

論文 走行荷重が作用する RC はりの曲げ耐力と動的影響に関する研究

阿部 忠*1 澤野利章*2 木田哲量*3 坪松 学*4

要 旨：本研究は、有効高 d が異なる ($d=17.2\text{cm}$ を A タイプ, $d=21.2\text{cm}$ を B タイプとする) RC はりに、走行荷重が作用した場合の曲げ耐力と、走行振動荷重による動的影響を実験より評価したものである。その結果、荷重走行後の曲げ耐力は静荷重のものに比較すると、A, B タイプともに 16% 低下した。次に、曲げ試験における走行振動荷重 10%, 20%, 30% の動的影響は、A, B タイプともに、与えた荷重振幅以上の衝撃係数となることが明らかになった。本実験の結果より、荷重振幅が $\pm 22\%$ 以上生じる場合には、現行道路橋示方書・同解説 I に規定する RC はりの衝撃係数を上まわることが分かった。

キーワード：走行振動荷重, RC はり, 曲げ耐力, 動的増幅率, 衝撃係数

1. はじめに

鋼道路橋 RC 床版は、大型自動車の走行によりひび割れ損傷が生じている。そこで、各研究機関では輪荷重走行試験機を開発し、床版モデルによる実験が行われ、研究成果^{1), 2)}が報告されている。さらに、RC 床版の耐力低下・疲労寿命低下は、伸縮継ぎ手の段差および路面性状により発生する大型自動車の動的影響も大きな原因であると考えられている。これらのことから、筆者^{3), 4), 5)}らは RC 床版を想定したはり部材を用いて、走行荷重が曲げ耐力に及ぼす影響と動的影響について実験的研究を行ってきた。その結果、はりの曲げ耐力は走行荷重が作用することにより静的曲げ耐力に比して著しく低下することを明らかにした。また、走行振動荷重が作用した場合の動的影響による曲げ耐力も低下する結果を得た。

そこで本研究は、道路橋 RC 床版を想定とした同一支間長および同一鉄筋量配置の有効高さの異なる RC はり供試体を 2 タイプ用いて、①静荷重による曲げ試験、②荷重走行後の曲げ試験、③走行一定荷重（無振動の荷重状態）による曲げ試験、④走行振動荷重（路面性状により走行振動が発生する荷重状態）による曲げ試験を行い、はり部材の走行荷重に対する曲げ耐力および動的影響に及ぼす効果を考察する。

2. 道路橋に及ぼす変動荷重の状態

建設省土木研究所⁶⁾では、道路橋の設計法が許容応力度設計法から限界状態設計法へ移行することに向けて、大型自動車が伸縮継ぎ手の段差部を走行することにより発生する衝撃力に関する調査・研究が行われ、報告されている。その中で、RC 床版非剛性桁橋（支間 45m）の伸縮継ぎ手を総重量 205.8kN のダンプトラックが通過する時に発生する中軸・後軸の荷重変動についての実験的研究を行い、その結果を図-1 のように示している。

図-1 の荷重変動によれば、タンデム式ダンプトラックの中軸、後軸の荷重振幅は、橋梁の両支点付近で約 $\pm 40\%$ 程度生じている。また、支間中央付近では、中軸で約 $\pm 10\%$ 、後軸で $\pm 20\%$ 程度の荷重振幅が生じている。この時の荷重周期は 1 軸あたり 18Hz 程度となっている。

これらのことから、鋼道路橋 RC 床版は伸縮装置の段差および路面状態によって発生する大きな変動荷重を受けている。よって、これらを考慮した走行振動荷重による種々の実験的考察が必要である。

3. 実験概要

3.1 走行振動疲労試験装置

本実験に用いる走行振動疲労試験装置は、鋼製反力フレーム（耐荷力 300kN, 柱 H-400×400

*1 日本大学専任講師 生産工学部土木工学科 (正会員)

