

走行振動疲労荷重を受ける RC 床版の動的影響および残存耐力

Dynamic Effects of Running Vibration Fatigue Loads on RC Slabs and
Residual Strengths of the Slabs Under the Loads

阿部 忠*, 木田哲量**, 澤野利章***, 徐 銘謙****

Tadashi ABE, Tetsukazu KIDA, Toshiaki SAWANO and Ming-Chien HSU

*博(工), 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)

****工修, 日本大学大学院 生産工学研究科土木工学専攻 (〒 275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

Abstract : Reinforced concrete (RC) slabs near expansion joints are subjected to fatigue under running vibration loads caused by level difference at the joints. In this paper, the dynamic effects of running vibration loads on the RC slabs during the service life are evaluated. The author conducted a fatigue test in 40,000 times of running loads under a running constant load and running vibration loads of $\pm 20\%$ and $\pm 30\%$ amplitude, assuming the dynamic effects of large-sized motor vehicles, and proposed the evaluation formula of an empirical impact coefficient, which was calculated from the dynamic amplification ratio of a live load deflection. Further, with the equivalent number of running times in the fatigue test, the service life of the slabs was predicted. After the fatigue test, a stepped load test was carried out under the running constant load and running vibration loads. As a result, residual strengths were measured, the service life was calculated from the equivalent number of running times in the stepped loading test, and the service life reduction ratio of the slabs under running vibration loads was clarified.

Key words : RC slab, running vibration load, fatigue test, experimental impact coefficient, residual strength

キーワード : RC床版, 走行振動荷重, 疲労実験, 実験衝撃係数, 残存耐力

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。

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荷重変動^{1), 2)}に着目し, 荷重変動が鋼道路橋 RC 床版に及ぼす動的影響を検討するために, 走行振動荷重による走行実験を行った。既往の研究における供試体は, 道路橋 RC 床版は輪荷重の作用によりかなり早い段階で貫通ひび割れとなり, はり状化するといわれていることから, このはり状化に伴うひび割れ間隔³⁾を想定した RC はりと実橋床版をモデルにした RC 床版とし, 走行振動荷重が作用した場合の衝撃係数を検証した。そして, 荷重振幅を関数とする動的影響評価式を提案した^{4), 5)}。これによると, 基準荷重に対して約 $\pm 21\%$ 以上の荷重変動が生じた場合は, 道路橋示方書・同解説⁶⁾(以下, 現行示方書と称する)に規定する衝撃係数を上回る結果が得

られた。しかし, 走行振動疲労荷重を受けた RC 床版の動的影響については解明されていない。

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, 活荷重たわみによる動的増幅率から動的影響, すなわち実験衝撃係数を求めるとともに, 松井ら⁷⁾が提案する等価繰返し回数を基に使用年数を算出した。また, 40,000 回走行後に 1 走行ごとに荷重を増加する段階荷重実験を行い, 残存耐力と等価繰返し回数による耐用年数について検証した。

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。材料特性値を表-1に示す。

表-1 供試体の材料特性値

供試体	コンクリート	鉄筋 (SD295A、D10)		
	圧縮強度 N/mm ²	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

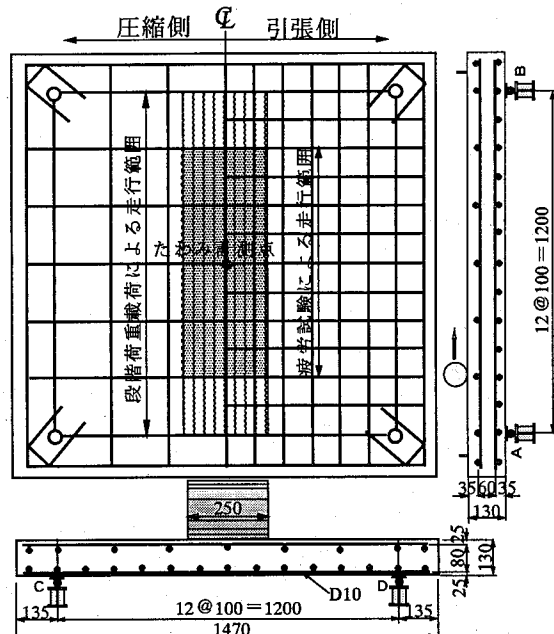


図-1 RC床版供試体寸法および鉄筋配置

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体用いることから合計6体製作した。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、有効高さはそれぞれ10.5cmとした。また配筋筋、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を配置した。

3. 実験装置の概要・実験方法および等価繰り返し回数

3.1 走行振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、鋼製反力フレームのほかに、車輪(幅=25cm、直径=40cm)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。

