

論文 繰返し荷重を受けた RC 部材における鋼材腐食と内部損傷に関する実験的研究

白川 裕之*¹・林 和彦*²・細田 暁*³・椿 龍哉*⁴

要旨：繰返し荷重を受けた RC 部材において、内部ひび割れの発生状況や発生した内部ひび割れが塩化物による鋼材腐食に及ぼす影響を把握するために、1 回もしくは 100 万回の荷重を与え、乾湿繰返し実験とインク注入実験を行った。その結果、普通コンクリートは繰返し荷重によって内部ひび割れが増大するが、膨張コンクリートは普通コンクリートと比較して内部ひび割れの発生が抑制されることがわかった。本研究の範囲においては内部損傷と塩分濃度との関係性は明らかにならなかった。

キーワード：繰返し荷重, 塩化物, ひび割れ可視化, 内部ひび割れ, 膨張材

1. はじめに

海岸付近の RC 部材は、内部に浸入した塩化物によって構造物の所要の性能が低下する場合がある。よってコンクリート標準示方書では、RC 部材中の鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値が一定の値を超えてはならないとしている。この設計値は外力によって生じる部材の表面ひび割れ幅から計算されるため、表面ひび割れ幅の規制にもつながる。しかしながらコンクリートの表面ひび割れが、鋼材の腐食にどれだけの影響を与えているかについては十分にはわかっていない。なお本研究では、曲げひび割れのように鉄筋を貫通して生じるひび割れを表面ひび割れ、コンクリート表面におけるそのひび割れ幅を表面ひび割れ幅と定義する。

著者らは、ひび割れを有する RC 部材に最大 100 万回の繰返し引張荷重を与え、繰返し数が増えるほど鋼材が腐食しやすくなった¹⁾ことを報告している。この原因の 1 つとして、RC 部材に繰返し荷重が作用して表面ひび割れ幅が増大し²⁾、塩化物の拡散係数が上昇³⁾して鋼材腐食が促進したことが考えられる。

一方で、表面ひび割れはコンクリート表面で 1 本のひび割れに見えていてもコンクリート内部で複数のひび割れに分散し、それぞれが鋼材の節と結びついている⁴⁾ことがわかっている。この内部ひび割れが、表面ひび割れと同様に繰返し荷重を受けることで成長し、塩化物の見かけの拡散係数が上昇して鋼材腐食が促進したという可能性もある。

表-1 供試体の実験条件

シリーズ	結合材	水結合材比(%)	かぶり (cm)	荷重回数 (回)	7 日圧縮強度 (MPa)	作製供試体		
						乾湿繰返し	インク注入	
N50-3.0	早強 セメント	50	2.9	1000000	42	○*	—	
				1		○*	—	
5.9			1000000	○*		—		
			1	○*		—		
N50-4.0		1000000	66	3.9		1	○*	○
						1	○*	○
N30-4.0		30	66	3.9		1000000	○	○
						1	○	○
E50-4.0	早強 セメント	50	3.9	1000000	41	○	○	
				1		○	○	
E46-4.0	早強 セメント + 膨張材	46	3.9	1000000	42	○	○	
				1		○	○	

* 乾湿繰返し実験用に作製した供試体に対して、インク注入を行った

- *1 横浜国立大学大学院 工学府社会空間システム学専攻
- *2 横浜国立大学大学院 工学研究院 特別研究教員 修士 (工学)
- *3 横浜国立大学大学院 環境情報研究院 准教授 博士 (工学)
- *4 横浜国立大学大学院 工学研究院 教授 Ph.D

表-2 配合

結合材	水結合材比 (%)	Slump (cm)	Air (%)	練上がり温度 (°C)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					単位量 (g/m ³)		
						水	セメント	細骨材	粗骨材	膨張材	AE剤	AE減水剤	SP
早強 セメント	50	10	4.2	13.3	43	160	320	790	1067	0	320	3200	0
	30	24.5	4.5	11.8	43	160	533	714	964	0	747	0	5333
早強 セメント +膨張材	46	16	6.6	11.6	43	160	320	779	1053	30	320	3200	0
	50	13	4.0	-	43	160	290	790	1067	30	320	3200	0

