

[19] 長年月を経たコンクリート中の鉄筋の腐食について

正会員 ○小 林 明 夫 (国鉄構造物設計事務所)

正会員 栗 原 啓 之 (国鉄構造物設計事務所)

三 好 正 樹 (国鉄中央鉄道学園)

1. まえがき

一般に、鉄筋コンクリートは強度と耐久性の点から優れており、数十年という長年月にわたって使用される構造物に適していると考えられるが、一方、使用条件、環境条件に対して適切な材料の選定、設計および施工が施されない場合は、予想外に短期間に本来の機能を十分発揮できなくなり、使用に耐えなくなることも考えられる。

鉄筋コンクリート構造物の耐久性は、基本的にはコンクリートの劣化と鉄筋の腐食の問題である。健全なコンクリート中の鉄筋はpH12~13という強いアルカリ環境下で鉄筋表面に水酸化第一鉄の皮膜を生じ、腐食しにくい状態にあるが、しかし、コンクリートにひびわれが生じ、さらにコンクリートが中性化していくと、その部分から水分や塩分が浸透し、鉄筋の腐食の要因となって、構造物の耐久性が低下する。

鉄筋コンクリート構造物は一般にひびわれを避けることは難しい。そこで、ひびわれ幅を制限して鉄筋が腐食することを防止しようとする考え方が多いが、その許容ひびわれ幅は気象条件あるいは環境条件などによって相違がある。本研究は、建設後長い年月を経過した鉄筋コンクリート構造物のひびわれおよび内部の鉄筋の腐食の程度を調査した資料をもとに、周囲の環境条件も考慮して鉄筋の腐食に影響を及ぼす要因の検討を行った。

2. 実橋による耐久性調査

本研究に使用したデータは、それぞれ気象条件および環境条件などが相違する3橋の耐久性調査より得たデータを用いた。その概要を以下に述べる。

2.1 調査橋および調査項目

(1) 調査橋の概要

A-橋：(写真-1)都内に昭和4年竣工した線路方向5径間直角方向2径間の鉄筋コンクリートビームスラブ形式ラーメン高架橋であり、高架橋の下は倉庫として長い間使用されていた。周囲の環境条件としてはかなり良く、スラブ、はり、柱について調査を行った。

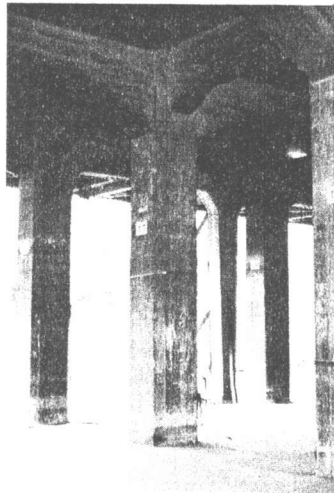


写真-1 A-高架橋

B-橋：(写真-2)北海道苫小牧市に昭和44年度竣工した比較的新しい鉄筋コンクリート3主単T桁であり、橋りょうは河川の感潮区間にある。また、冬にはかなりの寒冷下で潮風にさらされ、厳しい環境条件下にある。調査は桁のウェブ、フランジ、およびスラブについて行った。

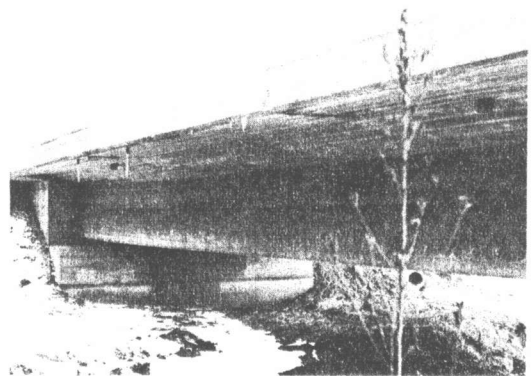


写真-2 B-橋りょう

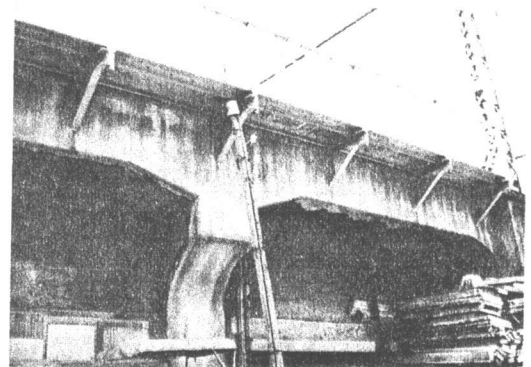


写真-3 C-高架橋

C-橋：(写真-3)京浜地区に昭和5年竣工した線路方向3径間直角方向1径間の鉄筋コンクリートスラブ形式ラーメン高架橋であり、A-橋同様、高架下は倉庫として使用されていた。また、B-橋同様、近くに海があり、比較的悪い環境条件下にある。調査は、スラブ、はり、柱について行った。

