

走行振動荷重を受けるRCはりの動的影響に関する実験研究

DYNAMIC EFFECT OF RC BEAM UNDER RUNNING VIBRATION-LOAD

阿部 忠*, 木田哲量**, 澤野利章***, 星埜正明**** 加藤清志**

Tadashi ABE*, Tetsukazu KIDA**, Toshiaki SAWANO***, Masaaki HOSHINO**** and Kiyoshi KATO**

* 日本大学助教授 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 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 日本大学助教授 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 日本大学教授 理工学部社会交通工学科 (〒 274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

キーワード：走行振動荷重，RCはり，耐荷力，動的影響係数

(Running vibration-load, RC beam, Load-carrying capacity, Dynamic effect coefficient)

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、伸縮継ぎ手部の段差や路面の凹凸により発生する大型自動車の荷重変動^{1)~3)}も大きな原因の1つであると考えられる。とくに、伸縮継ぎ手の段差部通過後は大きな荷重変動が生じることから、橋梁の両支点付近の床版は当然ひび割れ損傷が生じるものと考えられる。

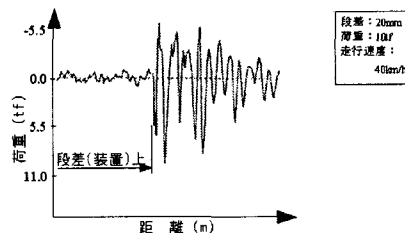
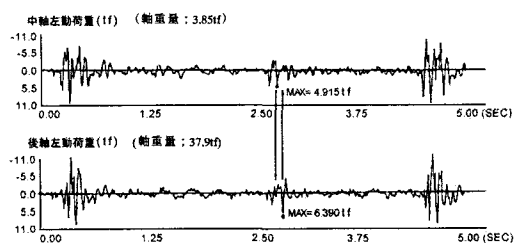
鋼橋RC床版の設計における荷重変動の影響を現行示方書(道路橋示方書・同解説I, II(道示I, II)⁴⁾では、設計支間を関数とする衝撃係数を以て活荷重モーメントを割り増ししている。したがって、現行示方書に規定する衝撃係数は、伸縮継ぎ手の段差により発生する大きな荷重変動の影響、すなわち、荷重振幅を関数とした衝撃係数として取り扱われていない。そこで、筆者らは走行振動荷重が作用するRCはりの動的影響に関する実験研究を行って報告してきた^{5)~7)}。それによると、荷重振幅が±21%以上となると、現行示方書に規定する衝撃係数を上回る結果を得た。

そこで本研究は、幅、有効高さの異なるRCはりを3タイプ用いて、伸縮継ぎ手の段差および路面の凹凸などのために振動を伴って走行する状態、すなわち「振動荷重による走行実験」を行い、RCはりの動的影響を評価した。

2. 実橋に作用する大型自動車の荷重変動

独立行政特殊法人土木研究所では、大型自動車が伸縮継ぎ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、その研究成果を報告している^{1), 2)}。

文献¹⁾では、3軸ダンプトラックの中軸左車輪が段差部通過後のピーク荷重と作用位置を図-1のように示している。また、文献²⁾では、総重量205.8kNの3軸ダンプトラックが伸縮継ぎ手部を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結果を図-2のように示している。両実験の結果によれば、3軸ダンプトラックの荷重変動は橋梁の入口

図-1 ピーク荷重と作用位置¹⁾図-2 大型自動車の荷重変動²⁾

と出口付近で軸重量に対して $\pm 40 \sim 50\%$ 程度生じている。いずれの実験においても段差部通過後は大きな荷重変動が生じている。したがって、鋼橋床版の長寿命化を図るためにも伸縮継ぎ手の段差によって発生する荷重変動、すなわち振動荷重による走行実験を行ってRC部材の動的影響を明確にする必要がある。

3. 実験概要

3.1 移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(400kN)のはりに鋼製の車輪を取り付けた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。走行振動試験装置を図-3に示す。

3.2 実験方法

RC床版の設計衝撃係数は、床版の支間方向が車両進行方向に直角および平行な場合も同じ式を適用している。そこで本実験では、はりの支間方向と車輪の進行方向を平行とする。振動荷重による走行実験方法を図-4に示す。