※ 膨張材は標準添加量が 20kg/m³ のエトリンガイト・石灰複合系を用いた

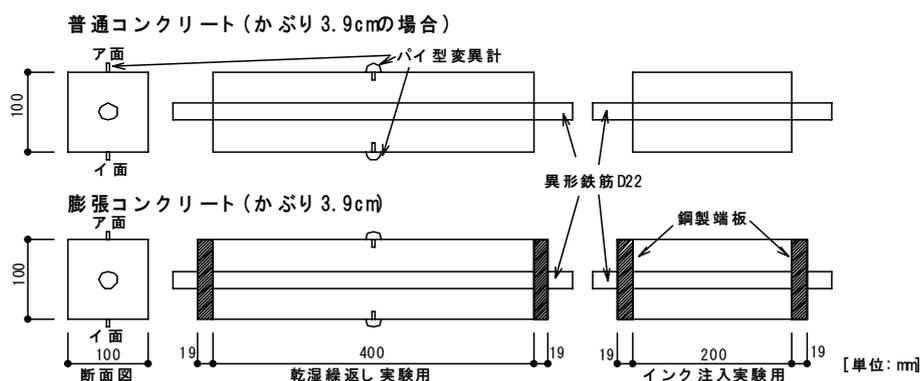


図-1 供試体図

塩化物については RC 部材中の鋼材表面に形成される不動態皮膜を破壊するだけでなく、濃度が高くなるにつれて鋼材腐食が促進する⁵⁾ことがわかっている。このため実構造物のように高サイクルの荷重が作用する RC 部材において、RC 部材内部へ浸入する塩化物の挙動を把握することは重要であり、また内部への塩化物の拡散に大きく関わる内部ひび割れの発生状況を把握することも重要である。

そこで本研究では表面ひび割れを有する RC 部材が高サイクルの繰返し荷重を受けた場合に、塩化物の浸入が促進されるかどうかを検証する乾湿繰返し実験と、内部ひび割れの状態変化をインクによりひび割れを可視化する観察するインク注入実験の2つを行った。

膨張コンクリートの場合には、普通コンクリートとは異なりひび割れ抵抗性が高いとされているため、膨張コンクリートに対しても同様の実験を行い、普通コンクリートと比較を行った。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

供試体の実験条件を表-1、配合を表-2に示す。実験のパラメータは結合材の種類、水結合材比、コンクリートのかぶり、荷重回数とし、各1体、計20体の供試体を作製した。

乾湿繰返し実験用の供試体は、断面が8×8cm (かぶり 2.9cm)、10×10cm (かぶり 3.9cm)、14×14cm (かぶり 5.9cm) の中心に、D22の異形鉄筋(SD345)を配置した形状の RC 構造とした。供試体長は、それぞれの断面寸法に対して30cm、40cm、48cmとした。これらはひび割れ定常状態において表面ひび割れが供試体中央1ヶ所に入るときの寸法となることを予備実験により確認した。ひび割れの位置を特定させるために、中央の4面には荷重直前に幅2mmのコンクリートカッターで切欠き(深さは各供試体に対して3mm、5mm、8mm)を入れた。

インク注入実験用の供試体は、乾湿繰返し実験供試体と同断面とし、供試体長はそのひび割れ間隔としたため供試体長は2分の1となる。その理由は、供試体の端部はひび割れが鉄筋を貫通した表面ひび割れ部分と境界条件が等しいためである。なお、乾湿繰返し用に作製した供試体も、その半分を用いてインク注入を行ったものもあり(表-1*印)、ここでは同じものとして扱う。

供試体は両実験用とも脱型を材齢1日で行い、材齢4日まで湿布養生を行った。その後、20°C一定の養生室で気中養生し、材齢7~9日の間で両引き荷重を行った。供試体と同一条件で養生したテストピースの圧縮強度を表-1に示す。

膨張コンクリートは、他の供試体と同じ寸法であるが、実構造物同様に膨張の拘束を与えるため、供試体の端部

において打設前から鋼製端板を鉄筋に溶接し、鋼製端板をつけたまま載荷を行った。膨張コンクリートの膨張ひずみは別途作製した供試体の鉄筋ひずみを計測することにより求め、載荷直前の膨張ひずみは、E46-4.0 シリーズで 62μ 、E50-4.0 シリーズで 126μ であった。

