

論文 腐食膨張挙動に対するコンクリートの拘束圧に及ぼす補強筋の影響とその影響範囲

菰澤 洋平^{*1}, 村上 祐貴^{*2}

要旨: 本研究では、静的破砕剤を用いた腐食膨張模擬実験を行い、補強筋が主鉄筋の腐食膨張挙動に対するコンクリートの抵抗性(コンクリートの拘束圧)に及ぼす影響について検討した。その結果、かぶり面にひび割れが発生する時点の拘束圧に及ぼす補強筋量の影響は小さかったが、補強筋量が多い程、最小かぶり面のひび割れ幅の拡大に伴う拘束圧の低下は抑制された。また、補強筋の拘束効果の影響範囲は、最小かぶり面のひび割れ幅が 1.0mm に到達した時点で補強筋からおおよそ 75mm までの範囲であった。さらに、補強筋が複数本配筋されその拘束効果が重なる場合、その領域では拘束効果が相互に影響することを明らかにした。

キーワード: 鉄筋腐食, 補強筋, 静的破砕剤, 相互の影響

1. はじめに

近年、日本各地で鉄筋コンクリート構造物(RC 構造物)の各種劣化が多数報告され、高度成長期以降に整備した社会資本ストックが今後さらに急速に老朽化していくことが予想される。これを踏まえ、2013 年 1 月、社会資本の老朽化対策会議が国土交通省に設置され¹⁾、同年 3 月には老朽化対策の工程表が取りまとめられた。また、社会資本老朽化対策推進室が国土交通省に設置され¹⁾、社会資本ストックの老朽化対策について産官学が連携して取り組む体制が構築されつつある。

RC 構造物に生じる劣化は多種多様であるが、四方を海で囲まれたわが国において、鉄筋腐食は比較的起こりやすく、耐荷性能や変形性能に影響を与えることが知られている。現状の維持管理活動では目視を主体として、ひび割れや剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰等の構造物の外観から得られる損傷情報を基に、グレーディングによって損傷程度の評価が行われている。しかしながら、グレーディングは目視を主体とした半定量的手法であり、点検者によって判定結果に差異が生じる場合もある。構造物の現有性能を定量的に評価することが可能となれば、補修・補強実施の判断や実施の優先順位付けの一義的な意思決定が可能となり、経済性・安全性の観点から合理的な維持管理活動の展開が可能となる。鉄筋腐食を生じた RC 構造物の現有性能の定量的評価については、現在までに研究が盛んに行われ、体系的な取り組みもなされている^{2)~5)}。

鉄筋腐食が部材或いは構造物全体の耐荷性能に及ぼす影響については、有用な知見が蓄積されつつあるが、変形性能については未解明な部分が多い。その主たる要因として、腐食した鉄筋とコンクリートの付着性状が未解明であることが挙げられる。鉄筋腐食が RC 部材の付

着性状に及ぼす要因は、鉄筋とコンクリートの界面における腐食生成物による弱層の形成、節やリブの減肉による有効支圧面積の減少、かぶりコンクリートのひび割れなどが挙げられる⁶⁾。特にかぶりコンクリートの鉄筋軸に沿った腐食ひび割れは、付着強度の著しい低下を引き起こすことが知られており、かぶりコンクリートの腐食ひび割れ幅を指標として腐食した鉄筋コンクリートの付着性能を評価する試みがなされている⁷⁾。米田らは、かぶりコンクリートの鉄筋軸方向の腐食ひび割れが付着劣化を生じさせる主たる要因として、鉄筋軸方向の腐食ひび割れが鉄筋近傍のコンクリートの拘束効果を低下させるためであると報告している⁸⁾。

このような背景から、長岡らは付着劣化の主要因の 1 つであるコンクリートの拘束効果に着目し、かぶり面に鉄筋軸に沿ったひび割れが発生したコンクリートの拘束圧の定量的評価を試み、補強筋を有しない場合の腐食膨張挙動に対するコンクリートの拘束圧算定式を提案した。さらに、補強筋を有しない鉄筋腐食をした鉄筋コンクリートの付着強度と膨張挙動に対するコンクリートの拘束圧には強い相関性を有することを明らかにするとともに、コンクリートの拘束圧に基づく付着強度算定式を提案した⁹⁾。

