論文　鉄筋腐食した短繊維補強コンクリートのはく落抵抗性に関する研究

伊藤　始[*1]・渡辺　健[*2]・轟　俊太朗[*3]・高見　涼[*4]

要旨：鉄筋腐食によるひび割れはコンクリート塊のはく落の原因となり，構造物の利用者に被害を与える可能性があり，その防止対策として高架橋上部構造やトンネル覆工には短繊維補強コンクリートが適用されている。本研究では，短繊維混入によるコンクリートのはく落抵抗性の向上効果を明らかにすることを目的として，鉄筋が腐食した供試体の鉄筋の押抜き試験および試験を模擬した数値解析を実施した。その結果，短繊維を混入することで，鉄筋の押抜き試験におけるひび割れ形態の変化や荷重保持性能の向上が確認できた。

キーワード：短繊維補強コンクリート，鉄筋腐食，はく落抵抗性，海水散布環境，FEM 解析

1. はじめに

鉄筋コンクリート（RC）構造物において塩害や中性化によって生じる鉄筋腐食は，コンクリートのひび割れ発生や鉄筋の断面減少等により RC 構造物の耐荷力を著しく低下させる劣化現象である。加えて，鉄筋腐食によるひび割れは，コンクリート塊のはく落の原因となり，構造物の利用者に被害を与える可能性がある。

近年，鉄筋腐食に起因した性能評価の検討が進んでおり，ひび割れ形態が境界条件や鉄筋かぶりによって変化すること，長期暴露や電食実験などの実験方法で腐食生成物の体積膨張率が異なることが確認されている [1), 2)]。それらのうち，鉄筋腐食はかぶりが小さい鉄筋表面から開始する場合が多く，数値解析モデルの腐食膨張圧を鉄筋円周の全体ではなく，かぶり側の半分または 1/4 に作用させることで，試験結果に近づくことが確認されている [3)]。同様に，鉄筋のかぶり側の腐食膨張圧を考慮して，はく落抵抗性を評価する試験として，鉄筋の押抜き試験が実施されている [4)]。

一方，コンクリート塊のはく落防止対策として，高架橋上部構造やトンネル覆工等には短繊維補強コンクリートが適用されている [5)]。短繊維補強コンクリートでは，架橋効果によるひび割れ幅の拡大抑制やはく落防止の性能が各種試験により評価されている。このうち，ひび割れ幅低減による鉄筋腐食の抑制効果が確認されているものの，実際の塩害環境で鉄筋が腐食し，ひび割れが生じたときのはく落抵抗性の検討は少ない。

本研究では，短繊維混入によるはく落抵抗性の向上効果および鉄筋腐食によるひび割れがはく落抵抗挙動に与える影響を明らかにすることを目的とした。研究では，海水散布環境に 10 年間暴露し，鉄筋が腐食し，一部ひび割れが生じた短繊維補強コンクリート供試体を対象に，鉄筋の押抜き試験を行い，荷重やひび割れ幅の変化を比較した。加えて，試験を模擬した数値解析を行い，ひび割れ形態を分析するとともに，鉄筋腐食による初期ひび割れがはく落抵抗性に与える影響を検討した。

2. 鉄筋押抜き試験方法

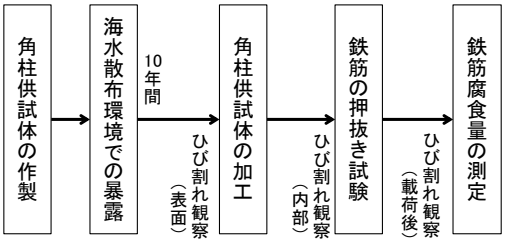
2.1 試験の流れ

鉄筋の押抜き試験までの流れを**図－1** に示す。まず短繊維補強コンクリートで角柱供試体を作製し，海水散布環境に暴露した。10 年後に暴露を終了し，供試体表面のひび割れ状況を観察した。次に角柱供試体を載荷方法に合わせて加工し，切断したコンクリート内部のひび割れを観察した。そして載荷試験を実施し，試験後にひび割れを観察するとともに，鉄筋腐食量を測定した。ここで，暴露後に観察された切断面のひび割れを「初期ひび割れ」，試験後に観察されたものを「載荷ひび割れ」と呼ぶ。

2.2 試験ケースおよび角柱供試体の概要

試験ケースは**表－1** に示すように，短繊維の体積混入率を 0.0～1.5vol.%の 4 水準として，各ケースで角柱供試体を 2 体用意した。そこから押抜き試験用の供試体を各 2 体採取し，合計 16 体の試験を実施した。

