

# RC 床版の走行振動疲労荷重による動的影響と疲労寿命の低下率

木田哲量, 阿部忠, 澤野利章 (土木工学科)

## 1. はじめに

鋼道路橋 RC 床版は、交通量の増大、過積載車の走行による疲労寿命の低下や伸縮継手、路面の凹凸によって発生する荷重変動によるひび割れ損傷が生じた。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大型自動車の荷重変動に着目し<sup>1), 2)</sup>荷重変動が RC 床版に及ぼす動的影響を評価するための室内実験を行った。

本研究では、RC 床版が耐用年数内に走行振動荷重によって受ける動的影響を評価する。実験では、RC 床版モデルに走行一定荷重および走行振動荷重による 40,000 回走行による疲労損傷を与え、設計荷重と作用荷重との関係から大西ら<sup>3)</sup>が提案している等価繰り返し回数をもとに実験衝撃係数を評価した。また、静荷重実験による最大耐荷力と走行一定荷重および走行振動荷重による段階荷重実験の残存耐荷力から耐荷力の低下率を検証するとともに段階荷重実験における等価繰り返し回数から疲労寿命の低下率も検証した。

## 2. 供試体の材料および寸法

### 2.1 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、粗骨材には栃木県栗野町産の最大寸法 20mm の骨材を使用した。また、鉄筋は SD295A, D10 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。

### 2.2 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<sup>5)</sup>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 2000 台以上を想定した単純 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。

供試体の支間長を 120cm, 供試体の張り出し部は 13.5cm

表-1 供試体の材料特性値

供試体	鉄筋 (SD295A, D10)			
	コンクリート 圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	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>
RC床版	35.0	370	511	200

とし、全長は 147cm 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 10.5cm とした。また、配力筋すなわち軸方向には D10 を 10cm 間隔で配置し、有効高さは 9.5cm 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 20cm 間隔とした。

## 3. 実験方法および等価繰り返し回数・衝撃係数の算出

### 3.1 静荷重実験

RC 床版供試体の静荷重実験は、床版中央で荷重を載荷する実験である。荷重の大きさを 0kN から 5.0kN ずつ供試体が破壊するまで増加する。静荷重実験における最大耐荷力を基準耐荷力とする。静荷重実験の場合の供試体名称は S とし、供試体は 2 体用いた。

### 3.2 走行一定荷重による疲労実験および段階荷重実験

#### 1) 走行一定荷重による疲労実験

走行一定荷重による疲労実験は、荷重 60kN 載荷して 1 往復 1.6m (片側 80cm) を 9.0sec で走行させる実験であ

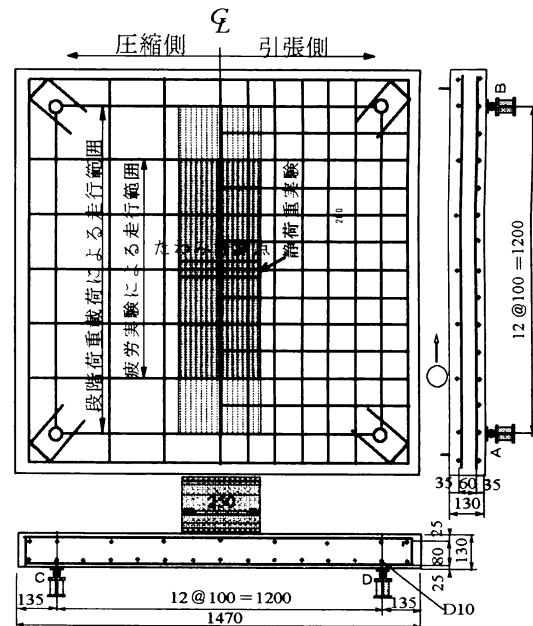


図-1 RC 床版供試体寸法および鉄筋配置

Dynamic Effect and Reduction Ratio of Fatigue life of the RC Slab by Running Vibration Fatigue Loads