(2) 調査項目および方法

各橋ともひびわれ分布状態、ひびわれ幅、ひびわれ深さ、コンクリートの中性化深さ、コンクリート強度、配合、かぶり厚さ、鉄筋の腐食状態、および鉄筋強度などを調べた。さらに、B-橋については細骨材の塩分含有量および鉄分の有無を測定し、C-橋については塩分含有量の測定を行った。

ひびわれ深さの測定は長さ方向約20cm毎にひびわれ中にパテントブルーアルコール溶液を注射器で注入し、その部分のコンクリートをはつり、青色を呈した深さをノギスで測定した。コンクリートの中性化深さの測定はひびわれ深さの測定時にフェノールフタレイン1%アルコール溶液を噴霧して赤色を呈しない部分の深さを測定した。塩分含有量の測定は海砂の使用の有無および構造物が海に近いので、コンクリート表面からの塩分の浸透などを確認するために行った。鉄分の有無はX線回折試験により行った。また、鉄筋の腐食の評価方法には現在数種あるが、今回の調査で

表-1 鉄筋の腐食の程度による分類

	A	B	C	D
は、目視により、腐食の程度を表-1に示すような4段階に分類した。目視により腐食が進んでいるとみられる鉄筋を抜き取り、触針試験により鉄筋の表面のあらさを測定した。さらに、抜き取った鉄筋について強度試験も行った。				
	まったく錆のない	点状の赤錆	全面的な赤錆	浮き錆および錆びて剥落したもの

2.2 調査結果およびその検討

A-橋：調査結果を表-2に示す。はりの一部に曲げ応力によるひびわれと思われるものがみられたが、他はコンクリートの乾燥収縮によるひびわれであると推定される。スラブ上面のひびわれは下面まで貫通していたが、アスファルト防水が完全に施されていたために漏水はみられなかった。スラブ上面以外、コンクリートの中性化はかぶりコンクリートからさらに鉄筋内のコンクリートまで進んでおり、理論値をはるかに上まっている。鉄筋の発錆はコンクリートのジャンカ部などの一部にみられるだけであった。発錆していた鉄筋の表面のあらさの測定値を図-1に示してあるが、最大0.15mm程度である。また、鉄筋の強度試験の結果と建設当時の鉄筋の強度試験の結果および現在のJIS規格値と比較したものを表-3に示してあるが、各強度ともすべてを満足している。

表-2 調査結果の概要 (単位：mm)

項目	ひびわれ幅		ひびわれ深さ		中性化深さ		かぶり	鉄筋の腐食状態	
	最大	平均	最大	平均	最大	平均			
スラブ	上面	0.3	0.3	スラブ貫通(280)		2	0	150	錆なし
	下面	0.8	0.3	3.9	3.9	4.1	4.1	3.5	錆なし
はり	側面	0.5	0.3	4.1	3.0	5.5	5.1	4.0	ジャンカ部の鉄筋に全面錆あり、他は一部錆
	底面	0.6	0.5	6.8	4.8	6.8	5.9	4.0	
柱	2.0	0.6	4.4	2.2	6.3	4.5	8.0	一部に錆あり	

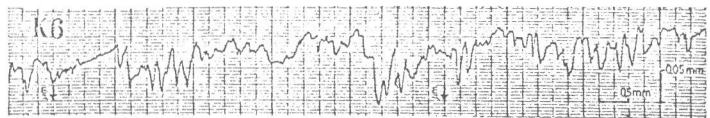


図-1 鉄筋の表面のあらさ

表-3 鉄筋の強度試験結果とJIS規格値

項目	スラブ上面		縦ばり			横ばり	柱		昭和4年	JIS規格
	1	2	1	2	3		1	2		
降伏点 (kg/mm ²)	3.0	3.0	3.1	3.0	3.0	3.1	3.3	2.8	3.1	24以上
引張強さ (kg/mm ²)	4.6	4.7	4.5	4.5	4.8	4.6	5.2	4.3	4.5	39-53
伸び (%)	3.4	3.1	3.1	3.1	2.9	3.0	3.0	3.0	3.1	20以上
絞り (%)	6.3	5.7	6.3	6.4	5.9	6.2	5.7	6.7		-