一方、柳らは鉄筋腐食による鉄筋コンクリートの付着劣化に及ぼす補強筋の影響について検討しており、補強筋は腐食に伴う付着強度の低下を抑制し、かぶり面の腐食ひび割れ幅が大きい程、補強筋の付着劣化の抑制効果が大きいことを示した¹⁰⁾。これは、腐食ひび割れ発生後も補強筋によって割裂応力に対するコンクリートの拘束圧が保持されるためであると考えられる。

既往の研究において、せん断補強筋が腐食膨張挙動を拘束し、付着劣化を抑制することは明らかとなっている

*1 長岡工業高等専門学校 環境都市工学専攻科 (学生会員)

*2 長岡工業高等専門学校 環境都市工学科准教授 博(工) (正会員)

ものの、補強筋による拘束効果の影響領域や、離散的に複数本配筋された補強筋の拘束効果の相互の影響については未解明である。

そこで本研究では、静的破砕剤を用いた腐食膨張模擬実験により、補強筋を有するコンクリートの膨張挙動に対する拘束圧を軸方向に複数点測定し、主鉄筋軸方向の腐食膨張挙動に対するコンクリートの拘束圧に及ぼす補強筋の影響領域やその相互の影響について検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体概要および実験パラメータ

試験体概要を図-1に示す。試験体は断面が150mm×150mm、高さ300mmの角柱試験体であり、直径22mmの円孔を芯かぶり50mmの位置に設けた。補強筋にはD6異形鉄筋(SD295A)を使用した。補強筋の配筋間隔は図-1(c)に示す通りである。

実験パラメータは表-1に示す通り、補強筋量および圧力計測箇所である。試験体名はかぶり、補強筋本数、計測箇所数となっている。試験体はパラメータ毎に3体作成した。

コンクリートの配合を表-2に示す。セメントは早強ポルトランドセメントを使用し、水セメント比は60%とした。

2.2 実験方法

本実験では図-1(d)に示す鋼管パイプを用いて拘束圧を測定した。鋼管パイプは圧力計測部と接続部がねじ部により連結されており、各圧力計測部の内曲面には2軸のひずみゲージが3枚貼り付けてある。

本実験では試験体円孔軸方向の5ヶ所と4ヶ所で拘束圧を計測した。5ヶ所計測の試験体では鋼管パイプを圧力計測部が各試験体の補強筋直上になるように試験体端から50mm、100mm、150mm、200mm、250mmの位置に、4ヶ所計測の試験体では各試験体の補強筋直上から25mmずらし圧力計測部が試験体端から75mm、125mm、175mm、225mmの位置になるように円孔内に挿入し、鋼管パイプと円孔の隙間に静的破砕剤を充填して膨張圧を発生させた。円孔の下端部は硬化前の静的破砕剤の漏れを防止するためにビニールテープで閉じ、上端部は開放している。なお、補強筋を有していないC39-S0試験体は5ヶ所計測のみ行った。

静的破砕剤の膨張挙動は、原田ら¹¹⁾によって液圧的であることが報告されていることから、図-1(e)に示すよう拘束圧は鋼管パイプに作用する外圧と等価であると仮定し、以下の手法により拘束圧を求めた。

圧力計測部の内曲面に貼り付けてある2軸のひずみゲージで、鋼管に生じる軸方向および円周方向のひずみを計測し、計測したひずみ値を中空円筒理論を用いた式(1)