Tetsukazu KIDA, Tadashi ABE and Toshiaki SWANO

る。輪荷重走行範囲は、輪荷重が 45° で RC 床版に分布するものと仮定して、輪荷重が床版支間内に分布する範囲とする。この走行範囲を図-1に併記した。一般に、走行荷重による疲労実験では、40,000 回走行ごとに荷重を増加する段階荷重載荷法が採用されているが、本実験は走行振動疲労荷重による動的影響を評価することから走行回数を 40,000 回(= 0.80m×40,000 = 32,000m) とする。実験では 1, 10, 100, 1,000, 5,000 回、および 5,000 回以降は 5,000 回ごとに最大荷重までの増加と最大荷重から最小荷重までの除荷をする漸増荷重載荷実験を行い、各走行回数ごとに荷重とたわみを計測する。この場合の供試体名称を CR-F とし、試験体は 2 体用いた。

## 2) 走行一定荷重による段階荷重実験

走行一定荷重による 40,000 回走行疲労実験後に、走行一定荷重による 1 往復ごとに荷重を増加する段階荷重実験を行い、残存耐力を評価する。各荷重載荷方法は、荷重 0.0kN から 1 走行ごとに 5.0kN ずつ増加し、走行方法は図-1に示す支点 A から支点 B を折り返す 1 往復(片側 1.2m) とする。また、走行時間は一往復 14sec とした。なお、走行範囲を 1.2m とした理由は、疲労実験の場合は設計荷重の 1.2 倍の荷重(60kN)であることから破壊に至ることはない。しかし、段階荷重載荷の場合は荷重増加中に破壊することが考えられるので支点上で、荷重を増加して支点間を走行させたためである。

## 3.3 走行振動荷重による疲労実験および段階荷重実験

### (1) 走行振動荷重による疲労実験

走行振動荷重による疲労実験は、基準荷重 60kN に対する荷重振幅を ±20 % (最大荷重 72kN, 最小荷重 48kN) と ±30 % (最大荷重 78kN, 最小荷重 42kN) の 2 タイプとする。振動数は 1.8Hz の正弦波形による片振り荷重載荷とする。走行速度は走行一定荷重の場合と同様に 1 往復 1.6m (片側 80cm) を 9.0sec で走行する。走行回数は 40,000 回(振動数 324,000 回, 走行距離 32,000m) までとする。実験は 1, 10, 100, 1,000, 5,000 回および 5,000 回以降は 5,000 回ごとに走行一定荷重の場合と同様に漸増荷重載荷実験を行い、各走行回数ごとに、荷重とたわみを計測する。また、走行振動荷重 ±20 % の供試体名称を V-20-F, ±30 % の供試体を V-30-F とし、各 4 体製作した。走行振動荷重による疲労実験で 4 体用いて実験衝撃係数を算出するが、残存耐力には各 2 体 (V20-F1, V20-F2 および V30-F1, V30-F2,) 用いる。

### (2) 走行振動荷重による段階荷重実験

走行振動荷重による 40,000 回走行の疲労実験後の残存耐力は、走行振動荷重による一往復ごとに荷重を増加させる段階荷重載荷実験を行い、残存耐力を評価する。荷重載荷方法は、荷重 0.0kN から 1 走行ごとに 5.0kN ずつ増加し、走行は支点 A から支点 B を折り返す 1 往復 2.4m (片側 1.2m) とする。また、走行時間は一往復 13sec

で、振動数を 1.8Hz の片振り荷重とする。

本実験では、走行振動荷重で 40,000 回走行させた場合の衝撃係数  $I_L$  を評価するとともに、40,000 回走行を履歴した後の走行振動荷重実験による残存耐力も評価する。

### 3.4 40,000回走行時における等価繰り返し回数

本実験における走行振動荷重が及ぼす動的影響は、40,000 回走行までの計測回数ごとの荷重とたわみの関係から実験衝撃係数を算出し、等価繰り返し回数から走行振動荷重が及ぼす使用年数として検証する。大西ら<sup>3)</sup>は、輪荷重が走行した影響を示す基準となる輪荷重の走行回数、すなわち等価繰り返し回数を式(1)として与えている。

$$N_{eqi} = (P_i/P_0)^{12.76} \times N_i \quad (1)$$

ここで、 $N_{eqi}$ : 基準輪荷重  $P_0$  に変換された等価繰り返し回数、 $P_i$ : 輪荷重(kN)、 $P_0$ : 基準輪荷重(kN)、 $N_i$ : 輪荷重  $P_i$  の走行回数

