

変動荷重を受けるRC床版の活荷重曲げモーメントに関する研究

(株)復建エンジニアリング ○西村 昌宏 日大生産工 澤野 利章
日大生産工 阿部 忠 日大生産工 木田 哲量

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。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^{1), 2)}に着目し、走行振動疲労荷重が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はりを実橋RC床版の1/2モデルで製作したRC床版供試体を用いて、走行振動荷重が及ぼす動的影響を実験衝撃係数として評価した。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は、道路橋示方書・同解説³⁾(以下、道示とする)Ⅰに規定する衝撃係数を上回る結果が得られた^{4), 5)}。これに対処するために、実験衝撃係数を荷重振幅を関数とする動的影響係数式とし、これを適用した活荷重曲げモーメント式の提案を行った⁵⁾。

本研究は、文献5)で提案した動的係数を含む活荷重曲げモーメントを2004年改定された道示の規定に基づいてIS単位で再解析した。その動的影響を含む活荷重曲げモーメントを基に、RC床版供試体を製作し、走行振動荷重実験を行い、実験衝撃係数を得て伸縮継手の段差および路面の凹凸により発生する振動荷重が作用した場合の衝撃係数に対する改善策を評価する。

2. RC床版の活荷重モーメントの解析

2.1 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、等方性無限単純版を対象とした偏微分方程式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。

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)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台数に制限なく載荷している。支間中央のx方向および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6.0mを解析し、その結果を図-1に示す。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、図中▲は、道示Ⅰに規定する衝撃係数(=20/(50+L))、L:設計支間)を含む活荷重曲げモーメントである。

1) 解析式

- ・衝撃を含まない場合

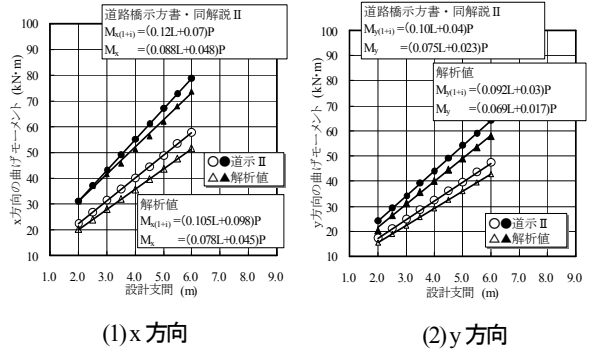


図-1 解析値と道示Ⅱの規定による活荷重曲げモーメント

$$M_{Lx} = (0.078L + 0.045)P \quad (1.1)$$

$$M_{Ly} = (0.069L + 0.017)P \quad (1.2)$$

- ・衝撃を含む場合

$$M_{Lx(1+I)} = (0.105L + 0.098)P \quad (2.1)$$

$$M_{Ly(1+I)} = (0.092L + 0.031)P \quad (2.2)$$

ここで、P: T荷重の片側荷重(kN)(=100kN), 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を含む活荷重曲げモーメント(図中●)を図-1に示す。

- ・衝撃を含む場合

$$M_{Lx(1+I)} = (0.12L + 0.07)P \quad (3.1)$$

$$M_{Ly(1+I)} = (0.10L + 0.04)P \quad (3.2)$$

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

1990年(平成2年)道示Ⅱで規定されている活荷重曲げモーメントは、理論値に対して10~17%の安全性を考慮している。一方、本解析値における線形近似式(2)と道示Ⅱに規定されている活荷重曲げモーメント式(3)を比較すると、11~17%の余裕がある。この余裕量は、解析を行ったときの仮定と施工誤差などを考慮したものである。そこで、本設計では、道示Ⅱに規定する衝撃係数を含む活荷重曲げモーメントの解析値に対して、活荷重Pが伸縮継手を通過する時に発生する動的影響を適用して活荷重曲げモーメントの割り増しをすることとする。衝撃係数の影響を除いた活荷重曲げモーメントは式(4)として与えられる。

$$M_{Lx} = (0.088L + 0.048)P \quad (4.1)$$

$$M_{Ly} = (0.074L + 0.023)P \quad (4.2)$$

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

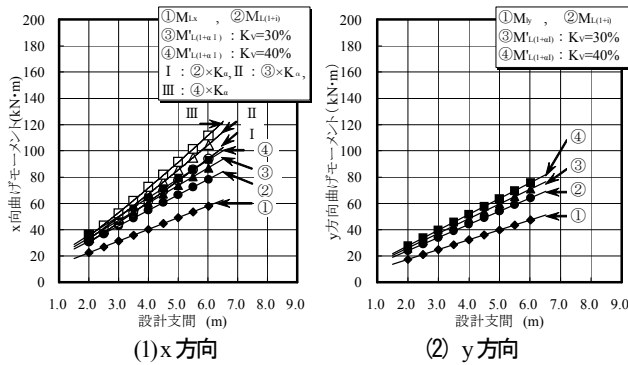


図2 動的影響を適用した活荷重モーメント

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)