(1) 振動荷重による走行実験

本実験の振動荷重は、図-2に示す3軸ダンプロックが伸縮継ぎ手を通過した後の荷重変動をモデルとする。したがって、荷重変動を振幅 $\pm 10\%$ 、 $\pm 20\%$ 、 $\pm 30\%$ とした振動数2 Hzの正弦波形による片振り荷重とする。

(2) 走行方法および荷重載荷方法

荷重の走行は図-4(a)に示すように、供試体の支点Aに輪荷重を載荷させた後に振動走行を開始して、支点Bを折り返して元の支点Aに戻るまでの1往復とする。1往復を18sec(平均走行速度22cm/sec)で走行する。載荷方法は動的影響を評価する大きさの荷重までは1往復ごとに荷重を10kNずつ増加させ、その後は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行う。本実験の段階荷重載荷と走行回数を図-5、振動荷重 $\pm 20\%$ の場合の荷重状態を図-6に示す。

(3) 動的影響計測の荷重

動的影響は振動荷重による走行実験の過程で、一定荷重による走行実験(図-4(b))を行い、両者のたわみを計測して考察する。なお、一定荷重による走行実験は、図-5示す弾性域の荷重(Aタイプ

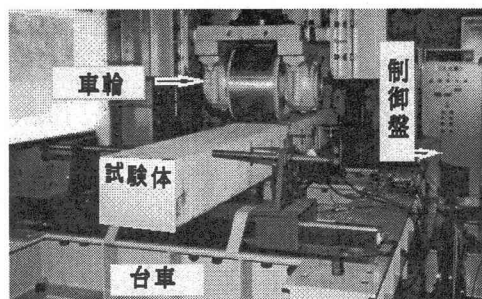


図-3 走行振動試験装置

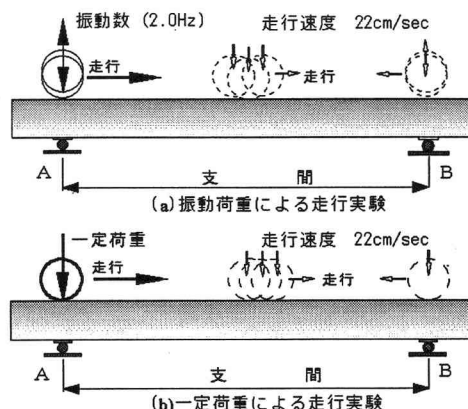


図-4 実験方法

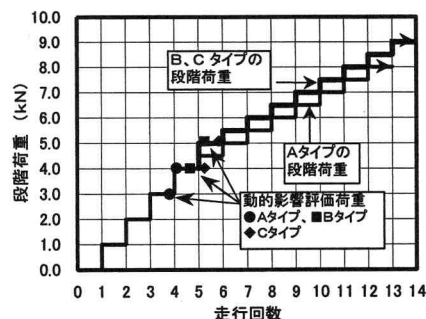


図-5 段階荷重と走行回数との関係

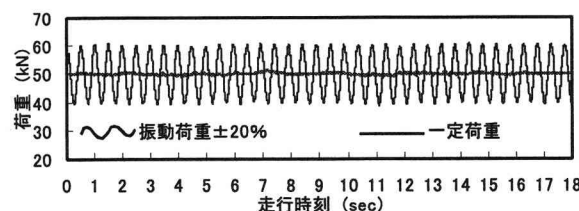


図-6 振動荷重および一定荷重の載荷状態

ブ; 30.0kN, 40.0kN, B, Cタイプ; 40.0kN, 50.0kN) 2種類とする。

4. 供試体寸法および計測方法

本研究では、幅の影響も含めた動的影響を評価する。なお、筆者らは、走行振動荷重が及ぼすRCの動的影響を有効高の異なるRCはりを用いた実験より評価している⁶⁾。そのために、供試体は有効高および幅の異なるRCはり3タイプとし、その断面方