本実験における走行一定荷重および走行振動荷重による疲労実験の基準荷重は、RC 床版の設計荷重 100kN の 1/2 である 50kN とし、その 1.2 倍の荷重 60kN で疲労実験を行った。そこで、基準輪荷重  $P_0$  は設計荷重の 1/2 の 50kN とする。また、走行振動荷重における輪荷重  $P_i$  は、走行振動荷重 ±20 % の場合は 72kN、走行振動荷重 ±30 % の場合は 78kN とし、本実験における等価繰り返し回数を得る。

本実験における等価繰り返し回数を式(1)より算出すると、走行一定荷重による疲労実験における 40,000 回走行時の等価繰り返し回数は 402,983 回走行、走行振動荷重 ±20 % の場合の等価繰り返し回数は 4,059,876 回、走行振動荷重 ±30 % の場合は 11,193,055 回である。1 日 1 方向の計画交通量が 2000 台とした場合の供用開始からの使用年数は、走行振動荷重 ±20 % の場合 5.6 年に相当し、走行振動荷重 ±30 % の場合は 15.3 年に相当する結果となる。

### 3.5 実験衝撃係数の算出方法

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値で除したものと定義し、式(2)で与えられる<sup>4)</sup>。なお、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(3)で与えられる。

$$DAF = 1 + \frac{y_{d,max} - y_{s,max}}{y_{s,max}} \quad (2)$$

$$I_L = DAF - 1 \quad (3)$$

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、 $I_L$ : 実験衝撃係数

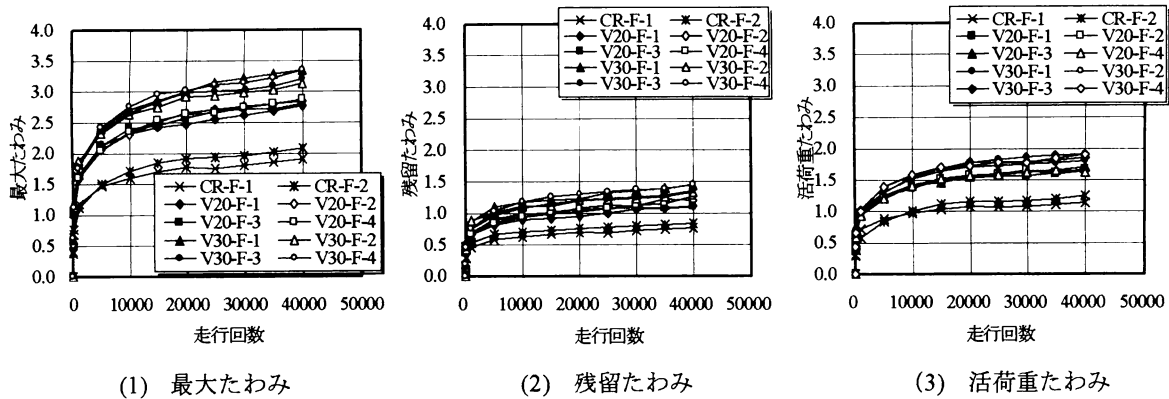


図-2 たわみと走行回数との関係

#### 4. 結果および考察

##### 4.1 疲労実験におけるたわみと走行回数との関係

本実験におけるたわみと走行回数との関係を図-2に示す。図-2(1)は走行回数ごとの最大たわみ値であり、図-2(2)は荷重除荷時、すなわち0kN時の残留たわみ値である。また、図-2(3)は、活荷重たわみである。

最大たわみは、走行回数5,000回までは、走行一定荷重および走行振動荷重ともに、たわみが急激に増加している。これは、走行回数ごとの残留たわみも同様であることから、初期走行による床版底面のひび割れ発生に伴って、急激に増加したものである。その後の走行においては、急激なたわみ増加は見られない。終局時では、走行一定荷重の場合の平均たわみが1.99mm、走行振動荷重±20%、±30%で、それぞれ2.82mm、3.26mmである。また、残留たわみの平均は、走行一定荷重の場合が0.80mm、走行振動荷重±20%、±30%それぞれで、1.17mm、1.39mmである。また、図-2(3)に示した活荷重たわみは、最大たわみから残留たわみを差し引いたたわみである。活荷重たわみは、本実験の走行回数20,000回から40,000回まではほぼ一定な値を示し、本実験の走行回数までは曲げ剛性の低下はほとんど見られない。また、40,000回走行時の活荷重たわみの平均は走行一定荷重の供試体(CR-F)では0.79mmであり、振動荷重±20%の供試体で(V20-F)は1.65mm、振動荷重±30%の供試体(V30-F)では1.88mmとなった。