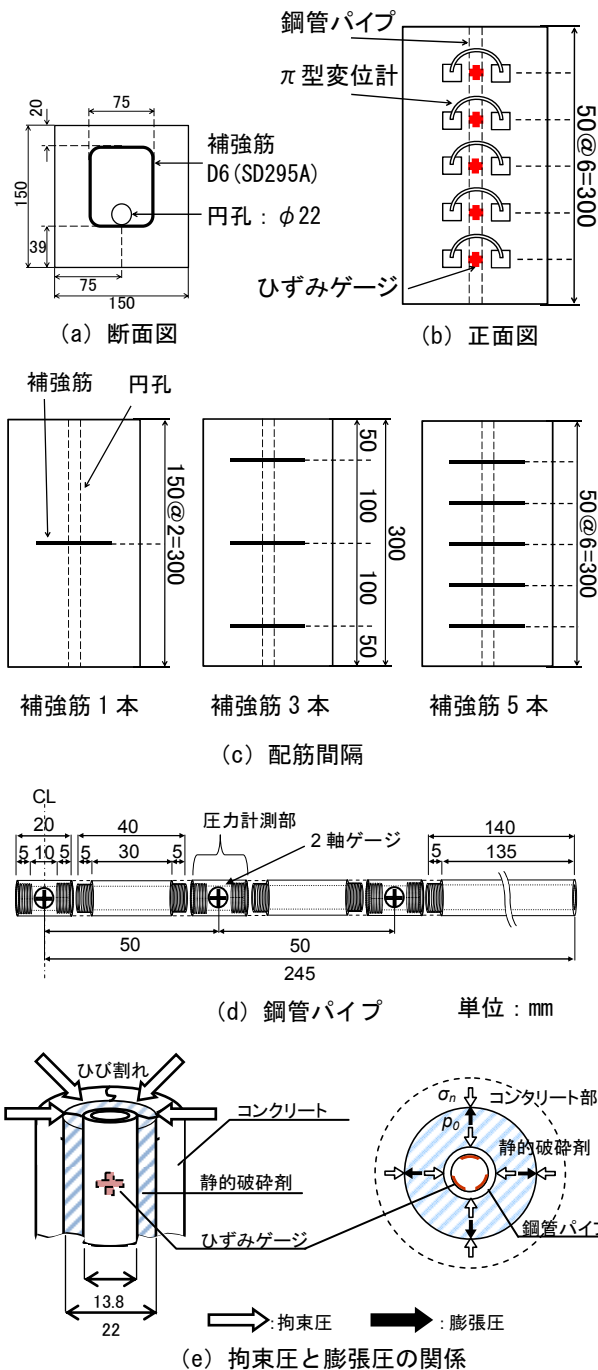


図-1 試験体概要

表-1 実験パラメータ

試験体名	かぶり厚 C(mm)	補強筋 本数	計測点数	圧縮強度 (N/mm ²)	補強筋量 pw(%)※	
C39-S0	C39-S0-5σ	39	0	5	34.8	—
C39-S1	C39-S1-5σ	39	1	5	39.0	0.28
	C39-S1-4σ		4	37.0	0.28	
C39-S3	C39-S3-5σ	39	3	5	33.6	0.42
	C39-S3-4σ		4	31.2	0.42	
C39-S5	C39-S5-5σ	39	5	5	32.9	0.84
	C39-S5-4σ		4	35.0	0.84	

※1 $pw = 2A_s / bs$ A_s : 鉄筋公称断面積, b : 試験体幅, s : 補強筋間隔

表-2 配合表

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				
	水:W	セメント:C	細骨材:S	粗骨材:G	混和剤
60	155	258	835	1040	2.58

に代入して拘束圧を算出した。

$$\sigma_n = p_0 = \frac{-E(k^2 - 1)}{2k^2(1 - \nu^2)}(\varepsilon_\theta + \nu\varepsilon_z) \quad (1)$$

ここで、 σ_n ：拘束圧(N/mm²)、 p_0 ：膨張圧(N/mm²)、 E ：鋼管の弾性係数(200000N/mm²)、 ε_θ ：鋼管の円周方向ひずみ、 ε_z ：鋼管の軸方向ひずみ、 k ：鋼管の外内径比(外径：13.8mm、内径：9.2mm)、 ν ：鋼管のポアソン比(0.3)である。

また、図-1(b)に示すように、試験体の最小かぶり面には、圧力計測部直上に π 型変位計を設置し、膨張圧に起因する縦ひび割れ幅の計測を行った。

3. 実験結果

3.1 ひび割れ性状

図-2 に試験終了時の試験体のひび割れ性状の一例を示す。補強筋量の違いによらず全ての試験体において最小かぶり面に円孔軸に沿ったひび割れが卓越して拡大した。また、最小かぶり面以外の側表面にひび割れが到達した試験体もあったが、最小かぶり面のひび割れ幅と比較して極めて小さかった。

