

[2110] 多数本の鉄筋を用いた鉄筋コンクリート梁の疲労破壊に関する研究

正会員 宮本征夫 (鉄道総合技術研究所・前国鉄構設)

正会員 石橋忠良 (東日本旅客鉄道株式会社・前国鉄構設)

正会員○林 淳 (日本鉄道建設公団・前国鉄構設)

1. はじめに

老朽化した鉄筋コンクリート構造物の補強、取替え等の判断を下す際には、耐力、ひびわれ、疲労等の項目について評価を行なわなければならない。中でも疲労については、構造物の補強、取替えの時期を明確に判定する方法が、いまだ確立されていない。過去に鉄道の鉄筋コンクリート構造物が列車荷重による疲労で破壊した例は起きていないが、東海道新幹線の鉄筋コンクリート桁等の構造物が今後疲労の耐用年限に近づくに従い、早晩、繰返し荷重が構造物に及ぼす影響が問題になることと考えられる。そのため、構造物の保守管理を的確に行ってゆくためには、疲労により鉄筋コンクリート構造物が破壊に至る兆候を事前に発見し、早期に対策を施す必要が生じるものと考えられる。

今までに鉄筋コンクリート部材としての疲労試験は、鉄筋を1～3本程度配置した供試体に関する報告が多く、多数本の鉄筋を配置した供試体についての報告がほとんどなされていない。そのため、多数本の鉄筋が配置されている実構造物が、疲労荷重により一度に破壊に至るのか、それとも鉄筋が順次破断して段階的に破壊するのか確かめられておらず興味深い問題である。そこで、ここでは多数本の鉄筋を配置した供試体を製作し、疲労による鉄筋コンクリート構造物のひびわれ、たわみの状況および破壊時の状況について、実験により確認した結果を述べる。

2. 実験の概要

2.1 供試体の製作

鉄筋コンクリート部材に対する疲労試験は、過去に鉄筋を1～3本程度配置した供試体でなされてきた。少数本の鉄筋を配置した供試体の場合、疲労強度の最弱の鉄筋により供試体全体の疲労強度がほぼ決定する。つまり、最初の1本が破断することにより他の鉄筋の負担が急増し、最初の1本の破断とほぼ同時に供試体が破壊してしまうため、最初の1本の破断による供試体の変

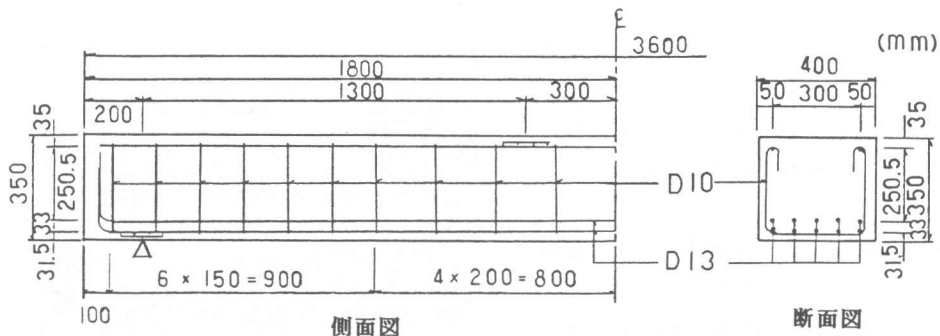


図-1 供試体の形状

状（ひびわれ，たわみ量の増加）を確認することが難しい。しかし，多数本の鉄筋が配置されている実構造物の疲労による破壊は，最弱の鉄筋が1本破断しても残りの多くの鉄筋で破断した1本分の引張力を負担するため，少数本の場合に比べ1本あたりの負担は軽い。そのため，最初の1本が破壊してもすぐには構造物全体が破壊してしまうことはないと考えられる。そこでここでは実構造物に近い多数本の鉄筋を配置した供試体を製作し，破壊までの過程を確認するという目的で，引張鉄筋を5本ずつ二段に計10本配置した供試体を製作した。供試体の製作の際には，鉄道構造物の疲労破壊を想定し，国鉄建造物設計標準解説に規定する量のせん断補強鉄筋を配筋した。また，支点部，載荷点部の支圧による破壊を避けるため，補強鉄筋を配置した。供試体の形状を図-1に，使用材料を表-1に示す。

