

走行振動疲労荷重を受けるRC床版の破壊メカニズムおよびひび割れ密度に関する研究

(株)復建エンジニアリング ○西村 昌宏 日大生産工 阿部 忠
日大生産工 木田 哲量 JFE 工建(株) 中野 孝則

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、伸縮継手の段差部通過後は大きな荷重変動が生じ、橋梁の支点付近の床版にはひび割れ損傷が生じている。そこで本研究は、伸縮継手の段差によって発生する荷重変動を想定した走行振動疲労荷重を受けたRC床版の動的影響を検討するものである。実験では走行一定荷重および走行振動荷重による40,000回走行の疲労実験を行い、松井ら¹⁾が提案する等価繰り返し回数を基に使用年数を算出した。また、走行振動荷重を受けたRC床版の損傷度をひび割れ密度と耐力比(残存耐力と理論値の比)の関係から検証する。

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した場合に生じる荷重変動および衝撃力についての実験・研究を行なっている²⁾。それによると、図-1に示すように、橋長45mの鋼合成桁橋を総重量205.8kNのダンデム式ダンプトラックが時速40km/hで段差20mmの伸縮継手を通過した時、中軸・後軸の軸重量に対し、 $\pm 41\sim 48\%$ の荷重変動が生じている。また、この時のバネ下振動数は中軸で13Hz、後軸で18Hz程度生じている。

2.2 鋼合成桁橋RC床版の損傷状況

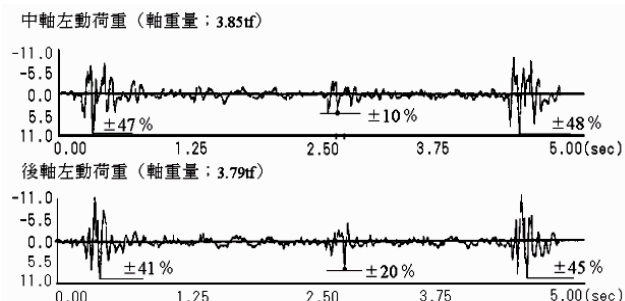


図-1 大型自動車の荷重変動

鋼合成桁橋RC床版の損傷状況の一例を図-2に示す。このひび割れ損傷は荷重変動の著しい伸縮継手部を通過した後の衝撃の影響が最も大きい走行レーンの入口付近の状況である。この床版のひび割れ間隔は15~30cm程であり、主桁付近まで進展していることから、すでにはり状化しているものと推測される。

3. 実験概要および実験方法

3.1 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。材料特性値を表-1に示す。

3.2 供試体の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。なお、供試体は各実験で2体用いることから

表-1 材料特性値

供試体	コンクリート 圧縮強度 N/mm ²	鉄筋 (SD295A, D10)		
		降伏強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	ヤング係数 kN/mm ²
RC床版	35.0	370	511	200



