

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

Experimental Load-Carrying Capacity and Impact Coefficient of RC Slab Under Running Vibration-Load

木田哲量*・阿部 忠**・西村昌宏***・澤野利章****・徐 銘謙***

Tetsukazu KIDA, Tadashi ABE, Masahiro NISHIMURA, Toshiaki SWANO and Ming-Chien HSU

* 工博 日本大学教授 生産工学部土木工学科(〒275-8575 習志野市泉町1-2-1)

** 日本大学助教授 生産工学部土木工学科(〒275-8575 習志野市泉町1-2-1)

*** 日本大学大学院生産工学研究科土木工学専攻(〒275-8575 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 習志野市泉町1-2-1)

The authors conducted running constant-load and vibration-load tests on RC slabs to quantitatively evaluate the experimental load-carrying capacity and the dynamic effect. The results of the tests showed that the load-carrying capacity of the slabs under running vibration-load was nearly approximate to the maximum running constant-load and upper limit running vibration-load. The dynamic effect of running vibration-load was evaluated from the experimental impact coefficient, which was obtained from the dynamic amplification factor based on deflections. The experimental impact coefficients of RC slabs under running vibration-load having an amplitude of $\pm 20\%$ and $\pm 30\%$ were 0.368 and 0.478, respectively. The present author evaluated a dynamic effect coefficient as a function of load amplitude, because the impact coefficient was larger than the amplitude of live load in each test case.

Keywords: RC slabs, Running constant-load, Running vibration-load, Impact coefficient

キーワード: RC床版, 走行一定荷重, 走行振動荷重, 実験衝撃係数

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。これに対して、道路橋の設計技術基準である道路橋示方書(以下、道示とする)¹⁾は性能規定型の基準を目指して改良され、床版に関する要求項目としては①耐荷力性能、②疲労耐久性能、③材料耐久性能などの基本的な力学性能が指定されている。しかし、①耐荷力性能に寄与する伸縮継手を輪荷重が通過するときに発生する大型車両の振動影響、すなわち荷重変動の大きさを考慮した衝撃係数に関する評価がなされていないのが現状である。

これらのことから筆者らは、RC床版の貫通ひび割れ間隔を想定した RC はりを用いて、走行振動荷重が及ぼす影響、すなわち衝撃係数に関する実験を行ってきた。これによると軸重量(基準荷重)に対して $\pm 21\%$ 以上の荷重変動が発生した場合は、現行道示 I に規定する衝撃係数を上回る動的影響を与えるとされている^{2), 3)}。

そこで本研究は、複鉄筋配置の RC 床版モデルを用い

て、伸縮継手の段差によって発生する荷重変動^{4), 5)}に着目し、荷重変動が RC 床版に及ぼす影響を衝撃係数として定量的に評価するための室内実験を行った。実験では①走行一定荷重実験、②走行振動荷重実験を行い、RC床版の実験耐力を評価する。さらに、走行一定荷重実験による最大たわみと走行振動荷重実験による最大たわみの関係によるたわみ係数および走行振動荷重実験から得たたわみによる動的増幅率から実験衝撃係数を求め、両者の関係より動的影響係数を評価する。

2. 大型自動車の荷重変動およびひび割れ状況

2.1 大型自動車の荷重変動

独立行政法人土木研究所では、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い、大型自動車の荷重変動を図-1のように報告している⁶⁾。これによると、タンデム式ダンプトラックの総重量は中軸で 37.73kN、後軸で 37.14kN であるが、この軸重量に対して、 $\pm 41\% \sim \pm 48\%$ の荷重変動となっている。また、この時の振動数は中軸で 13Hz、後軸で 18Hz 程度となっている。

また、タンデム式ダンプトラックが段差部通過後の荷

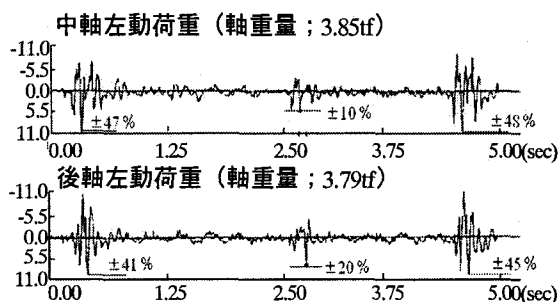
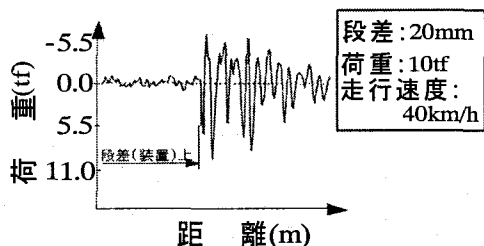
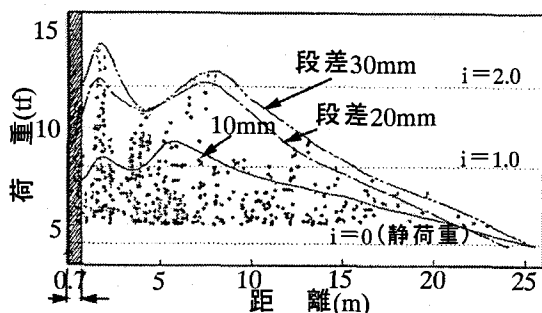