3.2 補強筋量が最大拘束圧に及ぼす影響

図-3 に最大拘束圧と補強筋量の関係を示す。なお、最大拘束圧の定義は最小かぶり面にひび割れが生じる時点の拘束圧とし、試験体の各圧力計測部で計測したひび割れ発生時の拘束圧を平均化した値である。

図-3 に示すように試験体 C39-S3-5 σ を除き、補強筋量によらず、最大拘束圧は、ほぼ同様の値を示しており、最大拘束圧に補強筋の及ぼす影響は少ないと思われる。

3.3 補強筋量がコンクリートの拘束圧に及ぼす影響

図-4 に最小かぶり面にひび割れが発生した時点からの拘束圧と最小かぶり面のひび割れ幅の関係を示す。図-4 に示す拘束圧は、同一ひび割れ幅における試験体 5ヶ所の拘束圧を平均化し、さらに 3 体平均した値である。C39-S0 試験体は 2 体平均である。なお、各試験体の結果には、ひずみゲージの不具合により、試験体 4 ヶ所の拘束圧を平均化した値が含まれている。

補強筋を有しない C39-S0-5 σ 試験体の場合、拘束圧はひび割れ幅の拡大に伴い指数関数的に低下し、ひび割れ幅が 1.0mm の時点で拘束圧はほぼ消失した。

一方、補強筋量 0.28% の C39-S1-5 σ 試験体と補強筋量 0.42% の C39-S3-5 σ 試験体の場合、C39-S0-5 σ 試験体と同様に拘束圧はひび割れ幅の拡大に伴い指数関数的に低下したが、その低下は明らかに抑制された。また、ひび割れ幅が大きいほど補強筋の有無による拘束圧の差異は顕著に生じ、補強筋量 0.84% の C39-S5-5 σ 試験体では、