図-2 鋼合成桁橋RC床版の損傷状況

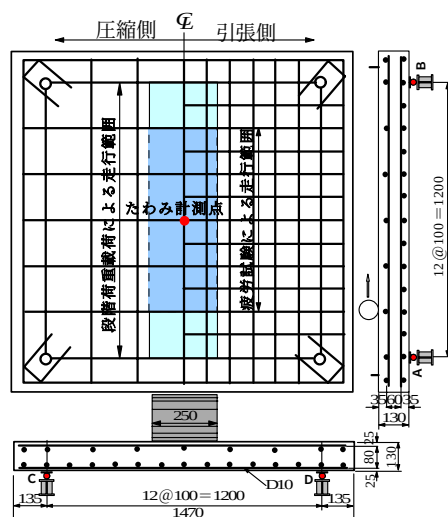


図-3 供試体寸法および鉄筋の配置

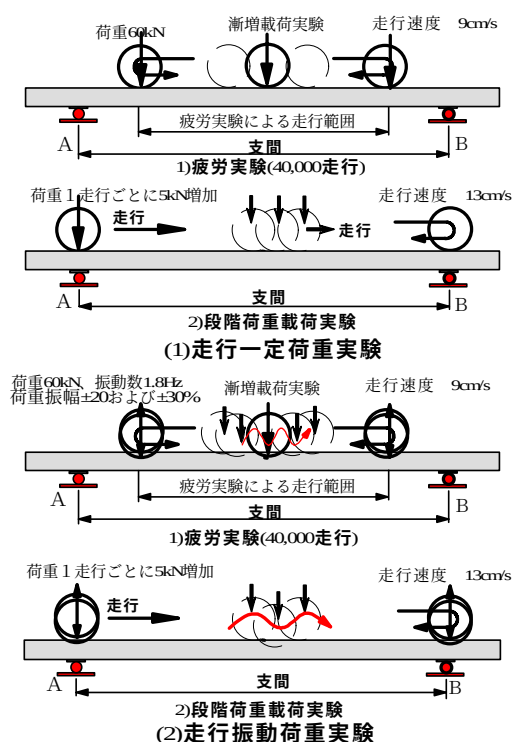


図-4 実験方法

合計 6 体製作した。供試体寸法および鉄筋の配置を図-3 に示す。

3. 3 実験方法

走行振動試験装置は、鋼製の反力フレームのほ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、供試体を取り付けた台車をクランクアームとモーターにより水平方向へ往復運動させ、車両の走行状態を再現するものである。実験方法を図-4 に示す。

(1)走行一定荷重による疲労実験および段階荷重載荷実験（供試体名：120-F-CR）

1)走行一定荷重による疲労実験

本実験の床版モデルは、現行示方書の規定に基づいて設計し、その 1/2 モデルとしたものである。そこで本実験における作用荷重は、現行示方書に規定する T 荷重 100kN の 1/2 の 50kN である。また、現行示方書に規定する活荷重曲げモーメント式には約 20%の安全率が含まれていることから、本実験の基準荷重を 60kN とする。したがって、走行一定荷重による疲労実験では、図-4(1)に示すように、荷重 60kN 載荷して 1 往復 1.6m（片側 80cm）を 9.0sec で走行した。

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 回走行疲労実験後は、図-4(1)2)に示すように、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 13sec とした。走行範囲を 1.2m としたのは、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からである。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間間を走行させている。なお、残存耐力は本実験における荷重および走行条件のなかで輪荷重が 1 往復を維持した最大荷重とする。

(2)走行振動荷重による疲労実験および段階荷重実験（供試体名：120-F-V20, 120-F-V30）

走行振動荷重による疲労実験は大型自動車の荷重変動を想定した走行振動荷重による載荷実験である。

総重量 205.8kN の大型自動車が伸縮継手を通じた後の荷重変動によると、最大で±48%作用している。そこで、本実験における荷重振幅は、段差量 20mm を想定して振動荷重±20%：最大荷重(60×1.2=72kN)、最小荷重(60×0.8=48kN)と、±30%最大荷重(60×1.3=78kN)、最小荷重(60×0.7=42kN)とする。

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図-4(2)1)、基準荷重 60kN に対して荷重振幅を±20%と±30%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と同様に 1 往復 1.6m（片側 80cm）を 9.0sec で走行する 17.8cm/s である。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。

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図-4(2)(2)に示すように、走行振動荷重による一往復ごとに荷重を増加する段階荷重実験を行い、残存耐力を得る。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 で走行する 18.5cm/s とし、振動数を 1.8Hz の片振り荷重とする。

4. 40,000 回走行時における等価繰返し回数

松井¹⁾ は S-N 曲線を用いた寿命の推定式(1)を提案し、式(2)を基に等価繰返し回数の算定式を提案している。なお、S-N 曲線を用いた寿命の推定は式(1)として与えられる。

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \cdot \log N + \log 1.520 \quad (1)$$

ここで、 P ：輪荷重(kN)、 P_{sx} ：床版の押抜きせん断荷重(kN)、 N ：輪荷重の走行回数

この式(1)を基に、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、すなわち等価繰返し回数は式(2)として与えられている。

$$N_{eq. i} = (P_i/P_0)^{12.76} \times N_i \quad (2)$$

ここで、 $N_{eq. i}$ ：基準輪荷重 P_0 に変換された等価繰返し回数、 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。また、走行振動荷重における輪荷重 P_i は、走行振動荷重 $\pm 20\%$ の場合は 72kN、走行振動荷重 $\pm 30\%$ 場合は 78kN とし、本実験における等価繰返し回数を得る。