図-1 大型自動車の荷重変動⁴⁾



(1) ピーク荷重と作用位置



(2) 荷重分布および包絡線

図-2 段差部通過後の荷重分布および包絡線⁵⁾

重分布および包絡線は図-2のように報告されている⁵⁾。これによると、タンデム式ダンプトラックが伸縮継手を通過した後の荷重変動の大きさは、図-2(1)に示すように最大 100kN 程度発生している。また図-2(2)では、段差量 20mm の場合の動的係数 $i = 1.0$ をみると、動的係数が 1.0 以下に減衰される位置は段差部から 14m の位置になっている。また、図-2(2)に示すように、自動車の振動系の影響により通過後も過大な振動荷重が衝撃力として作用し、この付近の床版が損傷を受ける原因の1つであると報告している。したがって、実橋の伸縮継手を車両が通過する際には、その近傍の床版に大きな変動荷重が作用することになる。

一方、本田・小堀⁶⁾らは道路橋の路面性状に関する実態調査をもとに、走行自動車の動的応答を解析し、伸縮継手を走行中に生じる自動車の衝撃力についての研究を行っている。これによると、伸縮継手を走行中に過大な衝撃力を橋面に与えている。

したがって、鋼道路橋 RC 床版の長寿命化を図るためにも伸縮継手の段差によって発生する荷重変動、すな

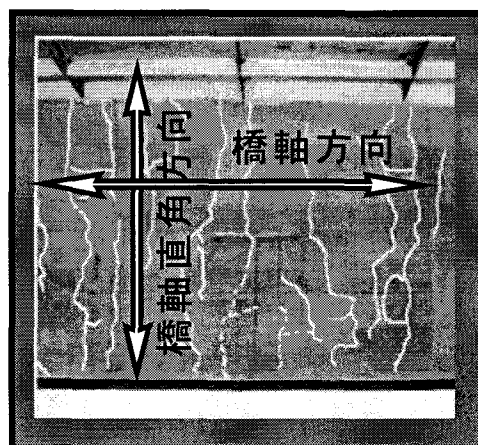


写真-1 実橋 RC 床版のひび割れ状況

わち振動荷重に関する走行実験を行って RC 床版の衝撃影響を明確にする必要があると考えられる。

2.2 鋼道路橋 RC 床版の損傷状況

既存 RC 床版の破損状況や RC 床版の疲労試験結果によると、大型車両の交通量の増大や過積載などにより橋軸直角方向に曲げひび割れが発生し、さらに荷重の繰り返し作用により最終的には陥没に至っている。ここで、実橋のひび割れ損傷状況の一例を写真-1に示す。写真-1は、走行レーンの入り口付近のひび割れ損傷であり、伸縮継手を通過する時に大型車両の衝撃力が最も大きい位置である。

3. 衝撃係数の算定法

3.1 実験衝撃係数の算出方法

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ものである。衝撃係数を検討する場合は、応力ないし曲げモーメント応答を基にした動的増幅率で評価するべきである。しかし、RC 床版のように変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による測定で得たたわみ応答に基づいて算出する場合が多い。したがって、本研究では、たわみ応答値による動的増幅率 DAF (Dynamic Amplification Factor) より衝撃係数を得るものとする。

3.2 たわみ応答による動的増幅率 DAF⁷⁾

単純桁に走行荷重が作用した場合の支間中央におけるたわみ応答による動的増幅率 DAF の概念図を図-3に示す。たわみ応答による動的増幅率は、図-3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値で除したものとして定義し、式(1a)で与えられる。なお、道路橋の DAF による衝撃係数は、

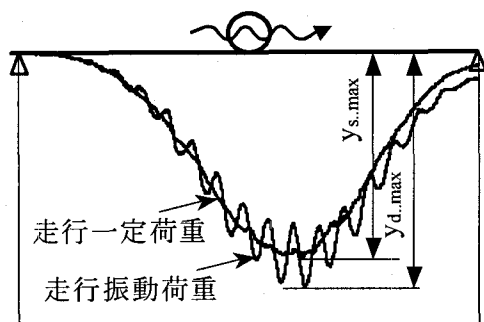


図-3 たわみによる動的増幅率 (DAF) 概念図

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(1b)で与えられる。

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

$$\alpha_t = DAF - 1 \quad (1b)$$

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、 α_t ：実験衝撃係数

4. RC 床版の押し抜きせん断実験

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 20 mm の粗骨材料を使用した。コンクリートの圧縮強度は 32.0N/mm²、弾性係数は 27.2kN/mm² である。また、鉄筋は D10 を用いた。鉄筋の降伏強度は 370N/mm²、弾性係数は 200kN/mm² である。

4.2 供試体寸法および鉄筋の配置

RC 床版供試体は 4 辺単純支持の正方形板とし、その寸法および鉄筋の配置を図-4に示す。

供試体は全長を 147cm、支間 120cm の等方性版とし、鉄筋は複鉄筋配置とした。引張側の軸直角方向および軸方向に D10 を 10cm 間隔で配置し、有効高さをそれぞれ 10.5cm、9.5cm とする。また、圧縮鉄筋量は引張鉄筋量の 1/2 を配置する。

4.3 測定位置および計測方法

本実験の衝撃係数はたわみによる動的増幅率式(1a)、(1b)から算出する。したがって、たわみの計測位置は床版の中央から軸方向に 3 点、軸直角方向は床版中央から左右に 2 点の計 5 点とする。計測位置を図-4に併記した。本実験の計測には東京測器(株)製の変位計 (CDP-50、定格出力；5mV/V ± 0.1%，感度；200×10⁻⁶/mm)、およびデジタル動ひずみ測定器 (DRA-101C、A/D 変換内蔵) を用いた。次に、計測方法は荷重・たわみを車輪が走行開始から終了までの応答値をデータ数 1300 個収録し、これを解析した。