2.2 実験方法

(1) 両引き載荷

油圧サーボ式疲労試験機を用いて両引き載荷を行い、1 回もしくは 100 万回の載荷を与えた。一般的に定められる材料の疲労限度 200 万回に近い値として 100 万回を定め、その途中の回数は省略している。繰返し載荷の周波数は 12Hz としたが、載荷の都合上 N50-3.0 シリーズのみ 14Hz とした。載荷周期は疲労強度の結果に影響を及ぼさない⁶⁾ことから影響はないものとして扱う。

繰返し載荷は、鉄筋応力の上限が 180MPa、下限が 100MPa とし、140MPa を中心とした応力振幅 40MPa の正弦波とした。これは道路橋示方書⁷⁾における一般部材の鉄筋(SD345)の許容応力度(死荷重 100MPa、活荷重 180MPa)を参考に定めた。1 回載荷の最大荷重は、鉄筋応力が 180MPa となる値とした。実験中、供試体の切欠き部において相対する 2 面(図-1、表-3 におけるア、イ面)にパイ型変位計を貼り付けてひび割れ幅を測定した。

(2) 乾湿繰返し実験

載荷が終了した供試体に対して乾湿繰返し実験を行った。湿潤 1 日、乾燥 2 日を 1 サイクルとし、5 サイクルで終了した。湿潤では、40℃に設定した市販の人工海水(4%NaCl 水溶液)中に浸漬させた。鋼材腐食の確認は、自然電位測定により行った。実験環境においては載荷の進

行と塩分の浸入は同時に起こるものの、本研究においては、条件の厳しい時を想定して、載荷終了後の供試体に対して乾湿繰返しを行った。

(3) 塩分濃度測定

乾湿繰返し試験終了後、表面ひび割れと鉄筋が直交する付近のコンクリート試料を取り出し、全塩化物濃度を電位差滴定法により測定した。

(4) インク注入実験

インク注入実験用の供試体と乾湿繰返し実験用の一部の供試体に対してインク注入実験を行った。乾式のダイヤモンドカッターで鉄筋に沿って半分に切断し鋼材を取り除いたコンクリートを密閉容器の中で-0.08MPa まで減圧し、赤色のインクで満たした後に除圧を行った。インク注入後に切断面をグラインダーで研磨すると、研磨面には赤い線が残る。既往の研究⁸⁾から、内部ひび割れは節の頂部から発生して周囲へ伸びていくことがわかっているため、この実験においては、グラインダーで研磨した後に研磨面に残っていて、かつ既往の研究結果と同

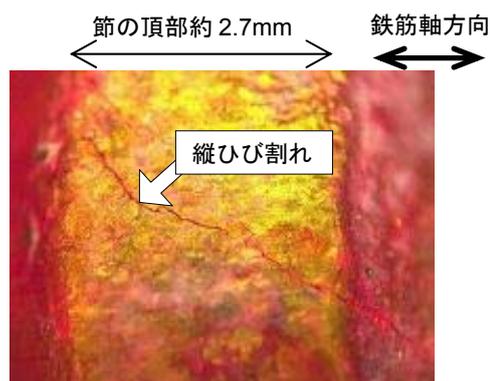


図-2 可視化した縦ひび割れ(表面ひび割れ近傍)

表-3 載荷による表面ひび割れ幅

シリーズ	載荷回数(回)	最大荷重時のひび割れ幅(mm)			除荷時の残留ひび割れ幅(mm)		
		ア面	イ面	アイ面の平均	ア面	イ面	アイ面の平均
N50-3.0	1000000	0.055	0.190	0.122	0.013	0.054	0.033
	1	-0.013	0.309	0.148	0.005	0.064	0.034
N50-6.0	1000000	0.271	0.100	0.186	0.10	0.029	0.064
	1	-0.062	0.354	0.146	-0.013	0.086	0.037
N50-4.0	1000000	0.138	0.257	0.197	0.047	0.091	0.070
	1	0.395	-0.06	0.168	0.081	-0.005	0.038
N30-4.0	1000000	0.479	-0.063	0.208	0.168	-0.021	0.074
	1	0.212	0.182	0.197	0.064	0.043	0.053
E50-4.0	1000000	0.085	0.191	0.138	0.028	0.050	0.039
	1	0.114	0.108	0.111	0.019	0.014	0.016
E46-4.0	1000000	0.053	0.208	0.130	0.023	0.062	0.043
	1	0.115	0.137	0.126	0.168	-0.021	0.074