B-橋：海側、中、山側の各桁におけるひびわれは、そのほとんどが桁の下フランジに発生しており、ウェブにみられるものは下フランジからの延長である。

また、ひびわれの特徴としては、その大部分が桁のスパン方向に対して直角に発達しており、しかも、ひびわれの間隔は

200～300mmの等間隔にある。すなわち、スターラップに沿って発生したものと思われる。ひびわれ深さは、山側桁を除き、ほとんど40mmであり、主鉄筋まで達しているものは少ない。また、コンクリートコアの圧縮強度もすべて300kg/cm²以上有していることから、コンクリートは健全であると判断できる。しかし、鉄筋のかぶりがかかなり少ない部分もあり、その位置の鉄筋に腐食の進んでいるものがみられた。(表-4参照)また、細骨材の塩分含有量は少なく海砂は使用していないと思われる。また、鉄分は検出されなかった。

C-橋：調査結果を表-5に示す。ス

ラブに幅0.5mm前後のひびわれがごくわずかある程度で、スラブ、はり、柱に発生していたひびわれの幅は、ほとんど0.1mm以下であり、また、鉄筋位置まで到達しているひびわれは、ほとんどみられなかった。しかし、コンクリートの中性化はほとんど鉄筋位置まで進んでおり、数箇所エフロレッセンスを折出していた。また、コンクリートのジャンカもみられた。鉄筋の腐食状態をみると、スラブ底面の鉄筋にはB段階のものが少しある程度で、あまり発錆はみられなかったが、はり側面にはC段階およびD段階のものが多かった。また、細骨材の塩分含有量の測定から、海砂を使用したのではないと思われる。

3. 要因分析および考察

3橋の調査から得られたデータをもとに各因子間の相関および腐食に対する影響度を検討した。

(1) A-橋

調査により、鉄筋にほとんど腐食がみられなかったことから、スラブ、はり、および柱について、ひびわれ幅、ひびわれ深さ、中性化深さ、および中性化深さとひびわれ深さとの差のそれぞれの関係を評価した。(表-6)

スラブ、はり、柱から得られた全データをもとに解析した各因子間の相関係数を表-6(a)に示す。中性化深さと中性化深さ-ひびわれ深さとの相関は若干みられるが、他の因子間には、ほとんど相関はみられない。次に、比較的データ数がそろっていて、ばらつきが少ないと思える柱のみのデータを用いて解析した相関係数を表-6(b)に示す。柱に関していえることは、i) ひびわれ幅とひびわれ深さには正の相関($r=0.471$)があり、ひびわれ幅が大きくなれば、ひびわれ深さが増す。ii) 中性化深さとひびわれ深さには相関はあまりみられない。iii) 中性化深さと中性化深さ-ひびわれ深さには正の相関($r=0.501$)がある。およびiv) ひびわれ幅と中性化深さ-ひびわれ深さには負の相関($r=-0.437$)がある。

以上のことから、ひびわれ幅はひびわれ深さと関係があるが、

表-4 調査結果の概要

(単位: mm)

項目別	ひびわれ幅		ひびわれ深さ		中性化深さ		かぶり		鉄筋の腐食状態
	最大	平均	最大	平均	最大	平均	最大	平均	
海側桁	0.1	0	5.3	2.4	1.0	2	4.0	1.7	腐食の進んだものがあった
中桁	0.2	0.1	9.7	2.8	8	1	5.6	2.2	"
山側桁	0.1	0.1	7.3	4.5	9	3	5.4	2.4	ほとんど発錆なし

表-5 調査結果の概要

(単位: mm)

項目位置	ひびわれ幅		ひびわれ深さ		中性化深さ		かぶり		鉄筋の腐食状態
	最大	平均	最大	平均	最大	平均	最大	平均	
スラブ	0.9	0.1	4.5	2.4	11.8	3.4	10.2	4.5	一部に発錆あり
海側縦はり	0.1	0	4.0	2.9	2.4	1.1	5.4	3.1	ほとんどの鉄筋に発錆あり
山側縦はり	0.1	0	7.0	4.4	1.4	5	4.7	3.3	"
横はり	0.1	0	6.5	3.7	3.8	1.6	4.0	3.1	一部に発錆あり