*2 日本大学専任講師 生産工学部土木工学科 工博

*3 日本大学教授 生産工学部土木工学科 工博(正会員)

*4 日本大学専任講師 生産工学部土木工学科

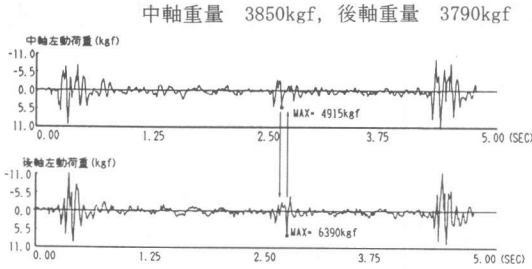


図-1 大型自動車の荷重変動⁶⁾

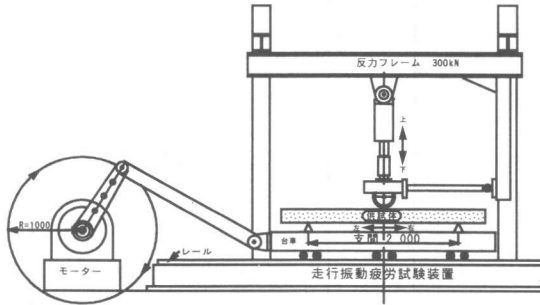


図-2 走行振動疲労試験装置

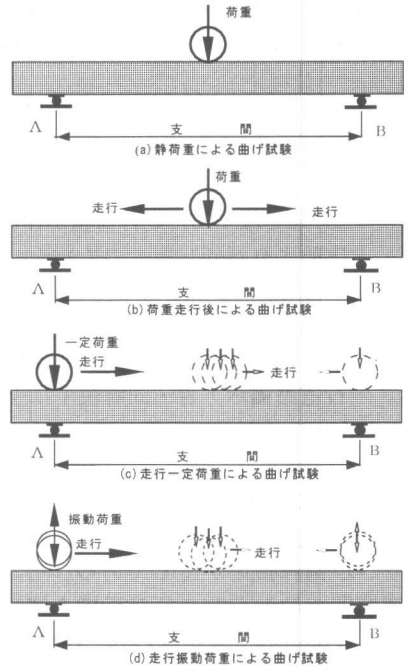


図-3 実験方法

×13×21mm, はりH-450×550×16×28mm) のはりに鋼製の車輪を取り付けた油圧式の構造物振動疲労試験機を固定し、供試体を設置した台車(長さ2.8m, 幅1.7m)をモーターとクラックアームにより水平方向へ往復運動させて車輪の走行状態を再現するものである。すなわち本試験装置は、①鉛直方向の荷重載荷装置、②供試体を設置する台車、③台車を水平方向へ往復運動させる装置より構成されている。走行振動疲労試験装置を図-2に示す。

3.2 実験方法

実験では、RCはりの供試体に単一の大型自動車を想定した輪荷重による①静荷重による曲げ試験、②荷重走行後の曲げ試験、③走行一定荷重による曲げ試験、④走行振動荷重による曲げ試験を行うものである。各実験方法を図-3に示す。

(1) 静荷重による曲げ試験(試験体MS)

静荷重による曲げ試験は図-3(a)に示すように、最大曲げ応力が生じる支間中央に車輪を停止した状態での曲げ試験である。荷重の大きさは0.0kNから5.0kNずつ増加させて載荷し、供試体が破壊するまで、それぞれの荷重ごとにたわみを計測する。

(2) 荷重走行後の曲げ試験(試験体MM)

荷重走行後の曲げ試験は図-3(b)に示すように、輪荷重が供試体上を走行した後に支間中央に車輪を停止させた状態で曲げ試験を行い、それぞれの荷重ごとにたわみを静的に計測するものである。

走行方法は、車輪を支間中央に載荷した後左右支点A、Bに向かって100cmを18sec(平均走行速度22cm/sec)で1往復するものである。そして、支間中央で停止して曲げ試験を行う。荷重の大きさは1走行ごとに5.0kNずつ増加させて載荷し、供試体が破壊するまで荷重の増加と走行を繰り返し行う。

