定点疲労実験による伸縮装置を設けた RC はりの耐疲労性および S-N 曲線式の提案

日大生産工 〇野口 博之 日大名誉教授 阿部 忠 日大生産工 水口 和彦 澤野 利章 朝日エンヂニヤリング(株) 川井 豊 日大生産工(院) 佐々木 茂隆

1.はじめに

現在供用されている道路橋床版は車輌の繰り返し走 行および伸縮装置部を通過する際の荷重変動によって 疲労損傷が促進されている¹⁾。荷重変動による影響に 関しては、土木研究所より伸縮装置の段差20mm を通 過する際に軸重量と基準荷重とした場合に約±47%の 荷重変動が生じており、この荷重変動が衝撃力として 作用し、伸縮装置の鋼材破損や劣化、既設 RC 床版へ の損傷も著しい²⁾。また、伸縮装置の補修サイクルは 平均10年程度で取替が行われ³⁾、伸縮装置の撤去時な らびに設置時に発生する新たな損傷も指摘されている。 これらの事例に対し、耐荷力性能の向上および施工時 におけるひび割れ損傷を抑制する工法として荷重分布 型伸縮装置が提案されている⁴。

本研究は、従来の荷重集中型伸縮装置を設置したRC はりと2タイプの荷重分布型伸縮装置を設置したRC はりを用いて定点疲労実験を行い、伸縮装置を設けた RC はりの耐疲労性を評価した。また、伸縮装置を設け たRC 構造の維持管理における寿命推定を行うために 静荷重実験から得られた静的耐荷力ならびに関ロら ⁵ が提案する伸縮装置を設けた RC 床版の疲労実験より 得られた成果を適用して算出した等価繰り返し回数お よび修正 Goodman の関係式⁶から得られた荷重比補正 係数 C_R'を考慮した等価繰り返し回数を算定し、鋼製伸 縮装置を設置した RC 部材の S-N 曲線式を提案する。

2. 供試体概要

2.1 使用材料

(1)RC はりの使用材料 伸縮装置を設置した RC はり のコンクリートには普通セメントと最大骨材寸法 5mm 以下の砕砂,最大骨材寸法 20mm の砕石を使用 する。コンクリートの配合条件は道示[¬]に規定するコ ンクリートの設計基準強度 24N/mm²を目標とする。鉄 筋には SD345, D16 を用いた。

(2) 伸縮装置に用いる鋼材・設置に用いる材料 伸縮装置に用いる鋼材には SS400 を用いる。また, 骨組み材 には SD345 のジベル筋と SD345 の鉄筋を用いる。

伸縮装置の設置に用いる材料として、コンクリート には材齢3時間で道示に規定する設計基準強度 24N/mm²以上を満足する超速硬コンクリートを用いる。 超速硬コンクリートの配合条件は超速硬セメントに最 大骨材寸法20mmの骨材が配合されたプレミックス材 を用いる。また、本実験に用いる伸縮装置は既設 RC はり上面から10mmの位置に配置するためこの10mm の隙間にセメントの充填が必要となることから本研究 では10mmの隙間には流動性超速硬モルタルを用いる。

伸縮装置の取替工事において,既設装置を撤去する 際に生じる微細なひび割れに対して低粘度エポキシ系 接着剤,打継ぎモルタル・コンクリートと既設コンク リート・伸縮装置との一体性を高めるために高耐久型 エポキシ系接着剤が適用されている[®]。本研究では, 実施工を想定し,2種類の接着剤を用いる。

2.2 供試体寸法

本実験に用いる供試体は,RC 床版端部と橋台の遊 間部に突き合わせ型伸縮装置を設置した場合を想定し たRCはりとし,支間2,000mm,幅270mm,高さ100mm とする.ここで,伸縮装置を設置したRCはりの寸法 をFig.1に示す。

(1)荷重集中型伸縮装置 荷重集中型装置を設置する 供試体の寸法はFig.1(1)に示すように, RC はりの厚さ を 100mm, 鉄筋は引張側のみに配置する単鉄筋配置と し, その上に伸縮装置を設置する.よって,高さは



Proposed of S-N curve and evaluation of fatigue durability of RC beam of expansion joint by fixed point fatigue experiment by

Hiroyuki NOGUCHI, Tadashi ABE, Kazuhiko MINAKUCHI, Toshiaki SAWANO, Yutaka KAWAI and Shigetaka SASAKI

