ISSN 2186-5647

1-18

輪荷重走行振動疲労実験におけるRC床版の耐疲労性の評価

日大生産工(院)　○木内彬喬　日大生産工　阿部忠，澤野利章　日大生産工(非常勤)　川井豊

１．はじめに

道路橋 RC 床版の損傷の多くは、伸縮継手の段差付近で発生している。この主な原因は、大型車両が伸縮継手を通過することで発生する振動荷重や、段差によって発生する衝撃によるものである [1)]。とくに、伸縮継手に段差がある場合、大型車両の段差通過時に発生する荷重変動が衝撃力として作用することから、伸縮継手付近の RC 床版に抜け落ち等が生じている。したがって、大型車両の荷重変動を想定した走行振動荷重が耐疲労性に及ぼす影響について検証を行う必要がある。

そこで本研究は、RC 床版供試体に一定荷重および荷重振幅 ±20%、±30%の振動荷重を重畳させた輪荷重走行疲労実験を行い、一定荷重を作用させた供試体の走行回数を基準に振動荷重が重畳した場合の耐疲労性を評価した。さらには、阿部ら [2)] が提案する RC 床板の S-N 曲線式との整合性を検証した。

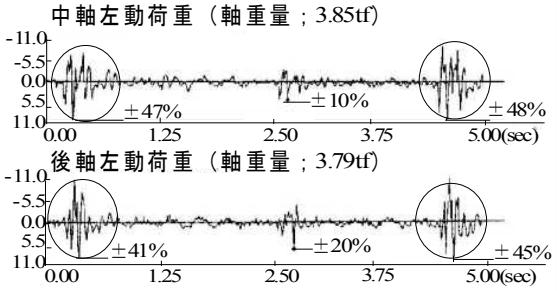
２．既往の研究

土木研究所 [1)] では、大型車両が伸縮継手の段差部を通過する際に発生する衝撃力に関する調査および実験研究を実施し、研究成果を報告している。報告によると、荷重分担が中軸左動荷重で 37.73kN、後軸左動荷重が 37.14kN の総重量 205kN タンデム式ダンプトラックを用いた実験を行い、この実験車両が段差量 20mm の伸縮継手部を通過するときに発生する中軸・後軸の荷重変動を図－1 のように示している。これによると、実験車両の軸重量に対して 2.77 倍～ 2.86 倍(基準荷重に対して ±41 ～ ±48%)の荷重変動が作用している。

３．供試体の使用材料および寸法

3.1　使用材料

RC 床版供試体のコンクリートには普通セメントと 5mm 以下の砕砂、5mm ～ 20mm の砕石を使用した。RC 床版の押抜きせん断耐力はコンクリートの圧縮強度の影響を受けることから、本供試体の目標配合条件を設計基準強度 24N/mm^2 および 30N/mm^2 の 2 種類とし、それぞれを A タイプ、B タイプとした。また、供試体の鉄筋には SD295A、D13 を配置した。ここで、実験に用いた供試体の材料特性値を表－1 に示す。表－1 より、A タイプのコンクリートの圧縮強度の平均は 30.0N/mm^2、B タイプのうち、一定荷重を作用させた供試体の圧縮強度の平均は 35.0N/mm^2、振動荷重を作用させた供試体は 33.0N/mm^2 である。



図－1　大型車両が段差量 20mm を通過する際に発生する中軸・後軸の荷重変動

表－1　材料特性値

供試体名称	コンクリートの圧縮強度 N/mm^2	鉄　筋　(SD295A)			
		使用鉄筋	降伏強度 N/mm^2	引張強度 N/mm^2	ヤング係数 kN/mm^2
RC-A RC-A-V	30.0	D13	355	498	200
RC-B	35.0	D13	355	498	200
RC-B-V	33.0	D13	355	498	200

3.2　供試体寸法および鉄筋の配置

RC 床版供試体は、現行の道路橋示方書 [3)] の規定に準拠して 3/5 モデルで製作した。よって、供試体の寸法は図－ 2 に示すように、全長 1,600mm、支間 1,400mm、床版厚 150mm の等方性版とした。鉄筋は複鉄筋配置とし、引張側の軸直角方向および軸方向に D13 を 120mm 間隔で配置し、圧縮側には引張側の鉄筋量の 1/2 を配置した。また、主鉄筋の有効高さはそれぞれ 125mm、112mm である。