(3) 走行一定荷重による曲げ試験(試験体MR)

走行一定荷重による曲げ試験は図-3(c)に示すように、一定の大きさの輪荷重を走行させ、たわみを動的に計測するものである。

載荷・走行方法は支間200cmの供試体の左支点Aに静的に一定輪荷重を載荷後、走行を始めて右支点Bを折り返して左支点Aに戻るまでを1往復とする。1往復を18secで走行することとし、この間のたわみを動的に測定する。荷重の大きさは1往復ごとに5.0kNずつ増加させ、供試体が破壊するまで荷重の増加と走行を

繰り返して行うこととする。なお、走行一定荷重による荷重状態の一例を図-4に示す。

(4) 走行振動荷重による曲げ試験(試験体M I)

走行振動荷重による曲げ試験は図-3(d)に示すように、まず静的に強度が一定の荷重を載荷させ、この荷重強度の±10%、±20%、±30% (以後、走行振動荷重10%、20%、30%と称する)を振幅とした周期2 Hz の正弦波形による片振り振動を荷重として供試体上を走行させた場合のたわみを動的に計測するものである。走行方法と荷重載荷方法は走行一定荷重の場合と同様とする。

なお、走行振動荷重20%の場合の曲げ試験における荷重状態の一例を図-4に示す。

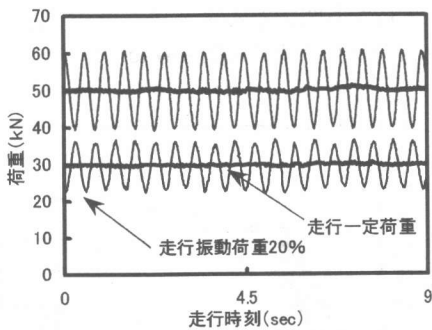


図-4 走行一定荷重と走行振動荷重20%の場合の荷重状態

次に、走行振動荷重による動的影響は、たわみ応答をもとに動的増幅率⁷⁾より評価する。

実験方法は、走行振動荷重10%、20%、30%の各曲げ試験の過程で、弾性域の荷重(Aタイプの場合30.0kN、40.0kN; Bタイプの場合40.0kN、50.0kN)で走行一定荷重による曲げ試験のたわみ応答値を計測する。

4. 供試体・計測方法

4.1 使用材料および寸法

(1) 使用材料

実験に用いた供試体のコンクリートには普通ポルトランドセメントと最大寸法20mmの粗骨材料(密度2.63g/cm³)を使用した。また、鉄筋はSD295A、D16を使用した。コンクリートの圧縮強度および鉄筋の降伏・引張強度を表-1に示す。

(2) 供試体寸法および鉄筋の配置

供試体の支間は200cmとし、供試体の張り出し部は、鉄筋D16を使用することから定着長を考慮した40cmとし、全長280cmとする。供試体の寸法は、走行荷重の影響を最も受ける道路橋RC床版を想定して、次の2タイプを設定した。はりの高さは道路橋示方書・同解説I、II⁸⁾に規定するRC床版の最小厚さを考慮して設定したものである。

○Aタイプ

支間200cmで、幅30cm、高さ21cmとし、引張側にD16を3本、圧縮側にD16を2本配置し、引張鉄筋の有効高さを17.2cmとする。

○Bタイプ

支間長、幅はAタイプ同様に200cmと30cmとし、鉄筋の配置法もAタイプ同様に引張側にD16を3本、圧縮側にD16を2本配置する。はりの高さは25cmとし、引張鉄筋の有効高さを21.2cmとする。

以上のような有効高の異なる供試体の寸法および鉄筋の配置を図-5に示す。

4.2 計測方法および測定位置

本実験における計測は、ロードセルから検出した荷重と左支点から40cm、70cm、100cm、130cm、160cm点で、走行開始から走行終了までに生じるたわみを動的に測定する。なお、測定位置は図-5に示す。