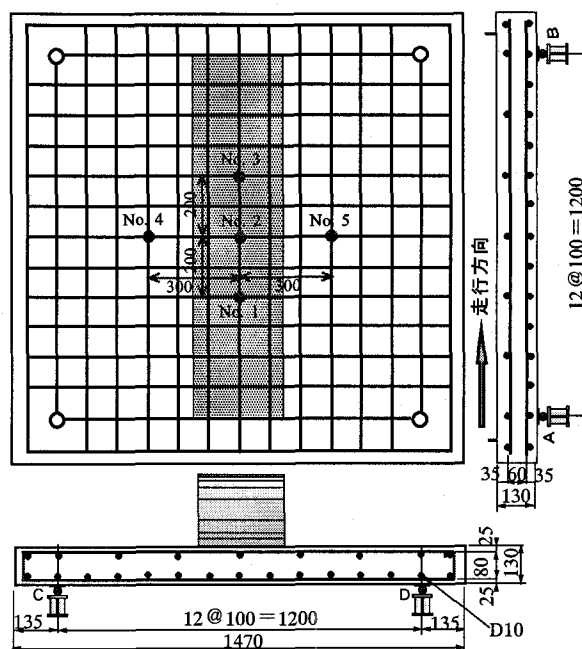


図-4 RC床版供試体寸法および鉄筋配置

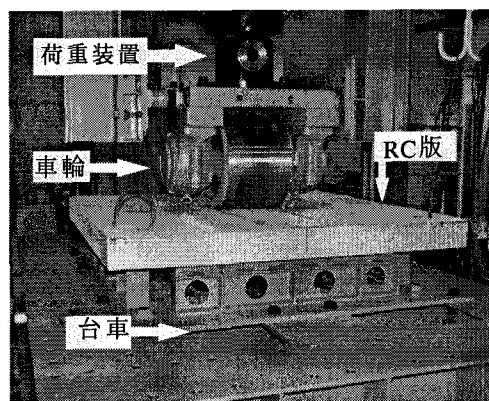


写真-2 実験装置（走行振動試験装置）

5. 実験装置の概要および実験方法

5.1 走行振動試験装置の概要

本実験に用いた走行振動疲労試験装置は、鋼製の反力フレーム (400kN) のはりに、鋼製の車輪 (幅 25cm、直径 45cm) 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。走行振動試験装置を写真-2に示す。

5.2 実験方法

走行一定荷重実験は、最近の RC 床版の疲労問題についての室内実験のほとんどで採用されており、一定な荷重が供試体の上面を走行(移動)するものである。

次に、走行振動荷重実験は、本実験装置の特徴である大型車両の荷重変動およびバネ下振動を想定した振動を伴う荷重が供試体の上面を連続走行するものである。本実験では走行振動荷重実験と称した。実験方法を図-5に示す。

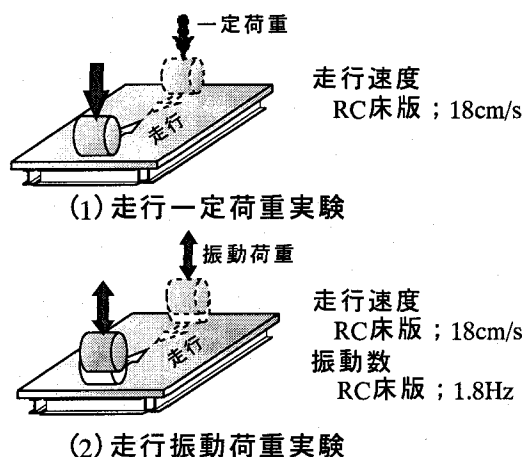


図-5 実験方法

(1) 走行一定荷重実験 (CR)

走行一定荷重実験では図-5(1)に示すように、供試体の支点 A から荷重を移動させ、たわみを動的に計測する。本実験における走行速度は、1 往復 2.4m を 13.0sec で走行する 0.18m/s (0.65km/h) とした。本実験では走行振動荷重実験における振動数との関係により速度を決めた。荷重は 1 走行ごとに大きさ 5.0kN ずつ増加した。

(2) 走行振動荷重実験 (V)

走行振動荷重実験は図-5(2)に示すように、大型自動車の荷重変動を想定した振動荷重が供試体の支点間を走行するものであり、走行一定荷重の場合と同様な走行をさせるものである。

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じた後の荷重変動をモデルとする。図-1に示す大型自動車中軸の軸重量 37.1kN の荷重変動の最大荷重は約 103.7kN であるが、タンデム式の場合は中軸の最大荷重を示した時に、後軸は静荷重程度、すなわち軸重量程度になる応答を示している。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 $\pm 41 \sim \pm 48\%$ となる。また、支間中央付近では、中軸で $\pm 10\%$ 、後軸で $\pm 20\%$ 程度生じている。そこで、本実験では、一往復走行ごとに 5.0kN ずつ増加する荷重の大きさを基準荷重とし、基準荷重に対する荷重振幅を $\pm 20\%$ 、 $\pm 30\%$ とした。本実験における走行一定荷重および走行振動荷重 (荷重振幅 $\pm 20\%$) の場合の荷重状態を図-6に示す。

