

論文

[1095] 鉄筋を腐食させたRCはりの劣化状態と耐力について

正会員 ○山住 克巳 (鉄道総合技術研究所)

正会員 宮本 征夫 (鉄道総合技術研究所)

正会員 佐藤 勉 (鉄道総合技術研究所)

1. はじめに

鉄道におけるコンクリート構造物は建設時の歴史を辿るとわかるように、海岸付近、山岳地帯にも多く建設され、これらはまた、厳しい環境にさらされているものも多い¹⁾。また、東海道、山陽、東北、上越の各新幹線では大量のコンクリート構造物の出現を見た。これらのコンクリート構造物は、程度の差こそあれ、材料、設計、施工に起因する耐久性の問題を抱えていることも事実である²⁾。筆者らは、国鉄時代からコンクリート構造物の耐久性、維持管理に関して現場の実構造物の調査を通じて、その健全度、供用性の把握につとめてきた。

コンクリート構造物の耐久性はコンクリート中の鉄筋の腐食に負うところが大きく、補修、補強、取替えの重要な判断指標である。この点に着目した調査研究はこれまでも数多く報告されているが^{3) 4) 5) 6)}、鉄筋が腐食した場合のRCはりの耐力については、あまり変わらないとするものや幾分低下するもの等があり、どのような要因が耐力に影響を与えるかは定かではない。そこで、所定のひびわれを導入後暴露して塩水を撒水し、鉄筋の腐食による軸方向ひびわれを発生させたRCはり供試体について、撒水開始後17ヶ月経過した時点で、コンクリート中の塩分量、鉄筋の腐食状態等の供試体の劣化状態を調査するとともに静的載荷試験ならびに疲労試験を行って、供試体あるいは鉄筋の劣化状態が曲げ耐力および疲労性能に与える影響を検討したものである。

2. 供試体および試験の概要

(1) 供試体の概要

試験に用いたRCはり供試体の形状寸法を図1に示す。供試体の形状は10×20×210cmの矩形はりとし、引張鉄筋はD13×2本(JIS G3112, SD35)、圧縮鉄筋はD6×2本(JIS G3112, SD30A)とし、スターラップD6(JIS G3112, SD30A)を10cmピッチにはり全長にわたって配置した。引張鉄筋のかぶり厚は下面、側面ともに2cmとした。

使用した材料は、セメントは早強ポルトランドセメント、粗骨材は八王子産砕石、細骨材は砕砂であり、混和剤としてAE剤および減水剤を用いた。コンクリートの配合は、表1に示す配合(以下標準配合という)と同配合にNaClを10kg/m³混入した配合(以下塩分混入という)の

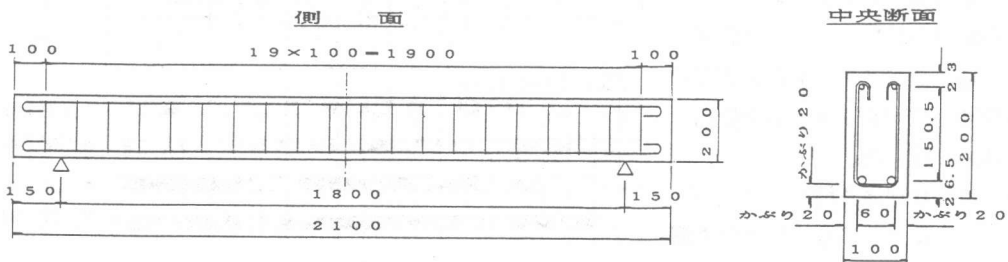


図1 RCはり供試体の形状寸法

2種類とした。フレッシュコンクリート中の塩分量 (Cl^-) は、標準配合で 0.217 kg/m^3 、塩分混入で

5.34 kg/m^3 であった。また、標準養生した円柱供試体の材令28日における圧縮強度は標準配合が 236 kgf/cm^2 、塩分混入が 281 kgf/cm^2 であった。