４．実験方法および等価走行回数

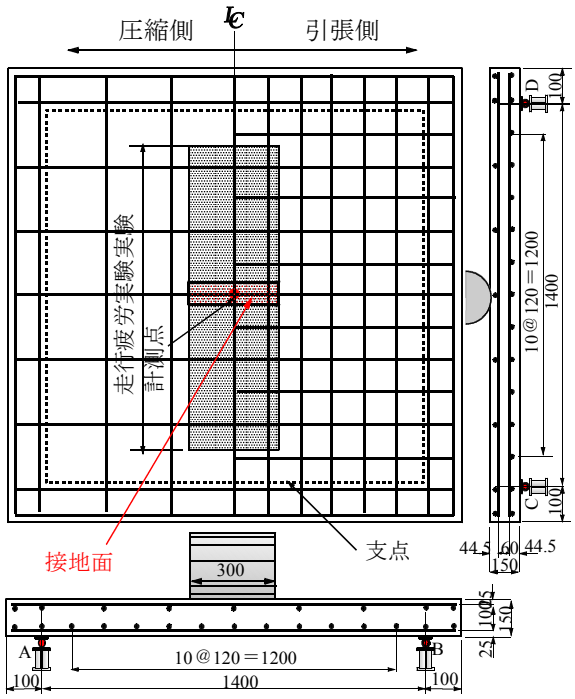
4.1　実験方法

(1) 走行一定荷重における疲労実験

RC 床版の輪荷重走行疲労実験は、輪荷重 100kN を載荷させ、床版中央から両支点方向に 450mm を

Evaluation of Fatigue Resistance of RC Highway Deck Slabs Subjected to Wheel Running Load Superposed Vibration

Akitaka KIUCHI, Tadashi ABE, Toshiaki SAWANO and Yutaka KAWAI



図－2　供試体寸法および鉄筋配置

破壊に至るまで往復連続走行させる実験である。また、A タイプの供試体の走行範囲には厚さ 3.2mm、B タイプには厚さ 9.0mm の鋼板を敷設し、走行時間は、1 走行 900mm を 9sec とした。ここで一定走行荷重波形の一例を図－3 に示す。

(2) 走行振動荷重における疲労実験

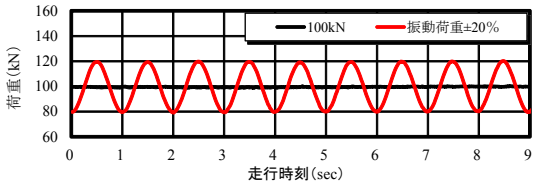
走行振動荷重による疲労実験は輪荷重 100kN に対して、荷重振幅 ±20 %（最大荷重 120kN、最小荷重 80kN）、±30 %（最大荷重 130kN、最小荷重70kN）、振動数1.0Hz の正弦波形の片振荷重を載荷し、破壊に至るまで走行させた。ここで、輪荷重 100kN に対して走行振動荷重 ±20 %の荷重波形の一例を図－ 3 に併記した。また、走行範囲、設置した鋼板、計測点は走行一定荷重における疲労実験と同様とした。

4.2　走行疲労実験における等価走行回数

等価走行回数はマイナー則に従うと仮定すると式(1)で与えられ、式(1)における基準荷重 P は 72kN (=100kN × 3/5 × 1.2)とした。また、式(1)における S-N 曲線の傾きの逆数 m には、松井らが提案する S-N 曲線の傾きの逆数の絶対値 m=12.7 を適用する [5), 6)]。

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^{n} (P_i/P)^m \times n_i \qquad (1)$$

ここで、N_{eq}：等価走行回数（回）、P_i：載荷荷重(kN)、P：基準荷重(=72kN)、n_i：実験走行回数(回)、m：S-N 曲線の傾きの逆数（=12.7）



図－3　波形の一例

表－2　実験走行回数および等価走行回数

供試体名称	コンクリートの圧縮強度(N/mm²)	走行回数および等価走行回数(回)		平均等価走行回数（回）	走行回数比
RC-A	30.0	実験走行回数	139,500	9,045,895	—
		等価走行回数	9,045,895		
RC-A-V20-1	30.0	実験走行回数	59,780	3,562,592	0.394
		等価走行回数	3,876,442		
RC-A-V20-2	30.0	実験走行回数	50,100		
		等価走行回数	3,248,741		
RC-A-V30-1	30.0	実験走行回数	18,001	1,044,040	0.115
		等価走行回数	1,167,278		
RC-A-V30-2	30.0	実験走行回数	14,200		
		等価走行回数	920,802		
RC-B	35.0	実験走行回数	378,800	24,563,332	—
		等価走行回数	24,563,332		
RC-B-V20-1	33.0	実験走行回数	104,000	6,743,893	0.275
		等価走行回数	6,743,893		
RC35-V30-1	33.0	実験走行回数	32,000	2,075,045	0.084
		等価走行回数	2,075,045		