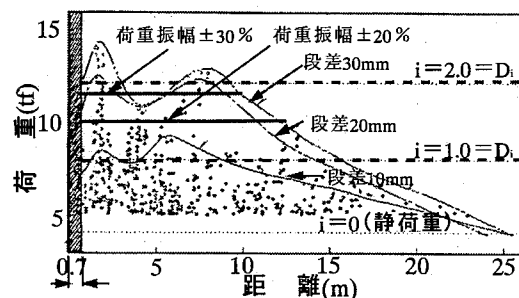


図-2 段差部通過後の荷重分布および包絡線²⁾

3.2 大型自動車の荷重変動

独立行政法人土木研究所は、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について報告している¹⁾。実験車両は、総重量205kNのタンデム式ダンプトラックで、その荷重分担は中軸左動荷重が37.73kN、後軸左動荷重は37.14kNであり、この軸重量に対して2.77倍～2.86倍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。次に、大型自動車が伸縮継手の段差部通過後の荷重分布と包絡線を図-2として示している²⁾。これによると、段差部から2m、8mの付近で最大荷重が生じており、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に及んでいる。したがって、実橋の伸縮継手を通過する際に、その近傍の床版には大きな荷重変動が生じることになる。なお、図-2には本実験の動的係数を加筆した。また、動的係数*i*は現行示方書に規定する衝撃係数と同じ号であるので、本論文では以降の動的係数を*D_i*とする。

3.3 実験方法

(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-CR-F)

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-3(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。この走行範囲では、輪荷重が45°で床版の底面方向に分布するものと仮定すると、輪荷重は床版支間内に分布する範囲である。走行範囲を図-1に併記した。本実験は走行振動疲労荷重を受けることによる動的影響を評価することから走行回数を40,000回走行とする。実験では1, 10, 100, 1,000, 5,000回、および5,000回以降は5,000回ごとに最大荷重から荷重

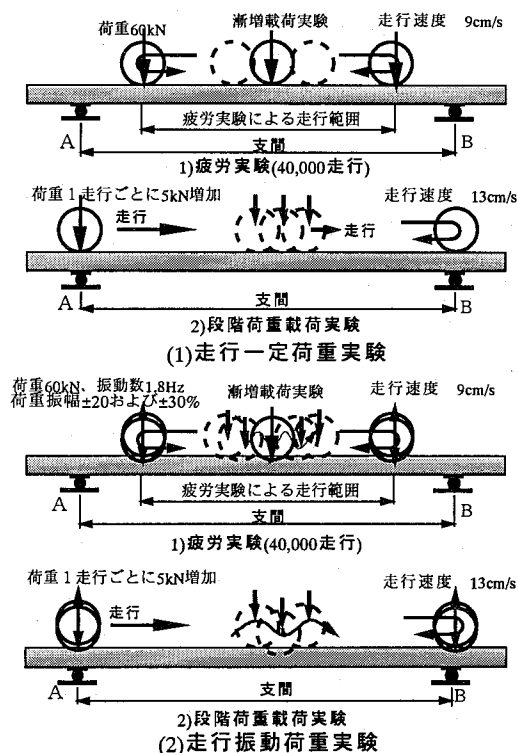


図-3 実験方法

0kN まで 10kN ずつ減少させ、残留たわみを計測する。また、0kN から 10kN ずつ最大荷重まで増加させ、各走行回数ごとに荷重とたわみを計測する。なお、走行一定荷重による疲労実験の供試体名称は 120-CR-F とする。

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-3(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。各荷重増荷方法は、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 14sec 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、段階荷重増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-V20-F, 120-V30-F)

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増荷実験である。

総重量 205.8kN の大型自動車が伸縮継手を通り抜けた後の荷重変動によると、最大で $\pm 48\%$ 作用している。この最大荷重が作用する位置は現行示方書の規定では床版端部として取り扱われている。しかし、図-2に示した段差部通過後の荷重分布では、段差量 20mm の場合の動的係

数 $D_i = 2.0$ となる位置は支点から 10m にも及んでいる。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 $\pm 20\%$ [動的係数 $D_i = P_u/P_L = 1.5$ [P_u : 最大荷重($60 \times 1.2 = 72\text{kN}$), P_L : 最小荷重($60 \times 0.8 = 48\text{kN}$)] と、 $\pm 30\%$ [動的係数 $D_i = P_u/P_L = 1.86$ [P_u : 最大荷重($60 \times 1.3 = 78\text{kN}$), P_L : 最小荷重($60 \times 0.7 = 42\text{kN}$)] とする。なお、本実験における荷重振幅による動的係数を図-2に併記した。

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-3(2)1)、基準荷重 60kN に対して荷重振幅を $\pm 20\%$ と $\pm 30\%$ 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増荷とする。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 17.7cm/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。実験は 1, 10, 100, 1,000, 5,000 回および 5,000 回以降は 5,000 回ごとに最大荷重から荷重 0kN まで 10kN ずつ減少し、また、0kN から 10kN ずつ最大荷重まで増加し、各走行回数ごとに荷重とたわみを計測する。なお、走行振動荷重による疲労実験における荷重振幅 $\pm 20\%$ の供試体名称を 120-V20-F とし、荷重振幅 $\pm 30\%$ の名称を 120-V30-F 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-3(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。荷重増荷方法は、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。