(2) 試験の概要

製作後約3ヶ月室内養生した供試体に曲げ載荷によりあらかじめひびわれを導入した。その後1ヶ月ほど静置してから屋外(当研究所構内)に暴露した。導入ひびわれは全てスターラップの位置付近に発生し、暴露直前の最大幅は $0.08 \sim 0.10 \text{ mm}$ 程度であった。暴露期間中の曲げひびわれの保持は、図2に示すように2体の供試体を1組としてローラーを介してステンレス棒鋼を締め付けることにより行った。なお、供試体は載荷試験のときに側面となる面を上にして暴露した。この状態で約3ヶ月経過してから、濃度3.13%の食塩水を1組の供試体につき1回当たり約 10 l 、雨天の日を除き1日3回(9時、13時、17時頃)撒水した。

塩水の撒水を開始してから17ヶ月経過した供試体について、供試体の外観観察を行ってから静的載荷試験および疲労試験を行った。載荷試験は図3に示すようにスパン 180 cm 、せん断スパン 70 cm の2点載荷とし、破壊荷重、供試体の変位、ひびわれの開口幅およびコンクリート上縁のひずみを測定した。なお、同時に製作して曲げひびわれを導入してから室内に静置していた供試体

(以下健全供試体という)も併せて試験を行った。

また、載荷試験の終了した供試体から鉄筋およびコンクリートの試料を採取して、鉄筋の腐食状態、コンクリート中の含有塩分量、コンクリートの中性化の調査を行った。

3. 劣化状態調査結果

(1) 劣化RCはり供試体の外観

載荷試験に先だって塩水撒水により劣化した供試体4体につ

表1 コンクリートの配合

f'ck (kgf/cm ²)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
240	8+2.5	4+1	65	50	165	245	932	953

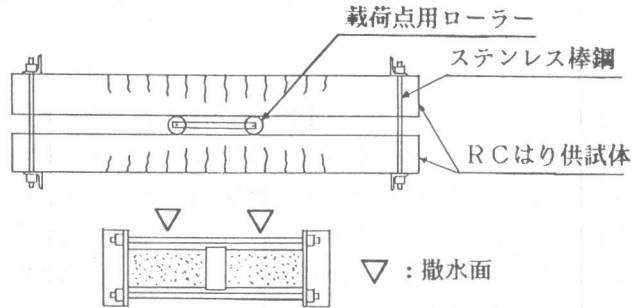


図2 はり供試体のひびわれ保持方法

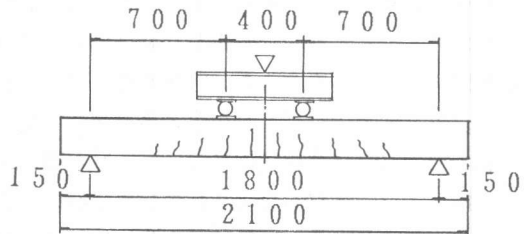


図3 載荷試験の方法

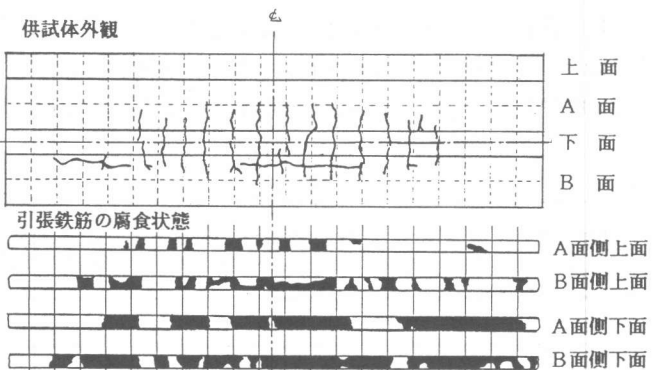


図4 供試体外観および鉄筋腐食状態スケッチ例 (SD-1N)