角柱供試体の寸法は，**図－2** のように 100×100×400mm とし，曲げ加工した直径 13mm の異形鉄筋を芯かぶり 25mm，純かぶり 18.5mm の位置に配置した。後述の載荷用供試体は，図のように長手方向中央部から切り出して採取した。短繊維には直径 0.66mm，標準長 30mm



図－1　試験全体の流れ

*1 富山県立大学　工学部　環境工学科　准教授　博（工）（正会員）
*2 （公財）鉄道総合技術研究所　構造物技術研究部　博（学）（正会員）
*3 （公財）鉄道総合技術研究所　構造物技術研究部　修（工）（正会員）
*4 富山県立大学　工学部　環境工学科

表－1　試験ケースと試験結果

角柱供試体No.	製作条件 短繊維混入率 Rv	強度試験結果*1 圧縮強度 f'c	強度試験結果*1 ヤング係数 Ec	載荷用供試体No.	採取箇所	暴露後の供試体状況 ひび割れの有無（ひび割れ幅(mm)） Left	Bottom	Right	鉄筋腐食量	押抜き実験結果 最大荷重	変位2mm時の荷重	載荷終了時の変位	ひび割れ形態
	vol.%	N/mm²	kN/mm²						mg/cm²	kN	kN	mm	―
00-1	0.0	35.5	28.6	00-1L	Left	―	―	―	0	6.47	0.00	0.5	A
				00-1R	Right	0.20	―	0.20	246	3.96	0.00	1.1	A
00-2				00-2L	Left	―	―	―	120	5.88	0.00	1.8	A
				00-2R	Right	―	0.25	0.06	216	1.76	0.00	*2	A
05-1	0.5	36.9	28.0	05-1L	Left	0.10	0.25	0.10	168	2.19	0.58	7.6	A
				05-1R	Right	0.30	0.30	0.30	199	0.66	0.44	9.2	A
05-2				05-2L	Left	0.15	1.30	0.06	219	0.92	0.58	7.1	B
				05-2R	Right	0.30	0.25	0.35	326	1.11	0.60	8.0	A
10-1	1.0	37.6	26.9	10-1L	Left	―	―	―	14	6.86	1.07	5.7	C
				10-1R	Right	―	―	―	201	3.67	1.54	*2	C
10-2				10-2L	Left	―	―	―	110	5.28	1.00	8.7	A
				10-2R	Right	0.20	―	0.20	132	3.23	1.73	9.5	A
15-1	1.5	30.5	24.0	15-1L	Left	―	0.15	0.25	243	2.73	2.52	12.4	B
				15-1R	Right	―	―	―	182	2.93	1.39	15.2	A
15-2				15-2L	Left	0.25	0.05	0.35	278	1.75	1.30	*2	D
				15-2R	Right	―	―	―	299	3.81	0.91	8.4	B

*1：材齢28日　　*2：欠測

の PVA（ポリビニルアルコール）繊維を使用した。短繊維の物性は密度 1.3g/cm³，引張強度 880N/mm²，弾性係数 29.4kN/mm² である。配合条件は粗骨材最大寸法 G_{max} 20mm，水セメント比 53.2%，細骨材率 47.8%として，短繊維混入前のベースコンクリートで目標スランプ 18cm，目標空気量 4.5%とした。材齢 28 日の強度試験結果は**表－1** のとおりである。なお，切断面でかぶり部の充填や 10mm 以上の粗骨材の存在を観察したものの，純かぶりが G_{max} から決まる設計上の寸法 27mm を満たさないことから，ひび割れが進展しやすい可能性が考えられた。

2.3 海水散布環境での暴露

暴露条件は神奈川県横須賀市の海岸沿いにおいて，1 日に自然海水を約 4 時間散布し，約 8 時間の乾燥を 2 回繰り返した。設置から 10 年後に暴露を終了した。

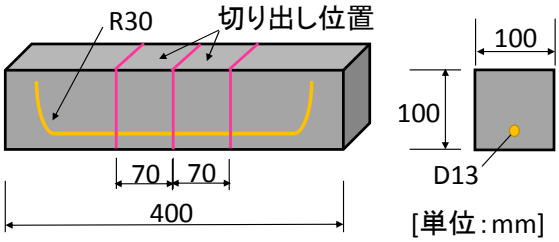
2.4 初期ひび割れの観察

載荷用供試体の切断面のひび割れ状況を目視で観察し，各ひび割れの延長上の最大幅をクラックスケールで計測した。ひび割れの有無および幅を**表－1** に示す。ひび割れは**図－3** のように下側，右側，左側の 3 方向に発生することが多く，各方向の値を記入した。供試体 16 体のうちひび割れが発生していないものが 7 体，0.3mm 以下のものが 6 体，0.3mm を超えるものが 3 体であった。**図－3(b)** に示すように，短繊維を混入することにより，ひび割れが同方向に複数発生する傾向が見られた。