3.3 40,000回走行時における等価繰返し回数

本実験における走行振動荷重が及ぼす動的影響、すなわち 40,000 回走行までの計測回数ごとのたわみの関係から実験衝撃係数を算出し、等価繰返し回数から走行振動荷重が及ぼす使用年数を検証する。松井⁷⁾は S-N 曲線を用いた寿命の推定式(1)を提案し、式(1)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。

$$\log(P/P_s) = -0.07835 \cdot \log N + \log 1.520 \quad (1)$$

ここで、 P : 輪荷重(kN), P_s : 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_{qi} : 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。本来、等価繰返し回数の算出における基準輪荷重 P_0 は、設計荷重に衝撃係数を割り増している。なお、本研究は衝撃係数の実験的な評価を目的とすることから、衝撃係数による荷重の割り増しは考慮しないこととする。したがって、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 $\pm 20\%$ 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 $\pm 20\%$ の場合 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。

4. 走行振動荷重による40,000回走行の結果

4.1 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-4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-4(1)に示すように、供試体 120-CR-F-1, 2 と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-4(2)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-V20-F-1 は供試体 120-V20-F-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-4(3)より、走行振動荷重 $\pm 30\%$ の場合は、供試体 120-V20-F-1, 2 と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 27.6 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。

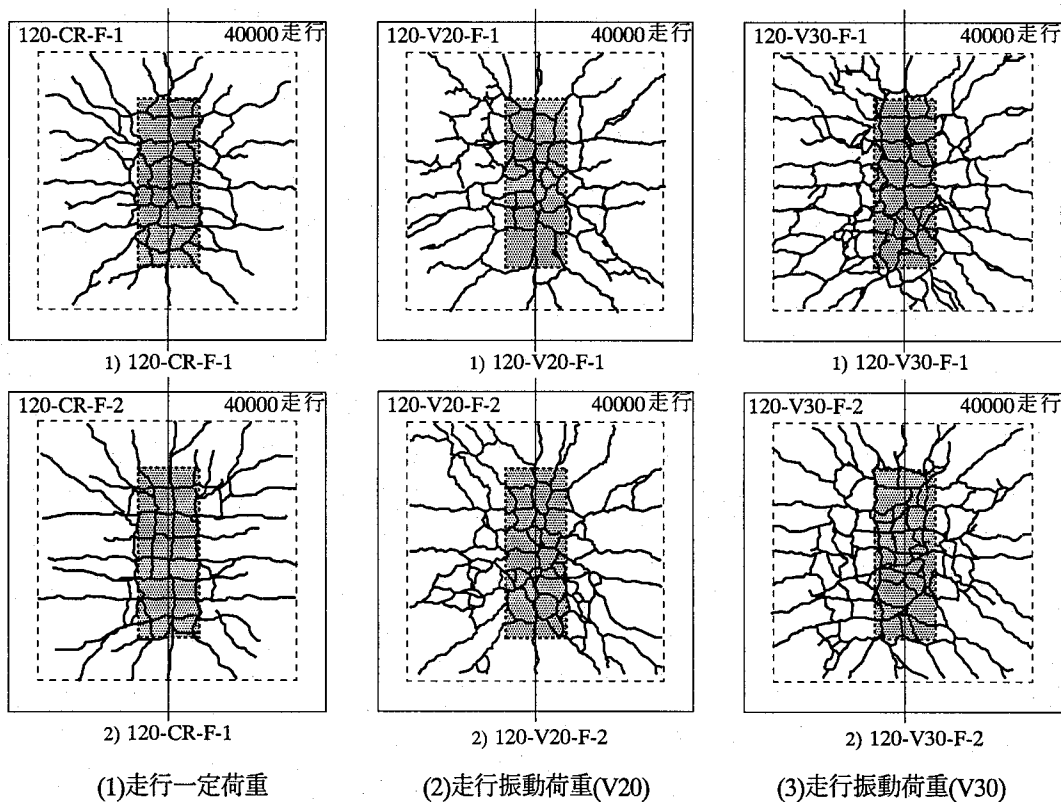
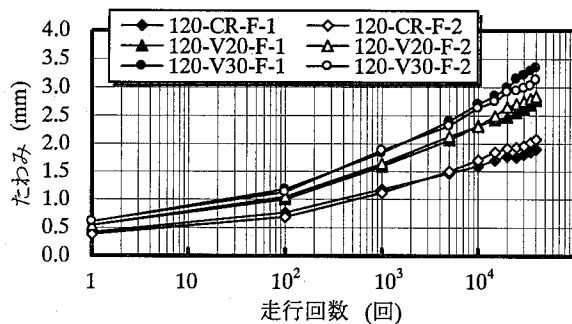
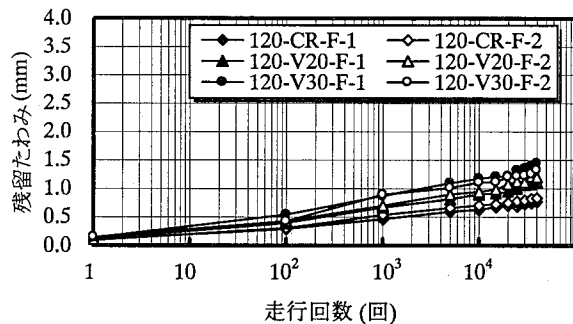