5．結果および考察

5.1　等価走行回数

本実験による等価走行回数を表－2 に示す。

(1) 供試体 A タイプ

供試体 RC-A の等価走行回数は 9.045×10^6 回である。これに対して供試体 RC-A-V20 等価走行回数の平均は 3.562×10^6 回であり、供試体 RC-A との等価走行回数の比は 0.394 である。

次に、供試体 RC-A-V30 の等価走行回数の平均は 1.044×10^6 回であり、供試体 RC-A との等価走行回数の比は 0.115 である。また、供試体 RC-A-V20 との比は 0.293 であり、走行振動荷重が重畳することで耐疲労性が大幅に低下している。

(2) 供試体 B タイプ

供試体 RC-B の等価走行回数は 24.563×10^6 回であり、供試体 RC-A の 2.7 倍である。

次に、供試体 RC-B-V20-1 の等価走行回数は 6.743×10^6 回であり、供試体 RC-B との等価走行回数の比は 0.275 である。また、供試体 RC-B-V30-1 の等価走行回数は 2.075×10^6 回であり、等価走行回数比は 0.084 である。両供試体ともに A タイプ 供試体の低下率を大きく下回っている。

これは、一定荷重走行実験に用いた供試体 RC-B の圧縮強度が 35N/mm² であるのに対し、振動荷重走行実験に用いた供試体の圧縮強度は 33N/mm² であり、コンクリートの圧縮強度の差が等価走行回数に反映された結果と考えられる。

この様な振動荷重は、主に伸縮装置部の段差や路面の凹凸によって生じることから、荷重振幅を最小限にするよう路面の凹凸の維持管理が必要に

なるものと考えられる。

5.2 S-N曲線式および耐荷力式

阿部ら[2)]は1994年改定の道示に準拠した1/2、3/5モデルのRC床版供試体を用いた輪荷重走行疲労実験の結果を基に、式(2)で表されるS-N曲線式とS-N曲線式に適用する押抜きせん断耐荷力式(3)を併せて提案している。ここで、阿部らが提案する押抜きせん断力学モデルを図－4に示す。

(1) RC床版のS-N曲線式

$$\log (P/P_{sx}) = -0.06417 \log N + \log 0.996 \quad (2)$$

ここで、P：基準荷重（kN）、P_{sx}：押抜きせん断耐荷力（kN）、N：繰返し回数（回）

(2) 押抜きせん断耐荷力式

S-N曲線式(2)におけるRC床版の押抜きせん断耐荷力P_{sx}は、式(3)として与えられる[6)]。

$$P_{sx} = f_{cv0}\{2(B+2a)a+2(A\times a)\}+f_t\{4C_X(2d_d+B)\} \quad (3)$$

$$f_{cv0} = 0.688f'^{0.610}_c \leqq f'_c = 80\mathrm{N/mm^2}$$

$$f_t = 0.269f'^{2/3}_c$$

$$C_X = (C'_X + C'_Y)/2$$

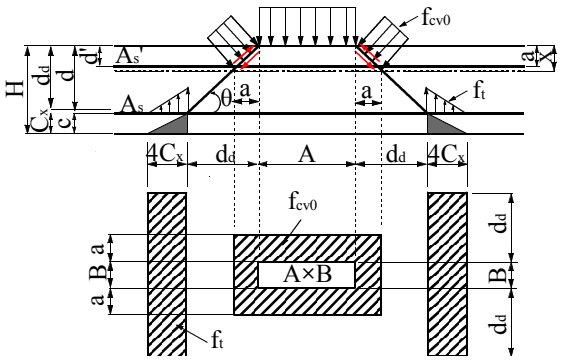
ここで、A、B：輪荷重の軸直角方向、軸方向の辺長（mm）、a：主鉄筋方向a_X、配力鉄筋方a_Yの等価応力ブロックの平均値（mm）、C_X：ダウエル効果の影響を示す寸法効果（mm）、d_d：主鉄筋の有効高さ(d_X)と配力筋方向の有効高さ(d_Y)の平均(mm)、H：床版全厚(mm)、f'_c：コンクリートの圧縮強度($\mathrm{N/mm^2}$)