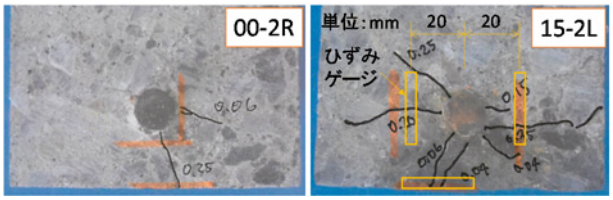
2.5 載荷方法および計測方法

角柱供試体から幅 70mm の載荷用供試体を切り出し，**図－4** のように切断面の両側から鉄筋を約 10mm ずつ突出させるように幅 50mm に加工した。供試体上部に固定用の厚さ 20mm の鋼板をエポキシ樹脂で貼り付けた。

載荷試験は**図－4** のように鋼板を介して供試体を試験機に固定し，突出させた鉄筋に鉛直下方向に荷重（強制変位）を作用させることで行った [4]。試験では荷重（鉄筋の反力），鉄筋とコンクリートの相対変位，コンクリートひずみを計測し，データロガーに記録した。コンクリートひずみは**図－3** のように切断面の 3 ヶ所に検長 20mm の塑性域ひずみゲージを貼り付けて計測した。

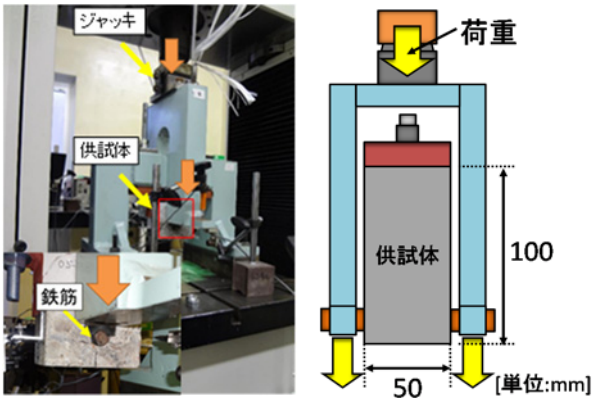


図－2　角柱供試体の概要と載荷用供試体の切出し位置



(a) 00-2R　　(b) 15-2L

図－3　初期ひび割れ発生状況



図－4　鉄筋押抜き試験の概要

2.6 鉄筋腐食量の測定

押抜き試験終了後に鉄筋を取出し，鉄筋の腐食量を計測した。温度 50℃の 10%クエン酸水素二アンモニウム水

溶液に 1～2 日間浸漬することで腐食生成物を除去した。除去後の鉄筋質量を計測して，腐食量を求めた。**図－5** に鉄筋腐食量と初期ひび割れ幅（各方向の最大幅）の関係を示す。鉄筋腐食量が大きくなると初期ひび割れ幅が大きくなる傾向が見られた。また，腐食量が 200～300 mg/cm^2 と比較的大きい場合でも混入率 1.0%と 1.5%のケースで初期ひび割れが発生していないものが見られた。

3. 鉄筋押抜き試験結果

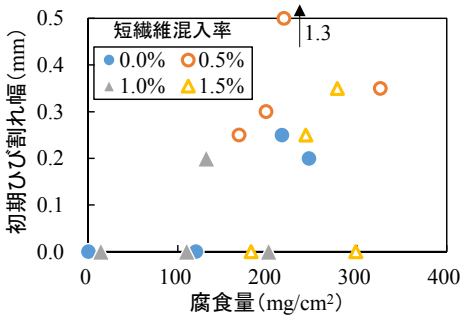
3.1 載荷ひび割れの発生状況

鉄筋押抜き試験の終了後のひび割れ発生状況を**図－6** に示す。短繊維を混入していないすべてのケースでは，載荷ひび割れが**図－6** (a)のように下側，左側，右側の 3 方向に生じた。それに対して，短繊維を混入したケースでは，短繊維の架橋効果で鉄筋直下の曲げひび割れの開口が抑制され，**図－6** (b)のように左右方向の載荷ひび割れが卓越することで異なった形態が見られた。ひび割れ形態は**図－7** に示す 4 つの種類があった（**表－1**）。短繊維混入ケース 12 体のうち形態 B が 3 体，形態 C が 2 体，形態 D が 1 体であった。形態 B と形態 D では初期ひび割れの位置に影響を受けたものであった。形態 C は初期ひび割れの無いケースであった。

