

論文

[1102] ひびわれの生じている鉄筋コンクリート部材の耐久性に関する研究

正会員 秋元泰輔 (首都高速道路公団工務部)

平林泰明 (首都高速道路公団工務部)

正会員 〇山内博司 (住友建設機技術研究所)

1. はじめに

鉄筋コンクリート部材 (以下RC部材) の設計計算では、部材引張部のコンクリートを無視して計算が行われているため、部材引張部のコンクリートにひびわれが生じて、耐力上何ら問題とはならない。しかし、ひびわれ幅が過大となると、内部の鉄筋が腐食しやすくなり、構造物の耐力の低下をまねくことが予測される。

そこで、RC部材に予め所定のひびわれ幅を生じさせた状態で一定期間屋外に放置したのち、試験体の曲げ破壊試験を行い、曲げ耐力の低下度合、鉄筋の腐食状態、コンクリートの中性化を調べる実験を行った。暴露によって部材耐力への影響をおよぼす要因として、暴露期間、ひびわれ幅、かぶり、鉄筋径等が考えられるため、試験体としては、それらを考慮して11種類を製作した。(表-1参照)

本報告はこのうちタイプA_{0.2}、A_{0.3}、A_{EPX}、Dの4種類を暴露期間15年について実験した結果を述べるものである。

2. 試験体および実験方法

2-1 試験体の種類

表-1中、タイプAは標準型で、かぶり3cmの一段配筋であり、タイプA_{EPX}はタイプA_{0.3}に一旦ひびわれを発生させ、それにエポキシ樹脂を注入したもので、樹脂により補修した桁の耐久性を調べるものである。タイプDは太径鉄筋D51を使用した場合の耐久性を調べるもので、それぞれを図-1に示す。

コンクリートは、橋脚を対象として $\sigma_{ck} = 240 \text{ kg/cm}^2$ 、鉄筋はSD30を使用した。

コンクリート配合及び養生方法は参考文献²⁾を参照。

2-2 実験方法

図-2に示すように、2体の試験体をコロを介してPC鋼棒で緊張することにより所定の幅のひびわれを発生させ、かつ暴露期間中それを保持させるようにした。(実測の結果、 $\pm 0.02 \text{ m/m}$ の微小変動であった。)試験体の暴露中の状態は、三寸角をまくら木とし

表-1 試験体一覧表

タイプ	ひびわれ幅 (m/m)	暴露年数 (年)		備考
		実験済み試験体	数の残	
A _{0.1}	0.1	0, 10,	20	標準型
A _{0.2}	0.2	0,1,2,5, 10, 15	20	"
A _{0.3}	0.3	0,1,2,5, 10,12,15	20	"
A _{EPX}	0.3	0, 5,	15	樹脂注入
B	0.3	0,1, 10,		二段配筋
C	0.3	0,1, 7,	15	かぶり2倍
D	0.3	0, 5,	15	太径鉄筋
P	0.1	0, 12,	15	PRC部材
S	0.3	0, 10,		SRC部材
K ₁ ¹⁾	0.3	0, 6,10,		かぶり1cm
K ₅ ¹⁾	0.3	0, 6,10,		かぶり5cm

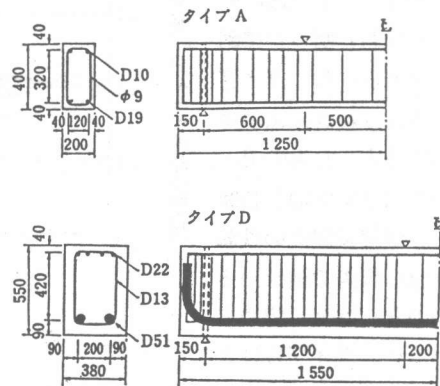


図-1 試験体の形状・寸法

た上に平面に並べた。(写真-1参照)

暴露場所は羽田の首都高速1号線に近接した地点で、温湿度、SO₂濃度については参考文献²⁾を参照。また飛来塩分の影響は、コンクリート中の塩分測定結果から鉄筋には及ぼしていない。