いて外観を観察した。図4に外観のスケッチ例を示したが、暴露時の撒水面（以下A面という）と下側とした面（以下B面という）ではその外観が異なっていた。なお、暴露期間中は供試体を裏返さず、上下面を固定したままとした。外観の状態は概ね次に示すようであった。

① A面については、供試体表面はセメントペーストが洗い流されて細骨材が露出する状態となっており、導入したひびわれの判別も困難な状態であった。供試体SD-2Nでは引張鉄筋に沿った軸方向ひびわれが発生していた。また、雨水等で洗い流されたためか、錆汁の滲出箇所は比較的少なかった。

② B面では、すべての供試体に引張鉄筋に沿った軸方向のひびわれが発生しており、ひびわれ部からの錆汁の滲出も多数見られた。各供試体の軸方向ひびわれの長さを測定した結果を表2に示した。

(2) 鉄筋の腐食状態調査

載荷試験が終了したRCはり供試体から取り出した引張鉄筋について、鉄筋の腐食位置、腐食状態を目視で観察した。目視観察による鉄筋の腐食状態の例を図4に示した。これより、

① A面側よりB面側の鉄筋の腐食が進んでおり、軸方向ひびわれの発生状態とも適合する。

② 鉄筋の面については、コンクリート打込み時に下面となった側の方が腐食長さ、面積ともに大きい。これは、コンクリート打込み時のブリージングによる欠陥のためと推定される。

③ 当初に導入したひびわれ位置（スターラップの位置付近）の腐食が進んでおり、その箇所の一部では孔食が認められた。

④ 鉄筋全体が腐食していない部分では、ひびわれとひびわれの中間部分が腐食していないいわゆるマクロセル現象が認められた。

また、上記の鉄筋について腐食率を調査した結果を表2に示した。鉄筋の腐食率調査用の試料は、載荷試験の影響が少ない左右のせん断スパン内から各1本採取し、1本の試料の長さは平均的な腐食率を求めるために約40cmとした。腐食率は、錆を取り除いた試料および健全供試体から採取した試料の重量を測定し、(1)式により求めたものである。表に示した値は左右の試料の平均値である。

$$\text{腐食率}(\%) = [(W_0 - W_1) / W_0] \times 100 \quad \text{----- (1)}$$

ここで、 W_0 : 健全供試体から採取した鉄筋の単位重量 (g/cm)

W_1 : 劣化供試体から採取した鉄筋の単位重量 (g/cm)

表2によると、

① 鉄筋の腐食率は、供試体毎にばらついているがすべての供試体でA面側に配置した鉄筋よりもB面側の方が大きい。これは、外観観察の結果とも一致する。

② A面とB面の鉄筋腐食率のばらつきは、腐食率の大きいSD-2Nおよび塩分混入のSD-4Sでは他の供試体よりもかなり小さい。

③ 軸方向ひびわれが発生している側は、いずれも鉄筋の腐食率が2%を超えている。

(3) コンクリート中の塩分量調査

表2 軸方向ひびわれおよび鉄筋腐食量調査結果

供試体		L (cm)	W los (%)
SD-1N	A面	無	0.35
	B面	80	2.71
SD-2N	A面	110	3.31
	B面	107	3.97
SD-3N	A面	無	0.07
	B面	55	2.76
SD-4S	A面	無	1.65
	B面	80	2.13