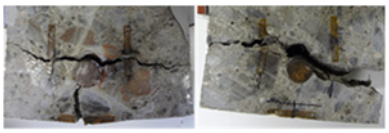
3.2 荷重－相対変位関係

図－8 に荷重と相対変位の関係を示す。なお，00-2L の全変位が計測器の不具合により得られず，最大荷重のプロットのみを示した。同様に 10-1R のコンクリート変位が得られず，鉄筋の中央変位のグラフを示した。

グラフでは相対変位の増加に伴い荷重が増加し，最大荷重に達した後，荷重が低下し，相対変位のみが増加した。初期ひび割れのないケースの多くでは，最大荷重が 4kN～7kN であった。これに対し，初期ひび割れがあるケースでは 4kN 程度以下であった。各ケースの初期ひび割れ幅と最大荷重の関係を**図－9** に示す。初期ひび割れ幅が大きくなると最大荷重が小さくなる傾向を示した。初期ひび割れは，鉄筋周囲のコンクリートが鉄筋腐食により最大荷重相当の荷重を受けることで発生する。そのため，初期ひび割れのあるケースの試験時の荷重－変位関係は最大荷重後の軟化曲線に向かう再載荷履歴をたどる。これが最大荷重低下の要因と考えられた。また，目視観察で初期ひび割れが発生していないケースのうち最大荷重が 3～4kN の範囲にあるケースが 3 ケースあった。この要因を検討するために，**図－10** に鉄筋腐食量と最大荷重の関係を示す。初期ひび割れが発生していないケースでも腐食量が大きいケースで最大荷重が小さくなっており，前記の 3 ケースでは鉄筋腐食による引張応力の蓄積や微細ひび割れの存在により荷重が小さくなったと推察された。