実験の方法は図-3に示すように二点荷重による曲げ試験とした。

2-3 調査項目

調査項目は試験体の①曲げ耐力、②ひびわれ幅、③曲げ剛性、④靱性、⑤鉄筋の腐食、⑥コンクリートの中性化、⑦試験体のコア強度、鉄筋強度およびコンクリート強度用供試体による圧縮、引張、曲げ強度である。

3. 実験結果および考察

3-1 曲げ耐力の経年変化と計算値との比較

図-4に各試験体の曲げ耐力の経年変化の結果を示す。図中、経年による耐力の変化は暴露0年を1.0として表してあるが、この変化率は経年によるコンクリート強度の増加に伴う耐力増加を考慮して、実測のコンクリート強度を用いた計算値と実測耐力との比の変化である。

図からわかるように、タイプA_{EPX}、タイプDは15年間の暴露による耐力低下は全くみられない。これに対してタイプA_{0.2}は5~8%、タイプA_{0.3}は9~10%と明らかに耐力低下がみられる。タイプA_{EPX}はひびわれにエポキシ樹脂を注入したもので、その効果によるものと判断される。破壊試験後の鉄筋のやり出し調査の結果からも鉄筋の発錆は全く認められていない。タイプDは太

径鉄筋D51を使用したもので、かぶりが6.5cmと大きい。許容ひびわれ幅は土木学会の「コンクリート標準示方書」(以下、標準示方書)では、一般の環境条件で0.005C(C:かぶ

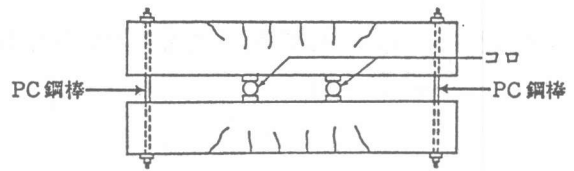


図-2 暴露中の試験体の状態

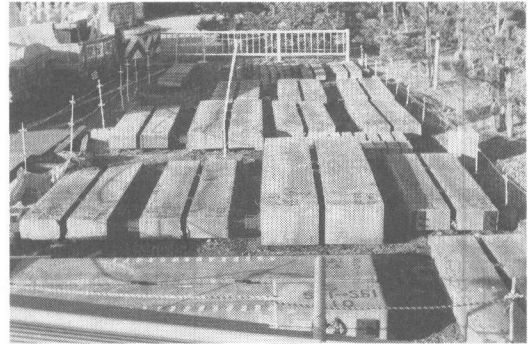
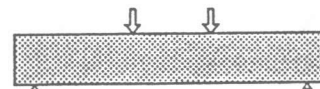


写真-1 試験体の暴露状態



注) 支点: 図-2に示すPC鋼棒の位置
荷重点: 同コロの位置

図-3 荷重方法

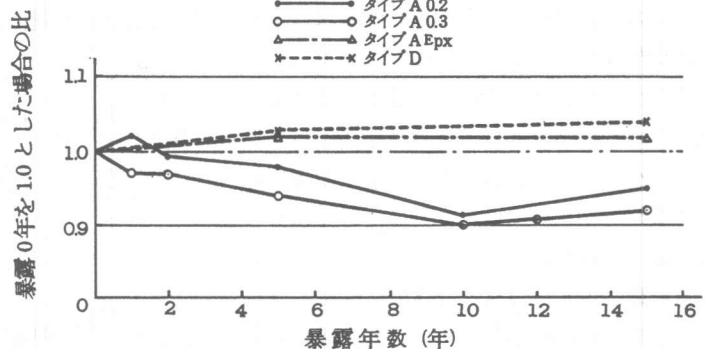


図-4 曲げ耐力の経年変化

り)と規定しているが、本実験の場合はこれにあたるため、許容ひびわれ幅としては、 $0.005 \times 65 = 0.325 \text{ m/m}$ となる。タイプDのひびわれ幅は 0.3 m/m であるから許容ひびわれ幅以下であり、このために耐力低下が生じなかったものと推察される。