表-1 使用材料表

使用材料	内 容
鉄 筋	寸 法 : 引張鉄筋 D13 スターラップ D10 断面形状: 竹節の異形鉄筋 引張試験値: 4100 kgf/cm ² (降伏点) 5800 kgf/cm ² (引張強度). 製造会社: K. K. 東京鉄鋼
セメント	早強ポルトランドセメント
骨 材	八王子産砕石, 砕砂
混和剤	高性能減水剤, AE剤

2.2 載荷荷重

載荷荷重は次の手順で設定した。試験期間の制約から，まず破壊時までの想定載荷回数Nを設定し，Nの値より(1)式を用いて鉄筋の完全片振り時の許容応力度 σ_{rao} を求め

表-2 載荷荷重の一覧表

名 称	破壊想定回数 N (回)	鉄筋応力度 $\sigma_{max} / \sigma_{min}$ (kgf/cm ²)	載 荷 荷 重 Pmax / Pmin (tf)
C-1	6×10^5	2915 / 600	7.0 / 1.4
C-2	10^6	2710 / 600	6.4 / 1.4
C-3	2×10^6	2465 / 600	5.9 / 1.4
C-4	2×10^6	2465 / 600	5.9 / 1.4
C-5	2.5×10^6	2390 / 600	5.6 / 1.4
C-6	2.5×10^6	2390 / 600	5.6 / 1.4

$$\log \sigma_{rao} = -0.18 \log N + 4.46 \quad (1)$$

$$\sigma_{max} = \sigma_{min} + (1 - \sigma_{min} / 5000) \cdot \sigma_{rao} \quad (2)$$

た。次に σ_{rao} の値より(2)式を用いて鉄筋の最大応力度 σ_{max} を算出した。また，その際鉄筋の最小応力度 σ_{min} は，実構造物同様に(はりの自重+版上死荷重)の載荷時を想定し600kg/cmと設定した。

(1)式は過去のSD35の鉄筋の疲労試験の実験値を回帰して得た式である。

また，載荷荷重は鉄筋の最大応力度，最小応力度の値より，最大載荷荷重，最小載荷荷重を表-2に示すように設定した。

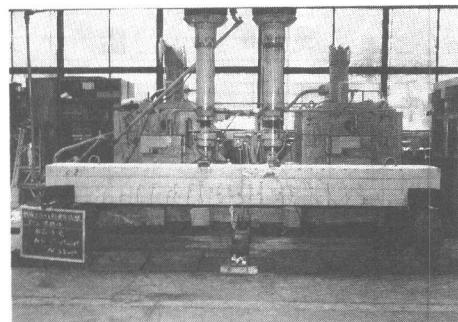


写真-1 載荷状況

2.3 載荷方法

載荷は最初に表-2に示す最大載荷荷重で静的載荷を2回繰返し、その後荷重制御により動的載荷を3Hz（1秒間に3回載荷）で行った。そして、たわみ量の増大等で動的載荷が不可能になった後静的載荷を行った。試験機は、日本国有鉄道鉄道技術研究所大型構造物疲労試験機（最大載荷能力は静的150t、動的100t）を使用した。載荷の状況を写真-1に示す。載荷は2点載荷で行った。

3. 実験の結果と考察

各供試体の破壊時の載荷回数をもとにして作ったS-N線図を図-2に示す。供試体の破壊時の載荷回数とは、何本かの鉄筋の破断による梁のたわみ量の増加で動的載荷試験が不可能となった時の値とした。ただし、その後静的載荷試験を動的載荷時の最大載荷荷重で行った結果、供試体がただちに破壊してしまうことはなかった。

図-2の結果、実験で得られた供試体の破壊時の載荷回数は、土木学会

コンクリート標準示方書に示される(3)式で算出される値とほぼ同等の値が得られた。また、(1)、(2)式より予測される値とも一部の供試体ではほぼ一致していた。

$$f_{srd} = 1900 \cdot 10 / N (1 - \sigma_{sp} / f_{ud}) / r_s \quad (3)$$

ここで、 f_{srd} : 異形鉄筋の設計疲労強度

f_{ud} : 鉄筋の設計引張強度 = 5000(kgf/cm)