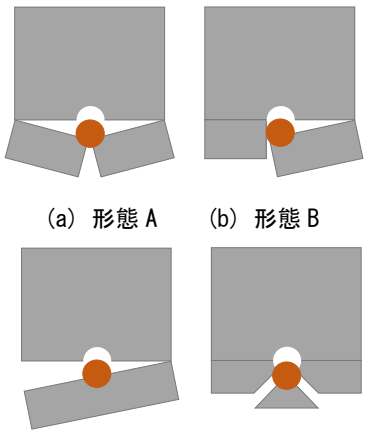


図－5　鉄筋腐食量と初期ひび割れ幅の関係



(a) 00-1L　　(b) 10-1L

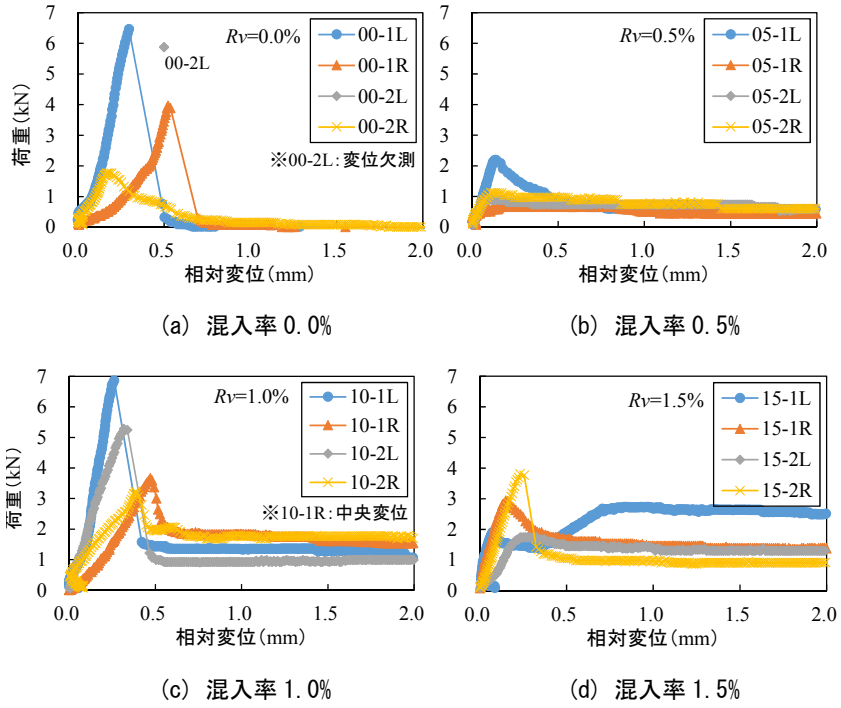
図－6　載荷ひび割れの発生状況



(a) 形態 A　　(b) 形態 B

(c) 形態 C　　(d) 形態 D

図－7　載荷ひび割れ形態の種類



(a) 混入率 0.0%　　(b) 混入率 0.5%

(c) 混入率 1.0%　　(d) 混入率 1.5%

図－8　荷重－相対変位関係

図－8 の最大荷重以降に着目すると，短繊維を混入していないケースでは，荷重低下後に荷重を保持できず，試験中にコンクリート片がはく落した。一方，短繊維混入ケースでは，荷重低下後も荷重を保持し，変位 10mm 程度の載荷終了（**表－1**）までコンクリートがはく落しなかった。**図－11** に相対変位 2mm 時の荷重と残存引張強度（折れ曲がり点応力）の関係を示す[6]。相対変位 2mm 時の荷重は，本研究での荷重保持性能の指標として用いた。また，残存引張強度とは，通常のコンクリートでひび割れが生じ，引張応力を負担できなくなった後に短繊維のみで保持される引張応力である。15-1L の荷重は，混入率 1.5%の他ケースの値より 2 倍以上大きく，**図－8** で相対変位 0.5mm 以降に増加しており，荷重抵抗機構が異なったと考えられた。このケースを除いた場合，残存引張強度と相対変位 2mm 時の荷重は良い相関関係を示した。以上より，本試験における最大荷重は初期ひび割れ幅や鉄筋腐食量に影響され，荷重保持性能は短繊維種類と混入率で設定できる残存引張強度に影響されることが確認できた。

3.3 荷重－ひずみ関係

図－12 に初期ひび割れのないケースの荷重とひずみの関係の一例を示す。ここでのひずみは，鉄筋中心から 20mm の位置（**図－3(b)**）に貼付した塑性域ひずみゲージで測定された値であり，ひび割れ開口に伴い大きくなる値である。初期ひび割れのないケースの多くでは，図のように下側（Bottom）のひずみが先行して大きくなり，遅れて左側（Left）・右側（Right）のひずみが大きくなった。ひび割れがなく，形態 A であった 4 ケースにおいて，最大荷重時のひずみは下側で 950～2500×10^{-6}，左右側で 50～1300×10^{-6} であり，下側の幅は左右側の幅の 2 倍程度であった。短繊維混入の有無による傾向の違いは見られなかった。初期ひび割れのあるケースでは，その状況によって載荷ひび割れ進展傾向が異なるが，**図－13** のように鉄筋下側のひび割れ開口に伴うひずみが大きくなるケースが多く見られた。

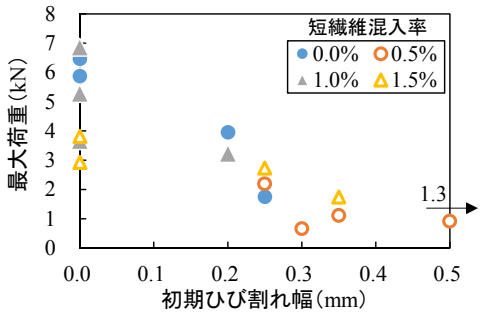
4. 数値解析を用いた短繊維補強効果の検討

4.1 解析の概要

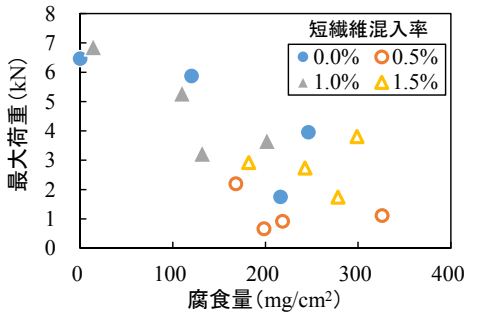
鉄筋の押抜き試験において，鉄筋腐食による初期ひび割れの有無にかかわらず短繊維混入による荷重保持性能の向上効果が確認できた。数値解析を用いることで，この効果や初期ひび割れの影響等ついて検討した。検討ケースは短繊維混入率を 0.0%と 1.0%の 2 水準，初期ひび割れをありとなしの 2 水準の 4 ケースとした。

4.2 解析方法

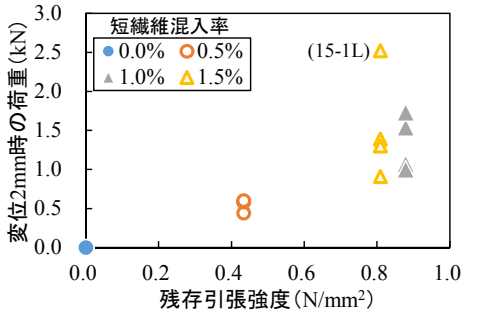
解析は 2 次元有限要素解析プログラム ATENA を用いて行った[7]。要素には平面応力要素を使用し，ひび割れ