200mm, 幅 270mm, 支間 2,000mm, 全長 2,200mm の RC はりである。伸縮装置の断面寸法は, 厚さ 9mm 鋼 板パラペットに D16 のジベル筋を 200mm 間隔で溶接 する。次に, 縦筋を 200mm 間隔, 鉄筋 D13 を溶接し た骨組み構造とした. ここで, 供試体名称を RC.F-J と する。

(2)荷重分布型伸縮装置 荷重分布型伸縮装置を設置 する供試体の寸法は Fig.1(2)に示すように,厚さ 9mm 荷重分布鋼板に縦筋 D16 を 200mm 間隔で溶接する。 次に,鋼板パラペットの側面に D16 のジベル筋を 200mm 間隔で溶接し,荷重分布鋼板の縦筋と溶接する。 最後に,圧縮鉄筋 D13 を溶接した骨組み構造とする。 荷重分布型伸縮装置の設置は,装置の両端側に,設置 固定用のアンカーボルトを端部 4 点で固定して既設 RC はりに設置する。ここで,伸縮装置を直接設置した 供試体名称を RC.F.J-N,低粘度エポキシ系接着剤と高 耐久型エポキシ系接着剤を塗布した供試体名称を RC.F.J-A とする。

3. 実験概略

3.1 実験方法

本実験は車両走行に荷重変動を考慮した実験として 定点疲労実験を行った。荷重の設置面積は道示に規定 する輪荷重設置面 500×200mm の載荷板を用いる。定 点疲労実験における荷重変動の条件は上限荷重 Pmax と 下限荷重 Pmin とした繰り返し載荷とし、荷重範囲(ΔP =Pmax-Pmin)を±30kN とする。繰り返し回数 20 万回 ごとに平均荷重 Pman を 20kN 増加させる階段状載荷と する。初期載荷荷重は既往の研究成果である静的耐荷 力の Puの 50%に相当する 50kN とし、荷重範囲±30kN で 2Hz の正弦波形で載荷させる。その後、20 万回ごと に平均荷重を 70kN、90kN、110kN と増加させる。

3.2 S-N曲線式および等価繰り返し回数

(1) 平均応力の影響を考慮しない疲労強度の算定 伸縮装置の設置した RC はりの静的耐荷力を Pu,基準荷重を Pa とした場合,完全片振り荷重載荷に対する S-N 曲線式は式(1)として与えられる。また,定点疲労実験における等価繰り返し回数は、マイナー則に従うと仮定すると式(2)として与えられる。

$$\log(P_d/P_u) = \log C_0 - m \cdot \log N_0 \tag{1}$$

$$N_{eq} = \sum_{i=1}^{N} (\Delta P_i / P_d)^m \times N_i$$
(2)

ここで, P_d/P_u:曲げ耐荷力を与える輪荷重で無次元 化した基準輪荷重, N_i:基準荷重が繰り返し載荷され たときの疲労寿命, C₀, m:各 S-N 曲線の切片と傾き に関する定数, N_{eq}:等価繰り返し回数, ΔP_i:実験時の 荷重変動範囲, P_u:静的耐荷力, N_i:実験繰り返し回数 (2) 平均応力の影響を考慮した疲労強度の算定 鋼部 材の疲労強度の推定において上限荷重 Pmax と下限荷重 Pmin の荷重比 R (=最大応力度 σ max と最小応力度 σ min の応力比)が疲労寿命に及ぼす影響は、圧縮片振りの 条件以外は無視できるが、コンクリート部材では、最 小応力度の影響が認められる。このことから、コンク リート標準示方書10では、コンクリートと鉄筋の疲労 設計強度(振幅)を求める式において、材料の静的強 度と死荷重応力度を想定して応力比が疲労強度に及ぼ す影響を考慮している。本実験では、載荷荷重に対し て荷重変動範囲 ΔPi を±30kN,段階荷重載荷としてい ることから荷重サイクルごとに荷重比 R が変化する。 そのため、伸縮装置を設置した RC はりの疲労強度は 応力比の影響を受けると考えると、式(2)を用いて等価 繰り返し回数 Neg を算出する際には、以下に示すよう に各載荷サイクルの荷重比Rの影響を平均応力に関す る補正係数Cr'(以下,荷重比補正係数とする)を考慮 する必要がある。荷重比補正係数 CR'は、応力が荷重 と線形関係にあるとして、応力を荷重で置き換えた場 合,修正 Goodman の関係式が成り立つ。そこで、本実 験では、修正 Goodman の関係が成立すると仮定し、完 全片振り (R=0) の疲労強度 Poは、部分片振り (R= R)時の作用上限荷重 Pmax,作用下限荷重 Pmin および静 的耐荷力 Puより,式(3)の関係として与えることとする。

$$P_0 = (P_{max} - P_{min}) / \{1 - (P_{min} / P_u)\}$$
(3)