表-6 各因子間の相関係数

(a) スラブ、はり、柱

	ひびわれ幅	ひびわれ深さ	中性化深さ	中性化深さ-ひびわれ深さ
ひびわれ幅	1	0.151	—	-0.194
ひびわれ深さ	0.151	1	0.187	—
中性化深さ	—	0.187	1	0.411
中性化深さ-ひびわれ深さ	-0.194	—	0.411	1

(b) 柱

	ひびわれ幅	ひびわれ深さ	中性化深さ	中性化深さ-ひびわれ深さ
ひびわれ幅	1	0.471	—	-0.437
ひびわれ深さ	0.471	1	-0.108	—
中性化深さ	—	-0.108	1	0.501
中性化深さ-ひびわれ深さ	-0.437	—	0.501	1

中性化深さにはあまり影響を及ぼしていないようである。

(2) B-橋

発錆していた鉄筋が多かったため、ひびわれ幅、ひびわれ深さ、かぶり厚の鉄筋の腐食への影響度を評価した。しかし、今回の調査では、腐食の程度を目視により、A、B、C、およびDと評価しているため統計数理研究所の坂元氏により開発されたCATDAP (A Categorical Data Analysis Program Package)というプログラムを使用した。

解析結果を表-7、8に示す。表-7より、鉄筋の腐食に影響を及ぼす因子およびその順は、全データおよび中桁のみのデータからは、かぶり厚さ、かぶり厚さ×ひびわれ幅となっているが、海側桁のみのデータからは、ひびわれ深さが2番目になっている。また、表-8より、かぶり厚さが12mmより小さいとその位置にある鉄筋のほとんどが浮き錆または錆びて剥落した状態になっていると判断できる。

表-7 鉄筋の腐食に対する各因子の影響度 (A I C)

各因子の組み合わせ	A I C		
	全データ	中桁のみ	海側桁のみ
かぶり厚さ	-61.25	-12.30	-4.90
かぶり厚さ×ひびわれ幅	-43.85	-11.05	7.87
かぶり厚さ×ひびわれ深さ	-35.99	-4.77	5.43
ひびわれ深さ	-6.89	0.68	-2.55
ひびわれ幅	-5.63	-8.06	4.26
かぶり厚さ×ひびわれ幅×ひびわれ深さ	3.88	1.78	30.27

表-8 分割表 (全データ)

		鉄筋の腐食の程度				行計
		A	B	C	D	
かぶり厚さ	0.0~12.0	0.0	4.5	0.0	95.5	100.0
	12.0~60.0	6.7	60.0	17.8	15.6	100.0
	60.0~	100.0	0.0	0.0	0.0	100.0
列計		15.8	36.8	10.5	36.8	100.0

(3) C-橋

C-橋もB-橋と同様であるため、CATDAPにより解析した。

表-9 鉄筋の腐食に対するA I C

各因子の組み合わせ	A I C
かぶり厚さ×ひびわれ深さ	-21.23
かぶり厚さ	-17.07
ひびわれ深さ	-10.13
かぶり厚さ×ひびわれ幅	-8.29
ひびわれ幅	-4.44
かぶり厚さ×ひびわれ深さ×ひびわれ幅	-2.00

表-10 分割表

		鉄筋の腐食の程度				行計
		A	B	C	D	
かぶり厚さ	7.0~31.3	4.3	17.4	34.8	43.5	100.0
	31.3~	25.3	49.5	18.9	6.3	100.0
列計		21.2	43.2	22.0	13.6	100.0

解析結果を表-9、10に示す。表-9より鉄筋の腐食に影響を及ぼす因子およびその順は、かぶり厚さ×ひびわれ深さ、かぶり厚さとなっている。また、表-10より、かぶり厚さが約30mmより小さいとその位置にある鉄筋の80%近くが、全面的な赤錆以上の腐食状態になっていると判断できる。

4. まとめ

コンクリート中の鉄筋の腐食について、実橋の調査およびそれをもとにした要因分析を行ってきたが、コンクリートの中性化はひびわれ幅および深さにあまり関係なく進行すること、また、鉄筋の腐食に対して、かぶり厚さの影響が極めて大きいことがわかった。

今回の調査箇所が3箇所であり、資料数が少ないということは否定できない。したがって、今後、相違した環境条件下の構造物について調査し、相当数の資料をそろえていきたいと思う。

参考文献

- 1) 浜田：鋼コンクリート応曲材に関する研究，建築雑誌527号，1929。
- 2) 小林，栗原，古谷；土木学会第36回年次学術講演会講演概要集，1981。
- 3) 坂元；カテゴリカルデータの解析，数理科学No.213，1981。