表-1 コンクリートの圧縮強度および鉄筋の降伏・引張強度

供試体	コンクリート	鉄筋 (SD295A、D16)			鉄筋比 引張
	圧縮強度 N/mm ²	降伏点 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	ヤング係数 kN/mm ²	
Aタイプ	36.5	361	517	191	0.66
Bタイプ	34.8				

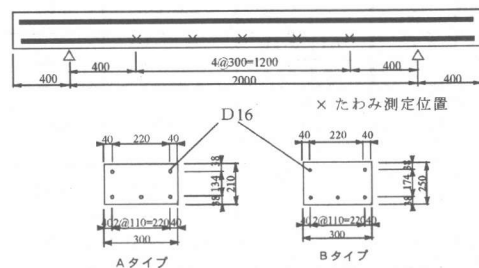


図-5 供試体寸法および鉄筋の配置

5. 曲げ耐力および破壊形式

静荷重および荷重走行後の場合の曲げ耐力を表-2に示す。また、走行一定荷重および走行

振動荷重の場合の曲げ耐力を表-3に示す。

なお、本研究の曲げ耐力とは、各実験において、荷重が作用した時にRCはりが抵抗できる最大荷重とする。

- 1) 荷重走行後の場合の静荷重に対する曲げ耐力比 (MM/MS) はA, Bタイプともに0.84となり、16%耐力が低下した。
- 2) 走行一定荷重と走行振動荷重の場合の静荷重に対する曲げ耐力比 (MRorMI/MS) はA, Bタイプともに0.90となり、10%耐力が低下した。

表-2 静荷重および荷重走行後の場合の曲げ耐力

供試体 *1	曲げ耐力(kN)	平均耐力(kN)	MM/MS
MSA-1	80.9	82.1	—
MSA-2	85.1		
MSA-3	80.4		
MMA-1	68.9	69.3	0.84
MMA-2	69.6		
MSB-1	105.6	103.6	—
MSB-2	100.1		
MSB-3	105.2		
MMB-1	84.6	87.2	0.84
MMB-2	89.8		

*1 MSA-1
 └ 供試体No.
 └ 供試体の種類(A:Aタイプ, B:Bタイプ)
 └ 実験名(S:静荷重, M:荷重走行後)
 └ 曲げ試験

表-3 走行一定荷重および走行振動荷重の場合の曲げ耐力

供試体 *2	曲げ耐力(kN)	平均耐力(kN)	MR(MI)/MS
MRA-1	75.3	74.9	0.91
MRA-2	75.4		
MRA-3	74.1		
MIA10-1	75.0-61.7	75.7-62.2	0.92
MIA10-2	76.4-62.7		
MIA20-1	75.6-51.0	75.8-50.7	0.91
MIA20-2	75.3-50.3		
MIA30-1	70.1-40.9	72.8-42.7	0.88
MIA30-2	75.4-44.5		
MRB-1	94.3	93.9	0.90
MRB-2	93.6		
MRB-3	93.8		
MIB10-1	93.5-74.4	93.6-73.8	0.90
MIB10-2	94.0-73.2		
MIB20-1	92.8-63.2	93.6-64.0	0.90
MIB20-2	94.6-66.7		
MIB30-1	95.2-54.0	94.5-53.3	0.91
MIB30-2	93.8-52.6		

*2 MRA10-1
 └ 供試体No.
 └ 荷重振幅(10:±10%, 20:±20%, 30:±30%)
 └ 供試体の種類(A:Aタイプ, B:Bタイプ)
 └ 実験名(R:走行一定荷重, I:走行振動荷重)
 └ 曲げ試験