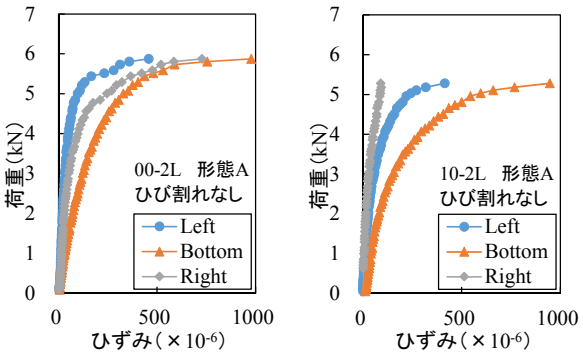
図－9　初期ひび割れ幅と最大荷重の関係



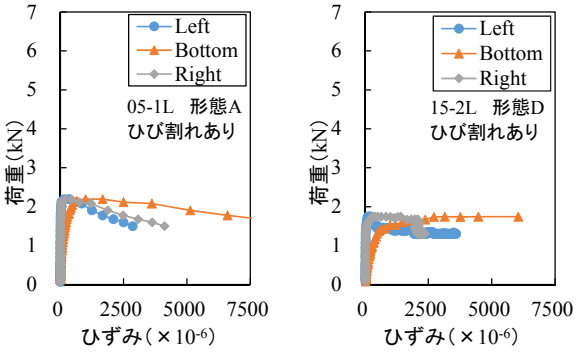
図－10　鉄筋腐食量と最大荷重の関係



図－11　変位 2mm 時の荷重と残存引張強度



図－12　荷重－ひずみ関係（初期ひび割れなし）



図－13　荷重－ひずみ関係（初期ひび割れあり）

モデルには回転ひび割れモデルを用いた。コンクリートの材料物性は試験値を用いることを基本とした。コンクリートの応力ーひずみ関係は，**図ー14** に示すモデルを使用し，引張側には引張軟化モデルを使用した。短繊維補強コンクリートでは，解析結果が破壊力学特性値に左右されるため，引張軟化モデルを RILEM の方法に準拠した曲げ試験の結果に基づき設定した [6]。

載荷用供試体は一辺 100mm の断面内に直径 13mm の鉄筋を配置してモデル化し，大部分の要素寸法は 2.5mm とした。載荷は供試体上面を鉛直方向に固定し，鉄筋上面 2 ヶ所の鉛直変位を下向きに増加させることで行った。鉄筋腐食による膨張は，鉄筋円周のかぶり側 1/4 を 0.65mm 膨張変位させることでモデル化した。この膨張変位量は，腐食量を実験の最大値と同程度の 340mg/cm^2，腐食生成物の体積膨張率を 2.5 と設定した値である [3]。

4.3 初期ひび割れがない場合の短繊維の効果

図ー15 に初期ひび割れがない場合の鉛直変位 1.0mm 時の主ひずみ分布を示す。鉄筋の下側鉛直方向の主ひずみが大きくなるとともに，鉄筋の上側を起点にして左右側に主ひずみが卓越した。この主ひずみ分布の形態は，試験におけるひび割れ形態 A と一致する形態となった。

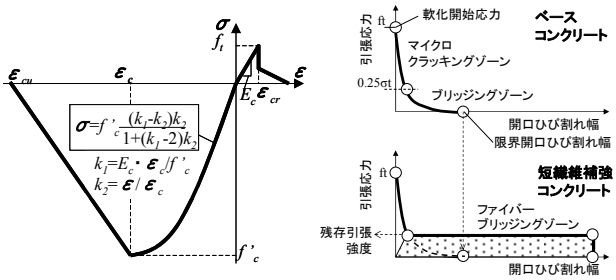
図ー16 に初期ひび割れがない場合の荷重ー相対変位関係を示す。同図には初期ひび割れがないケースの試験値を併せて示した。また短繊維混入ケースの解析値では，残存引張強度を引張強度 f_t の 0.34 倍としたケース（Nu0.34）と同 0.13 倍としたケース（Nu0.13）を示した。引張強度の 0.34 倍は既往の知見の値であり，0.13 倍は荷重保持性能を一致させた値である [6]。解析の相対変位は，試験の最大荷重時の相対変位に近づけるように 0.25mm を加えた値を示した。この差異は試験において鉄筋突出部の曲げ変形，変位計測点間のせん断変形，鉄筋とコンクリートの界面のズレ変形が要因で生じたと考える。