タイプA_{0.2}、タイプA_{0.3}のかぶりは、いずれも3cmであるが、かぶりに関しては標準示方書では次のように規定している。 $C_{\min} = \alpha \cdot C_0$ (C_{\min} : 最小かぶり、 $C_{\min} >$ 鉄筋径、 α : コンクリート強度に応じた係数、本実験の場合1.0、 C_0 : 一般環境下のはり部材として3.0cm)、したがって最小かぶりは、 $C_{\min} = 1.0 \times 3 = 3 \text{ cm}$ である。よってかぶりについては規定値を満足しているが、図-4の結果から明らかに耐力は低下している。この原因はひびわれ幅にあるものと推察される。すなわち標準示方書で規定している許容ひびわれ幅は、前述のように0.005Cで表されており、これをタイプA_{0.2}、A_{0.3}に適用すると、 $0.005 \times 30 = 0.15 \text{ m/m}$ となる。タイプA_{0.2}、A_{0.3}のひびわれ幅は各々、 0.2 m/m 、 0.3 m/m でありいずれも許容ひびわれ幅を超えている。以上のことから経年による曲げ耐力の低下に対する検討は、かぶりのみではなくひびわれ幅も合わせて行う必要があることが明らかとなった。

なお、タイプA_{0.2}、A_{0.3}ともに暴露10年の耐力の低下率が暴露15年より大きくなっているのは、前者は昭和48年度製作、後者は昭和49年度製作と製作年度が異なり、それぞれの暴露0年時の結果と対比したものであり、多少の実験誤差も含まれているかもしれないが、現在のところ不明である。今後48年度製作の暴露20年ものの試験が予定されているが、その結果が待たれる。

表-2に曲げ耐力の実験結果を計算値と比較して示す。計算値の算出は標準示方書により行い、部材安全係数は全て1.0とした。

コンクリートおよび鋼材強度は実測値を用いた。同表から、タイプA_{0.2}、A_{0.3}は暴露0年では計算値の1.2倍を示しているが、最も低下率の大きいタイプA_{0.3}の暴露年数10年でも計算値と同等の曲げ耐力となっている。タイプA_{EPX}、タイプDは経年による耐力低下はみられず計算値の1.15倍前後および1.02倍前後となっている。

3-2 経年による曲げ耐力の低下についての考察

ひびわれを生じさせた状態で長期間暴露すると、曲げ耐力の低下が生ずることは明らかであり、低下の度合はひびわれ幅とかぶり厚さに影響されることが分かった。

耐力の低下の生じた試験体の鉄筋は、いずれも腐食しており、腐食長さ率が大きい程耐力低下も大きい傾

表-2 曲げ耐力の実測値と計算値との比較及び経年変化

タイプ	暴露年数	実測値 (t)	計算値 (t)	実測値 / 計算値	暴露0年との比
A _{0.2}	0年	14.00	12.00	1.17	1.00
	1年	14.50	12.25	1.18	1.02 *1
	2年	14.10	12.31	1.14	0.99 *1
	5年	13.88	12.12	1.16	0.98
	10年	11.95	11.34	1.05	0.91 *2
	15年	13.45	12.16	1.11	0.95
A _{0.3}	0年	14.70	12.00	1.23	1.00
	1年	13.50	12.25	1.11	0.97 *1
	2年	13.70	12.31	1.11	0.97 *1
	5年	14.10	12.12	1.16	0.94
	10年	12.15	11.45	1.06	0.90 *2
	12年	12.80	12.70	1.01	0.91 *3
15年	13.80	12.16	1.13	0.92	
A _{EPX}	0年	13.70	12.00	1.14	1.00
	5年	14.00	12.12	1.16	1.02
	15年	14.10	12.16	1.16	1.02
D	0年	50.80	50.77	1.00	1.00
	5年	52.30	51.31	1.02	1.02
	15年	53.60	51.32	1.04	1.04