また、走行一定荷重の曲げ耐力と走行振動荷重10%、20%、30%の振幅上限の曲げ耐力は、ほぼ近似値となった。

3) A, Bタイプともに静荷重に対する耐力比が近似していることから、有効高dの違いは曲げ耐力に影響しないことが分かった。

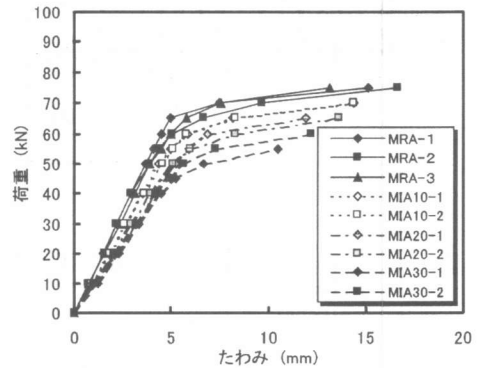
4) 静荷重および荷重走行後の曲げ試験の場合の破壊モードは支間中央で曲げ破壊となった。また、走行一定荷重および走行振動荷重の場合には、走行中に支間中央付近で曲げ破壊となった。

6. 走行荷重による動的影響

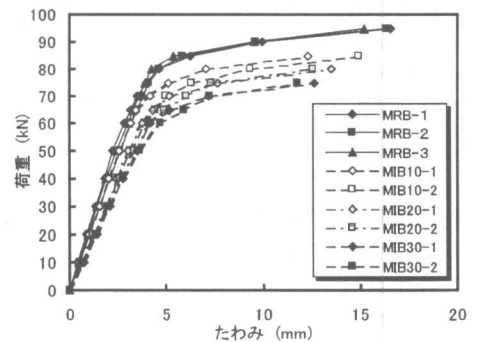
6.1 耐力低減率

(1) 荷重とたわみの関係

走行一定荷重および走行振動荷重の場合の荷重とたわみの関係をAタイプの場合を図-6(a)、Bタイプの場合を図-6(b)に示す。



(a) Aタイプ



(b) Bタイプ

図-6 荷重とたわみの関係

(2) たわみによる耐力低減率

図-6に示すようにA, Bタイプともに走行

一定荷重と比較すると走行振動荷重の場合のたわみは増大している。この走行振動荷重によるたわみの増大を走行一定荷重に対する耐力低減率 ξ とし、式(1)で定義する。

$$\xi = (K_{MI} / K_{MR}) - 1.0 \quad \text{式(1)}$$

ここで、 K_{MR} ：走行一定荷重によるたわみ、
 K_{MI} ：走行振動荷重によるたわみ

荷重とたわみの関係から算出した耐力低減率 ξ は、Aタイプの場合、走行振動荷重10%、20%、30%で、それぞれ0.180、0.355、0.454となった。また、Bタイプの場合は、それぞれ0.178、0.320、0.450となり、A、Bタイプともに与えた荷重振幅以上の低減率となった。

6.2 走行振動荷重による動的影響

大型自動車が行走時に発生する走行振動の影響、すなわち動的影響を道路橋示方書・同解説I（以下、道示I）では衝撃と称し、衝撃係数をもって活荷重による断面力を割り増しすることとしている。衝撃係数は、応力、あるいはたわみ応答を基にした動的増幅率DAF（Dynamic Amplification Factor）として評価している（図-7）。

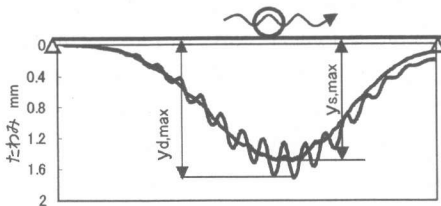


図-7 動的増幅率 (DAF)