5.3 RC床版の押抜きせん断耐荷力

鉄筋の引張強度f_yおよび鉄筋のヤング係数は表－1より、それぞれ498N/mm²、200kN/mm²である。また、供試体Aタイプは走行面に厚さ3.2mmの鋼板を設置して疲労試験を行ったことから、輪荷重の設置面積は300×50mmである。これらを式(3)に適用した場合の押抜きせん断耐荷力P_{sx}を表－3に示す。表－3より、コンクリートの圧縮強度30N/mm²の供試体RC-Aの押抜きせん断耐荷力は202.4kNである。

一方、供試体RC-B、RC-B-V20-1、V30-1は走行面に9mmの鋼板を設置して疲労実験を行ったことから輪荷重の設置面は300mm×55mmである。よって、コンクリートの圧縮強度を35.0N/mm²、33.0N/mm²とした場合の押抜きせん断耐荷力P_{sx}はそれぞれ215.1kN、211.2kNである。

そこで、供試体RC-Bのコンクリートの圧縮強度を振動荷重の供試体と同様に33N/mm²として押抜きせん断耐荷力を式(3)から算定すると、P_{sx}は供試体RC-B-20-1、RC-B-30-1と同様に211.2kNとなる。



図－4 押抜きせん断力学モデル

表－3 押抜きせん耐荷力およびS値

供試体	コンクリートの圧縮強度(N/mm²)	等価走行回数 N_{eq}(回)	基準荷重 P(kN)	押抜きせん断耐荷力 (Psx)	S(=P/Psx)
RC-A	30.0	9,045,895	72.0	202.4	0.356
RC-A-V20-1		3,876,442			
RC-A-V20-2		3,248,741			
RC-A-V30-1		1,167,278			
RC-A-V30-2		920,802			
RC-B	35.0	24,563,332		215.1	0.335
RC-B-V20-1	33.0	6,743,893		211.2	0.341
RC-B-V30-1		2,075,045			

ここで阿部らが提案するS-N曲線式(2)に式(3)から算出した押抜きせん断耐荷力P_{sx}(=211.2kN)と基準荷重P(=72kN)を与え、等価走行回数を算定すると18.331×10^6回となった。また、荷重振幅±20%、±30%の荷重を重畳させた供試体との等価走行回数比はそれぞれ0.368、0.113となり、圧縮強度30N/mm²の供試体RC-Aと同程度の低下率が得られた。以上のように、輪荷重の設置面積およびコンクリート圧縮強度が押抜きせん断耐荷力の算定に大きく影響することになる。

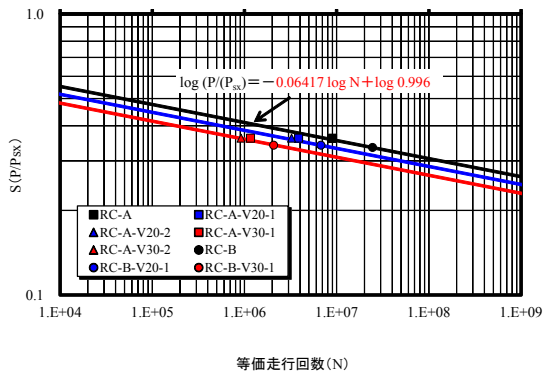
5.4 S-N曲線

基準荷重Pを押抜きせん断耐荷力P_{sx}で除して無次元化したS値と等価走行回数N_{eq}との関係で表わされるS-N曲線を図－5に示す。

(1) 一定荷重走行実験

コンクリートの圧縮強度30N/mm²、輪荷重の設置面積が300×50mmである供試体RC-Aの等価走行回数は9.045×10^6回である。

一方、コンクリートの圧縮強度35N/mm²、輪荷重の設置面積が300×55mmである供試体RC-Bの等価走行回数は24.563×10^6回であり、供試体RC-Aの等価走行回数の2.715倍である。しかし、無次元輪荷重値S(=P/P_{sx})をS-N曲線上にプロットすると、阿部らが提案するS-N曲線式上にプロットされる結果となった。このことから、圧縮強度および輪荷重の設置面が異なるRC床版および実験