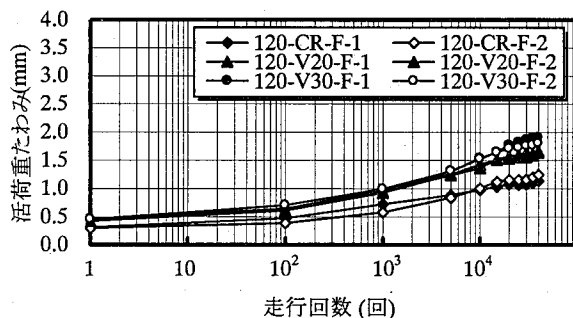
図-4 走行一定荷重・走行振動荷重による40,000回走行時のひび割れ発生状況



(1) 最大たわみと走行回数の関係



(2) 残留たわみと走行回数の関係



(3) 活荷重たわみと走行回数の関係

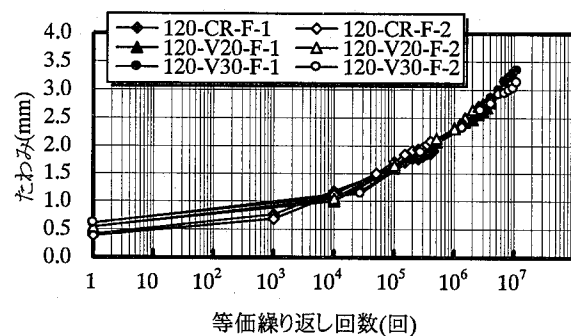
図-5 たわみと走行回数の関係

したがって、等価繰り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。

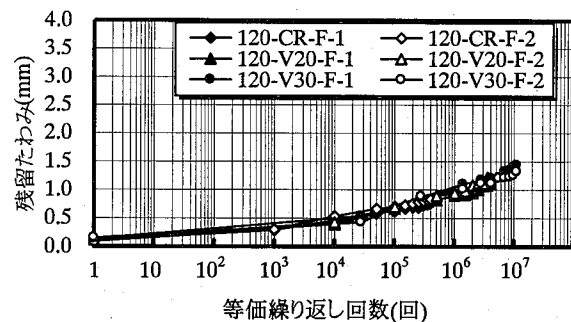
4.2 たわみと走行回数の関係

本実験におけるたわみと走行回数の関係を図-5に示す。図-5(1)は走行回数ごとの最大たわみ値であり、図-5(2)は荷重除荷時 0kN のたわみ値、すなわち残留たわみ値である。また、図-5(3)は、活荷重たわみ (= 最大たわみ - 残留たわみ) である。

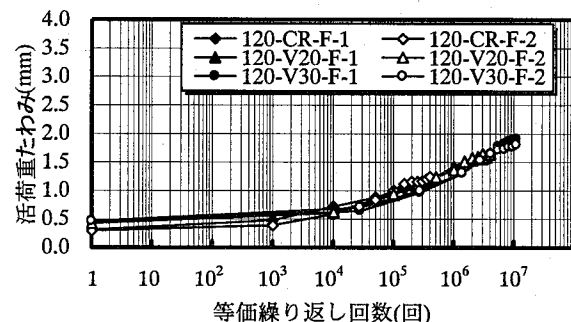
図-5(1)より、走行回数 5,000 回までは、走行一定荷重および走行振動荷重ともに、たわみが急激に増加している。これは、図-5(2)に示す走行回数ごとの残留たわみも同様であることから、初期走行による床版底面のひび割れ発生に伴い、急激に増加したものである。その後の走行においては、急激な増加は見られない。40,000 回走行時では、平均たわみは走行一定荷重の場合が 1.99mm、



(1) 最大たわみと等価繰り返し回数の関係



(2) 残留たわみと等価繰り返し回数の関係



(3) 活荷重たわみと等価繰り返し回数の関係

図-6 たわみと等価繰り返し走行回数の関係

走行振動荷重 $\pm 20\%$ 、 $\pm 30\%$ の場合でそれぞれで、2.81mm、3.24mm 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 $\pm 20\%$ 、 $\pm 30\%$ の場合それぞれで、1.18mm、1.38mm である。次に、図-5(3)に示した活荷重たわみは、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、実験終了時の活荷重たわみは 120-CR-F-1、2 でそれぞれ 1.14mm、1.25mm、120-V20-F-1、2 でそれぞれ 1.66mm、1.64mm、120-V30-F-1、2 でそれぞれ 1.91mm、1.80mm となった。したがって、走行一定荷重による疲労実験のたわみに比して、走行振動荷重による疲労実験で得られる活荷重たわみは増加傾向を示している。