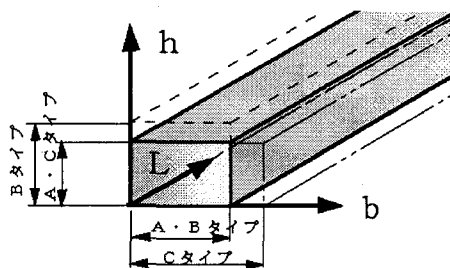


図-7 断面方向のモデル

表-1 材料特性値

供試体	コンクリート	鉄筋 (SD295A, D16)		
	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	38.5	368	568	195.5
Bタイプ	41.5			
Cタイプ	30.0	373	544	200.0

向のモデルを図-7に示す。

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と最大寸法 20mm の粗骨材料を使用した。また、鉄筋は SD295A, D16 を使用した。コンクリートおよび鉄筋の材料特性値を表-1に示す。

4.2 供試体寸法および鉄筋の配置

供試体の支間は 200 cm とし、そ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 40 cm とし、全長 280cm とする。供試体寸法および鉄筋の配置を図-8に示す。

(1) Aタイプの供試体 (M1A)

支間 200cm で、幅 30cm、高さ 21cm とし、鉄筋は引張側に 3 本 ($A_s = 5.96\text{cm}^2$)、圧縮側に 2 本 ($A_{s'} = 3.97\text{cm}^2$) 本配置し、引張鉄筋の有効高さを 17.2cm とする。

(2) Bタイプの供試体 (M1B)

支間長、幅はAタイプ同様に 200cm、30cm とし、鉄筋の配置もAタイプ同様に引張側に 3 本、圧縮側に 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。

(3) Cタイプの供試体 (M1C)

支間長、高さはAタイプ同様に 200cm、21cm とし、幅を 40cm とする。鉄筋は引張側に 4 本 ($A_s = 7.94\text{cm}^2$)、圧縮側に 3 本 ($A_{s'} = 5.96\text{cm}^2$) 配置し、引張鉄筋の有効高さを 17.2cm とする。

4.3 測定位置および計測方法

振動荷重による走行実験の実験衝撃係数は動的増幅率から求めて評価する。そのために、計測点は左支点から 40cm、70cm、100cm、130cm、160cm の

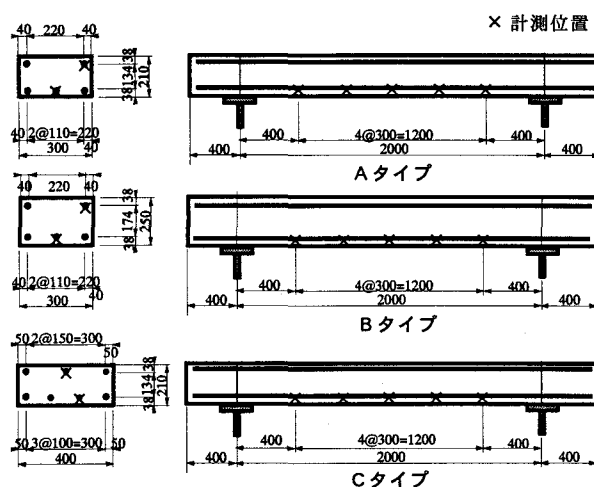


図-8 試験体寸法

の計 5 箇所とする。たわみの計測は走行開始から走行終了までを動的に行うものである。

5. 実験耐荷力および動的影響

5.1. 実験曲げ耐荷力と破壊モード

振動荷重が作用した場合の各供試体の実験耐力を表-2に示す。

次に、破壊モードは、全ての供試体で走行中に支間中央における曲げ破壊である。

振動荷重による走行実験の耐力は、振動荷重 ± 10, 20, 30 % の場合、各タイプともに荷重振幅の上限値と近似した結果が得られた。したがって、耐力に関しては、荷重振幅の大きさは影響しないことが確認できる。