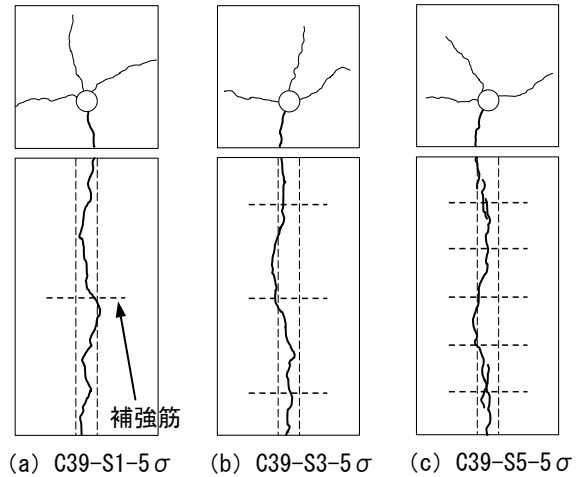


図-2 ひび割れ性状

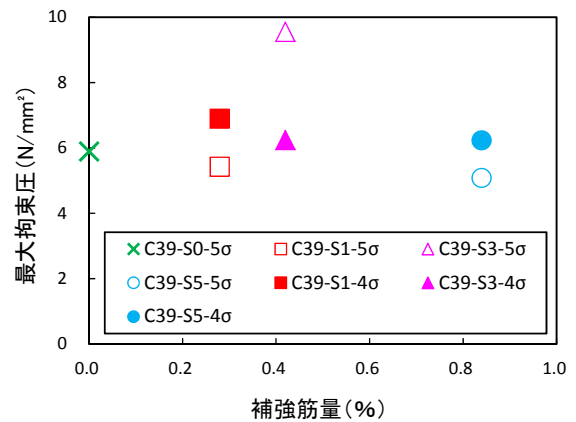


図-3 最大拘束圧と補強筋量の関係

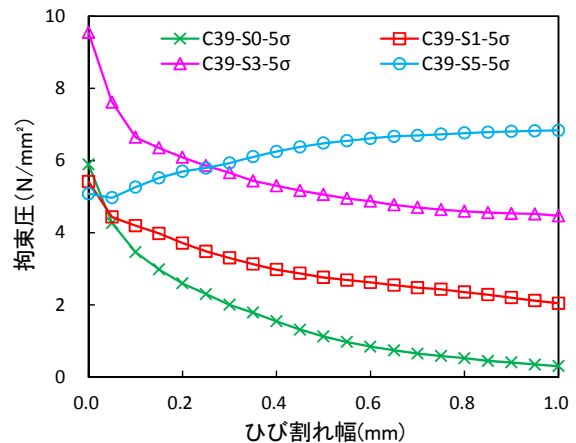


図-4 拘束圧とひび割れ幅の関係

ひび割れ発生後も拘束圧は増加した。なお、C39-S3-5 σ 試験体のみ他の試験体と比べ拘束圧が大きい値を示しているが、この原因については現在検討中である。

最大拘束圧のばらつきを考慮するために、最大拘束圧で正規化したひび割れ発生後の拘束圧と最小かぶり面のひび割れ幅の関係を図-5 に示す。補強筋量 0.28% の C39-S1-5 σ 試験体と補強筋量 0.42% の C39-S3-5 σ 試験体の場合、拘束圧の低下程度はひび割れ幅が 1.0mm に到達した時点でもひび割れ発生時の 5 割程度に抑えられてい

る。補強筋量が 0.28%, 0.42% の場合ひび割れ幅の拡大に伴う拘束圧の低下割合に差異は認められないが、補強筋量 0.84% の C39-S5-5 σ 試験体の場合、ひび割れ発生後も拘束圧は増加し、ひび割れ幅 1.0mm 時点の拘束圧は最大拘束圧に比べ 4 割程度大きい値を示した。このことから、かぶり表面にひび割れ発生後は、補強筋が膨張挙動を拘束することが確認されるとともに、補強筋量が多い程拘束効果は増加する傾向にある。しかしながら、図-5 に示した試験体は補強筋直上の拘束圧を計測しており、補強筋の拘束効果が補強筋を中心としてどの程度の影響範囲があるのか、あるいは影響領域自体が存在するかどうかは判断できない。

図-6 に拘束圧測定位置を補強筋直上から 25mm ずらして計測した試験体 C39-S5-4 σ と C39-S5-5 σ の拘束圧とひび割れ幅の関係を示す。補強筋が配筋されていない C39-S0-5 σ 試験体と比較すると、コンクリートの拘束圧の低下は明らかに抑制されている。このことから、コンクリートの拘束圧の低下に及ぼす補強筋の拘束効果が補強筋直上のみならず、ある程度の範囲に広がっていることが確認できる。補強筋の拘束効果の影響範囲については次章で詳しく述べる。

4 コンクリートの拘束圧に及ぼす補強筋の影響範囲

4.1 影響範囲の検討

図-7 に試験体中央に補強筋を一本配筋した試験体および補強筋を有しない C39-S0-5 σ 試験体の各ひび割れ時における最大拘束圧に対する拘束圧の比（拘束圧比）と補強筋直上からの距離の関係を示す。補強筋 1 本あたりの拘束効果の影響範囲を検討するにあたり、C39-S1-5 σ 試験体の補強筋直上を含む 5 ヶ所で計測した拘束圧と、補強筋直上から 25mm 離れた位置を含む 4 ヶ所で計測した C39-S1-4 σ 試験体の拘束圧を併せて示している。なお、最大拘束圧およびひび割れ幅の値は、試験体 5 ヶ所および 4 ヶ所で計測した値をそれぞれ同一時間で平均化している。

補強筋を有していない C39-S0-5 σ 試験体では、最小かぶり面のひび割れ幅の拡大に伴い拘束圧は 5 ヶ所の計測部で一様に低下したことから、5 ヶ所の平均値を直線で示した。

図-7 より、拘束圧比は補強筋を有しない C39-S0-5 σ 試験体では最小かぶり面のひび割れ幅の拡大に伴い、ひび割れ幅が 0.1mm の時点で約 60% となり 0.5mm の時点では約 15% まで低下し、ひび割れ幅 1.0mm の時点でほぼ消失した。

一方、C39-S1 試験体はひび割れ幅 0.1mm の時点では、C39-S0-5 σ 試験体と同様に拘束圧は円孔軸方向にほぼ一様に低下しているが、ひび割れ幅 0.5mm では、補強筋直