いずれの解析値も最大荷重が 7kN 程度となり，試験ケース 00-1L や 10-2L と同様の結果となった。短繊維を混入していないケースの解析値では，荷重低下が試験値に比べ緩やかであるものの，傾向を捉えることができた。またケース Nu0.13 において短繊維混入による荷重保持効果を再現可能であった。

4.4 初期ひび割れがある場合の短繊維の効果

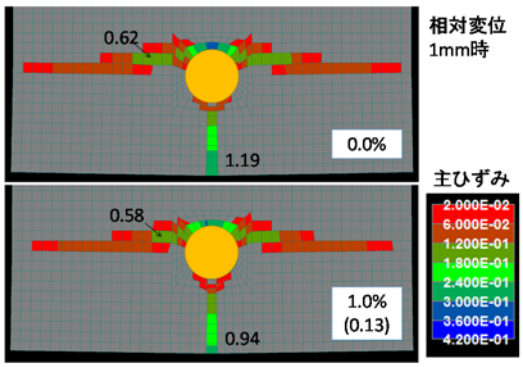
図ー17 に膨張変位を作用させて初期ひび割れを発生させた場合の解析の主ひずみ分布を示す。上図は初期の膨張変位 0.65mm を作用させた時点の分布図であり，下図はその後に鉛直変位 1.0mm を作用させた時点の分布図である。膨張変位作用時には鉄筋の下側鉛直方向の主ひずみが大きくなるとともに，鉄筋の下側を起点にして左右側の主ひずみが卓越した。次の鉛直変位作用時には鉄筋の下側鉛直方向の主ひずみがさらに大きくなるとともに，鉄筋の上側を起点にして左右側に主ひずみが進展し，膨張変位作用時の初期ひび割れと合流した。このようなひび割れ形態が**図ー18** の試験の 00-1R と 10-2R の 2 体で見られた。この結果から鉄筋とコンクリートの相対変位が生じる位置すなわち腐食生成物の膨張位置を起点に水平ひび割れが進展することが確認できた。

試験では**図ー3** や**図ー6** のひび割れ形態のように，鉄筋の側面や上部に近い面から水平方向のひび割れが進展し，押抜き試験時にこのひび割れが拡大することで破壊したケースも見られた。今回の解析では鉄筋円周の 1/4 を膨張変位させたが，その作用位置が変化したときにはひび割れ形態が変化することが推察された。

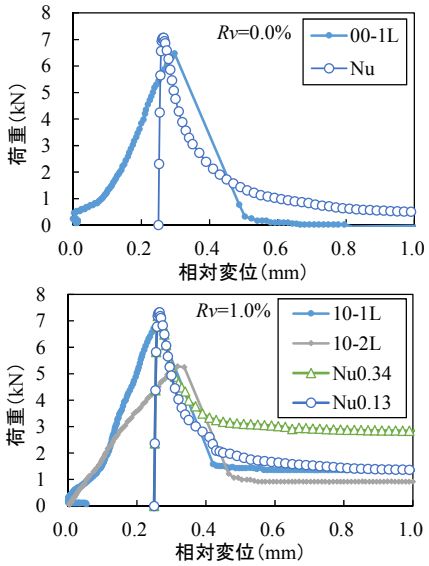


(a) 応力ーひずみ関係　　(b) 引張軟化モデル

図ー14　コンクリートの応力ーひずみ関係



図ー15　主ひずみ分布（初期ひび割れなし）



図ー16　荷重ー相対変位関係（初期ひび割れなし）

図－19 に初期ひび割れのある場合の解析の荷重－相対変位関係を示す。初期ひび割れのある解析ケースは，初期ひび割れのないケース Nu と Nu0.13 の後に Ep を付けて表現した。また，同図には初期ひび割れがあるケースの試験値を併せて示す。初期ひび割れありの解析の場合，短繊維混入の有無に係わらず最大荷重が小さくなった。しかし，腐食による膨張変位に実験の最大値を想定したが，最大荷重の低下量は実験値に比べて小さかった。

一方，最大荷重以降について，短繊維混入ケースでは架橋効果により初期ひび割れの進展が抑制されたことで，最大荷重が 0.7kN 大きくなった。初期ひび割れありの鉛直変位 1.0mm 時における荷重（Nu_Ep，Nu0.13Ep）は，初期ひび割れなしの値に比べ0.8～1.2kN大きくなり，試験値よりも大きくなった。これは初期ひび割れがあることで前述（**図－17**）のように複数のひび割れ経路が形成され，耐荷機構が変化したことが要因と考えられた。