2.2 動的影響係数の適用

本設計の場合は、伸縮継手の段差によって発生する荷重変動の影響を考慮した動的影響係数 α_l を適用した活荷重曲げモーメント式とする。よって、走行振動荷重による動的影響を示す動的影響係数 α_l を考慮した活荷重 $P_{L(1+\alpha_l)}$ は、式(5)として与えられる。

$$P_{L(1+\alpha_l)} = P(1 + \alpha_l) \quad (5)$$

ただし、

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

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

$$K_i = -0.20L + 20.8$$

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

ここに、 $P_{L(1+\alpha_l)}$: 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), α_l : 動的影響係数, K_v : 荷重変動率(例えば、段差2cmの場合30%, 段差3cmの場合40%), K_i : 基準荷重振幅, L: 床版設計支間(m), i: 道示IIに規定する衝撃係数

以上より、動的影響係数 α_l を適用した場合の曲げモーメントは式(4.1), (4.2)より主筋方向を式(6.1), 配筋方向を式(6.2)として得る。

$$M_{L(1+\alpha_l)} = (0.088L + 0.048)P_{L(1+\alpha_l)} \quad (6.1)$$

$$M_{L(1+\alpha_l)} = (0.074L + 0.023)P_{L(1+\alpha_l)} \quad (6.2)$$

ここに、L: 設計支間, $P_{L(1+\alpha_l)}$: 動的影響を含む設計荷重, K_a : 割増し係数

2.3 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: $M_{L(1+\alpha)}$ (kN・m/m)

動的影響を考慮した軸直角方向および軸方向の活荷重曲げモーメントを算出した結果を図-2に示す。図-2の①は式(3.1), (3.2)より算出し、②は道示II、③に規定する式(4.1), (4.2)より算出した結果である。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。また、図中Iは②、IIは③、IIIは④に、それぞれ道示に規定する床版支間に対する軸直角方向の割増し係数 K_a 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をx方向を主鉄筋方向として式(7.1), y方向を配筋方向とし

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
120×11-D10	30.0	346	511	200
120×11-D13	27.0	368	516	200

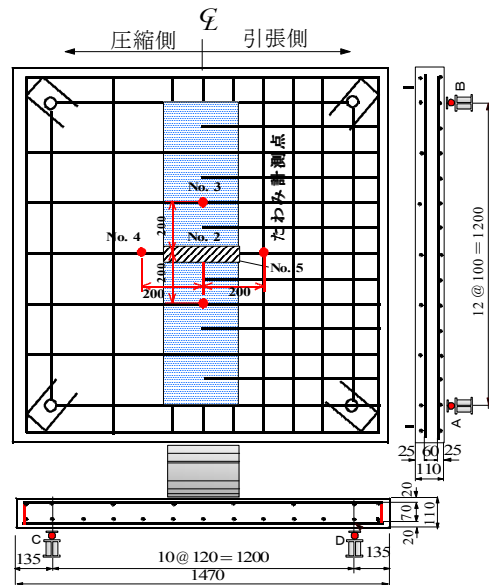


図3 RC床版供試体寸法および鉄筋の配置

て式(7.2)として与えられる。

1) 単純版の主鉄筋方向の曲げモーメント(kN・m)

$$K_v \leq \pm 20\%; M_{L(1+\alpha)} = (0.12L + 0.07)P$$

$$\pm 20\% < K_v \leq \pm 30\%; M_{L(1+\alpha)} = (0.13L + 0.07)P \quad (7.1)$$

$$\pm 30\% < K_v \leq \pm 40\%; M_{L(1+\alpha)} = (0.14L + 0.07)P$$

2) 単純版の配筋方向の曲げモーメント(kN・m)

$$K_v \leq \pm 20\%; M_{L(1+\alpha)} = (0.10L + 0.04)P$$

$$\pm 20\% < K_v \leq \pm 30\%; M_{L(1+\alpha)} = (0.11L + 0.04)P \quad (7.2)$$

$$\pm 30\% < K_v \leq \pm 40\%; M_{L(1+\alpha)} = (0.12L + 0.04)P$$

道示IIに示す衝撃を含む活荷重曲げモーメントを、本実験により得られた荷重振幅を考慮し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 $\pm 20\%$ 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 $\pm 20\%$ 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 $\pm 30\%$, $\pm 40\%$ の荷重の場合に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を算出すると、荷重振幅 $\pm 30\%$ で9%, $\pm 40\%$ で17%上回っており、割増して計算する必要がある。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。