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 $\sim$ 18Hz である。また、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て、実験供試体の支間長と走行速度から振動数を決定した。

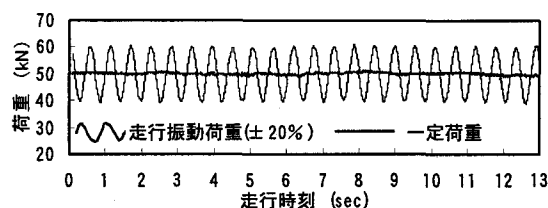


図-6 走行一定荷重・走行振動荷重 ($\pm 20\%$) の一例

本実験では、1 往復 2.4m を 13sec で走行し、振動数を 1.8Hz の片振り荷重とする。

3) 実験衝撃係数

荷重変動が及ぼす RC 床版の衝撃係数は、走行振動荷重実験の過程で、大きさが一定な荷重で走行 (図-5(1)) したときの、静的最大たわみを計測し、たわみ応答による動的増幅率から実験衝撃係数を求める。そこで、実験衝撃係数を求める荷重は、大きさが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荷重 2 点 (60kN, 70kN) とする。なお、走行一定荷重実験における軸直角方向および軸方向に配置した引張鉄筋のひずみの降伏荷重平均値はそれぞれ 132.5kN, 137.5kN である。また、筆者らは、本供試体と同じ供試体を用いて静荷重による押し抜きせん断耐力に関する実験結果を報告⁹⁾している。これによると、押し抜きせん断耐力の平均値は 223.4kN であり、本実験の衝撃係数を得る荷重 (60kN, 70kN) は静的耐力の 30 % 程度の荷重である。

6. 実験・理論耐力および破壊モード

6.1 実験耐力

本実験における RC 床版の実験耐力および破壊モードを表-1に示す。走行一定荷重および走行振動荷重の場合の耐力とは、本実験の荷重載荷条件のなかで、1 往復走行を維持し得た最大荷重とする。

供試体 120x13 タイプにおける走行一定荷重の場合の平均最大耐力 (CR_F) は 183.1kN であり、走行振動荷重の場合の上限荷重 (V_{F0}) は荷重振幅 $\pm 20\%$ の場合で 183.0kN であり、その耐力比 (V_{F0}/CR_F) は 1.00 となり、近似している。また、荷重振幅 $\pm 30\%$ の場合では 178.1kN となり、走行一定荷重との耐力比は 0.97 となり、3% 耐力低下がみられた。

6.2 破壊状況

本実験の走行一定荷重および走行振動荷重の場合の破壊状況 (クラッキングマップ) を図-7に示す。なお、ひび割れ性状は供試体 CR-1, V20-1, V30-1 に関するものである。各実験における破壊モードを表-1に併記した。

走行一定荷重の場合は図-7(1)に示すように、供試体上面は軸直角方向の走行面にひび割れが発生し、とくに

表-1 実験耐力および破壊モード

供試体	最大耐力(kN)			平均最大耐力(kN)			耐力比 V_{PU}/CR_p	最大たわみ (mm)	破壊モード
	上限荷重 P_U	軸重量 P	下限荷重 P_L	上限荷重 P_U	軸重量 P	下限荷重 P_L			
120×13-CR-1	—	184.3	—	—	183.1	—	—	9.6	曲げ卓越型押し抜きせん断破壊
120×13-CR-2	—	181.9	—	—	183.1	—	—	11.7	曲げ卓越型押し抜きせん断破壊
120×13-V20-1	186.1	154.7	123.2	183.0	151.9	120.9	1.00	9.5	曲げ卓越型押し抜きせん断破壊
120×13-V20-2	179.8	149.2	118.6	183.0	151.9	120.9	1.00	10.1	曲げ卓越型押し抜きせん断破壊
120×13-V30-1	181.6	140.5	99.3	178.1	137.4	96.7	0.97	9.1	曲げ卓越型押し抜きせん断破壊
120×13-V30-2	174.5	134.3	94.1	178.1	137.4	96.7	0.97	10.6	曲げ卓越型押し抜きせん断破壊