σ_{sp} : 永久荷重による鋼材の応力度 = 600(kgf/cm)

$$\alpha = k_o \cdot (0.82 - 0.003 \phi) = 0.039$$

$$k = 0.12 \quad k_o = 1.0 \quad \phi = 13 \text{ (mm)} \quad r_s = 1.0$$

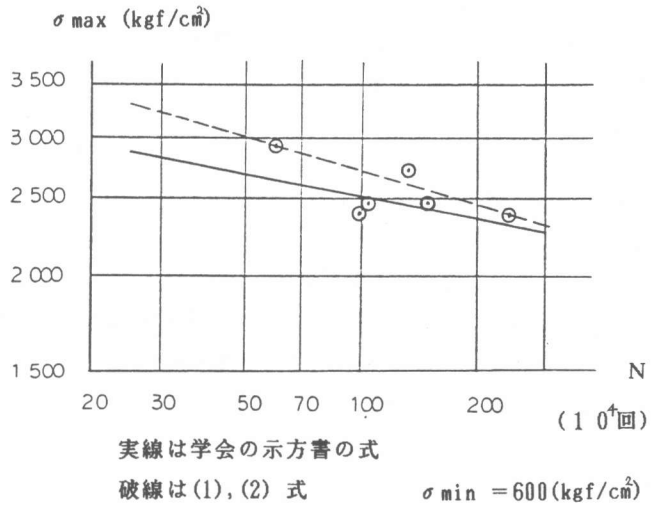


図-2 今回の実験より得られたS-N線図

表-3 のひびわれ幅と載荷回数の関係 (C-2)

載荷回数 (回)	たわみ量 (mm)	ひびわれ幅 (mm)				
		A	B	C	D	E
0.55*10 ⁶	1.0	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
0.94*10 ⁶	1.0	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
1.19*10 ⁶	1.1	0.06	0.06	0.04	0.06	0.04
1.275*10 ⁶	1.15	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
1.329*10 ⁶	1.9	0.04	0.04	0.30	0.04	0.06
1.335*10 ⁶	3.4	0.04	0.04	1.10	0.25	0.04
1.337*10 ⁶	9.3	0.04	0.04	3.5~	0.9	0.04

供試体 C-2 の載荷回数とたわみ量の関係を図-3に、載荷回数とひびわれ幅の関係を表-3に示す。ここで、ひびわれ幅の測定は、その都度機械を停止して荷重0の状態で行った。図-3の結果、たわみ量は試験開始時より一定の値を示していたが、132.9万回で不連続な増加を示し、その後直線的な増加を示し、その後直線的な増加が133.7万回まで続いた。133.7万回以降は、たわみ量が急増し動的載荷が不可能となった。動的載荷終了後の静的載荷試験の結果、動的載荷時の最大載荷荷重で変位が進行した。また、ひびわれ幅については断続的なデータしか得られていないが、初期の増加が132.9万回で、その後133.5万回、133.7万回で増加が見られた。ひびわれ幅の測定箇所は、最初の静的載荷で生じたひびわれの中から動的載荷により増加が予想される箇所を選び図-4に示すA~Eとした。

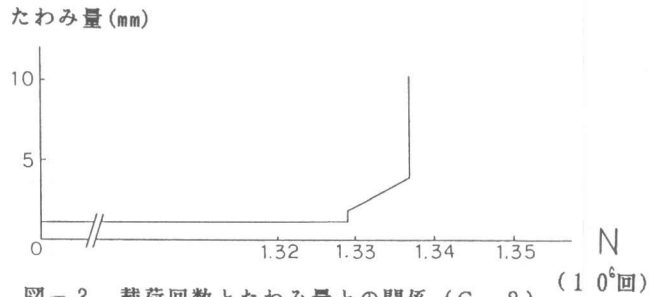


図-3 載荷回数とたわみ量との関係 (C-2)

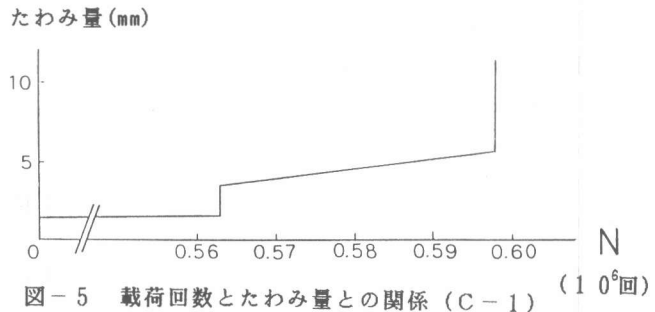


図-5 載荷回数とたわみ量との関係 (C-1)