ただし、 P_{max} - $P_{min} = \Delta P_0$ ($P_{min} \neq 0$) ここで、 P_{max} :上限荷重、 P_{min} :下限荷重、 ΔP :部 分片振荷重(荷重比 R $\neq 0$)における荷重範囲、 P_u :静 的耐荷力

次に,完全片振り荷重条件 (R=0) に対する S-N 曲 線式と荷重比 R=R が疲労強度に及ぼす影響を考慮し た部分片振り荷重条件における S-N 曲線式を式(4), (5) として与える。

$$\log(\Delta P/P_u) = \log C_0 - m \cdot \log N_0 \tag{4}$$

$$\log(\Delta P/P_u) = \log C_R - m \cdot \log N_R$$
(5)

ここで, ΔP:荷重範囲(部分片振荷重), C₀, N₀:完 全片振条件(R=0)に対する S-N 曲線式の切片, 疲労 寿命, C_R, N_R:部分片振条件(R=R)に対する S-N 曲 線式の切片, 疲労寿命, m:S-N 曲線式の勾配に関する 定数

荷重範囲 ΔP に対する完全片振り条件の疲労寿命 N_0 と部分片振り条件の疲労寿命 N_R の比を荷重補正係数 C_R と定義すると C_R 'は式(3),(4),(5)より,式(6)として与え,部分片振り条件(荷重比R=R,荷重範囲 ΔP)で得られた疲労寿命 N_R と式(6)で表される荷重比補正係数 C_R 'を用いて,これと疲労損傷が等価な完全片振り

基準荷重:P _d		40]		
実験荷重:P _{mean}		50	70	90	110			
上限荷重:P _{max}		80	100	120	140			
下限荷重:P _{min}		20	40	60	80			
荷重範囲:ΔPD		60						
供試体名称		N_1	N ₂	N3	N4	ΣΝ	Rate	
RC-F-J	静的耐荷力:Pu	100.5						
	実験繰り返し回数:N _i	12,500				12,500	_	
	N_{eq} (C _R '=1.0)	62,381				62,381		
	N _{eq.R} (C _R 'を考慮)	66,891				66,891		
RC-F-J.N	静的耐荷力:Pu	140.4						
	実験繰り返し回数:N _i	200,000	200,000	8,566		408,566	32.93	
	N_{eq} (C _R '=1.0)	1,012,500	1,012,500	43,365		2,068,365		
	N _{eq.R} (C _R 'を考慮)	1,052,156	1,101,041	49,851		2,203,048		
RC-F-J.A	静的耐荷力:Pu	160.8						
	実験繰り返し回数:Ni	200,000	200,000	200,000	400	600,400	48.95	
	N_{eq} (C _R '=1.0)	1,012,500	1,012,500	1,012,500	2,025	3,039,525		
	N _{eq.R} (C _R 'を考慮)	1,046,685	1,087,551	1,137,893	2,405	3,274,534		

Table 1 等価繰り返し回数および荷重比補正係数を考慮した等価繰り返し回数

条件 (R=0, 荷重範囲 Δ P) での繰り返し回数 N₀ (等価 繰り返し回数) は,式(7)で与えられる。

$$C_{\rm R}' = (N_{\rm R}/N_0) = (C_{\rm R}/C_0)^{-1/m} \{1 - (P_{\rm min}/P_{\rm u})\}^{-1/m}$$
 (6)

$$N_0 = (C_R / C_0)^{-1/m} \times N_R = C_R' \times N_R$$
 (7)