表-2 RCはりの実験耐力

供試体	曲げ耐力(kN)		平均曲げ耐力(kN)	
	最大値	最小値	最大値	最小値
M1A10-1	75.0	61.7	74.6	62.2
M1A10-2	74.0	62.7		
M1A20-1	72.2	50.7	75.8	50.5
M1A20-2	75.3	50.3		
M1A30-1	70.1	40.9	72.8	42.7
M1A30-2	75.4	44.5		
M1B10-1	93.5	74.4	93.8	73.8
M1B10-2	94.0	73.2		
M1B20-1	92.8	63.2	93.7	65.0
M1B20-2	94.6	66.7		
M1B30-1	95.2	54.0	94.5	53.3
M1B30-2	93.8	52.6		
M1C10-1	98.3	80.1	96.1	78.3
M1C10-2	93.9	76.5		
M1C20-1	96.2	64.0	95.8	63.9
M1C20-2	95.4	63.2		
M1C30-1	95.7	51.1	96.3	51.8
M1C30-2	96.8	52.8		

5.2. RCはりの動的増幅率

(1) 振動荷重を受けるRCはりの動的影響

大型車両の走行による橋梁に対する動的影響は、車両が振動しない状態の走行による応答値に対して、振動しながら走行する場合の応答値の割合を示す動的増幅率 DAF (Dynamic Amplification Factor)⁸⁾ として評価している。動的増幅率は橋梁応答の動的影響を評価する方法の1つであり、設計では支間長に対する低減関数とした衝撃係数 ($i = 20/(50 + L)$, L : 設計支間)⁹⁾ を用いている。

本研究においても、振動荷重が作用した場合の動的影響はたわみ応答による動的増幅率 DAF から実験衝撃係数を求めて評価する。

(2) たわみ応答値による動的増幅率 DAF

単純けた橋に走行振動荷重が作用した場合の支間中央におけるたわみ応答の動的増幅率を図-9に示す。

動的増幅率による実験衝撃係数は、実験最大静的たわみ値を基準に、その値と実験最大動的たわみ値の差の比として定義されている。したがって、本研究の走行振動荷重が作用するRCはりの実験衝撃係数 I は、式(1)として与えられる。

$$I = (y_{d\max} - y_{s\max}) / y_{s\max} \quad (1)$$

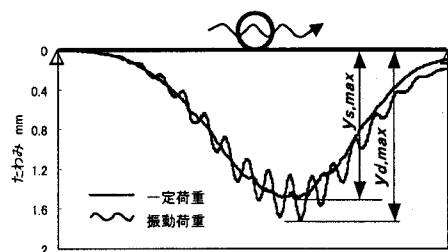


図-9 動的増幅率

ここで、 I : 実験衝撃係数、 $y_{d\max}$: 最大動的たわみ、 $y_{s\max}$: 最大静的たわみ

供試体 MIA20-1 (振動荷重 20%) の場合の動的増幅率の一例を図-10に示す。

5.3 実験衝撃係数および動的影響係数

(1) DAF による実験衝撃係数

動的増幅率は、振動荷重および一定荷重の場合ともに復路で最大値を示している。これは、走行することによる残留たわみが累積された結果である。したがって、実験衝撃係数の算出には、この残留たわみの影響も含むものとして解析する。

なお、図-10に示す動的増幅率から実験衝撃係数を算出する場合は、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、一定荷重の場合の最大