注) SD: 劣化 N: 標準配合
S: 塩分混入
L: 軸方向ひびわれ長さ
W los: 鉄筋腐食率

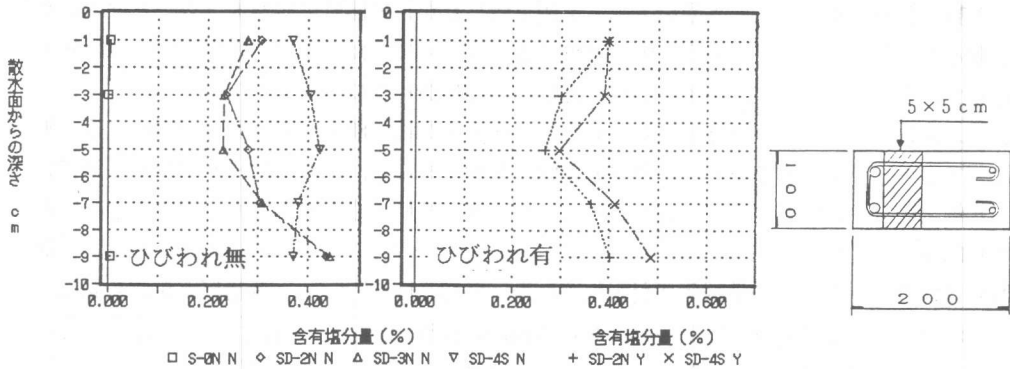


図5 含有塩分量調査結果

注) S:健全 ON~3N:標準配合 末尾N:ひびわれ無
SD:劣化 4S:塩分混入 Y:ひびわれ有

載荷試験の終わったRCはり供試体より採取した試料について、硬化コンクリート中の全塩分量を調査した。試料の採取位置は図5に示すように、引張鉄筋直近の5×5cmの部分のひびわれの無い部分としたが、一部のものについては当初に導入したひびわれを含む部分からも採取した。試料は暴露時の撒水面からの深さ2cm毎にスライスし、「硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法(JCI-SC5)」により分析した。その結果を図5に示したが、塩分量はコンクリートに対するCl⁻の重量%で示している。これより、

① ひびわれの無い部分:

標準配合の場合はA面よりもB面の方が塩分量が多くなっており、塩分が浸透して下方に蓄積されたものと考えられ、鉄筋の腐食状態とも一致する。打込み時に塩分を混入したものは各深さを通じてそれほど差がない。

② ひびわれの有る部分:

標準配合と塩分混入とはほぼ同様な傾向を示し、上下の表面付近で塩分量が多く深さ方向の中央部では少なくなっている。

標準配合ではA面に近い範囲ではひびわれが無い部分よりも塩分量が多くなっており、深さ方向の差もひびわれの無い部分よりも小さくなっている。

なお、供試体の含有塩分量の値は、塩害により変状を生じた一部の実橋での表面付近における測定値の最大値にほぼ近い値となっている。

(4) コンクリートの中性化深さ

前述の鉄筋の錆に対する中性化の影響の有無を確認するため、載荷試験が終了したRCはり供試体について中性化深さを測定した。コンクリート割裂面にフェノールフタレン・アルコール溶液を噴霧して変色しない深さをもって中性化深さとした。表3 コンクリートの力学的特性調査位置は各供試体についてスパン中央付近および両支点付近の3断面とした。

調査結果は、健全供試体では最大17.9mm、平均10mm、暴露供試体では最大11.0~18.9mm、平均5.0~6.6mmであり、どの供試体においても中性化は鉄筋位置まで達していなかった。

(5) コンクリートの力学的特性

RCはり供試体の載荷試験に先立ち、同時に製作してお

	標準配合		塩分混入	
	室内	暴露	室内	暴露
圧縮強度 (kgf/cm ²)	221	237	277	303
ヤング係数 (10 ³ kgf/cm ²)	1.56	1.81	1.83	2.11
曲げ強度 (kgf/cm ²)	33.0	—	33.8	—

いた円柱供試体（同じ条件で劣化させたものおよび室内に静置しておいたもの）について圧縮強度およびヤング係数を調査した。材令はいずれも25ヶ月、屋外暴露供試体の暴露期間は21ヶ月である。その結果を表3に示したが、圧縮強度、ヤング係数とも室内に静置したものが暴露したものよりもやや小さい値であった。