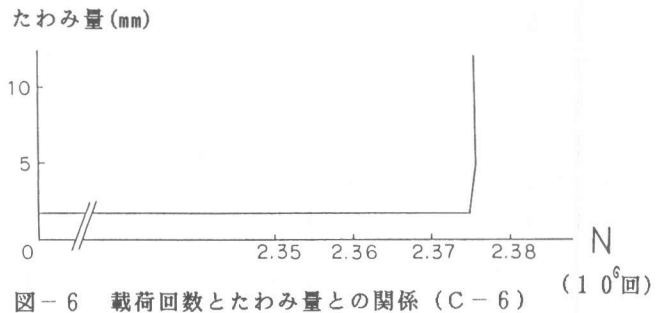


図-6 載荷回数とたわみ量との関係 (C-6)

これらの結果より、供試体中の鉄筋の破断は132.9万回で一度生じ、その後133.7万回で二度目の鉄筋の破断が生じて破断していない鉄筋の応力度が急増したため、鉄筋の伸びが著しく大きくなったものと考えられる。132.9万回と133.7万回の間でたわみが増加しているのは、ひびわれの進行によるものと考えられる。ひびわれ幅についても鉄筋の破断の直前まで顕著な増加現象が見られず、鉄筋の破断とともに増加していったものと考えられる。ただし、ひびわれ幅の増加が見られたのは鉄筋の破断面の直下の1~2本のひびわれであり、他のひびわれ幅はほとんど増加が見られないという特徴を持っている。鉄筋の破断によるひびわれの特徴を写真-2, 3に示す。写真-2, 3ともに供試体の底面のひびわれを示している。

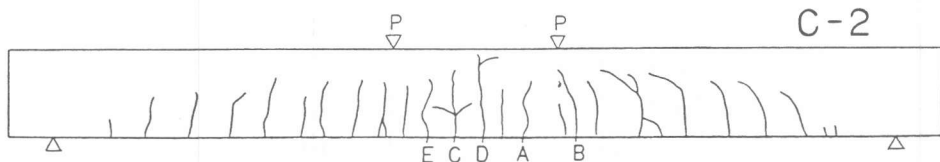


図-4 ひびわれ幅の測定位置

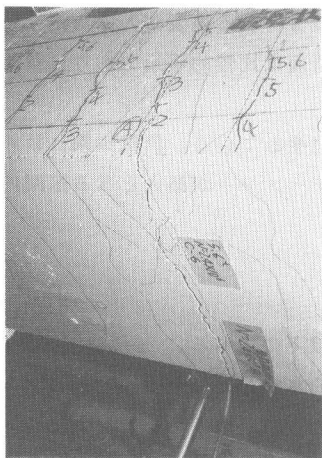


写真-2 鉄筋の破断によるひびわれ形状

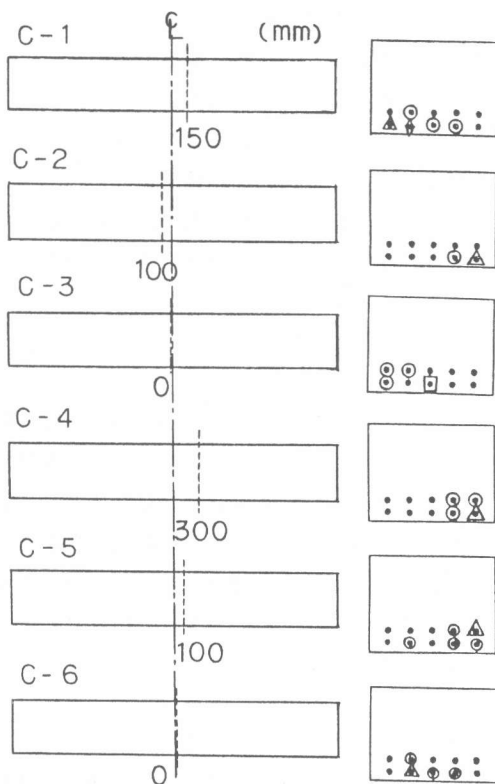
供試体C-1, 6の荷回数とたわみ量の関係を図-5, 6に示す。図-5より供試体C-1はC-2と同様に56.8万回, 59.8万回の二度にわたりたわみが急増した。これはC-2と同じく二回にわたり鉄筋の破断が生じたものと考えられるが, 一回目と二回目の破断時の荷回数の間隔はC-2よりも長くなっている。一方, 図-6よりC-6の場合には, 一回目と二回目の破断時の間隔が極めて短くほとんど同時にたわみ量の増加が生じている。これらの結果より, 鉄筋の応力度の振幅が大きいほど疲労による各鉄筋の破断時までの荷回数のバラツキが大きくなるものと推定できる。