ここで, C_R':荷重比補正係数

(3) 等価繰り返し回数の算定 定点疲労実験における 耐疲労性の評価は等価繰り返し回数を算出する。荷重 比補正係数 Cr'を考慮しない等価繰り返し回数の算定 には式(2)を用いる。また、荷重比補正係数 CR'を考慮 した等価繰り返し回数の算定には式(2)に補正係数式 (6)を考慮した式(8)として与え、算出する。等価繰り返 し回数の算定に用いる基準荷重 Paには、RC はりに B 活荷重(100kN)に衝撃係数を考慮した荷重(150kN) を本実験のはり幅 270mm を考慮して 40kN (= 150kN/(1,000/270)) とする。なお、式(2)における S-N曲 線式の傾きの逆数の絶対値 m には伸縮装置に鋼部材 が適用されることから鋼部材の疲労強度推定に用いら れる m=3 が検討される⁷。しかし、伸縮装置を設置し た部材はRC構造となるためm=3を適用する場合、 疲労寿命が短くなるためより安全側に評価される。関 ロら 5は伸縮装置の材料に炭素繊維シート、樹脂やゴ ム系材料を用いた埋設型伸縮装置を設けた RC床版の 輪荷重走行実験が行われ、伸縮装置を設けた RC 構造 の疲労耐久性評価として m=4 を適用した場合の妥当 性を評価している。そこで本研究では、伸縮装置を設 けたRCはりのS-N曲線の傾きの逆数の絶対値mには 関口らの実験から得られたm=4を適用する。

$$N_{eq.R} = \sum_{i=1}^{N} \{1 - (P_{min}/P_u)\}^{-1/m} \times N_{eqi}$$
(8)

ここで、N_{eqR}: C_R'を考慮した場合の等価走行回数, m:伸縮装置を設置した RC はりの S-N 曲線の傾きの 逆数の絶対値(=4), N_{eqi}: C_R'=1.0 の場合の実験繰り 返し回数

4. 実験結果

4.1 静的耐荷力

静荷重実験より得られた荷重集中型伸縮装置を設け たRCはりRC-F-Jの静的耐荷力は100.5kN,荷重分布 型伸縮装置を設けたRCはりRC-F-J.Nの静的耐荷力は 140.4kN,接着剤を併用した荷重分布型伸縮装置を設け たRCはりRC-F-J.Aの静的耐荷力は160.8kNとなっ た。これらの静的耐荷力を基にS-N曲線式および繰り 返し回数を算出する。

4.2 等価繰り返し回数

定点疲労実験による荷重補正係数 C_R'=1 とし,式 (8)より算出した等価走行回数 N_{eqi} と荷重補正係数 C_R' を考慮した等価走行回数 N_{eqR} を Table 1 に示す。

Table 1 に示すように従来型の RC.F-J を基準とした 場合, RC.F-J.N および RC.F-J.A の等価繰り返し回数は それぞれ 32.93 倍, 48.95 倍と向上する結果となった。 これを荷重倍率に換算するとそれぞれ 32.93¹⁴=2.40 倍, 48.95¹⁴=2.65 倍となり,荷重分布型伸縮装置が標準的 な荷重集中型伸縮装置と比較して大きな輪荷重の繰り 返しに耐える結果が得られた。また,接着剤の塗布よ り等価繰り返し回数が 1.49 倍となることから接着剤を 塗布することで伸縮装置を設置した RC 構造の耐疲労 性が向上することが確認された。

以上より,等価繰り返し回数においては荷重分布型 伸縮装置を設置することで輪荷重が広範囲に分布し作 用することから耐疲労性が向上する。また,接着剤を 塗布することでコンクリート材料と分布鋼板の一体性

	基準荷重 P _d (kN)	最大耐荷力 P _d (kN)	S=P _u /P _d	繰り返し回数 N _{eq.R}
RC-F-J	40	100.5	0.398	66,891
RC-F-J-N	40	140.4	0.285	2,203,048
RC-F-J-A	40	160.8	0.249	3,274,534

