図-2 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して定義され、式(5a)で与えられる。なお、

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>
D10	32.0	346	511	200
D13	30.0	368	516	200

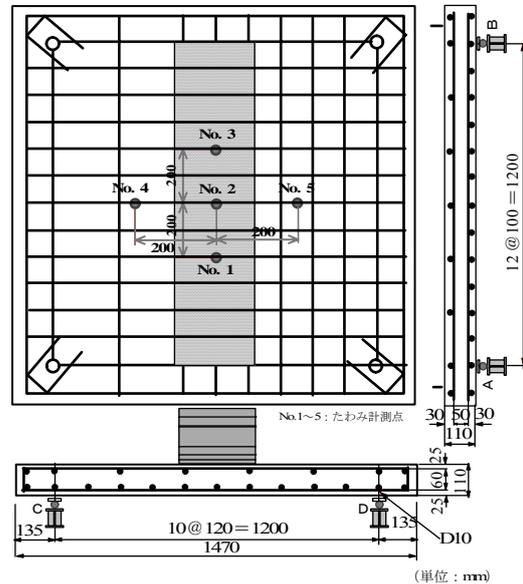


図-1 供試体寸法および鉄筋の配置

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(5b)で与えている。

$$DAF = 1 + \frac{y_{d,max} - y_{s,max}}{y_{s,max}} \quad (5a)$$

$$I = DAF - 1 \quad (5b)$$

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<sup>1)~3)</sup>。タンデム式ダンブトラックの軸重量は中軸で 37.73kN、後軸で

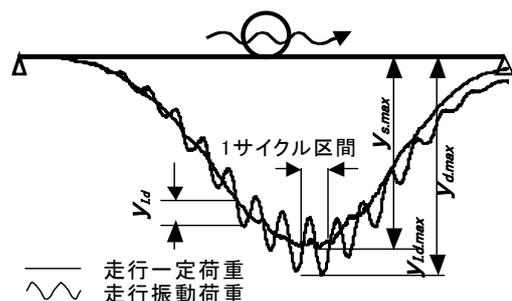


図-2 動的増幅率 (DAF)

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<sup>2)～3)</sup>。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。

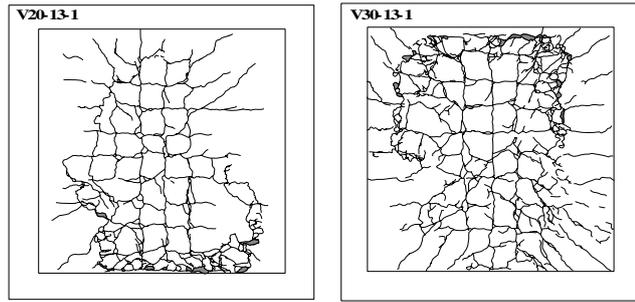


図-3 ひび割れ状況

## 2) 作用振動数

タンデム式のダンプ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<sup>2)</sup>。また、この車両の場合には中軸、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あたりの波数を求めた。実験供試体の作用振動数は、この1mあたりの波数をもとに走行速度を決定した<sup>8)</sup>。

## 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、一定な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、実験衝撃係数を求めるものとする。

本実験における実験衝撃係数の算出には式(5a)、(5b)を適用する。そこで、図-2に示す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。

## 5. 結果および考察

### 5.1 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%の場合には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輪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。ここで、D13供試体のひび割れ状況の一例を図-3に示す。

### 5.2 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に示した軸方向に3点、軸直角方向に2点の合計5箇所での計測を行い、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

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
V20-10-2	138.6		60kN	0.354	0.372	0.388	0.397	0.400		
V30-10-1	130.2	133.5	50kN	0.381	0.374	0.387	0.372	0.386	0.382	0.485
V30-10-2	136.7		60kN	0.372	0.378	0.392	0.385	0.391		
V20-13-1	149.2	146.8	50kN	0.491	0.485	0.482	0.475	0.486	0.491	0.233
V20-13-2	144.3		60kN	0.517	0.480	0.502	0.481	0.508		
V30-13-1	149.6	146.5	50kN	0.473	0.463	0.500	0.468	0.461	0.480	0.336
V30-13-2	143.3		60kN	0.487	0.477	0.492	0.481	0.498		
			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		
			50kN	0.236	0.234	0.226	0.222	0.235	0.235	0.333
			60kN	0.248	0.245	0.233	0.237	0.231		
			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		
			50kN	0.321	0.328	0.346	0.312	0.316	0.329	0.333
			60kN	0.347	0.329	0.335	0.332	0.328		

\*V20-10-1:V20(荷重振幅20%)–10(鉄筋D10)–1(供試体番号)

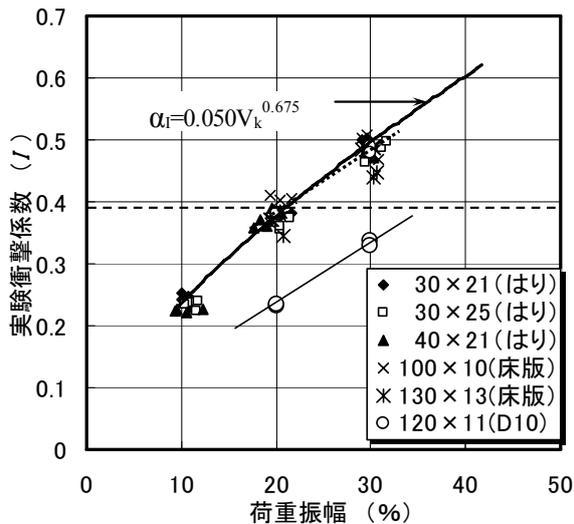


図-4 実験衝撃係数と荷重振幅の関係

試体 V20-10-1, 2 で、それぞれ 0.380, 0.382, 荷重振幅  $\pm 30\%$  の場合に供試体 V30-10-1, 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 ( $\pm 20\% : 0.200, \pm 30\% : 0.300$ ) 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  $\pm 20\%$  の場合は現行示方書 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  $\pm 30\%$  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  $\pm 20\%$  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  $\pm 30\%$  の供試体 V30-13-1, 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現行示方書に規定する衝撃係数を比較すると、荷重振幅  $\pm 20\%$  の場合は 0.61 となり、現行示方書に規定される衝撃係数を大幅に下回る結果となった。また、荷重振幅  $\pm 30\%$  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  $I$  と荷重振幅  $V_k$  の関係を図-4 に示す。

##### (1) D10 の RC 床版

図-4 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<sup>5)</sup> 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-4 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、現

行示方書に規定する衝撃係数と比較すると、荷重振幅が  $\pm 35\%$  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 としたことから、設計活荷重曲げ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で検討した RC 床版供試体に荷重振幅  $\pm 20\%$ ,  $\pm 30\%$  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力は荷重振幅による差異は小さく、D10, D13 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力に大きな影響を及ぼさない。
- ② 現行示方書で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  $\pm 35\%$  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(VIII-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
- 7) 阿部忠, 木田哲量, 澤野利章, 水口和彦, 近藤崇：走行振動試験装置の性能検証に関わる RC はりの走行実験, 日本大学生産工学部研究報告, 第 34 巻, 第 2 号, pp.1-11, 2001
- 8) 木田哲量, 阿部忠, 西村昌宏, 澤野利章, 徐銘謙：走行振動荷重を受ける RC 床版の実験耐力および衝撃係数, 構造工学論文集, Vol.1.50A, pp1287-1294, 2004