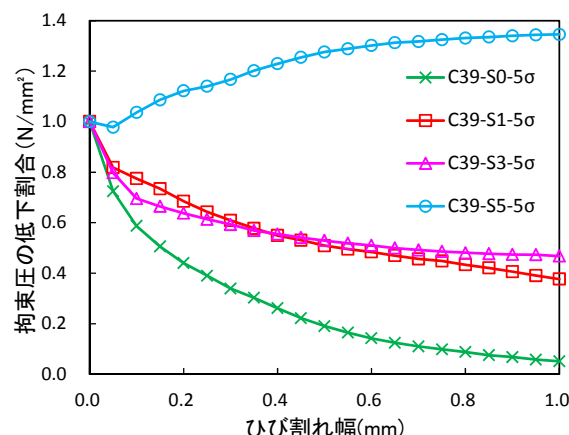


図-5 拘束圧の低下割合

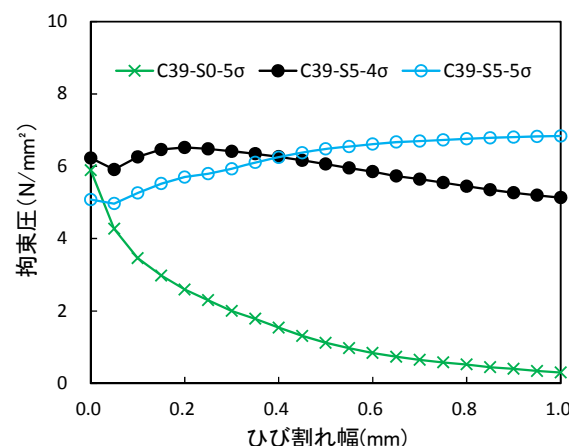


図-6 直上で計測した拘束圧と直上から 25mm ずらして計測した拘束圧の比較

上では、ひび割れ幅 0.1mm の時点から拘束圧はほとんど低下しておらず、補強筋直上から距離が離れるに従い拘束圧は低下する傾向にある。ひび割れ幅 1.0mm の時点ではその傾向が顕著に現れ、補強筋からの距離が離れるに従い、指数関数的に拘束効果は低下し、補強筋直上から 75mm 以上離れた位置では、C39-S0-5 σ 試験体と同様に拘束圧は消失した。このことから補強筋の拘束効果は補強筋から 75mm 離れた位置まで期待できると考えられる。

4.2 補強筋の相互影響の検討

補強筋の拘束効果が補強筋から 75mm までの領域に及ぶとなれば、補強筋を 100mm 間隔で配筋した試験体と 50mm 間隔で配筋した試験体は各補強筋の拘束効果が重なることとなる。この拘束効果の重なる領域において相互影響を確認するために、補強筋を 3 本配筋した試験体と 5 本配筋した試験体についても補強筋の拘束圧の低下率の分布を 4.1 節と同様の方法で算出した。

図-8 に全パラメータの最小かぶり面のひび割れ幅が 1.0mm 時点の補強筋の拘束効果の影響範囲を示す。図-8(a) に示すように C39-S3 試験体では補強筋直上の試験体中央と試験体中央から 100mm の位置の拘束圧の低下が抑制されており、図-8(b) に示す C39-S5 試験体は補