4.3 たわみと等価繰り返し回数の関係

本実験の 40,000 回走行時におけるたわみと等価繰り返し回数の関係を図-6に示す。

図-6(1)は最大たわみと等価繰返し回数の関係を、図-6(2)は残留たわみと等価繰返し回数の関係を示したものである。また、図-6(3)は活荷重たわみと等価繰返し回数の関係を示したものである。図-6(3)における活荷重たわみでは、走行一定荷重による等価繰返し回数のたわみの増加傾向と走行振動荷重 $\pm 20\%$ および $\pm 30\%$ の等価繰返し回数に換算した場合のたわみはほぼ同程度の増加傾向を示している。また、残留たわみも同様な傾向で増加している。

以上から、等価繰返し回数を用いることで、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。

5. 実験衝撃係数

5.1 衝撃係数の算定法

本研究では、RC 床版の供試体に走行振動荷重を作用させた場合の動的影響を衝撃係数として実験値から算定した（以下、実験衝撃係数と呼ぶ）。そこで、たわみ応答値による動的増幅率より実験衝撃係数を得るものとする。なお、単純桁に走行荷重が作用した場合のたわみによる動的増幅率の関係を図-7に示す。

動的増幅率は⁹⁾、図-7に示す最大静的たわみ値を基準とし、その値と最大動的たわみ値の差を最大静的たわみで除したものと定義し、式(3)で与えられる。なお、道路橋における動的増幅率から算出する衝撃係数は、走行荷重実験による動的増幅率から1を引いた値と定義し、式(4)で与える。

$$DAF = 1 + \frac{y_{d,max} - y_{s,max}}{y_{s,max}} \quad (3)$$

$$I = DAF - 1 \quad (4)$$

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 ：衝撃係数

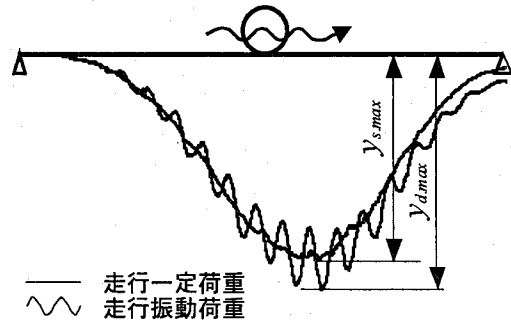


図-7 動的増幅率

本実験では、基準となる走行一定荷重による最大たわみを静的たわみ $y_{ls,max}$ とし、走行振動荷重実験によるたわみを動的たわみ $y_{ld,max}$ とすると、実験衝撃係数 I_L は式(5)として与えられる。

$$I_L = \frac{y_{ld,max} - y_{ls,max}}{y_{ls,max}} \quad (5)$$

実験衝撃係数は図-5(3)に示した活荷重たわみと走行回数の関係より得ることとする。図-5(3)より、基準となる走行一定荷重による活荷重たわみを $y_{ls,max}$ とし、走行振動荷重による活荷重たわみを $y_{ld,max}$ として、式(5)より実験衝撃係数を算出する。本実験より得られた実験衝撃係数 I_L を表-2に示す。

活荷重たわみより算出した実験衝撃係数 I_L は、走行振動荷重 $\pm 20\%$ の場合が平均で 0.410、走行振動荷重 $\pm 30\%$ の場合が平均で 0.554 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 $\pm 20\%$ の場合は 0.200（＝最大荷重/基準荷重-1.0＝72/60-1.0）、走行振動荷重 $\pm 30\%$ の場合は 0.300（＝78/60-1）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_L は走行振動荷重 $\pm 20\%$ の場合は 2.05 倍、走行振動荷重 $\pm 30\%$ の場合は 1.85 倍となった。これは、等

表-2 RC 床版の実験衝撃係数

走行回数	等価繰返し回数	120-V20-F-1	120-V20-F-2	平均値 (V20)	走行回数	等価繰返し回数	120-V30-F-1	120-V30-F-2	平均値 (V30)
1	1	0.396	0.404	0.400	1	1	0.538	0.523	0.530
100	10150	0.410	0.434	0.422	100	27983	0.493	0.639	0.566
1000	101497	0.422	0.448	0.435	1000	279826	0.480	0.518	0.499
5000	507484	0.449	0.438	0.443	5000	1399132	0.512	0.525	0.519
10000	1014969	0.437	0.379	0.408	10000	2798264	0.551	0.540	0.545
15000	1522453	0.404	0.407	0.405	15000	4197396	0.528	0.523	0.525
20000	2029938	0.367	0.408	0.388	20000	5596528	0.588	0.532	0.560
25000	2537422	0.398	0.426	0.412	25000	6995660	0.636	0.548	0.592
30000	3044907	0.386	0.468	0.427	30000	8394792	0.661	0.565	0.613
35000	3552391	0.393	0.372	0.383	35000	9793923	0.638	0.531	0.584
40000	4059876	0.392	0.374	0.383	40000	11193055	0.599	0.513	0.556
平均値		0.405	0.414	0.410	平均値		0.566	0.541	0.554