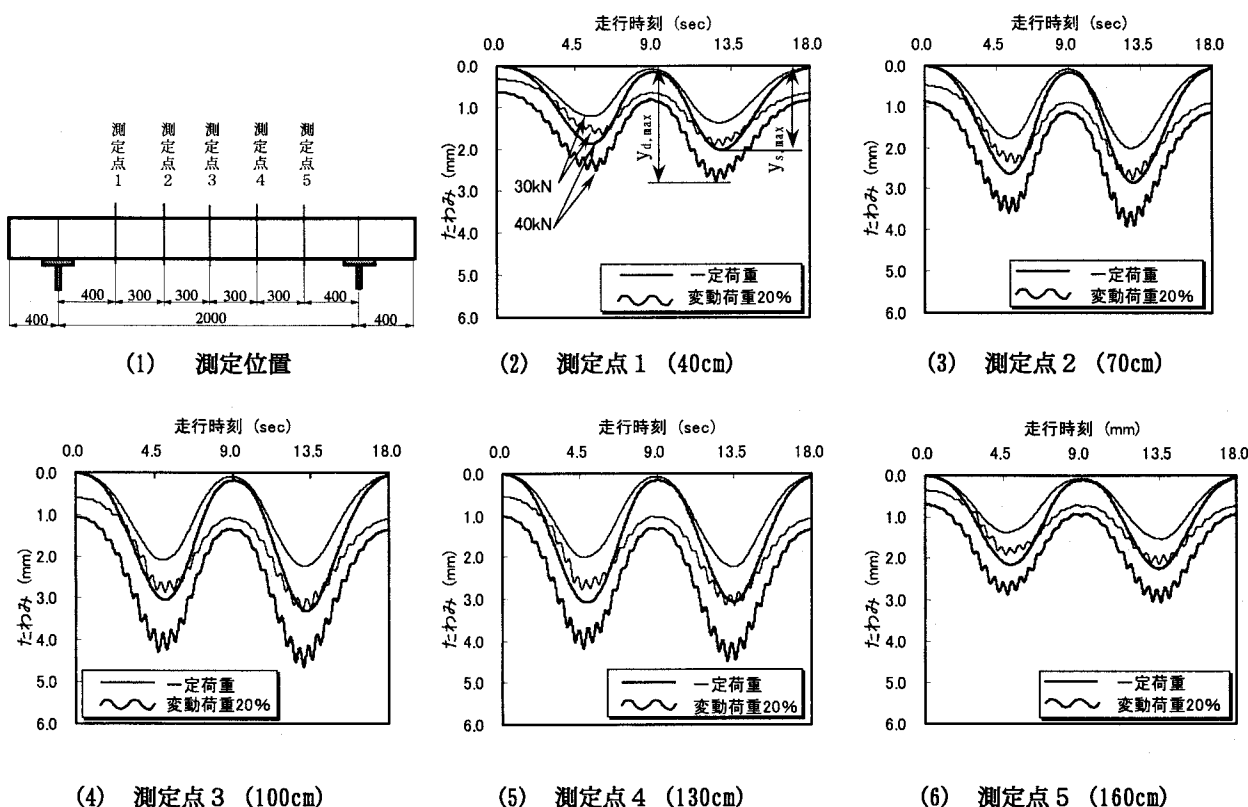


図-10 各測定点の動的増幅率の一例 (MIA20-1)

たわみを最大静的たわみ($y_{s,max}$)として式(1)に適用する。

走行振動荷重が作用するRCはりの実験衝撃係数 I をタイプ別に解析した結果を表-3に示す。

表-3より、振動荷重 $\pm 10\%$ 、 20% 、 30% の場合の実験衝撃係数 I は、Aタイプの場合は、0.243、0.379、0.496であり、Bタイプの場合は、0.234、0.368、0.482、Cタイプは 0.224、0.370、0.483 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。これは、振動荷重によって発生するひび割れが支間全体にわたるためにRCはりの曲げ剛性が低下した結果である。

(2) 荷重振幅と動的影響係数

RCはりに振動荷重 $\pm 10\%$ 、 20% 、 30% が作用した場合に生じる実験衝撃係数は、いずれの場合も与えた荷重振幅以上の係数を得た。そこで、振動荷重による走行実験から得た実験衝撃係数を動的影響係数 α_i と定義し、荷重振幅 K の関数として解析する。その結果を道示Iに規定する支間 2.0m の衝撃係数 i の関係と併せて図-11に示す。

動的影響係数 α_i は、供試体の高さおよび幅の影響に関係なく近似した結果を示している。

なお、図-11に示す式①、②は累乗近似式より得たもので、その相関係数は $r = 1.00$ であり、極めて良好な結果である。

次に、図-11に示す荷重振幅と道示Iの衝撃係数と比較すると、道示Iの衝撃係数を上回る荷重振幅はAタイプで $\pm 20\%$ 、A、B、Cタイプの平均値で $\pm 21\%$ である。したがって、RCはりの有効高および幅は動的影響係数に大きな影響を示さないことが確認された。