3. 供試体の材料および寸法

RC床版は、道示の規定により設計した供試体と、荷重変動率 $\pm 30\%$, 40% を考慮した場合の供試体を用いて実験を行う。

(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。

(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に規定するT荷重の1/2モデルであることから、道示に規定する支間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-3に示す。よって、RC床版供試体の寸法は、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、引張側の主鉄筋にはD10を10cm間隔で配置し、有効高さは9.0cmとした。また、配筋筋にはD10を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、軸直角方向が20.0cm、軸方向が24.0cm間隔で配置した。

次に、動的影響係数を適用したRC床版供試体は、引張側の主鉄筋にはD13を10cm間隔、配筋筋にD13を12cmで配置し、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. 実験衝撃係数の算定法および実験方法⁹⁾

4.1 実験衝撃係数の算定法

本研究では、RC床版の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。本実験では、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。たわみ応答値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-4に示す。

動的影響増幅率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(8.1)で与えられる。なお、道路橋の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(8.2)で与えている。

$$DAF = 1 + (y_{dmax} - y_{smax}) / (y_{smax}) \quad (8.1)$$

$$I = DAF - 1 \quad (8.2)$$

ここに、DAF：動的増幅率、 y_{dmax} ：最大動的たわみ、 y_{smax} ：最大静的たわみ、I：実験衝撃係数

4.2 実験方法

(1) 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させて、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。

(2) 作用荷重振幅

本実験の振動荷重は、大型自動車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、大型自動車が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。タンデム式ダンブトラ

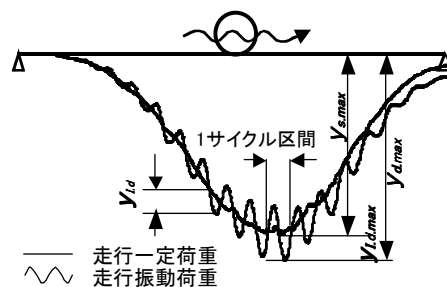


図4 動的増幅率 (DAF)

ックの軸重量は中軸で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、中軸の重量を上限荷重、後軸の重量を下限値とすると、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。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。

(3) 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自動車が段差量20mmを通過した場合のバネ下振動数は13Hz～18Hzである。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当りの波数を求めた。実験衝撃係数の作用振動数は、この1m当りの波数をもとに走行速度を決定した。

(4) 実験衝撃係数

荷重変動がRC床版に及ぼす影響は、たわみ応答値による動的増幅率DAFから求めた実験衝撃係数を評価する。したがって、走行振動荷重の場合の動的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。実験衝撃係数を求める荷重は、一定の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、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。

本実験における動的たわみは走行振動荷重の場合の方が走行一定荷重の場合よりも上回っていた。したがって、衝撃係数の算定式には式(8.2)を定適用する。

5. 実験結果および考察

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は、D10の供試体の荷重振幅±20%の場合、V20-10は135.5kN、鉄筋D13の供試体の荷重振幅±20%の場合、V20-13は148.8kNである。したがって、D13を用いた場合は1.08倍耐荷力大きい。同様に±30%の場合は、D10に比べ1.10倍耐荷力大きい。

次に、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。

5.2 動的増幅率による実験衝撃係数

本実験より得られたRC床版の実験衝撃係数を表2に示す。また、弾性域の荷重におけるロードセルより計測した荷重波形から、軸重量 P (基準荷重)と上限荷重 P_U から得た、荷重変動 $(P_U/P-1) \times 100$ を表2に示した。ここで、荷重変動率は与えた荷重振幅と多少異なっているが、これは車輪が供試体を走行する時に供試体の凹凸により生じる荷重変動の影響によるものである。

荷重振幅 $\pm 20\%$ 、 $\pm 30\%$ の場合の実験衝撃係数 I は、各測定点で求めた結果を荷重振幅ごとに平均して求めた結果である。

5.3 実験衝撃係数

実験衝撃係数と荷重振幅の関係を図5に示す。なお、図中に既往の実験結果⁴⁾である3タイプのRCはりおよび2タイプの床版の結果を併記した。本実験結果の場合もほぼ近似する結果となった。