*1、*2、*3は基準となる暴露0年が表中のものと製作年度が異なるため表中の0年との比ではない。

*1 : S47年製作で暴露0年の実/計 = 1.15

*2 : S48年製作で暴露0年の実/計 = A_{0.2} - 1.15, A_{0.3} - 1.18

*3 : S50年度製作で暴露0年の実/計 = 1.11

無印 : S49年製作

向にあるが鉄筋の引張強度自体は低下がなく、コンクリート強度も低下していない。以下に類似の実験例を掲げる。

魚本氏他の実験³⁾では、RCはり内の鉄筋を腐食させ、無腐食のものと同様の曲げ耐力の比較を行っており、その結果鉄筋腐食率が大きい程低下率も大きくなっている。ただし鉄筋耐力は低下しているものの、はり部材としての曲げ耐力の低下率に比べてごく微かである。この結果について、鉄筋の腐食によるRCはりの曲げ耐力の減少は、鉄筋の引張強度の減少だけではなく、鉄筋の腐食による付着力の減少、ひびわれが耐力のメカニズムの変化に与える影響、損傷の形態、荷重状態、スターラップの有無のような種々のファクターがRCはりの曲げ耐力に重要な役割を果たしているとして述べている。

また大即氏他の実験⁴⁾では、RCはりに0.1mmの曲げひびわれを発生させ、海岸の波しぶきのかかる場所に10年間暴露したのち、曲げ試験を行い、暴露前の耐力と比較したものである。結果としては、暴露10年により耐力低下の傾向がみられ、かぶりが小さい程鉄筋の腐食率も大きく、耐力低下も大きいことが明らかとなった。

これらの結果から、いずれも鉄筋の腐食率が大きくなると曲げ耐力の低下率も大きくなっているが、鉄筋の腐食率のみでは曲げ耐力の低下は説明できず、曲げ耐力の低下には、かぶり、部材に生じているひびわれ、応力状態が複雑に関係していると思われる。

3-3 曲げ試験時の変位

図-5にタイプA_{0.2}とタイプDの荷重とスパン中央の変位との関係を示す。図中の計算値は暴露0年における実測のコンクリートのヤング係数を用い、引張側コンクリートを無視したRC断面として算出した。

図よりわかるように荷重-変位曲線は暴露年数には影響されず正常な状態を成している。しかし変形量は暴露によって減少がみられる。図-6に計算上の鉄筋応力が1800kg/cm²時の変形量について暴露0年の変形量を1.0として暴露による変化を示す。

図より、タイプA_{EPX}を除き暴露により変形量は減少し、見掛けの剛性が大きくなっていることがわかる。これは暴露中ひびわれ幅を保持させるためにPC鋼棒を固定しているため、その残留変形によるものである。タイプA_{EPX}は計算上の鉄筋応力1800kg/cm²時点では樹脂注入した部分が伸びて試験体にひびわれが発生しない。このため全断面有効の弾性体のような性

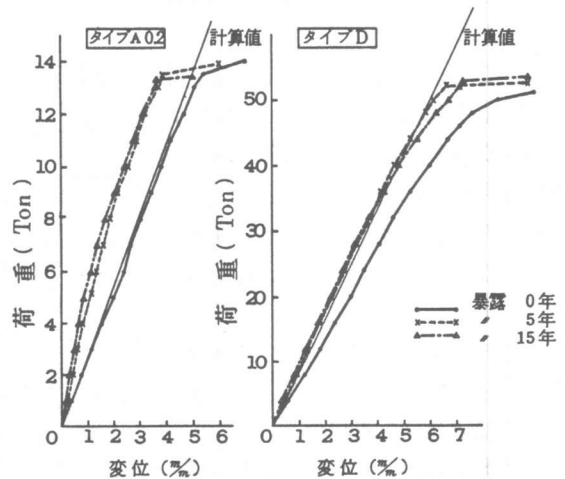


図-5 各試験体の荷重-変位曲線

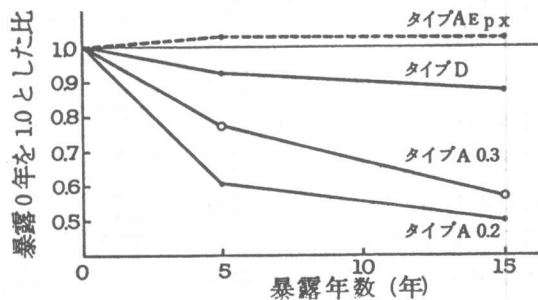


図-6 暴露年数による載荷重に対する変形量の変化

状となり、これが暴露年数には影響されない原因と思われる。

3-4 鉄筋の腐食状況

鉄筋の腐食状況については暴露10年までは目視により発錆の有無のみを調査したが、それ以降は腐食の度合を定量的に示す方法として建設省土木研究所方式⁵⁾による腐食長さ率(鉄筋の全長に対する鉄筋の腐食している部分の長さの合計の比)で表した。