図－5　S-N 曲線

状況においても、押抜きせん断耐荷力を適切に算定することで、破壊荷重付近の等価走行回数が適切に評価できる。

(2) 振動荷重走行実験：±20% 、±30%

振動荷重 ±20%の振動荷重で疲労実験を行った A タイプの供試体 RC-A-V20-1、2 の S 値は 0.356 であるが等価走行回数は一定荷重で走行した RC 床版の 39%程度である。

一方、B タイプの供試体 RC-B-V20-1 の S 値は 0.341 であり、これをプロットするといずれも RC 床版の S-N 曲線式の下方となる。

次に、振動荷重 ±30%の振動荷重で疲労実験を行った A タイプの供試体 RC-A-V30-1、2 の S 値は 0.356 であるが等価走行回数は一定荷重で走行した RC 床版の 11%程度であり、振動荷重 30%が生じることで大幅に耐疲労性が低下する結果となる。

また、B タイプの供試体 RC-B-V30-1 の S 値は 0.341 であり、等価走行回数はさらに低下し、2.075×10^6 回である。よって、A、B タイプの S 値を結ぶと、振動荷重 ±20%、±30%が重畳した場合の RC 床版の S-N 曲線式が評価されることになる。

(3) 振動走行荷重 ±20%、±30%の S-N 曲線式

振動荷重が重畳した場合の疲労破壊モードは一定荷重走行時と同じであることから、S-N 曲線の勾配は同じであり、切片のみが変化すると仮定できる。この仮定を用いることにより、供試体 RC-V20、RC-V30 の S-N 曲線式は式(4)、式(5)で与えられる。

$$\log (P/Psx) = -0.06417 \log N + \log 0.935 \quad (4)$$
$$\log (P/Psx) = -0.06417 \log N + \log 0.865 \quad (5)$$

なお、式(4)、(5)は一定荷重走行時の S-N 曲線式をスライドさせた結果である。

以上より、段差を有する伸縮継手部などによって発生する振動荷重が重畳することで RC 床版の疲労寿命が大幅に低下することが明らかとなった。

６．まとめ

(1) RC 床版に、伸縮継手の段差等によって発生する荷重変動が作用する場合、基準荷重に対して ±20%（上限荷重 120kN、下限荷重 80kN）、±30%（上限荷重 130kN、下限荷重 70kN）の荷重変動が重畳することで、等価走行回数はそれぞれ 39%、11%と著しく低下する結果が得られた。このことから、伸縮継手の段差等、振動荷重を発生させる原因となる路面の凹凸は、RC 床版の疲労耐久性確保の観点から適切な管理値を設けて荷重変動幅を最小限にする必要があると考えられる。

(2) 阿部らが提案する押抜きせん断耐荷力式に、コンクリートの圧縮強度、輪荷重の設置面の辺長を適切に与えることで、破壊荷重付近の押抜きせん断耐荷力が適切に評価でき、阿部らが提案する S-N 曲線式上にプロットされたことから、これらの整合性を確認することができた。

(3) 走行振動荷重を作用させた疲労実験における実験結果から、阿部らが提案する押抜きせん断耐荷力式を用いて求めた S 値と等価走行回数 N_{eq} の関係を用いて評価した S-N 曲線については、一定荷重走行実験の S-N 曲線式との関係性と、振動荷重が S-N 曲線に及ぼす影響についても明らかにすることができた。

(4) 走行振動荷重 ±20%、±30%が作用した場合の疲労寿命の予測式として式(4)、(5)を提案した。これらの式を用いることにより、段差を有する伸縮置等により発生する走行振動荷重 ±20%、±30%を許容した疲労寿命予測の推定が可能となると考えられる。

参考文献

1) 建設省土木研究所構造研究室：橋の衝撃荷重に関する実験調査報告書（I-1987）、土木研究所資料、No. 2508、(1987)
2) 阿部忠ほか：道路橋 RC 床版の押抜きせん断耐荷力および耐疲労性の評価、土木学会論文集 A1、pp. 39-54、(2011.1)
3) 阿部忠ほか：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 (2006.1)
4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I、II、(2012.3)
5) 前田幸雄、松井繁之：輪荷重移動装置による道路橋床版の疲労に関する研究、第 6 回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.221-224、(1984)
6) 松井繁之：道路橋床版設計・施工と維持管理、森北出版、(2007.10)