(3) 動的影響係数を適用する基準荷重振幅

図-11に示した動的影響係数 α_i と荷重振幅 K の関係に、道示Iに規定する衝撃係数 i を支間長が 2.0m ~ 4.0m までを算出して図-12に示す。図-12より、動的影響係数 α_i が支間 L を関数とする衝撃係数 i を上回る領域においては、RC床版の設計活荷重曲げモーメントを割り増しする必要がある。その場合の領域の境界点となる基準荷重振幅 K_i は、図-12より式(2)、(3)として与えられる。

$$A \text{タイプ} : K_i = -0.52L + 21.3 \quad (2)$$

$$\text{平均値} : K_i = -0.52L + 22.1 \quad (3)$$

(4) 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 K が作

表-3 実験衝撃係数

(1) Aタイプ

供試体	荷重	測定位置					平均値
		40cm	70cm	100cm	130cm	160cm	
MIA10-1	30kN	0.236	0.231	0.213	0.228	0.238	0.243
	40kN	0.253	0.231	0.258	0.264	0.261	
MIA10-2	30kN	0.228	0.256	0.255	0.238	0.234	0.243
	40kN	0.250	0.259	0.264	0.242	0.228	
MIA20-1	30kN	0.376	0.377	0.390	0.379	0.387	0.379
	40kN	0.362	0.368	0.371	0.390	0.385	
MIA20-2	30kN	0.382	0.395	0.364	0.377	0.386	0.379
	40kN	0.366	0.367	0.393	0.368	0.393	
MIA30-1	30kN	0.522	0.496	0.502	0.493	0.493	0.496
	40kN	0.500	0.483	0.496	0.500	0.482	
MIA30-2	30kN	0.486	0.485	0.500	0.501	0.480	0.496
	40kN	0.513	0.503	0.495	0.487	0.505	

(2) Bタイプ

供試体	荷重	測定位置					平均値
		40cm	70cm	100cm	130cm	160cm	
MIB10-1	40kN	0.226	0.240	0.239	0.212	0.206	0.234
	50kN	0.203	0.245	0.254	0.253	0.234	
MIB10-2	40kN	0.233	0.229	0.242	0.220	0.243	0.234
	50kN	0.232	0.237	0.256	0.243	0.229	
MIB20-1	40kN	0.351	0.366	0.370	0.353	0.337	0.368
	50kN	0.390	0.375	0.387	0.353	0.359	
MIB20-2	40kN	0.356	0.356	0.347	0.364	0.381	0.368
	50kN	0.387	0.395	0.360	0.371	0.404	
MIB30-1	40kN	0.453	0.449	0.490	0.479	0.443	0.482
	50kN	0.495	0.468	0.482	0.478	0.478	
MIB30-2	40kN	0.457	0.511	0.476	0.498	0.496	0.482
	50kN	0.480	0.493	0.497	0.522	0.489	

(2) Cタイプ

供試体	荷重	測定位置					平均値
		40cm	70cm	100cm	130cm	160cm	
MIC10-1	40kN	0.203	0.216	0.237	0.230	0.221	0.224
	50kN	0.213	0.221	0.229	0.228	0.221	
MIC10-2	40kN	0.210	0.224	0.236	0.236	0.220	0.224
	50kN	0.209	0.211	0.247	0.234	0.226	
MIC20-1	40kN	0.349	0.354	0.368	0.362	0.357	0.370
	50kN	0.357	0.363	0.375	0.372	0.389	
MIC20-2	40kN	0.334	0.355	0.366	0.373	0.380	0.370
	50kN	0.385	0.363	0.390	0.401	0.403	
MIC30-1	40kN	0.460	0.456	0.487	0.476	0.471	0.483
	50kN	0.492	0.476	0.479	0.475	0.491	
MIC30-2	40kN	0.454	0.483	0.473	0.508	0.506	0.483
	50kN	0.478	0.486	0.519	0.494	0.490	