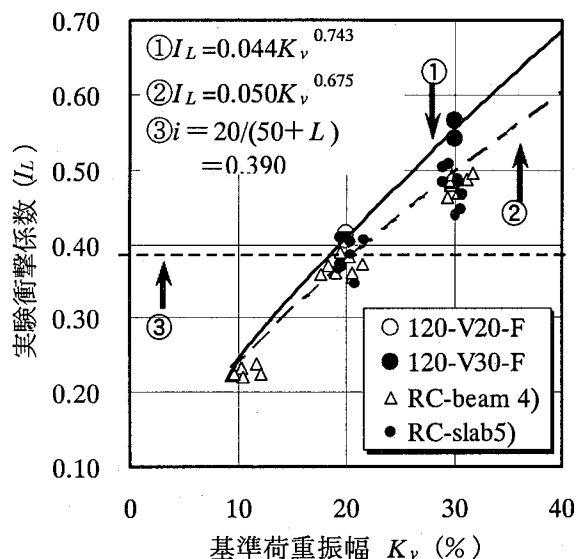


図-8 実験衝撃係数と基準荷重振幅の関係

価繰り返し回数に見られるように、40,000 回走行の疲労損傷によるものである。

5.2 走行振動疲労実験による動的影響

実験衝撃係数 L と基準荷重振幅 K_v の関係を図-8に示す。なお、筆者らは、3 タイプの RC はりおよび 2 タイプの RC 床版を用いた走行振動荷重による段階荷重実験の過程で、弾性域の荷重 2 点を設定して一定な荷重による走行実験を行い、たわみによる動的増幅率から実験衝撃係数の評価式を提案している^{9, 9)}。これらの結果も合わせて図-8に併記した。

(1) 疲労損傷を受けた場合の RC 床版の実験衝撃係数： L

本実験における疲労損傷を受けた RC 床版の実験衝撃係数 L と基準荷重振幅 K_v の関係から、基準荷重振幅を変数とした実験衝撃係数 L を定式化すると、式(6)として与えられる。

$$L = 0.044K_v^{0.743} \quad (6)$$

ここに、 L ：実験衝撃係数、 K_v ：基準荷重振幅(%)

なお、相関係数は $\gamma^2=1.000$ であり、極めて良好な結果である。

(2) RC はりおよび RC 床版の実験衝撃係数： L

筆者らが行った走行振動荷重による段階荷重実験による RC はりおよび RC 床版の実験衝撃係数 L は式(7)として与えられている⁹⁾。

$$L = 0.050K_v^{0.675} \quad (7)$$

なお、相関係数は $\gamma^2=0.999$ であり、極めて良好な結果である。

本実験における疲労損傷を受けた RC 床版の実験衝撃係数 L (式(6))と RC はりおよび RC 床版の実験衝撃係数 L (式(7))とを比較すると、本実験における走行振動荷重 $\pm 20\%$ 、 $\pm 30\%$ の方が大幅に上回っている。とくに、走行振動荷重 $\pm 30\%$ の場合の増加が著しい。これは、図-5(3)に示したひび割れ発生状況からも見られるように、損傷度が大きくなり、活荷重たわみが増加したためである。また、走行荷重振幅 $\pm 30\%$ の場合の等価繰り返し回数が大幅に増大することからも実験衝撃係数が著しく増加したものと考えられる。

現行示方書の規定する衝撃係数 $i(i = 20/(50 + L))$ 、 L ：支間))は、床版支間長 1.20m の場合 $i = 0.390$ 、支間長が 2.4m の場合は $i = 0.386$ である。本実験の場合には荷重振幅が $\pm 20\%$ 以上になると、現行示方書の規定する衝撃係数を上回ることになる。

6. 段階荷重実験の結果

6.1 残存耐力

走行一定荷重および走行振動荷重による 40,000 回走行実験後の段階荷重実験による残存耐力を表-3に示す。

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 182.5kN であり、走行振動荷重 $\pm 20\%$ の残存耐力の平均は 174.4kN であり、その耐力比は 0.956 となり、走行振動荷重の方が約 4 %耐力が低下した。また、走行振動荷重 $\pm 30\%$ の残存耐力の平均は 165.4kN であり、走行一定荷重の耐力との比は 0.906 と