結果を図-7に示す。図よりかぶり⁶⁾が3cmと一定とし、ひびわれ幅を0.1m/m、0.2m/m、0.3m/mと変化させた場合、0.3m/mでは2年、0.2m/mでは5年、0.1m/mでは10年を経過すると鉄筋は発錆することがわかる。すなわち同じかぶりでも、ひびわれ幅の小さい程鉄筋の発錆する時期は遅くなる。ここでひびわれ幅が0.1m/mと微細な場合でも暴露年数が10年と長期間になると鉄筋が錆びる現象は、関氏他の研究⁶⁾、西田氏他の研究⁷⁾結果に近いものである。

次にひびわれ幅と腐食長さ率の関係をみると、明らかにひびわれ幅が大きくなる程腐食長さ率は増大しているが、ひびわれ幅が0.2m/m以上では大きな増大はない。これはコンクリートの中性化が鉄筋位置に達していないかぎり暴露期間が長くなると、ひびわれ内に堆積物が増え、外部からのCO₂の浸入が妨げられることも一因であると思われる⁸⁾。また腐食長さ率の経年変化は暴露期間が10年までは進行するがそれ以降は進行度合が小さくなっている。なおエポキシ樹脂を注入したタイプA_{EPX}は暴露期間15年を経過しても全く鉄筋は発錆しておらず、樹脂注入の効果が明らかであることが判明した。

3-5 コンクリートの中性化

コンクリートの中性化試験結果を岸谷・浜田式⁹⁾と比較して図-8に示す。図から次のことが推察される。暴露5年までは中性化はみられないが、6年以降になると認められはじめ、暴露年数の増加に伴いその深さは深くなる。

試験体の上面と下面を比較すると下面の方が中性化が進んでいる。文献¹⁰⁾によると、十分に乾燥したコンクリートでは中性化は進行せず、

相対湿度50~60%の空気中の場合最も早く進行し、それよりも湿度の高い場合は、CO₂がコンクリート中の空隙に存在する水によって阻害されかえって遅くなる。本実験の場合、上面は屋外の空气中に暴露されており、雨天時では水分を含み、晴天時では乾燥する状態であるが、下

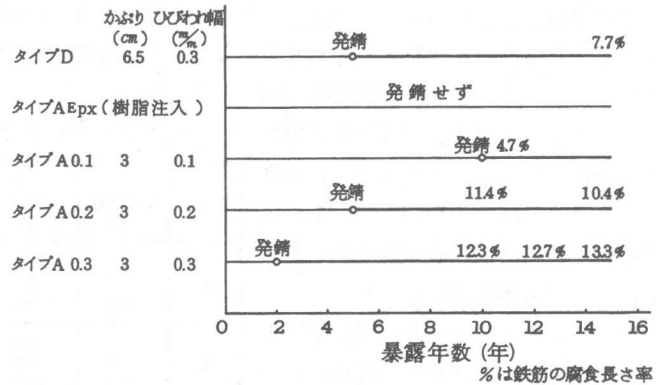
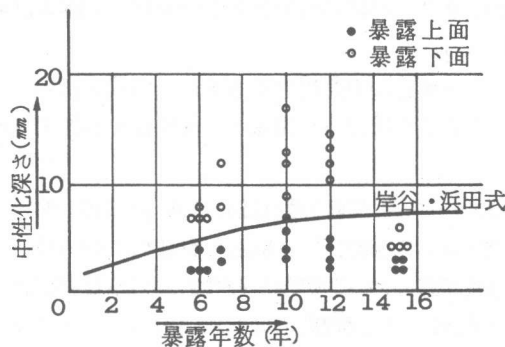


図-7 暴露年数と鉄筋の発錆状況の関係



⊕暴露年数15年のコンクリートは他とは製作年度が異なる。

図-8 コンクリートの中性化深さの経年変化

面は10cmの角材を介して地表面に接しているため常に湿潤状態となっている。この影響により下面の方が上面よりも中性化が進行したものと思われる。中性化式としては岸谷・浜田式があるが、これと実測値を比較すると実測値の上面と下面との中間にある。