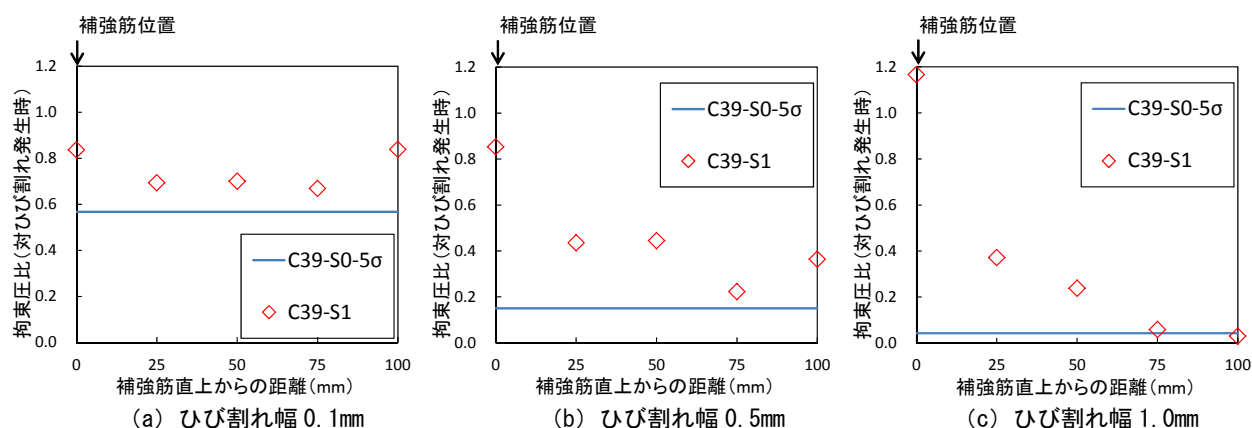


図-7 補強筋の拘束効果の影響範囲

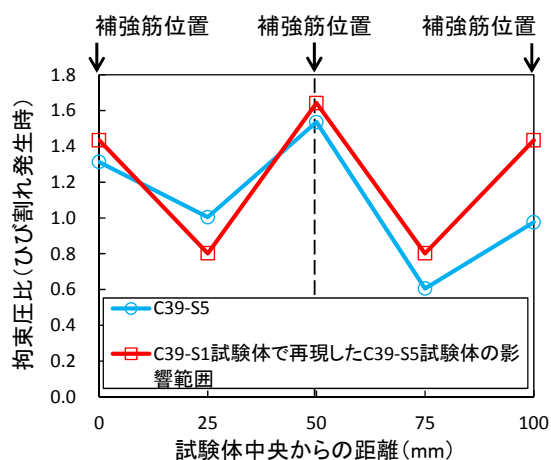
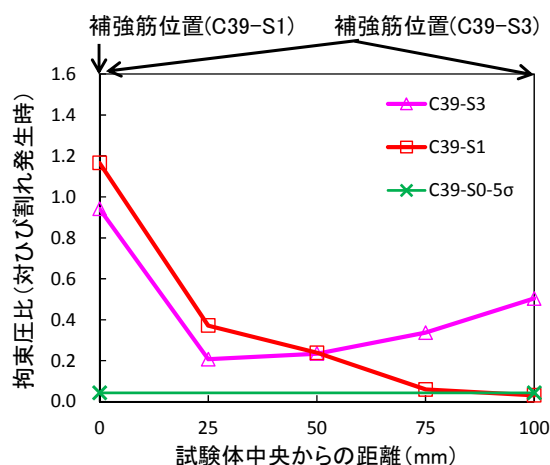


図-9 補強筋の拘束効果の影響範囲の再現 (ひび割れ幅 1.0mm)

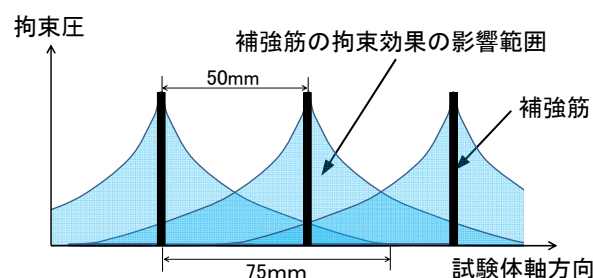
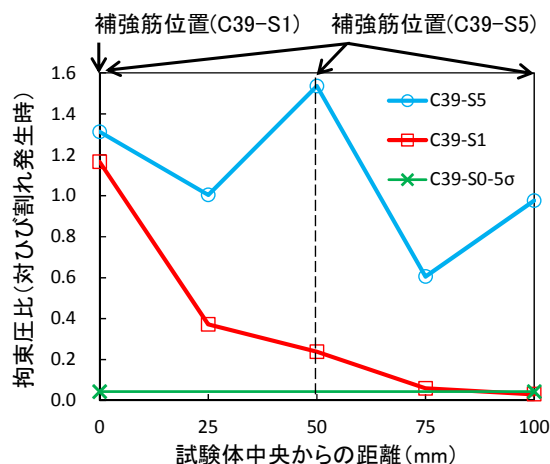