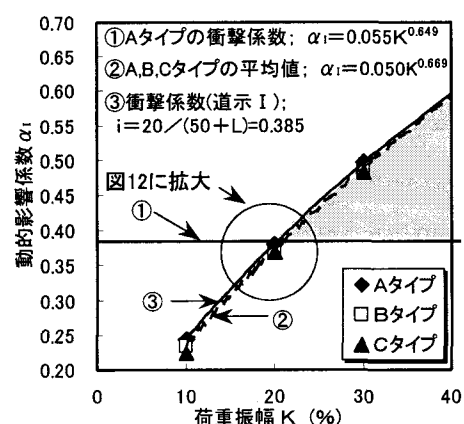


図-11 荷重振幅と動的影響係数

用する場合は、動的影響係数 α_i の適用が必要となる。そこで、道示Iに規定する衝撃係数 i を含めた動的影響係数 α_i は、Aタイプの場合を式(4)、各タ

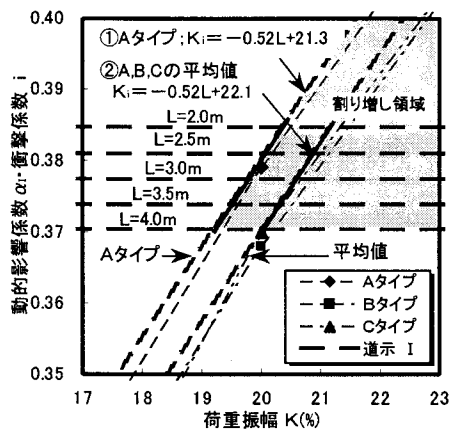


図-12 動的影響係数と荷重振幅の関係

イプの平均値の場合を式(5)として与えられる。

1) Aタイプの場合の動的影響係数； α_i

$$K < K_i ; \alpha_i = i$$

$$K_i \leq K ; \alpha_i = 0.055K^{0.649} \quad (\text{図-11, ①}) \quad (4)$$

ただし、

$$K_i = -0.52L + 21.3$$

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

ここで、 α_i ：動的影響係数、 K ：荷重振幅(%), K_i ：基準荷重振幅、 i ：道示Ⅰの規定によるRCはりの衝撃係数、 L ：支間(m)

2) 平均値の場合の動的影響係数； α_i

$$K < K_i ; \alpha_i = i$$

$$K_i \leq K ; \alpha_i = 0.050K^{0.669} \quad (\text{図-11, ②}) \quad (5)$$

ただし、

$$K_i = -0.52L + 22.1$$

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

なお、有効高さの異なるA、Bタイプの動的影響係数の平均値は $\alpha_i = 0.053K^{0.682}$ である⁶⁾。本報告は、幅の影響を考慮した場合であるが、文献⁶⁾とほぼ近似している。

したがって、走行振動荷重が作用するRCはりには、伸縮継ぎ手の段差を通過するときの荷重振動が±20%以上になると、道示Ⅰの規定する衝撃係数よりも大きく、危険側を示された。したがって、橋梁の両支点付近の床版の設計には式(3)を適用した動的影響係数を用いて、活荷重曲げモーメントの割り増が必要であると考えられる。

7. まとめ

振動荷重の作用による橋梁の両支点部付近のひび割れ損傷に対処するために、現行示方書に規定する衝撃係数に着目し、振動荷重による走行実験を行った結果、次のことが判明した。

①振動荷重±10%、20%、30%の場合の実験耐力は、各試験体ともに荷重振幅の上限値でほぼ近似している。したがって、耐力には荷重振動の影響は及ばない。

②実験衝撃係数(I)は各タイプともにそれぞれの荷重振幅で近似している。したがって、実験衝撃係数には有効高さおよび幅は影響を及ぼさない。

③振動荷重が作用する実験衝撃係数(I)は荷重振幅±20%を超えると、道示Ⅰに規定する衝撃係数(i)を上回る結果となった。

④道路橋RC床版の設計においては、伸縮継ぎ手を通過するときが発生する振動荷重を考慮した動的影響係数を適用することにより、安全な設計が可能である。

参考文献

- 1) 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
- 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(Ⅱ-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, 1997.12
- 5) T. Abe, T. Kida, T. Sawano, M. Hoshino and K. Kato; Flexural Load-Carrying Capacity and Dynamic Effects of RC Beam due to Running Vibration Load, Materials Science Research International, Vol. 6, No.2, pp. 96-103, 2000.6
- 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) 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