Table 2 S値とN値



Fig.2 定点疲労実験における伸縮装置のS-N曲線式

が高まり、耐疲労性の向上に寄与する。

4.3 伸縮装置を設けた RC 構造の S-N 曲線式

RC部材の S-N 曲線式は式(1)として示されている。 本研究は静的耐荷力で基準荷重を除した無次元化した 基準輪荷重 S と荷重補正係数 C_R'を考慮した等価走行 回数 N_{eqR}の関係から,鋼製伸縮装置を設置した RC部 材の S-N 曲線式を提案する。ここで,無次元化した基 準輪荷重 S と荷重補正係数 C_R'を考慮した等価走行回 数 N_{eqR}の関係を Table 2, Table 2 に示す関係から RC部 材の S-N 曲線を Fig.2 に示す。なお, S-N 曲線式は荷 重補正係数 C_R'を考慮した RC.F-J, RC.F-JNの関係か ら S-N 曲線式を得て,これを基準に RC.F-JA の S-N 曲 線式は平行移動した式として提案する。RC.F-J, RC.F-J.N の関係から得られた S-N 曲線式を式(9),平行移動 した S-N 曲線式を式(10)として与える。

1) RC. F-J, RC. F-J. N (接着剤なし)

$$\log(P_d/P_u) = \log 1.139 - 0.0949 \log N$$
 (9)

2) RC. F-J. A (接着剤)

 $\log(P_d/P_u) = \log 1.032 - 0.0949 \log N$ (10)

提案した S-N 曲線式との整合性は,基準荷重 Pd と 静的耐荷力 Pu の関係から破壊繰り返し回数 Nf を算定 して検証する。破壊繰り返し回数 Nf は式(11)として与 える。

$$N_{f} = 10^{[\{\log C_0 - \log(P_d/P_u)\}/m]}$$
(11)

S-N曲線式より算出した破壊繰り返し回数Nfと荷重 補正係数 Cr'を考慮した等価走行回数 NeqR の関係を Table 3 に示す。

Table 3 に示すように、RC.F-J、RC.F-J.N の回数比 (=

Table 3 提案S-N曲線式と繰り返し回数

	S-N曲線			等価繰り	回数比	
	算定式	m	C_0	式(11)	式(8)	式(11)/式(8)
RC-F-J	式(9)	0.0949	1.139	64,818	66,891	0.969
RC-F-J-N				2,196,529	2,203,048	0.997
RC-F-J-A	式(10)	0.0949	1.032	3,244,329	3,274,534	0.991

Ng/Neq.R) はそれぞれ 0.969, 0.997 と近似している。また, RC.F-J.N の回数比(=Ng/Neq.R) も 0.991 と近似する結果が得られた。

以上より、定点疲労実験により荷重補正係数 C_R'を 考慮して算出した等価走行回数N_{eqR}は提案したS-N曲 線式と近似する結果が得られたことから、鋼製伸縮装 置を設置したRC構造のS-N曲線式として評価できる。

5. まとめ

- (1) 定点疲労実験により,荷重分布型伸縮装置を設置した RC 構造の荷重補正係数 Ck'を考慮した等価走行回数は荷重集中型伸縮装置を設置した RC 構造と対して 32 倍以上,荷重倍率を考慮しても2 倍以上の等価繰り返し回数が得られていることから従来型と比較して耐疲労性が評価できる。
- (2) 提案する S-N 曲線式より算出した破壊繰り返し回数と荷重補正係数 C_R'を考慮した等価走行回数の関係は近似していることから,鋼製伸縮装置を設置した RC 構造の S-N 曲線式として十分に評価できると考えられる。

参考文献

- 阿部忠:道路橋床版の健全性評価と長寿命化対策, 建設図書,2021.9
- 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(II-1987),土木研究所資料, No.2508, 1987.
- 3) 関口幹夫ほか: 埋設型炭素繊維シートジョイント付きRC床版の輪荷重走行疲労実験,構造工学論文集 Vol.57A, pp.1326-1337, 2011.3
- 深水弘一:道路橋の伸縮装置及び道路橋伸縮装置の 施工方法,特許第6567920号,2019
- 5) 関ロ幹夫ほか: ゴムジョイント付き RC 床版の輪荷 重走行疲労実験,構造工学論文集 Vol.55A, pp.1509-1520, 2009.3
- ご羽淳一郎ほか:異形鉄筋の疲労強度算定式,土木 学会論文集,第354号/V-2, pp.73-79, 1985.2
- 7) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 I, II, 1994
- 8) 阿部忠ほか:低弾性 PCM・PCC の性能および2種類の接着剤を塗布した RC 床版の薄層補修における耐疲労性の検証,コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, pp.1477-1482, 2019.7
- 9) 土木学会:コンクリート標準示方書[設計編], 2018.3