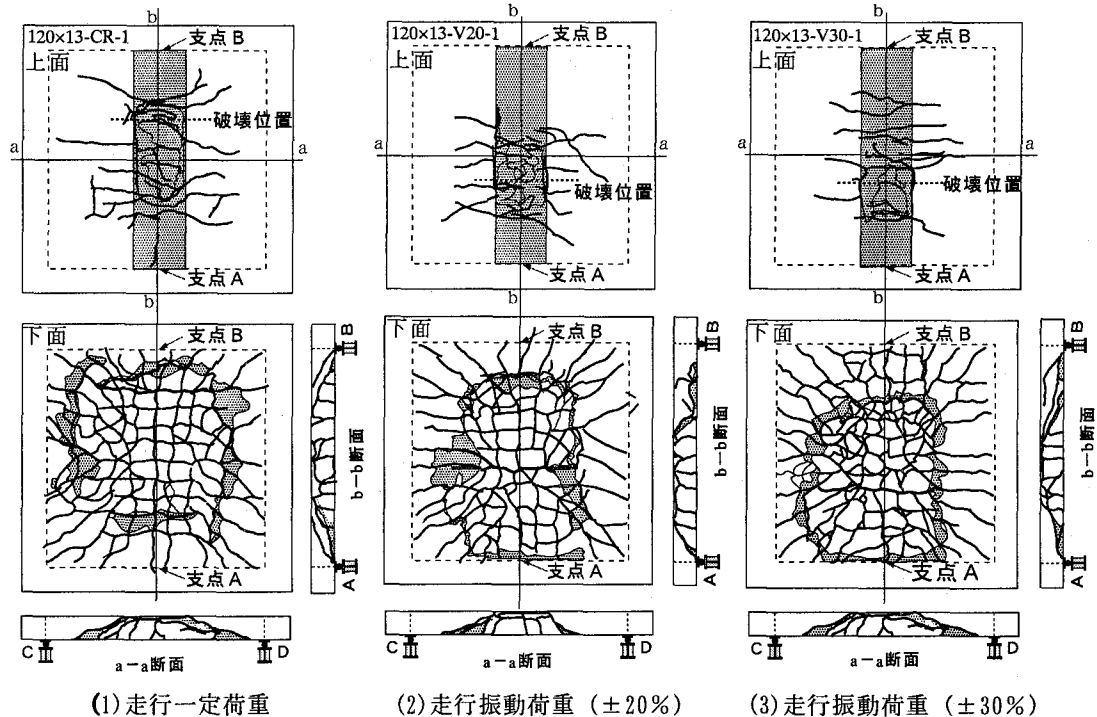


図-7 最終押し抜き破壊性状

押し抜き破壊付近に集中している。破壊位置は、供試体 CR-1 は支点 B から 40cm の位置の位置で破壊している。この供試体上面には破断線方向のひび割れは見られない。なお、下面は軸直角方向および軸方向ともに 10cm 間隔で発生し、格子状を形成している。軸直角方向の断面 (a-a) は、車輪直下から約 30 ~ 45 度のせん断破壊面を形成し、ダウエル効果によるはく離が生じている。また、軸方向(b-b)は軸直角方向の下縁に発生したひび割れが荷重の増加と走行を繰り返すことにより中立軸まで伸展し、曲げ卓越型のひび割れ形状を示している。なお、軸方向のせん断破壊形状は、破壊時に生じたものである。したがって、破壊モードは曲げ卓越型の押し抜きせん断破壊⁹⁾となった。なお、単鉄筋の場合は栗橋・三上らの FRP シートで下面を補強した RC 床版の耐衝撃挙動に関する実験に関する報告がなされているように、荷重載荷位置から 45° の押し抜きせん断破壊となる¹⁰⁾。

次に、走行振動荷重 ± 20 % の場合は図-7(2)に示すように、供試体上面は走行一定荷重の場合とほぼ同様であるが、下面のひび割れは、格子状に発生したひび割れと破断線方向に沿ったひび割れの交差がより著しく発生している。また、破壊面はダウエル効果によるはく離も

著しい。破壊位置は支点 A から 50cm の位置となっている。また、軸直角方向はせん断面を形成しているが、軸方向は圧縮鉄筋により荷重が分散されているために両支点付近までせん断破壊面を形成しているが、これは走行一定荷重の場合と同様に破壊時に生じたものである。したがって、軸方向は曲げの影響によるひび割れが卓越した破壊である。

さらに、走行振動荷重 ± 30 % の場合は図-7(3)に示すように、ひび割れの発生およびコンクリートのはく離が著しい。支点 A から 50cm の位置で破壊に至っている。破壊モードは一定荷重の場合と同様に曲げ卓越型の押し抜きせん断破壊となった。

走行一定荷重と走行振動荷重のひび割れ状況を比較すると、走行振動荷重の場合のひび割れ損傷の著しさが観察された。

7. たわみ係数と実験衝撃係数

走行車両が伸縮継手の段差を通過するときを生じる衝撃問題は、本実験で得た①走行一定荷重実験による最大たわみと走行振動荷重実験による最大たわみとの関

係から求めるたわみ係数 ξ_i 、②走行振動荷重実験におけるたわみによる動的増幅率から得た実験衝撃係数 α_i の2つの観点から定量的に評価する。

7.1 たわみによるたわみ係数； ξ_i

本実験における床版中央（No.2）の荷重とたわみとの関係を図-8に示す。なお、本実験におけるたわみ値は、走行開始から終了までの13sec間を動的に計測したたわみ応答値のうちの最大値である。

(1) 荷重とたわみの関係

図-8より、本供試体は走行一定荷重によるたわみが5mmから増加が著しく、最大たわみは供試体CR-1、2で、それぞれ9.6mm、11.7mmである。また、走行振動荷重の場合は4mmからたわみが著しく増加し、最大たわみは供試体V20-1、2で、それぞれ9.5mm、10.1mmであり、供試体V30-1,2で9.1mm、10.6mmである。本供試体の最大たわみを表-1に併記した。

(2) たわみ係数

図-8より、走行一定荷重の最大たわみと走行振動荷重の最大たわみとを比較すると、走行振動荷重による最大たわみは全ての荷重で増大している。この走行一定荷重によるたわみに対する増加割合をたわみ係数 ξ_i と定義し、式(2a)、(2b)で与えた。

$$\xi_i = (\delta_{v \cdot \max} / \delta_{CR \cdot \max}) \quad (2a)$$

$$\xi_i = \xi_i - 1.0 \quad (2b)$$

ここで、 $\delta_{v \cdot \max}$ ：走行振動荷重実験による最大たわみ、 $\delta_{CR \cdot \max}$ ：走行一定荷重実験による最大たわみ