じ傾向を示している赤い線を内部ひび割れと定義した。

3. 乾湿繰返し実験の結果と考察

3.1 表面ひび割れ幅

各シリーズの最大荷重時のひび割れ幅、残留ひび割れ幅の結果を表-3に示す。表よりひび割れ幅の平均値は、既往の研究²⁾と同様に繰返し荷重が作用したことで増大している。しかしながらかぶりが2.9cmであるN50-3.0シリーズにおいて、最大荷重時のひび割れ幅は1回だけ荷重された供試体の方が大きく、除荷時の残留ひび割れ幅は荷重回数に関係なくほぼ同じ値であったため、既往の研究²⁾と異なる結果であった。その理由を調べるために乾湿繰返し試験終了後、この供試体にインク注入実験を行った結果、表面ひび割れ近傍において、図-2に示す縦ひび割れが発生していた。この縦ひび割れは幅が約12 μ m程度で、外観からは観察できなかった。一方、100万回荷重した供試体では縦ひび割れは生じていなかった。本シリーズはかぶりが小さかったため、ばらつきにより1回荷重した供試体にだけ縦ひび割れが生じ、最大ひび割れ幅の増大と残留ひび割れ幅の低下が鈍ったと考えている。

3.2 自然電位と鋼材腐食

5サイクル目の湿潤が終わった時点で計測した表面ひび割れ近傍の自然電位と荷重回数との関係を図-3に示す。図-3より、N50-4.0シリーズにおいて既往の研究¹⁾通りに荷重回数が大きい供試体の自然電位が卑になっている。しかし、その他のシリーズでは荷重回数の増大により鋼材腐食が促進する傾向はなかった。N50-3.0シリーズにおいては、1回荷重の供試体の自然電位の方が卑であった。土木学会規準⁹⁾では飽和硫酸銅電極換算での自然電位が-350mVを下回っていれば、90%以上の確率で鋼材腐食が起きているとされている。そこで、供試体をコンクリートカッターで鉄筋に沿って半分に切断し、鋼材を取り出して腐食の確認をした。その結果、図中の

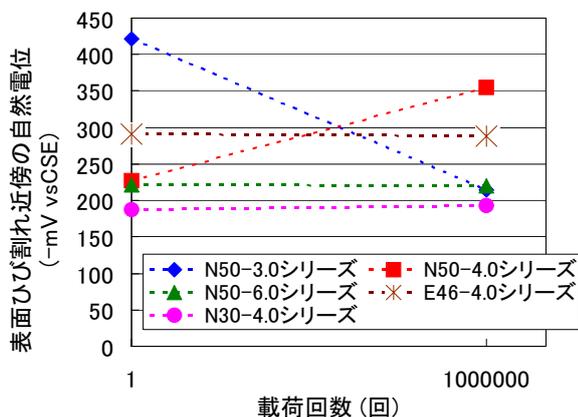


図-3 自然電位と荷重回数の関係

-350mVを下回っている2つの供試体において鋼材腐食が発生していた。この鋼材腐食は、表面ひび割れと鋼材が直交する付近で生じていた。

表-3から、N50-3.0シリーズの残留ひび割れ幅の最大値は荷重回数によらずほとんど変わらない。しかし1回荷重の供試体においてのみ鋼材が腐食していた。この1回荷重の供試体を観察すると縦ひび割れが生じており、この縦ひび割れの幅は、4.2節で述べる内部ひび割れの幅よりも大きいものであった。このため、塩化物の拡散係数や酸素の透気性が増して腐食促進が起きた可能性がある。その他の供試体は自然電位が-350mVを上回っており、鋼材腐食は発生していなかった。