各供試体における破断した鉄筋の位置を図-7に示す。それによると破断した鉄筋の位置に規則性は見られないが, おおむね左右どちらかに偏る傾向がある。また, 応力振幅の小い上側の鉄筋が破断していても下側の鉄筋が破断しているとは限らない。これについては, 同じ規格の鉄筋間の疲労強度のバラツキに起因するものと推定する。

図-7中で, 疲労+引張による破断あ



写真-3 鉄筋の破断によるひびわれ形状



- 疲労による破断
- 引張による破断
- △ 疲労+引張による破断
- ◇ 疲労によるキレツが見られる

図-7 鉄筋の破断位置および破断した鉄筋の配置

るいは引張による破断とあるのは、引張による破断の場合、しぼりによる鉄筋の断面積の減少が見られることにより判定した。疲労+引張による破断とは、疲労による亀裂が入った後に引張により破断した場合を示している。なお、疲労による鉄筋の破断面は比較的平坦であり、破断面の形状から以上のような判定をおこなった。

また、鉄筋の破断は一つの供試体においてほぼ同じ位置で発生している。供試体別に鉄筋の破断位置を比較すると、ばらつきは見られるが載荷点間の曲げモーメントが最大となる区間内で生じている。

4. まとめ

今回の実験および考察から、明かになった主な点について以下に述べる。

- (1) 多数本の鉄筋を配置した梁の疲労による破壊は、破壊の前兆無しに一度に生じるのではなく鉄筋の破断が段階的に進むことによるたわみ量の増大、鉄筋の破断面直下のひびわれ幅の増大等の現象が見られたのちに生じる。
- (2) 疲労による鉄筋の破断で生じる梁のひびわれは、鉄筋の破断面の直下に1～2本の幅の大きなひびわれが生じるという特徴を持つ。
- (3) 鉄筋の破断は、ほぼ同一断面に生じる。
- (4) 実験で得られた供試体の破壊時の載荷回数は、土木学会コンクリート標準示方書中の(3.3.2)式で得られる値とほぼ同等の値であった。
- (5) (1), (2) より疲労の耐用年限に近づいた鉄筋コンクリート構造物の保守管理においては、疲労による変状を発見した後に早急にその処置を考えれば、桁の落下等の大事故は事前に防ぐことができるものと考えられる。

5. おわりに

鉄筋コンクリート製の実構造物が、列車荷重等の繰返し荷重により瞬時にして破壊に至り、大事故を引き起こすという可能性は少ないことが判った。とすれば、設計時の疲労の耐用年限を過ぎた構造物に対して、検査体制を強化し疲労による破壊の前兆を早期に発見し、すみやかに対処することで、疲労による構造物の取替えおよび補強の時期を的確に判断することができると思われる。疲労による破壊の前兆としては、今回の試験からひびわれ幅、たわみ量の段階的な増加等が明らかにされたが、今後の実験等により、より顕著で的確な疲労による破壊の兆候を捉えることが必要だと考える。

<参考文献>

土木学会：コンクリート標準示方書，昭和61年10月

二羽淳一郎他：複数本の溶接鉄筋を用いたRCはりの疲労強度の推定法，コンクリート工学，Vol.23,1985.5

宮田尚彦他：鉄筋コンクリート部材の疲労強度，構造物設計資料，1983.12，日本鉄道施設協会

石橋忠良他：コンクリート構造物の疲労設計(1)，(2)，構造物設計資料，1982.6,1982.9，日本鉄道施設協会