本実験における等価繰返し回数を式(2)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 回走行時の等価繰返し回数は 402,983 回走行、走行振動荷重 $\pm 20\%$ の場合の等価繰返し回数は 4,059,876 回、走行振動荷重 $\pm 30\%$ 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 $\pm 20\%$ の 5.6 年に相当し、走行振動荷重 $\pm 30\%$ の場合は 15.3 年に相当する結果となる。

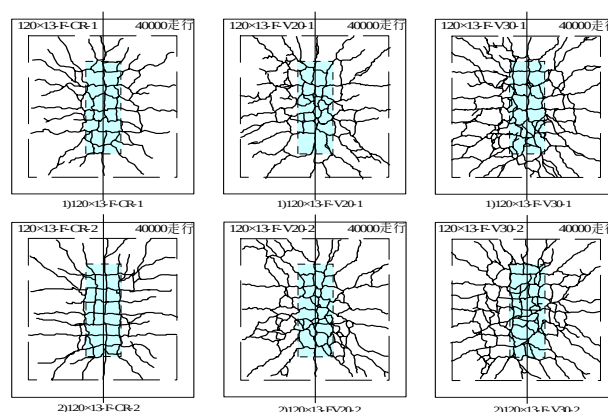


図-5 ひび割れ状況

5. 走行振動荷重による 40,000 回走行の結果

5. 1 40,000 回走行後のひび割れ発生状況

本実験の走行一定荷重・走行振動荷重による 40,000 回走行後のひび割れ状況を図-5 に示す。

(1) 走行一定荷重のひび割れ発生状況

走行一定荷重による 40,000 回走行の疲労実験における供試体底面のひび割れ状況は図-5 に示すように、供試体 120-CR-F-1, 2 ともに走行範囲に集中して発生し、軸直角方向および軸方向に 10cm から 15cm 間隔で発生し、格子状を形成している。

(2) 走行振動荷重 $\pm 20\%$ のひび割れ発生状況

荷重 60kN に対して走行振動荷重 $\pm 20\%$ で 40,000 回走行の疲労実験における供試体底面のひび割れ状況は図-5 に示すように、格子状に発生したひび割れは走行一定荷重の場合に比して広範囲に渡っている。供試体 120-F-V20-1 は供試体 120-F-V20-2 に比してややひび割れが密集している。これは、走行一定荷重による等価繰返し回数は 402,983 回走行に対して、走行振動荷重 $\pm 20\%$ の等価繰返し回数は 4,059,876 回であり、走行一定荷重の場合の 10.1 倍の走行回数となることから、ひび割れ発生も著しい。

(3) 走行振動荷重 $\pm 30\%$ のひび割れ発生状況

図-5 より、走行振動荷重 $\pm 30\%$ の場合は、供試体 120-F-V20-1, 2 ともに走行一定荷重および走行振動荷重 $\pm 20\%$ の場合と比較してもひび割れが著しく発生している。走行一定荷重による等価繰返し回数 40,000 回に対して、走行振動荷重 $\pm 30\%$ の等価繰返し回数は 11,193,055 回と 27.7 倍の走行回数となることから、ひび割れ発生も著しい。また、走行振動荷重 $\pm 20\%$ の場合の等価繰返し回数と比較すると 2.8 倍の走行回数となる。したがって、等価繰返し回数に見られるように、走行振動荷重 $\pm 20\%$ と比較して、さらにひび割れ損傷が著しくなった。

5. 2 ひび割れ密度

走行振動荷重を受けた RC 床版の損傷度を格子密度法により検証する。各供試体のひび割れ密度の平均値は、走行一定荷重の場合 9.2 m/m^2 ，走行振動荷重 $\pm 20\%$ の場合 11.1 m/m^2 ，走行振動荷重 $\pm 30\%$ の場合 12.6 m/m^2 となった。走行振動荷重による疲労実験におけるひび割れ密度は走行一定荷重による疲労実験に比して、 $\pm 20\%$ の場合 1.21 倍， $\pm 30\%$ の場合 1.37 倍となった。