5. まとめ

本研究において得られた知見を以下にまとめる。

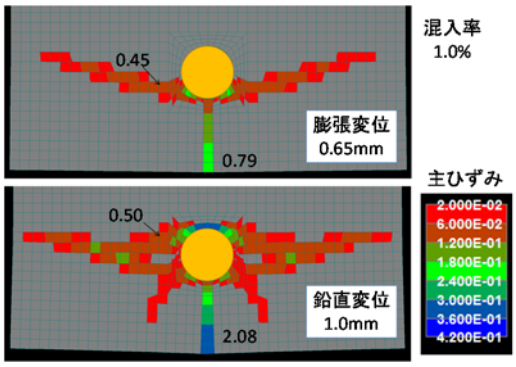
1) 短繊維を混入することで，鉄筋の押抜き試験における鉄筋直下の曲げひび割れの開口が抑制されるとともに，新たなひび割れが発生する傾向となった。また短繊維混入により荷重保持性能が向上し，その保持荷重は残存引張強度と良い相関関係であった。
2) 鉄筋の押抜き試験における最大荷重は，短繊維混入率に影響されず，初期のひび割れ幅や鉄筋腐食量に影響された。
3) 数値解析を用いることで，鉄筋押し抜き試験によるひび割れ分布（主ひずみ分布）や短繊維混入による荷重保持性能が再現可能であった。
4) 数値解析において膨張時と鉛直変位作用時とで水平ひび割れの起点が異なり，鉄筋とコンクリートの相対変位が生じる位置すなわち腐食生成物の膨張位置を起点に水平ひび割れが進展することが確認できた。

謝辞

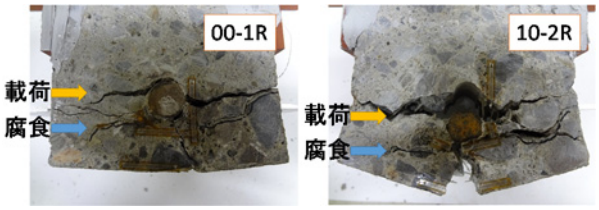
研究の実施にあたり港湾空港技術研究所の加藤絵万氏，クラレの末森寿志氏，計算力学研究センターの三輪健治氏にご協力頂きました。ここに感謝の意を示します。

参考文献

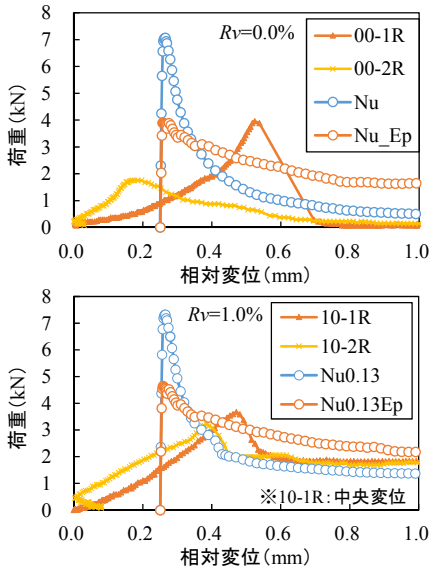
1) 日本コンクリート工学会：コンクリート構造物のひび割れ進展評価手法に関する研究委員会報告書，pp.1-26，2013
2) 日本コンクリート工学会：鉄筋腐食したコンクリート構造物の構造・耐久性能評価の体系化シンポジウム，pp.24-30，2013



図－17　主ひずみ分布（初期ひび割れあり）



図－18　ひび割れ発生状況



図－19　荷重－相対変位関係（初期ひび割れあり）

3) K. K. Tran, H. Nakamura, K. Kawamura M. Kunieda: Quantitatively Evaluation of Crack Propagation due to Rebar Corrosion, Proceedings of Japan Concrete Institute, Vol.32, No.1, pp.1043-1048, 2010
4) 渡辺健，轟俊太朗，大野又稔，岡本大，曽我部正道：鉄筋コンクリート高架橋のかぶりはく落現象の評価，鉄道総研報告，Vol.28，No.8，pp.5-10，2014
5) 日本コンクリート工学会：繊維補強セメント系複合材料の新しい利用法に関するシンポジウム，pp.14-21，2012
6) H. Ito, M. Iwanami, H. Yokota, E. Kato：Analytical Study on Shear Capacity Evaluation of RC Beams with PVA Short Fiber, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.12, pp.187-199, 2014
7) 計算力学研究センター：ATENA 資料，2014