3.3 塩分濃度

供試体を切断して内部の鋼材腐食を観察した後、普通コンクリートの供試体に対して塩分濃度の測定を行った。測定をおこなった箇所は、表面ひび割れと鋼材が直交する付近である。その結果、いずれの試料からも塩分は検出されなかった。

このことは鋼材腐食と塩化物の浸入が関係していないとはいえない。乾湿繰返しによってひび割れを通して塩化物は浸入したものの、サイクル数が短かったためにペースト中へ塩化物が浸入しなかった可能性があるためである。

4. インク注入実験の結果と考察

4.1 内部ひび割れの長さ

インク注入実験の結果の一例を図-4と図-5示す。図は画像データ上で内部ひび割れの位置をわかりやすくす

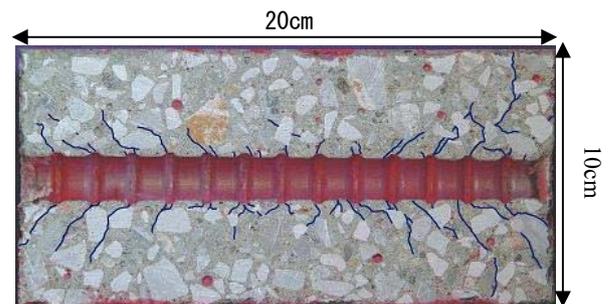


図-4 内部ひび割れの発生状況 (N50-4.0 100万回)

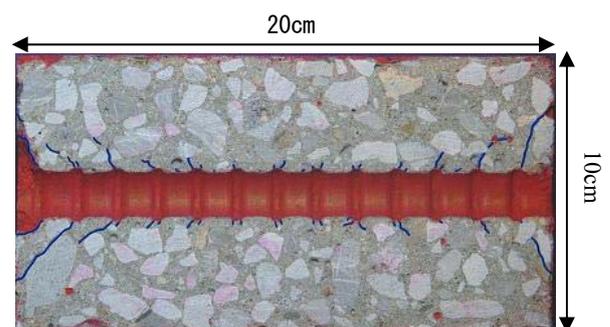


図-5 内部ひび割れの発生状況 (E50-4.0 100万回)

るために、青線でトレースして強調したものであり、青線の幅は内部ひび割れ幅と関係ない。図のように本実験において、既往の研究⁴⁾で観察できなかった供試体中央の内部ひび割れをも観察することができた。図中央の赤い領域は異形鉄筋が接していた箇所であり、この領域で横方向へ等間隔に並んだ溝が節の跡である。図より、内部ひび割れの長さは表面ひび割れを模擬した供試体端部において大きく、供試体中央において小さい結果になった。この傾向は他の供試体にも共通しており、付着応力の分布と関係していると考えている。

結合材による違いを見ると、膨張コンクリートは普通コンクリートより内部ひび割れの発生が少ないことがわかる。荷重の最大荷重は、膨張コンクリートのひび割れ発生荷重を超えている。膨張コンクリートは引張破壊時の限界ひずみが大きく、その伸び能力の影響が内部ひび割れの発生状況にも現れたためだと考えている。

このインク注入実験では、1回も荷重していない普通コンクリート供試体に対しても行っている。その結果、荷重を行った場合と比較して極めて微小ではあるが、ひび割れと見なせる赤線が観察された。これは収縮によるひび割れではないかと考えている。