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と最大静的たわみ値の比として定義⁷⁾し、これを衝撃係数Iとして、次式で与えられている。

$$I = (y_{d,max} - y_{s,max}) / y_{s,max} \quad \text{式(2)}$$

ここで、 $y_{d,max}$ ：最大動的たわみ、 $y_{s,max}$ ：最大静的たわみ

本実験の衝撃係数Iは、走行振動荷重による曲げ試験におけるたわみ応答値を最大動的たわみ $y_{d,max}$ とし、弾性域の荷重(Aタイプの場合30kN、40kN；Bタイプの場合40kN、50kN)における一定荷重で走行した場合のたわみ応答値を最大静的たわみ $y_{s,max}$ として式(2)より求め、表-4に示す。

RCはりに走行振動荷重10%、20%、30%が作用した場合に生じる衝撃係数Iは、Aタイプの場合は、0.246、0.379、0.496であり、Bタイプの場合は、0.234、0.368、0.482である。いずれの場合も与えた荷重振幅以上の衝撃係数が得られている。これは、走行振動荷重によって発生したひび割れが支間全体にわたり発生したことから、曲げ剛性が低下し、最大動的たわみが増加したものと考えられる。

なお、供試体の表面仕上げ、すなわち走行面の凹凸により生じる荷重変動は ± 0.2 kN程度（衝撃係数 $I = 0.002$ ）であるが、表-4にはこれらの影響も含んだ結果を示した。

6.3 動的影響係数

現行の道路橋設計法における走行荷重の動的影響は、はりの設計支間長の関数で定義した衝撃係数で評価している。

本実験における動的影響は、①走行一定荷重による曲げ試験と走行振動荷重による曲げ試験におけるたわみ値より得た耐力低減率 ξ と、

表-4 各測定点の衝撃係数I

(a) Aタイプ							(b) Bタイプ										
供試体	荷重	測定位置					平均値	供試体	荷重	測定位置					平均値		
		40cm	70cm	100cm	130cm	160cm				40cm	70cm	100cm	130cm	160cm			
MIA10-1	30kN	0.236	0.231	0.213	0.228	0.238	0.243	MIB10-1	40kN	0.226	0.240	0.239	0.212	0.206	0.234		
	40kN	0.253	0.231	0.258	0.264	0.261			50kN	0.203	0.245	0.254	0.253	0.234			
MIA10-2	30kN	0.228	0.256	0.255	0.238	0.234		MIB10-2	40kN	0.233	0.229	0.242	0.220	0.243			
	40kN	0.250	0.259	0.264	0.242	0.228			50kN	0.232	0.237	0.256	0.243	0.229			
MIA20-1	30kN	0.376	0.377	0.390	0.379	0.387		0.379	MIB20-1	40kN	0.351	0.366	0.370	0.353		0.337	
	40kN	0.362	0.368	0.371	0.390	0.385				50kN	0.390	0.375	0.387	0.353		0.359	
MIA20-2	30kN	0.382	0.395	0.364	0.377	0.386			MIB20-2	40kN	0.356	0.356	0.347	0.364		0.381	
	40kN	0.366	0.367	0.393	0.368	0.393				50kN	0.387	0.395	0.360	0.371		0.404	
MIA30-1	30kN	0.522	0.496	0.502	0.493	0.493			0.496	MIB30-1	40kN	0.453	0.449	0.490		0.479	0.443
	40kN	0.500	0.483	0.496	0.500	0.482					50kN	0.495	0.468	0.482		0.478	0.478
MIA30-2	30kN	0.486	0.485	0.500	0.501	0.480	MIB30-2			40kN	0.457	0.511	0.476	0.498	0.496		
	40kN	0.513	0.503	0.495	0.487	0.505				50kN	0.480	0.493	0.497	0.522	0.489		

②走行振動荷重による曲げ試験から得た衝撃係数 I を荷重振幅 K の関数とした動的影響係数 α として定義し、評価する。ここで、動的影響係数と荷重振幅の関係を図-8に示す。