図-8 各パラメータの補強筋の拘束効果の影響範囲

強筋直上の試験体中央、試験体中央から 50mm、100mm の拘束圧の低下が抑制されている。両試験体とも試験体中央から 100mm の位置で拘束圧が低下する傾向にあるが、これは試験体端から 50mm の位置であることから、拘束圧が解放されやすいためであると考えられる。

図-9 には C39-S5 試験体のひび割れ幅 1.0mm 時における拘束圧比の分布と、図-10 に示すように C39-S1 試

験体の補強筋の影響範囲を重ね合わせた拘束効果の影響範囲を示す。C39-S5 試験体の拘束圧比の分布と C39-S1 試験体の分布を重ね合わせ算出した分布は近い値を示しており、各補強筋の影響領域が重複する領域は相互に影響が生じるものと考えられる。

補強筋の拘束効果によりコンクリートの拘束圧の低下は補強筋量によって変化するとともに、膨張挙動に対する拘束効果は空間的な広がりを持つことから、鉄筋腐食による付着劣化を評価する際には補強筋の拘束効果の空間的な分布および相互の影響を考慮する必要があると考えられる。

5 まとめ

本研究では、主鉄筋軸方向の腐食膨張挙動に対するコンクリートの拘束圧に及ぼす補強筋の影響領域やその相互の影響について明らかにすることを目的として、静的破砕剤を用いた腐食膨張模擬実験を行った。以下に得られた知見を示す。

- (1) 最小かぶり面にひび割れが発生する時点の拘束圧(最大拘束圧)に及ぼす補強筋量の影響は少ない。
- (2) 補強筋量が多い程、最小かぶり面のひび割れ幅の拡大に伴う拘束圧の低下は抑制される。
- (3) 補強筋の拘束効果の影響範囲は、最小かぶり面のひび割れ幅が 1.0mm に到達した時点でその影響範囲は補強筋直上からおよそ 75mm までの範囲である。
- (4) 補強筋が複数本配筋されて、その拘束効果の影響範囲が重なる場合、その領域では拘束効果の相互の影響が生じる。
- (5) 本実験の範囲内では、補強筋の拘束効果の相互の影響は、補強筋 1 本あたりの拘束効果の影響範囲を重ね合わせることで評価可能であった。

謝辞 本研究の一部は、科学研究費補助金(若手研究(B), 課題番号: 25871031)により行った。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 平成 24 年度国土交通白書, 第Ⅱ部第 2 章, pp.113-121
- 2) 土木学会: 材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能, コンクリート技術シリーズ, Vol.71, 2006.
- 3) 土木学会: 続・材料劣化が生じたコンクリート構造物の構造性能, コンクリート技術シリーズ Vol.85, 2009
- 4) 土木学会: 材料劣化が生じるコンクリート構造物の維持管理優先度研究小委員会 (342 委員会) 委員会報告書およびシンポジウム講演概要集, 2012
- 5) 日本コンクリート工学会: 鉄筋腐食したコンクリート構造物の構造・耐久性能評価の体系化研究委員会報告書, 2013
- 6) Fédération Internationale du Béton : State-of-art Report. Bulletin 10. Bond of Reinforcement in Concrete, FIB, 2000
- 7) 日本コンクリート工学協会: コンクリート構造物のリハビリテーション研究委員会報告書, 1998.10
- 8) 米田直也, 丸山久一, 清水敬二, 柳益夫: 鉄筋の発錆による付着劣化機構, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.2, pp.81-86, 1992
- 9) 長岡和真, 阿部哲雄, 番場俊介, 村上祐貴: 主鉄筋の腐食膨張挙動に対するコンクリートの拘束圧に基づく付着割裂性状評価, コンクリート工学論文集, vol.34, No.1, pp.29-42, 2013.5
- 10) 柳益夫, 丸山久一, 清水敬二: 鉄筋の腐食による付着劣化に及ぼすスターラップの影響, 土木学会第 47 回年次学術講演会講演概要集, V-190, pp.410-411, 1992
- 11) 原田哲夫, 出光隆, 渡辺明: 静的破砕剤を用いたコンクリートの解体に関する基礎的研究, 土木学会論文集, 第 360 号, pp.61-70, 1985