4. RCはり供試体の静的載荷試験結果

静的載荷試験の結果を表4に示す。破壊形式は全て曲げ破壊であり、かぶりコンクリートの剝離もなく、引張鉄筋の定着部付近にも異常は認められなかった。表4によれば、劣化供試体の破壊荷重は健全供試体よりも低下しており、その割合は健全供試体の87~94%程度の値となった。

また、荷重と引張鉄筋に沿った軸方向ひびわれの開口幅との関係を図6に示す。軸方向ひびわれの開口幅はπゲージによって測定した（SD-1Nは測定していない）。図6によれば軸方向のひびわれは荷重の増大とともに徐々に開いており、このことは、鉄筋とコンクリートの付着が低下していくことを示唆していると考えられる。また、3tf付近（破壊荷重の約60%）からの開きが大きいほど破壊荷重が小さくなっており、鉄筋とコンクリートの付着の低下がはりの耐力の低下の一因となっているものと考えられる。

静的載荷における耐力比と鉄筋腐食率との関係を図7に示した。ただし、この図の鉄筋腐食率は表2に示したB面側（腐食率が大きい方）の値を用いている。図によれば鉄筋腐食率が大きくなるほどはりの曲げ耐力が低下する傾向を示している。鉄筋腐食率が2~4%に対して耐力は健全供試体の6~13%程度低下しており、耐力評価において鉄筋の断面欠損のみならず、軸方向鉄筋に沿ったひびわれによる鉄筋とコンクリートの付着低下等を考慮した評価が必要であると考えられる。

5. RCはり供試体の疲労試験

疲労試験の結果を表5に示す。載荷は計算応力の下限を500kgf/cm²と一定にし、上限を3500kgf/cm²、3300kgf/cm²の2段階について実施した。載荷方法は静的載荷の場合と同じである。

表4 静的載荷試験の結果

供試体	配合	条件	Pmax(tf)	耐力比
S-0N	標準	健全	5.35	1.00
SD-1N	標準	劣化	4.80	0.90
SD-2N	標準	劣化	4.65	0.87
SD-3N	標準	劣化	4.90	0.92
SD-4S	塩混	劣化	5.05	0.94

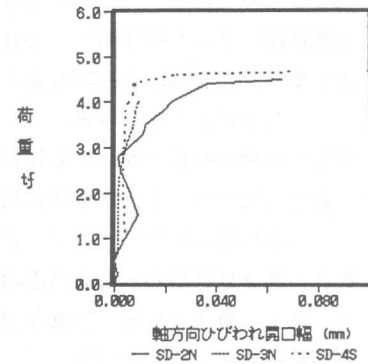


図6 荷重と軸方向ひびわれ開口幅の関係

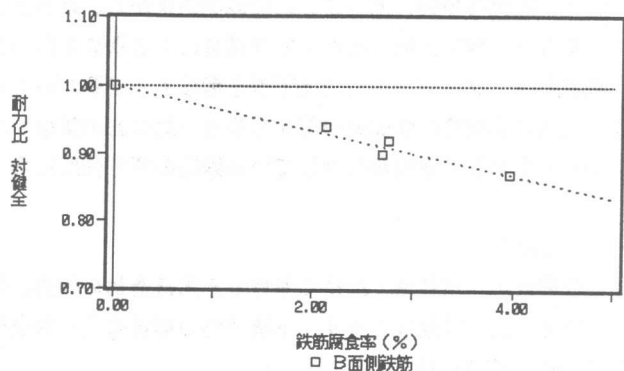


図7 曲げ耐力比と鉄筋腐食率の関係

表5 疲労試験結果

供試体	条件	σ_{min}	σ_{max}	破断回数	f_{rt}/f_{rc}
F-20S	健全	500	3500	9.91×10^5	1.08
FD-11N	劣化	500	3500	1.56×10^5	0.87
FD-21N	劣化	500	3300	1.99×10^5	0.83