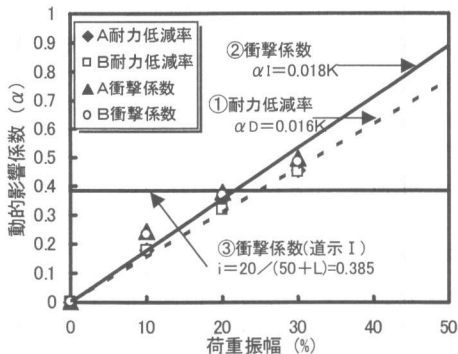


図-8 動的影響係数と荷重振幅

動的影響係数 α は、①の耐力の低減率 ξ より $\alpha D = 0.016K$ 、②の衝撃係数 I より $\alpha I = 0.018K$ を得た。また、③は道示 I に規定する RC はりの設計衝撃係数 $i (= 20 / (50 + L)) = 0.385$ である。なお、 L は設計支間 ($= 2.0\text{m}$) である。

耐力低減率より得た動的影響係数 αD は、走行一定荷重による曲げ試験でのたわみと、走行振動荷重による曲げ試験でのたわみから得た結果であり、両実験におけるたわみは残留たわみを含んだ結果である。また、衝撃係数より得た動的影響係数 αI は、走行振動荷重による曲げ試験でのたわみから得たものであり、式(2)における最大動的たわみ ($y_{d,max}$) には残留たわみを含み、一定な荷重で走行した場合の最大静的たわみ ($y_{s,max}$) には残留たわみが含まれない結果である。したがって、衝撃係数より求めた動的影響係数の方が厳しい結果となった。

7. まとめ

(1) 静荷重の場合の曲げ耐力と比較すると走行荷重後の場合の曲げ耐力は、A、Bタイプともに16%低下した。A、Bタイプ同じ低下率であることから、曲げ耐力に関しては有効高 d の違いによる影響は見られない。

(2) 走行一定荷重の曲げ耐力と走行振動荷重10%、20%、30%の振幅上限の曲げ耐力は、ほぼ

近似値となった。

(3) RC はりの動的影響を示す衝撃係数は、荷重振幅が約22%を超えると道示 I に規定する衝撃係数 i を上まわる結果となったことから、橋梁の両支点付近では、これらの影響を考慮した設計法が望まれる。

(4) 衝撃係数は支間長の他に荷重振幅の関数として評価する必要があることから、この定式化が今後の課題である。

謝辞：本研究に際しましてご指導下さいました日本大学理工学部星埜正明教授、ならびに供試体の製作にご協力下さいました住建コンクリート工業(株)の近藤二郎氏に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 松井繁之, 前田幸雄: 輪荷重移動装置による道路橋床版の疲労に関する研究, 第6回コンクリート工学年次講演論文集, pp.221 ~ 224, 1984
- 2) 川口昌弘, 柳沼善明, V.R.Macam Jr., 飯井幸弘: 走行荷重によるRCモデルはりの疲労強度実験, 構造工学論文集, Vol.38A, pp.1265 ~ 1274, 1992
- 3) 阿部 忠, 澤野利章, 木田哲量: 走行振動荷重がRC はりの曲げ耐力に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No3, pp. 205 ~ 210, 1999
- 4) 木田哲量, 阿部 忠, 澤野利章: 走行荷重が及ぼすRC はりの曲げ耐力に関する実験的研究: コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No3, pp. 211 ~ 216, 1999
- 5) 阿部 忠, 澤野利章, 木田哲量, 星埜正明, 加藤清志: 走行荷重を受けるRC はりの曲げ耐力および動的影響に関する研究, 第43回日本学術会議材料研究連合講演論文集, pp.177 ~ 178, 1999
- 6) 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(II - 1987), 土木研究所資料, No.2508, 1987.1
- 7) Bakht, B. and Pinjarkar, S.G.: Review of dynamic testing of highway bridges, the Research and Development Branch, Ministry of Transportation of Ontario (OTM), TRB 880532, SPR-89-01, January 1989
- 8) 日本道路橋会: 道路橋示方書・同解説 I, II, III, 1997.12