##### 4.2 活荷重たわみによる衝撃係数

実験衝撃係数(式(3))は、図-2(3)に示した活荷重たわみと走行回数との関係より得ることとする。図-2(3)より、基準となる走行一定荷重による活荷重たわみを $y_{s,max}$ とし、走行振動荷重による活荷重たわみを $y_{d,max}$ として、式(2)、(3)より実験衝撃係数を算出した。その結果、活荷重たわみによる実験衝撃係数の平均は、走行振動荷重±20%の場合が0.412、振動荷重±30%の場合は0.561となった。本実験の作用荷重による衝撃係数を算出すると、走行振動荷重±20%の場合は0.200、走行振動荷重±30%の場合は0.300である。いずれの供試体も作用荷重から算出した衝撃係数に比して、実験衝撃係数 $I_i$ は走行振動

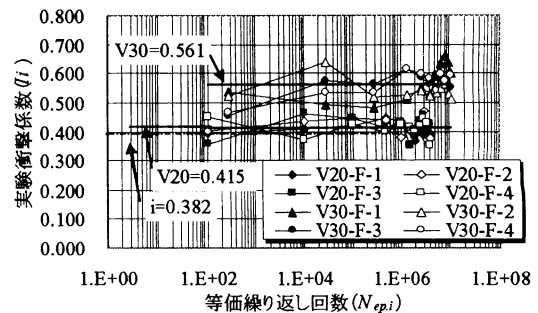


図-3 実験衝撃係数と等価繰り返し回数の関係

荷重±20%の場合は2.05倍、走行振動荷重±30%の場合は1.85倍となった。これは、40,000回走行の疲労によって床版底面に発生したひび割れ損傷によるものである。

##### 4.3 実験衝撃係数と等価繰り返し回数の関係

実験衝撃係数 $I_i$ と等価繰り返し回数 $N_{ep,i}$ の関係、道路橋示方書による衝撃係数 $i$ を図-3に示す。図-3より、走行振動荷重±20%、±30%の場合ともにばらつきが見られるが、これは走行回数ごとにひび割れの発生および進展が異なることによるものであると考えられる。

筆者<sup>2)</sup>らが走行振動荷重による段階荷重実験から得た実験衝撃係数は走行振動荷重±20%の場合は0.378、荷重振幅±30%の場合は0.497である。これに対して疲労損傷を受けた場合は走行振動荷重±20%は0.415、±30%の場合は0.516であり、疲労損傷を受けることによって、実験衝撃係数が約1.1倍上回る結果となった。また、現行示方書<sup>8)</sup>の規定する衝撃係数 $i$ ( $i=20/(50+L)$ ,  $L$ :支間)は、支間長が2.4mの場合は $i=0.386$ である。これに比して、本実験の実験衝撃係数は走行振動振幅±20%の場合は1.06倍、荷重振幅±30%の場合は1.44倍となる。

#### 5. 残存耐力および等価繰り返し回数

##### 5.1 残存耐力

本実験で求めた静荷重実験の最大耐力および走行一定荷重・走行振動荷重による段階荷重実験の残存耐力を表-2に示す。なお、残存耐力は、走行一定荷重の

表-2 RC床版の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/CR (kN)	最大たわみ (mm)
S-1	235.3	237.8	-	14.4
S-2	240.2			14.6
CR-F-1	180.0	182.5	0.768	10.6(残留値0.763)
CR-F-2	185.0			12.8(残留値0.833)
V20-F-1	174.6	172.9	0.727	9.4(残留値1.111)
V20-F-2	171.2			12.2(残留値1.242)
V30-F-1	161.8	166.4	0.700	11.7(残留値1.434)
V30-F-2	170.9			12.6(残留値1.324)

場合は供試体 CR-F-1, 2, 走行振動荷重 ±20 % の場合は供試体 V20-F-1, 2, 走行振動荷重 ±30 % の場合は供試体 V30-F-1, 2 のものを用いた。

RC 床版の静荷重実験における最大耐荷力は表-2より、供試体 S-1, 2 の平均値が 237.8kN である。この最大耐荷力と残存耐荷力との比から耐荷力の低下率を検証する。