3-6 コンクリートおよび鉄筋強度の経年変化

コンクリートおよび鉄筋強度の経年変化を表-3、表-4に示す。鉄筋は暴露0年は母材を、暴露5年、10年は試験体の曲げ試験後に研り出したものについて強度試験を行った。

表よりコンクリートの圧縮試験は15年経過で20~25%増だが、ヤング係数は10~20%増である。また鉄筋の強度は暴露15年では低下はみられず、破断時の伸び能力も低下していないことがわかる。

4. まとめ

ひびわれの生じたRC部材を都市部の中でも非常に厳しい環境条件下で15年間暴露し、経年による耐力変化を調べた。以下に得られた結果を示す。

樹脂注入を施し補修した部材およびかぶり6.5cmの太径鉄筋D51を使用した部材では、耐力の低下はみられないが、かぶり3cmでひびわれ幅が0.2mm以上の部材では、5~10%の耐力が低下することが判明した。

暴露によるRC部材の耐力低下は、かぶり、及び部材に作用している応力によって生じているひびわれ幅が主な要因と思われ、適切なかぶりをとり、引張鋼材に生ずる引張応力を適切な値に設定することにより、部材の耐力低下を軽減させ、耐久性のあるコンクリート部材とすることができるとされる。

おわりに、15年目の中間報告であるが、今後も実験を続けていくので、結果が出しだい報告する。また、本研究に携わった関係者一同に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：鉄筋コンクリート中の鉄筋腐蝕に関する試験方法(案)、コンクリートライブラリー、No.41, PP.186
- 2) 秋元泰輔, 他：ひびわれの生じている鉄筋コンクリート部材の耐久性に関する研究, コンクリート工学, Vol.27, No.2, Feb.1989, PP.31~39
- 3) 魚本健人, 他：鉄筋腐蝕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論文報告集, Vol.9, No.2, 1987, PP.675~680
- 4) 大野信明, 他：10年間酒田および鹿児島港に暴露したコンクリート梁の性状, セメントコンクリート, No.485, July.1987, PP.10~17
- 5) 建設省土木研究所：コンクリート橋の塩害対策に関する暴露試験調査(I), 建設省土木研究所資料, No.1851, 昭和57.7, PP.61
- 6) 関 博, 他：長期間海水作用を受けたコンクリートはりのひびわれと内部鉄筋の腐蝕について, 運輸省港湾技術研究所研究報告, Vol.12, No.13, 1973.9,
- 7) 西田勝美, 他：コンクリートのひびわれと鉄筋のさび-塩沢における20年放置実験の結果-, コンクリート工学, Vol.14, No.5, May.1976, PP.36~40
- 8) P.Schiebl: Korrosion abtragung, Betonwerk+Fertigteil-Technik, Dec.1975
- 9) 岸谷孝一, 他：コンクリート工学ハンドブック, 1984, PP.592~594
- 10) 浜田啓：コンクリートの中性化と鉄筋の腐蝕, セメントコンクリート, No.272, 1969, PP.2~18

表-3 コンクリート強度の経年変化(kg/cm²)

タイプ	暴露年数(年)	圧縮強度		ヤング係数	
		実測値	0年との比	実測値	0年との比
A	0	305	1.00	1.81×10 ⁵	1.00
	5	365	1.20	2.30×10 ⁵	1.27
	15	384	1.26	2.13×10 ⁵	1.18
D	0	315	1.00	1.84×10 ⁵	1.00
	5	392	1.24	2.13×10 ⁵	1.16
	15	394	1.25	2.02×10 ⁵	1.10

表-4 鉄筋強度の経年変化

タイプ	暴露年数(年)	σ_{sy} (kg/cm ²)	σ_{su} (kg/cm ²)	伸び (%)
A (D19)	0	3743	5829	23.3
	5	3683	5679	23.2
	15	3780	5801	21.3
D (D51)	0	3610	5870	31.1
	5	3620	5890	—
	15	3600	5950	30.5