次に荷重回数と内部ひび割れ長さの関係を観察するため、内部ひび割れによって表面ひび割れ面と結ばれる節の数に注目する。その結果を表-4に示す。図-4の場合では、図の右上にある3つの節から発生したそれぞれの内部ひび割れが表面ひび割れ面に合流しているため3つである。図-5の場合では、左下の2つの節から発生した内部ひび割れが表面ひび割れ面に合流しているため2つである。表中にある供試体記号の末尾(A, B)については、Aが乾湿繰返し実験用に作製した供試体を表し、Bがインク注入用に作製した供試体を表す。表より普通コンクリートの場合ではかぶりや水結合材比によらず荷重回数が増大するにつれ、表面ひび割れ面に合流する内部ひび割れが増加している。これによって、内部ひび割れ長さが荷重回数の増大によって伸展したことがいえる。そもそもひび割れの先端は破壊が進行している領域であり、脆弱になっている。この破壊進行領域において1回目の荷重時にはインクが十分に注入されなかったが、高サイクルの繰返し荷重をうけたことで破壊が進行(ひび割れ長さが進展)してインクが注入されやすくなった可能性がある。かぶりの違いと節の数を比較した場合には、荷重回数によらずかぶりが3.9cmの時が最大となり、表面ひび割れ面に合流するひび割れが多い。水結合材比の観点からも荷重回数によらず、水結合材比が大きいほど表面ひび割れ面に合流するひび割れが多かった。その一方で膨張コンクリートについては、荷重回数の増大によるひび割れ本数の増加はみられず、本数自体も普通コン

表-4 各シリーズの節の数とひび割れ長さの最大値

供試体 記号	表面ひび割れ面 と結ばれている 節の数(個)		ひび割れ長さの 最大値(cm)	
	1回	100万回	1回	100万回
N50-3.0-A	1	2	2.9	2.9
N50-4.0-A	2	3	3.9	3.9
N50-6.0-A	1	2	1.6	3.0
N50-4.0-B	2	3	3.9	3.9
N30-4.0-B	1	2	3.9	3.9
E50-4.0-B	2	2	1.8	2.0
E46-4.0-B	1	1	2.6	2.5

クリートに比べて少ない結果であった。

次に、コンクリートかぶりの対する内部ひび割れ発生への影響を観察するため、鋼材と直交方向の内部ひび割れの長さに注目する。計測は分解能1mmのスケールで測った。本研究で行った内部ひび割れの可視化方法では、粗骨材領域によって内部ひび割れが途切れてしまう場合がある。そこで、内部ひび割れが粗骨材によって止まっても、その内部ひび割れの延長線上にひび割れが存在していれば、内部ひび割れが粗骨材を迂回して伸展しているとみなした。各供試体の鋼材と直交方向における内部ひび割れの長さを表-4にまとめた。この結果から供試体記号がN50-4.0-A, N50-4.0-B, N30-4.0-Bにおいてひび割れ長さの最大値は3.9cmとなっており、N50-3.0-Aでは2.9cmとなっている。これらの値はそれぞれの供試体のかぶり厚さであり、内部ひび割れがコンクリートの表面に達していることを意味する。かぶりが3.9cmの普通コンクリートの場合、荷重回数と水結合材比によらず内部ひび割れはコンクリート表面に達していた。図-4右上に見える内部ひび割れがその一例である。かぶりが2.9cmの普通コンクリートの場合でも、荷重回数によらず内部ひび割れはコンクリート表面に達していた。しかし、かぶりが5.9cmの場合では内部ひび割れはコンクリート表面まで達しないが、荷重回数の増大によって内部ひび割れ長さも増大する結果になった。膨張コンクリートについては表面に達しているひび割れはなかった。膨張コンクリートのかぶりが3.9cmの時には、水結合材比が小さいほど内部ひび割れ長さは短い、ほとんど荷重回数にはよらない結果となった。

4.2 内部ひび割れの幅

本実験では鋼材の節の跡において、鋼材の軸直交方向に内部ひび割れの開口部が観察できる。この開口部の幅を内部ひび割れの幅とした。既往の研究⁸⁾から、内部ひび割れの開口部は節の頂部に沿うと予想された。しかし

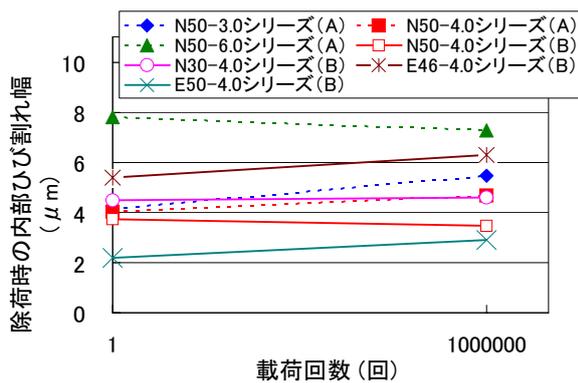


図-6 内部ひび割れ幅と載荷回数の関係

観察の結果、節の頂部と頂部との平坦部に開口部ができた内部ひび割れもあった。これは市販の異形鉄筋では節の立ち上がり角度が鈍いため、節の頂部に力が集中しなかったためと考える。