引張鉄筋が降伏した荷重値までのたわみ係数 ξ_i を求めて表-2に示す。

床版中央におけるたわみから得たたわみ係数は、供試体V20-1,2で0.336,0.344、供試体V30-1,2で0.448,0.456であり、いずれも与えた荷重振幅（±20%：0.200、±30%：0.300）に対して供試体V20-1,2で1.68倍（=0.336/0.200）、1.72倍（=0.344/0.200）、供試体V30-1,2で

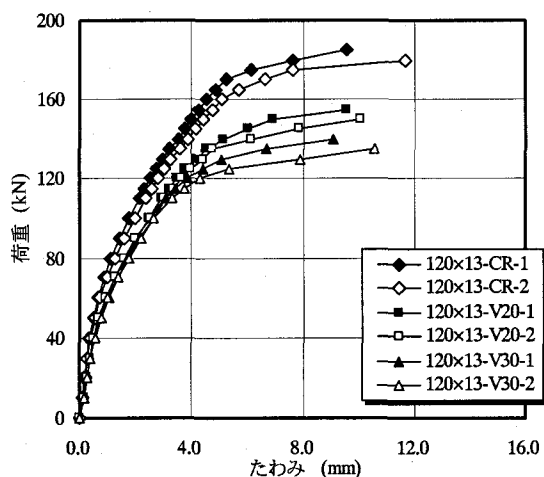


図-8 荷重とたわみとの関係

表-2 たわみ係数

荷重	V20-1	V20-2	平均値	荷重	V30-1	V30-2	平均値
10kN	0.376	0.394	0.385	10kN	0.395	0.448	0.422
20kN	0.352	0.333	0.343	20kN	0.514	0.366	0.440
30kN	0.335	0.382	0.358	30kN	0.522	0.424	0.473
40kN	0.376	0.319	0.347	40kN	0.441	0.493	0.467
50kN	0.400	0.339	0.369	50kN	0.491	0.536	0.514
60kN	0.344	0.337	0.340	60kN	0.483	0.452	0.467
70kN	0.371	0.357	0.364	70kN	0.468	0.495	0.482
80kN	0.346	0.308	0.327	80kN	0.433	0.486	0.459
90kN	0.304	0.303	0.303	90kN	0.420	0.444	0.432
100kN	0.301	0.345	0.323	100kN	0.396	0.418	0.407
110kN	0.266	0.329	0.297	110kN	0.368	0.453	0.411
115kN	0.267	0.363	0.315				
平均	0.336	0.344	0.340	平均	0.448	0.456	0.452

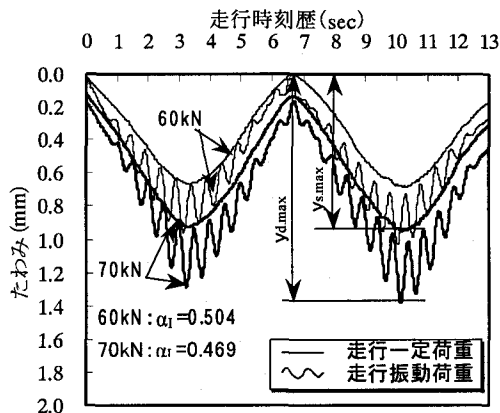


図-9 たわみ応答による動的増幅率（一例）

1.49 倍（= 0.448/0.300）、1.52 倍（= 0.456/0.300）となった。

なお、たわみ係数は走行一定荷重および走行振動荷重ともに、走行中における残留たわみが累積された結果である。

7.2 動的増幅率による実験衝撃係数； α_i

供試体 120x13-V30-1 における床版中央（No.2）のたわみによる動的増幅率の一例を図-9に示す。

図-9に示すたわみによる動的増幅率における走行時刻歴 0sec が支点 A であり、6.5sec 付近が支点 B、13sec が元の支点 A の位置である。

たわみによる動的増幅率から実験衝撃係数を算出する場合は、走行振動荷重実験による最大たわみを最大動的たわみ（ $y_{d \cdot \max}$ ）とし、走行振動荷重実験の過程で一定な荷重で走行した場合の最大たわみを最大静的たわみ（ $y_{s \cdot \max}$ ）として、式(1a)、(1b)を適用する。よって、実験衝撃係数は計測点 No.1 ～ No.5 を求めて表-3に示す。

表-3より、供試体 V20-1, 2 の実験衝撃係数の平均値は 0.377, 0.358 であり、与えた荷重振幅に対して、それぞれ 1.89 倍（= 0.377/0.200）、1.79 倍（= 0.358/0.200）の衝撃係数が得られた。次に、供試体 V30-1, 2 の実験衝撃係数の平均値は 0.486, 0.469 であり、与えた荷重振幅に対して 1.62 倍（= 0.486/0.300）、1.56 倍（= 0.469/0.300）となった。

7.3 たわみ係数および実験衝撃係数の評価式

本実験におけるたわみ係数および実験衝撃係数は、ともに与えた荷重振幅（±20%：0.200、±30%：0.300）

以上の結果となった。そこで、軸重量（基準荷重）に対する荷重振幅を変数として作用させたことから、本実験の荷重振幅を荷重変動率 V_k と定義する。なお、荷重変動率 V_k は、表-3に示した荷重振幅の上限荷重 P_u と軸重量 P から、式(3)より算出し、表-3に併記した。

$$V_k = \{(P_u/P) - 1\} \times 100 \quad (3)$$

ここで、 V_k ：荷重変動率(%), P_u ：上限荷重(kN), P ：軸重量(kN)