6. 残存耐力

段階荷重実験による走行一定荷重における 40,000 回走行後の残存耐力の平均は 182.5 kN であり，走行振動荷重 $\pm 20\%$ の残存耐力の平均は 174.4 kN であり，その耐力比は 0.956 となり，走行振動荷重の場合約 4%耐力が低下した。また，基準荷重 $\pm 30\%$ の走行振動荷重における残存耐力の平均は 165.4 kN であり，走行一定荷重の耐力との比は 0.906 となり，9%耐力が低下した。段階荷重実験による走行一定荷重および走行振動荷重における残存耐力は，荷重振幅の上限値と近似するとの結果が報告³⁾されているが，本実験の場合は走行振動荷重での疲労実験で 40,000 回走行したことに起因したひび割れの増大により耐力の低下が大きくなったものと考えられる。

7. 耐力比とひび割れ密度の関係

RC 床版の損傷度を評価する方法の 1 つにひび割れ密度と耐力比との関係がある⁴⁾。ここで本実験における耐力比とは，40,000 回走行後の残存耐力を土木学会式⁵⁾による押抜きせん断耐力で除したものである。耐力比とひび割れ密度の関係を図-6 に示す。

図-6 よりひび割れ密度で表わした損傷度と残存耐力との間には相関関係($\gamma = 0.97$)があり，ひび割れの進展により床版の曲げ剛性が低下していることが分かる。

走行振動荷重による段階荷重実験の等価繰り返し回数の平均は，走行一定荷重の場合 26,994,405 回，走行振動荷重 $\pm 20\%$ の場合 14,980,150 回，走行振動荷重 $\pm 30\%$ 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 37.0 年，走行振動荷重 $\pm 20\%$ の場合 20.5 年，走行振動荷重 $\pm 30\%$ 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しての耐用年数の低下率をみると，走行振動荷重 $\pm 20\%$ の

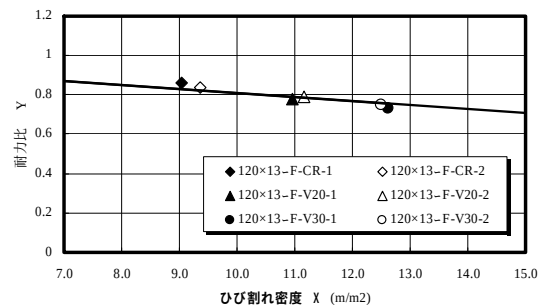


図-6 ひび割れ密度と耐力比の関係

場合は 45%，走行振動荷重 $\pm 30\%$ の場合は 70%の寿命が低下する結果となった。

8. 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 $\pm 20\%$ ， $\pm 30\%$ の場合の 40,000 回走行の疲労実験を行い，残存耐力とひび割れ密度を評価した結果，以下の結論を得た。

- ①40,000 回走行時のひび割れ状況は，走行一定荷重の場合に比して走行振動荷重 $\pm 20\%$ および $\pm 30\%$ のひび割れ損傷が著しく，荷重振幅の大きさおよび等価繰り返し回数に比例してひび割れ損傷も著しい。
- ②走行一定荷重の残存耐力に比して，走行振動荷重 $\pm 20\%$ の場合は 4%，走行振動荷重 $\pm 30\%$ の場合は 9%耐力が低下した。また，ひび割れ密度で表わした損傷度と残存耐力との間には相関関係があり，走行振動荷重により発生するひび割れが RC 床版の耐力に及ぼす影響が大きいものと推察される。
- ③走行一定荷重の場合の等価繰り返し回数から算出した耐用年数の低下率をみると，走行振動荷重 $\pm 20\%$ の場合が 45%，走行振動荷重 $\pm 30\%$ の場合は 70%の寿命が低下した。

「参考文献」

- 1) 松井繁之：橋梁の寿命予測，安全工学 Vol.30，No.6，pp.432-440，1991
- 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) 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
- 4) 成田信之：鋼橋の未来-21 世紀への挑戦，技報堂出版，1998
- 5) コンクリート標準示方書：構造性能照査編，土木学会，2002