走行一定荷重の 40,000 回走行後の段階荷重実験における残存耐荷力の平均は 182.5kN であり、静的実験の最大耐荷力の平均値との比は 0.768 であり、約 23 % 耐荷力が低下した。走行振動荷重の荷重振幅 ±20 % の場合の残存耐荷力の平均値は 172.9kN であり、静的実験の最大耐荷力の平均値との比は 0.730 であり、27 % 耐荷力が低下した。また、荷重振幅 ±20 % の場合の残存耐荷力の平均値と走行一定荷重の場合と比較すると約 5 % 耐荷力が低下した。次に、走行振動荷重の荷重振幅 ±30 % の場合の残存耐荷力の平均値と静荷重実験との比は 0.70 となり、30 % の耐荷力が低下した。また、走行一定荷重の残存耐荷力とを比較すると、9 % 耐荷力が低下した。これは、走行振動荷重による疲労実験で 40,000 回走行したことによるひび割れの増大が起因して耐荷力の低下率が大きくなったものと考えられる。

## 5.2 等価繰り返し回数

走行振動荷重による段階荷重実験の等価繰り返し回数を式(1)より算出すると、走行一定荷重の場合の平均は 26,994,405 回、走行振動荷重 ±20 % (V20-F-1) の場合は 14,980,150 回、走行振動荷重 ±30 % (V30-F-1) の場合 7,923,822 回となる。大型車両が 1 日 1 方向 2000 台以上走行した場合を想定して耐用年数を算出すると、走行一定荷重の場合の 37.0 年、走行振動荷重 ±20 % の場合 20.5 年、走行振動荷重 ±30 % の場合 10.9 年となる。したがって、荷重振幅が大きくなることにより、耐用年数が大幅に減少する結果となった。走行一定荷重の場合の計画交通量に対する耐用年数の低下率をみると、走行振動荷重 ±20 % の場合が 45 %、走行振動荷重 ±30 % の場合は 70 % 寿命が低下する結果となった。

## 6. まとめ

本研究は、大型車両の荷重変動が及ぼす動的影響を定

量的に評価するために、RC 床版供試体を用いて走行一定荷重および走行振動荷重 ±20 %、±30 % で 40,000 回走行の疲労実験を行い、動的影響と等価繰り返し回数から寿命の低下率を明らかにした。

① 走行振動荷重による 40,000 回走行までの実験衝撃係数は、荷重振幅 ±20 % の場合が 0.412、±30 の場合が、0.561 となり、与えた荷重振幅に対して走行振動荷重 ±20 % の場合で 2.06 倍、走行振動荷重 ±30 % の場合で 1.87 倍となった。

② 本実験における 40,000 回走行の等価繰り返し回数は、走行振動荷重 ±20 %、±30 % の場合で、それぞれ 4,059,876 回、11,139,055 回となり、1 日 1 方向の計画交通量が 2000 台以上とした場合、それぞれ 5.6 年と 15.3 年に相当する損傷を受けている。

③ たわみと等価繰り返し回数の関係では、走行一定荷重および走行振動荷重の場合のたわみの増加傾向がほぼ同程度であることから、等価繰り返し回数式を用いることで、載荷条件の異なる試験体を同一の尺度で評価できるものと考えられる。

④ 走行一定荷重による耐荷力は静荷重実験による最大耐荷力と比較すると、耐荷力が 23 % 低下した。また、走行振動荷重の場合は荷重振幅が ±20 %、±30 % の最大耐荷力は静荷重の最大耐荷力に比して、それぞれ 27 %、30 % 耐荷力が低下している。したがって、荷重振幅が大きくなるにしたがって耐荷力の低下率が大きい。

⑤ 走行荷重の段階荷重実験による等価繰り返し回数から大型車両が 1 日 1 方向 2000 台以上走行した場合の耐用年数を算出すると、走行一定荷重の場合 37.0 年、走行振動荷重 ±20 % の場合 20.5 年、走行振動荷重 ±30 % の場合 10.9 年となる。したがって、荷重振幅が大きくなるにつれて、耐用年数が大幅に減少する結果となった。

## 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(VII-1985), 土木研究所資料, No.2258, 1985
- 2) 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)
- 3) 大西弘志, 本間雅史, 嶽下裕一, 佐藤辰巳, 松本茂：床版の補修を考慮した寿命推定に関する研究、第 3 回道路橋床版シンポジウム講演論文集(土木学会), pp. 55-60, 2003.
- 4) 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
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I, II, III, 2003.3