本実験における作用荷重振幅が± 20 %, ± 30 % であるのに対して、荷重変動率 V_k をみると約± 1.0 % の差異生じている。これは供試体の表面の凹凸によるものであると考えられる。

ここで、たわみ係数 ξ_i ・実験衝撃係数 α_i と荷重変動率 V_k の関係を図-10に示す。なお、RC はりの場合の実験衝撃係数⁶⁾も図-10に併記した。

図-10より、走行一定荷重実験の最大たわみと走行振動荷重実験の最大たわみから得たたわみ係数 ξ_i と走行振動荷重実験のたわみによる動的増幅率から得た実験衝撃係数 α_i とを比較すると、実験衝撃係数がやや大きめとなった。これは、たわみ係数を算出する場合の走行一定荷重によるたわみが、各荷重ごとのひび割れ発生による残留たわみが累積された結果であるのに対して、実験衝撃係数は荷重 60kN, 70kN のみで一定な荷重で走行した結果によるものである。また、RC はりの場合と比較すると、やや下回った。そこで、図-10より荷重変動率 V_k を関数とするたわみ係数 ξ_i および実験衝撃係数 α_i を定義する。

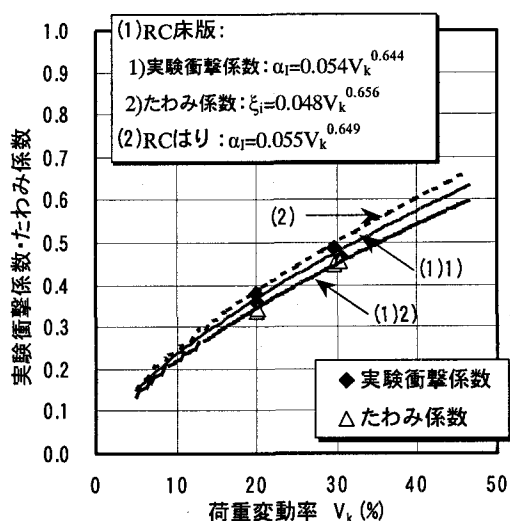


図-10 衝撃係数と荷重変動率との関係

表-3 実験衝撃係数

供試体	荷重変動率 V_k				実験衝撃係数					平均値	平均値
	P_U (kN)	P (kN)	$(P_U/P)-1$	V_k (%)	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5		
120×13-V20-1	72.32	60.08	0.204	20.4	0.365	0.417	0.352	0.413	0.373	0.377	0.368
	83.44	69.74	0.196	19.6	0.339	0.405	0.392	0.379	0.334		
120×13-V20-2	71.80	60.13	0.194	19.4	0.339	0.365	0.403	0.424	0.329	0.358	
	86.70	71.75	0.208	20.8	0.381	0.359	0.328	0.345	0.307		
120×13-V30-1	76.95	59.65	0.290	29.0	0.444	0.504	0.499	0.458	0.510	0.486	0.478
	92.10	70.73	0.302	30.2	0.436	0.469	0.428	0.426	0.439		
120×13-V30-2	78.54	60.16	0.306	30.6	0.424	0.464	0.427	0.472	0.447	0.469	
	90.98	69.84	0.303	30.3	0.533	0.533	0.451	0.455	0.461		

(1) たわみ係数 ξ_i

図-10より、荷重変動率 V_k を関数としたたわみ係数 ξ_i を定式化すると、式(4)として与えられる²⁾。

$$\xi_i = 0.048V_k^{0.656} \quad (4)$$

ここに、 ξ_i ：たわみ係数, V_k ：荷重変動率(%)

(2) 実験衝撃係数： α_i

荷重変動率 V_k を関数とした実験衝撃係数 α_i を定式化すると、式(5)として与えられる。

$$\alpha_i = 0.054V_k^{0.644} \quad (5)$$

ここに、 α_i ：実験衝撃係数, V_k ：荷重変動率(%)

なお、相関係数はたわみ係数の場合は $\gamma = 0.989$, 実験衝撃係数は $\gamma = 0.979$ であり、極めて良好な結果である。RC はりのみ場合は $\alpha_i = 0.055V_k^{0.649}$ である³⁾。

7.4 荷重変動を考慮した衝撃係数の適用

車両が伸縮継手を通過するときに発生する荷重変動（図-1, 2）は、橋梁の両端部支点付近で軸重量に対して± 41 %～± 48 %生じている。この付近の床版は大きな荷重変動による動的影響を受けている。そこで、図-2(2)に示した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の損傷問題の解決策のひとつとして、道示Ⅱに規定する活荷重モーメント式に本実験より得た衝撃係数を割り増しする必要がある。ここで、荷重変動率による RC 床版の実験衝撃係数を式(5)より算出すると、荷重変動率 20 % の場合 $\alpha_i = 0.372$, 30 % の場合 $\alpha_i = 0.483$, 40 % の場合 $\alpha_i = 0.581$ となる。

本実験による実験衝撃係数 α_i を適用する場合は、道示Ⅰに規定する衝撃係数 ($i = 20/(50 + L)$, L ：設計支間(m))とを比較して大きい方で RC 床版の設計曲げモーメントを割り増しする必要がある。そこで、実験衝撃係数(α_i)および衝撃係数(i)を適用する境界線を基準荷重振幅 V_{kk} とし、設計支間 L と基準荷重振幅 V_{kk} の関係として図-11に示す。図-11より、設計支間 2.0m の場合は道示Ⅰに規定する衝撃係数は $i = 0.385$, 基準荷重振幅は $V_{kk} = 21.2$ % であり、設計支間 4.0m の場合は衝撃係数 $i = 0.370$, 基準荷重振幅は $V_{kk} = 19.9$ % である。したがって、設計支間 L を関数とす