実験衝撃係数の平均値は、荷重振幅 $\pm 20\%$ の場合に供試体 V20-10-1, 2 でそれぞれ 0.380, 0.382, 荷重振幅 $\pm 30\%$ 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以上の衝撃係数となっている。なお、本供試体は、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 $0.382(I=20/50 \times 2.4)$ である。したがって、荷重振幅が $\pm 20\%$ の場合は道示Ⅱに規定する衝撃係数と同程度の結果となったが、 $\pm 30\%$ の場合は、1.27 倍となった。

D13 を用いた RC 床版の実験衝撃係数は、荷重振幅 $\pm 20\%$ の場合に供試体 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 を用いた場合約 40% 衝撃係数の低減が見られる。また、荷重振幅 $\pm 30\%$ の場合に供試体 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約 31% 低減が見られた。次に、これらの実験衝撃係数と道示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、道示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。なお、今回の実験では供試体の鉄筋量を D10 から D13 としたこと、設計活荷重曲げモーメントによる鉄筋の割増し量 9% に対して、鉄筋量を 17% 割増し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。

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、走行振動荷重の動的影響に

表2 実験衝撃係

供試体	計測荷重			(P _U /P-1)×100 (%)	実験衝撃係数					平均値	平均値
	P _U	P	P _L		1	2	3	4	5		
S-10-V20-1	72.3	60.1	57.9	20.4	0.357	0.401	0.386	0.362	0.383	0.380	0.381
	83.4	69.7	66.8	19.6	0.354	0.372	0.388	0.397	0.400		
S-10-V20-2	71.8	60.1	57.4	19.4	0.381	0.374	0.387	0.372	0.386	0.382	0.382
	86.7	71.8	69.4	20.8	0.372	0.378	0.392	0.385	0.391		
S-10-V30-1	77.0	59.7	53.9	29.0	0.491	0.485	0.482	0.475	0.486	0.491	0.485
	92.1	70.7	64.5	30.2	0.517	0.480	0.502	0.481	0.508		
S-10-V30-2	78.5	60.2	55.0	30.6	0.473	0.463	0.500	0.468	0.461	0.480	0.480
	91.0	69.8	63.7	30.3	0.487	0.477	0.492	0.481	0.498		
S-13-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	56.4	20.3	0.250	0.250	0.223	0.222	0.224		
S-13-V20-2	71.6	59.7	50.1	20.0	0.236	0.234	0.226	0.222	0.235	0.235	0.233
	84.3	70.3	59.0	19.9	0.248	0.245	0.233	0.237	0.231		
S-13-V30-1	78.4	60.1	48.1	30.5	0.339	0.342	0.334	0.322	0.328	0.336	0.333
	93.6	71.8	57.4	30.5	0.327	0.343	0.353	0.336	0.338		
S-13-V30-2	78.6	60.3	55.0	30.3	0.321	0.328	0.346	0.312	0.316	0.329	0.329
	91.9	69.9	64.3	31.5	0.347	0.329	0.335	0.332	0.328		

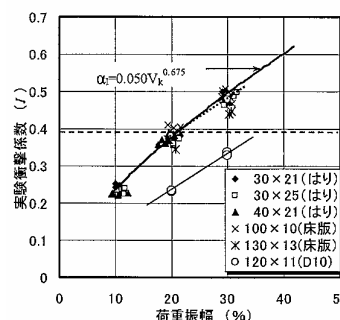


図5 実験衝撃係数Iと荷重振幅の関係

対する RC 床版の改善効果を検討し、以下の結果を得た。

- ①D10を用いたRC床版とD13を用いたRC床版供試体の実験衝撃係数を比較すると、振動荷重 $\pm 20\%$ で40%、 $\pm 30\%$ で31%減少している。したがって、鉄筋量を割増しすることにより大幅に改善された。これは、鉄筋量を割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。
- ②D10を用いたRC床版とD13を用いたRC床版の押抜きせん断耐荷力を比較すると約10%増大している。押抜きせん断耐荷力に関してはコンクリートの圧縮強度が支配的となることから、動的影響係数を考慮した活荷重曲げモーメントに対しての鉄筋量の割増しは大幅な耐荷力の向上にはならない結果となった。
- ③動的影響係数を適用した活荷重曲げモーメントより設計されたRC床版の改善効果を行った結果、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)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)日本道路協会：道路橋示方書・同解説I，II，III，2002.3
- 4)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)
- 5)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
- 6)横山功一，井上純三，永原 隆：道路橋床版の衝撃係数に関する実験，構造工学論文集，Vol.35A，pp.749-756. 1989.