表-3 RC 床版の実験耐力・破壊モードおよび段階荷重実験の等価繰り返し回数

供試体	残存耐力 (kN)	平均残存耐力 (kN)	耐力比 V/CR (kN)	破壊モード	等価繰り返し回数 (回)	平均等価繰り返し回数 (回)	耐用年数 (年)	最大たわみ (mm)
120-CR-F-1	180.0	182.5	—	押抜きせん断破壊	22,355,412	26,994,405	37.0	10.6(残留値0.763)
120-CR-F-2	185.0			押抜きせん断破壊	31,633,398			12.8(残留値0.833)
120-V20-F-1	174.6	174.4	0.956	押抜きせん断破壊	15,197,794	14,980,150	20.5	9.4(残留値1.111)
120-V20-F-2	174.2			押抜きせん断破壊	14,762,507			12.2(残留値1.242)
120-V30-F-1	161.8	165.4	0.906	押抜きせん断破壊	5,792,124	7,923,823	10.9	11.7(残留値1.434)
120-V30-F-2	169.0			押抜きせん断破壊	10,055,521			12.6(残留値1.324)

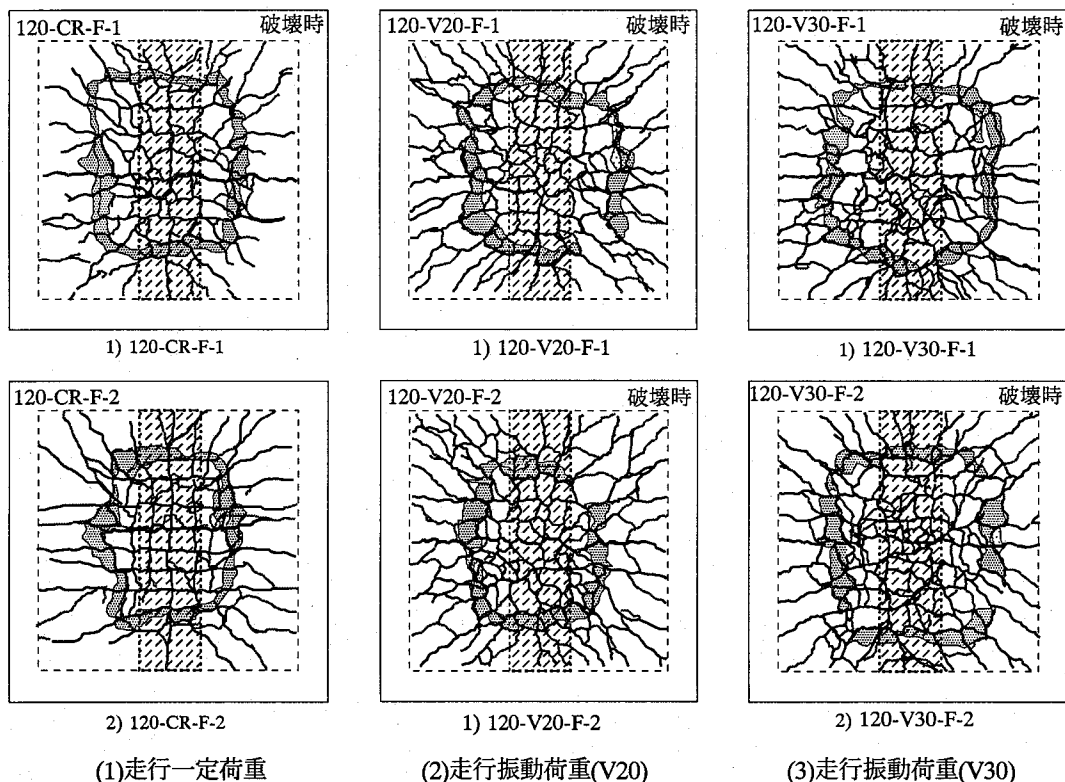


図-9 段階荷重終了後のひび割れ・破壊状況

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、振動荷重の荷重振幅の上限値と近似するとの結果が報告⁹⁾されているが、本実験の場合は走行振動荷重による疲労実験には、40,000 回走行したことによるひび割れの増大に起因する耐力の低下が大きくなったものと考えられる。

走行振動荷重による段階荷重実験の等価繰返し回数の平均は、走行一定荷重の場合 26,994,405 回、走行振動荷重 ± 20 % の場合 14,980,150 回、走行振動荷重 ± 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 ± 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しての耐用年数の低下率をみると、走行振動荷重 ± 20 % の場合は 45 %、走行振動荷重 ± 30 % の場合は 70 % の寿命が低下する結果となった。

6.2 破壊状況および破壊モード

段階荷重実験におけるひび割れ状況を図-9に示す。

(1) 走行一定荷重の場合の破壊状況

走行一定荷重による段階荷重実験では、走行範囲を支点 A から支点 B までの一往復とした。ひび割れ間隔は 2 供試体ともに、図-4に示した疲労実験で発生したひび割れが、段階荷重によってさらに進展し、破壊時には軸方向および軸直角方向にひび割れが進展している。また、