注) f_{rt} : 応力振幅の実験値
 f_{rc} : 文献[7]による鉄筋母材の疲労強度の平均値

表には文献〔7〕により計算した鉄筋母材の疲労強度の平均値と実験から求めた疲労強度との比を示している。これより、劣化供試体では計算値に対して13~17%、健全供試体に対しては20%以上も低下しており、低下の程度は著しい。

試験終了後に破断した鉄筋をはつり出して破断箇所および破断面を調査した。劣化供試体の破断箇所はいずれも曲げ域内の導入ひびわれ付近のスターラップとの接触部分であり、破断面はいずれも腐食が進んでおり断面欠損が認められた。また、疲労痕は断面欠損部から発達していた。なお、疲労試験は現在も継続中であり、全体については別途報告する予定である。

6. まとめ

本試験の範囲で得られた結論をとりまとめると以下のとおりである。

- (1) 引張鉄筋に沿った軸方向ひびわれは、塩水を撒水した面よりも反対側の面の方に発生した供試体が多い。これは、含有塩分量の分析の結果から、塩分がコンクリート中を浸透して下方に蓄積されたためと考えられる。
- (2) 鉄筋の腐食率も撒水面よりも反対面の方が大きく、腐食率が2%を超えた面に軸方向ひびわれが発生していた。また、鉄筋の面では供試体の下面側の面の腐食が進んでいるが、これはコンクリート打込み時のブリージング等の微細な欠陥の影響があるものと考えられる。
- (3) 鉄筋の腐食はひびわれ位置付近の進行が早く、ひびわれ部をアノード部としひびわれ間をカソード部としたマクロセル腐食が認められた。また、錆を取り除いた面は複雑な凹凸を示し、局所的な孔食が発生していた。
- (4) 鉄筋が腐食して軸方向ひびわれが発生した供試体の耐力は健全なものより低下し、鉄筋の腐食率が大きいほど低下の割合も大きく、鉄筋の腐食率よりもはりの耐力の低下率が大きい。これは、載荷時の軸方向ひびわれの観測結果から、鉄筋とコンクリートの付着力の低下が一因と考えられ、耐力評価にあたっては腐食による鉄筋の断面欠損のみならず軸方向ひびわれによる鉄筋とコンクリートの付着低下等を考慮する必要があるものと考えられる。
- (5) 鉄筋に孔食等の断面欠損部があると一般に応力集中が起こるといわれており、本試験の結果からも腐食して断面が欠損している鉄筋の疲労強度は著しく低下するおそれがあるものといえる。

【参考文献】

- 1) 佐藤武志、川井清：国鉄における土木構造物の検査、鉄道土木、vol23,NO.2,1981年2月
- 2) 宮本征夫：鉄筋コンクリート構造物の塩害劣化—鉄道橋における被害の実態、コンクリート工学Vol25,NO.11,1987.11
- 3) 武若耕司、松本進：コンクリート中の鉄筋腐食がRC部材の力学的性状に及ぼす影響、第6回コンクリート工学年次講演会論文集、1984
- 4) 魚本健人、辻恒平、柿沢忠弘：鉄筋腐食によるコンクリート構造物の劣化機構に関する基礎的研究、第6回コンクリート工学年次講演会論文集、1984
- 5) 岡田清、小林和夫、宮川豊章、九富理：鉄筋腐食における鉄筋軸方向ひびわれがコンクリート部材特性に与える影響、コンクリート工学年次講演会論文集、1985
- 6) Sudhir MISRA, Taketo UOMOTO：鉄筋腐食が鉄筋コンクリートはりの静的耐力に及ぼす影響、コンクリート工学年次講演会論文集、1987
- 7) 二羽淳一郎、前田詔一、岡村甫：異形鉄筋の疲労強度算定式、土木学会論文集、第354号/V-2, 1985年2月