計測した内部ひび割れ幅と載荷回数の関係を図-6に示す。この図で用いている内部ひび割れ幅は、表面ひび割れ面近傍の3つの節（使用した異形鉄筋の節の1つの間隔はおおよそ14mm）にある内部ひび割れの幅をマイクロSCOPE（倍率：1000倍）で計測して平均した値である。その結果、内部ひび割れ幅の平均はおおよそ2~8μmであった。しかし、インク注入前にコンクリートを切断して鋼材を除去しているため、ひび割れは除荷後の残留ひび割れである。実際に荷重が作用している状態でのひび割れ幅は、計測結果より大きくなると推定できる。今回用いた、マイクロSCOPEによる計測では、このような微小ひび割れ幅の計測には1μm程度の誤差があると考えている。よって図-6から、除荷時の内部ひび割れ幅は載荷回数により変化するとはいえない。

内部ひび割れの幅はかぶりが大きいくほど、水結合材比が小さいほど増加する結果であった。膨張コンクリートの内部ひび割れ幅については、同じ水結合材比の普通コンクリートより小さくなった。

5. まとめ

本研究の範囲内を取りまとめると以下のとおりとなる。

- 市販の異形鉄筋を用いた繰返し載荷を受けたRC供試体において、インク注入法により内部ひび割れを可視化させることができた。
- 除荷後の内部ひび割れの長さは、表面ひび割れ付近で大きく、離れるにつれて小さくなる傾向がある。
- 除荷後の内部ひび割れの幅は繰返し荷重が作用しても変化しないが、内部ひび割れの長さは繰返し荷重を受けることで増加する傾向がある。
- かぶり厚さが小さい場合には内部ひび割れがコンク

リート表面に到達する傾向がある。

5) 膨張コンクリートは普通コンクリートに比べて内部ひび割れの発生と進展を抑制する傾向がある。

6) 低サイクルの乾湿繰返しでは、繰返し載荷による鋼材腐食の促進と塩化物の関係性をみることはできなかった。

謝辞

塩分濃度の測定に関しては東京大学生産技術研究所の岸利治研究室、加藤佳孝研究室にお世話になった。なお本研究の一部は、平成19年度文部科学省科学研究費補助金（若手研究（B）, 課題番号18760347, 研究代表者：林和彦）に基づき実施された。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 五十嵐悠, 林和彦, 椿龍哉: 繰返し荷重を受けたRC部材の鉄筋腐食に及ぼす影響因子, 土木学会第62回年次学術講演会講演概要集, V-485, pp.969-970, 2007.9
- 森竹巧: 疲労荷重を受けるRC部材のひび割れ幅, 横浜国立学大学院修士論文, 2005.3
- 塚原絵万, 加藤佳孝, 魚本健人: ひび割れを有するコンクリート中の塩化物イオン移動評価手法の提案, 土木学会論文集, No.732/V-5, pp.109-120, 2002.5
- 林和彦, 高梨大介, 五十嵐悠, 椿龍哉: 繰返し荷重を受けるRC部材の異形鉄筋周辺のひび割れ性状, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.619-624, 2007.7
- Raja Rizwan HUSSAIN and Tetsuya ISHIDA: Electro-Chemical Modeling of corrosion in Reinforced concrete and The Effect of Chloride and Temperature, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, pp.1389-1394, 2007
- A.M.Neville, 三浦尚訳: ネビルのコンクリートバイブル, 技報堂出版, p.427, 2004
- 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編, IIIコンクリート橋編, pp.126-128, 2002.2
- 後藤幸正, 大塚浩司: 引張を受ける異形鉄筋周辺のコンクリートに発生するひび割れに関する実験的研究, 土木学会論文報告集, No.294, pp.85-100, 1978.11
- JSCE-E 601-2007, コンクリート構造物における自然電位測定方法（案）