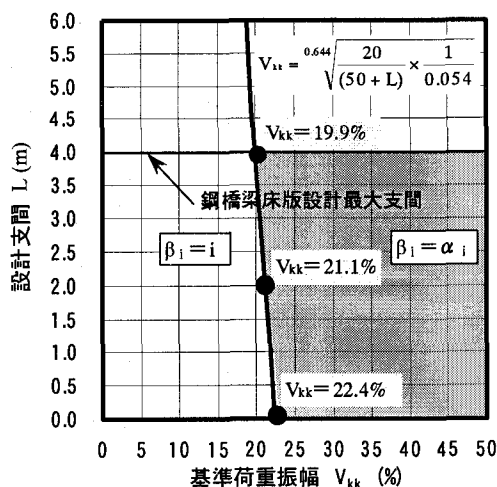


図-11 設計支間と基準荷重振幅の関係

る基準荷重振幅 V_{kk} は、式(6)として与えられる。

$$V_{kk} = \frac{0.644}{\sqrt{(50 + L)}} \times \frac{1}{0.054} \quad (6)$$

ここで、 V_{kk} ：基準荷重振幅(%), L ：床版支間(m)

したがって、RC 床版の設計活荷重モーメントを割り増しする場合、基準荷重振幅 V_{kk} に対して荷重変動率 V_k が小さい場合は道示Ⅰに規定する衝撃係数(i)、荷重変動率が大きい場合は本実験式(5)を適用し、これらを動的影響係数と定義する。よって、設計活荷重曲げモーメントは式(7)で与えられる。

$$M_{L(1+\beta_i)} = M_L \cdot (1 + \beta_i) \quad (7)$$

ただし、

$$\begin{aligned} V_k &\leq V_{kk}; \beta_i = 20/(50+L) \\ V_k &> V_{kk}; \beta_i = 0.054 V_k^{0.644} \end{aligned}$$

ここで、 $M_{L(1+\beta_i)}$ ：RC 床版の動的影響係数を含む設計活荷重モーメント($\text{kN}\cdot\text{m/m}$)、 M_L ：RC 床版の設計活荷重モーメント($\text{kN}\cdot\text{m/m}$)、 β_i ：動的影響係数、 V_{kk} ：基準荷重振幅、 V_k ：荷重変動率

なお、動的影響係数の適用に際しては、伸縮継手の段差部により発生する荷重振幅を明確にし、本提案式を適用することにより、合理的な耐久性のある床版の設計が可能となる。

8. まとめ

本研究は、道路橋示方書が性能照査型設計の基準を目指し、改訂されたことに伴い、その要求項目の1つである RC 床版の耐荷力性能要求に対して、大型車両の荷重変動が及ぼす衝撃係数を定量的に評価するため、RC 床版供試体を用いて実験を行った結果、以下の結論を得た。

① RC 床版の最大耐力は、走行振動荷重の場合と走行一定荷重の場合とが近似している。したがって、本研究の範囲内では荷重振幅の大きさは耐力に大きな影響を及ぼさない結果となった。

② 荷重とたわみの関係からは、走行振動荷重は作用荷重振幅以上の衝撃係数を生じさせた。これは、振動荷重の影響によるひび割れが曲げ剛性を低下させ、たわみが増大したためである。

③ たわみによる動的増幅率から得た実験衝撃係数は、 $\pm 20\%$ で0.368、 $\pm 30\%$ で0.478となり、荷重振幅に対して約1.8倍～1.6倍生じていることから、伸縮装置の段差量を最小限にするなどの維持管理を行なうことでライフサイクルコスト低減が可能であると考えられる。

④ 伸縮継手の段差部により発生する荷重変動と減衰距離を明確にし、荷重変動が及ぼす動的影響を活荷重モーメントに割り増しするとした、本提案式は耐荷力性能を定量的に評価することに有用である。

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) 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.
- 3) 阿部 忠、木田哲量、澤野利章、星埜正明、加藤清志：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、第6回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集、土木学会、構造工学技術シリーズ No.26, pp.7-12, 2002.
- 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.2508, 1987.
- 5) 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.
- 6) 本田秀行、小堀為雄：道路橋の伸縮継装置部に与える走行自動車の衝撃力と路面性状の影響、土木学会第41回年次学術講演会、Ⅰ-472, pp.943-944, 1986.
- 7) 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, 1989.3
- 8) 中野孝紀、木田哲量、阿部 忠、水口和彦：走行荷重を受けるRC床版の押し抜きせん断耐力、第58回土木学会年次学術講演会講演論文集V-371, pp.741-742, 2003.
- 9) 小澤満津雄、内田裕市、小柳 治：RC スラブの押し抜きせん断破壊機構に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告書、日本コンクリート工学協会、Vol.21, No.3, pp.565-570, 1999.
- 10) 栗原祐介、三上 浩、田口史雄、岸 徳光：FRP シートで下面補強した RC 床版の耐衝撃挙動に関する一考察、第6回構造物の衝撃問題に関するシンポジウム論文集、土木学会、構造工学技術シリーズ No.26, pp.105-110, 2002. (2003年9月12日受付)