引張鉄筋のかぶり内にはコンクリートのはく離が見られる。破壊モードは輪荷重が走行中に床版中央付近で押抜きせん断破壊となった。

(2) 走行振動荷重の場合の破壊状況

走行振動荷重 ± 20 % の場合の終局時の破壊状況も 2 供試体ともに、疲労実験によるひび割れが鉄筋の配置間隔とほぼ同間隔で発生し、走行振動荷重による段階荷重によってさらにひび割れが進展し、輪荷重が走行中に支間中央付近で押抜きせん断破壊となった。すなわち、破壊付近はひび割れが密集している。

走行振動荷重 ± 30 % の場合の終局時の破壊状況は、2 供試体ともに走行振動荷重 ± 20 % の場合と比較すると、破壊位置付近のひび割れが著しい。また、底面のコンクリートはく離も広範囲に亘っていることが確認できる。破壊モードは押抜きせん断破壊となった。

6.3 荷重とたわみの関係

段階荷重実験における荷重とたわみの関係を図-10に示す。なお、図-10では 40,000 回走行時の残留値を基準値とした。また、最大たわみと 40,000 回走行時の残留たわみを表-3に併記した。

図-10より、走行一定荷重の場合の最大たわみは、供試体 120-CR-F-1, 2 の場合、それぞれ 10.6mm, 12.8mm である。次に、走行振動荷重 ± 20 % の場合、供試体 120-V20-F-1, 2 の終局時のたわみは、それぞれ 9.4mm, 12.2mm である。また、走行振動荷重 ± 30 % の場合、供試体 120-V30-F-1, 2 の終局時のたわみは、それぞれ 11.7mm, 12.2mm

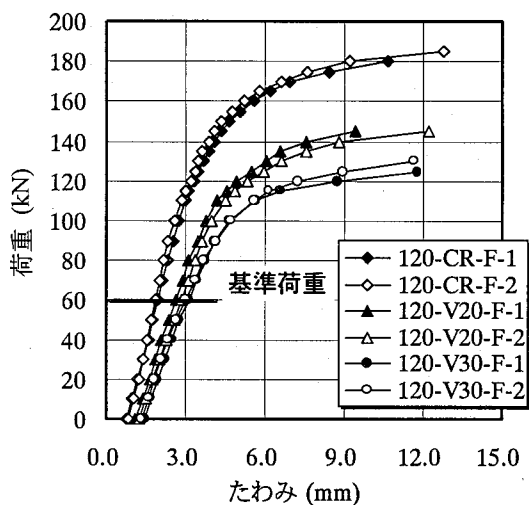


図-10 荷重とたわみの関係

である。実験衝撃係数を得た基準荷重 60kN における各実験の平均たわみは、走行一定荷重では 1.91mm、走行振動荷重 $\pm 20\%$ 、 $\pm 30\%$ で、それぞれ 2.74mm、1.61mm である。この平均たわみ値から実験衝撃係数（式(5)）を求めると、荷重振幅 $\pm 20\%$ の場合は 0.431、 $\pm 30\%$ の場合は 0.606 となる。したがって、走行振動荷重による段階荷重によってさらに損傷を受け、走行振動荷重による 40,000 回走行の疲労実験における実験衝撃係数を上回ったものと考えられる。

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、動的影響および 40,000 回走行後の段階荷重実験による残存耐力を評価した結果、以下の結論を得た。

- 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、走行振動荷重 $\pm 20\%$ の場合が 0.441、 $\pm 30\%$ の場合が、0.556 となり、与えた荷重振幅に対して走行振動荷重 $\pm 20\%$ が 2.05 倍、走行振動荷重 $\pm 30\%$ の場合で 1.85 倍となった。
- ② 本実験における 40,000 回走行の等価繰返し回数は、走行振動荷重 $\pm 20\%$ の場合が 4,059,876 回、走行振動荷重 $\pm 30\%$ の場合が 11,139,055 回となり、活荷重たわみと等価繰返し回数との関係では、ほとんど同等なたわみの増加傾向を示した。
- ③ 40,000 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返し回数に比例してひび割れ損傷も著しい。

④ 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、走行一定荷重の場合の等価繰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。

⑤ 荷重振幅 $\pm 20\%$ 、 $\pm 30\%$ の走行振動荷重により 40,000 回走行の疲労損傷を履歴した動的影響を示す実験衝撃係数は式(6)より推定することが可能である。

⑥ 本実験の 40,000 回走行時における実験衝撃係数は、現行示方書に規定する衝撃係数を上回ることから、伸縮装置の段差量を 10mm 以下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。

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(Ⅷ－1985)、土木研究所資料、No.2258、1985
- 2) 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
- 3) 松井繁之、石井孝男、庄中 憲、国原将司：23 年間供用された鋼道路橋 RC 床版の疲労試験、土木学会第 48 回年次学術講演会、土木学会、Ⅰ-46、pp. 286-287、1993
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、2002.3
- 7) 松井繁之：橋梁の寿命予測、安全工学 Vol.30、No.6、pp. 432-440、1991
- 8) 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

(2005 年 9 月 10 日受付)