

論文 外来液状水がコンクリート中の異形鉄筋の疲労引抜き破壊性状に及ぼす影響

山口 寛史*1・長井 宏平*2・松本 浩嗣*3・千々和 伸浩*4

要旨：外面からの液状水の供給と繰返し載荷を同時に受ける異形鉄筋の付着疲労特性を検討するため、液状水の供給の有無、マトリクスの種類と特性、載荷方法を変化させ、疲労引抜き試験を実施した。その結果、液状水の供給と疲労の複合作用により、鉄筋近傍のマトリクスがスラッジ化し、マクロなひび割れを伴わない異形鉄筋の引抜き破壊が生じた。スラッジ化を伴う引抜き破壊は、比較的低い荷重レベルにおいて発生する傾向があり、液状水が異形鉄筋の付着劣化を促進し、疲労寿命が著しく減少することが確認された。その際、破壊モードは静的破壊とは異なり、鉄筋からの応力の影響範囲が小さくなることがわかった。

キーワード：水中疲労、付着、引抜き破壊、異形鉄筋、スラッジ化、ECC、定着

1. はじめに

土木構造物は実環境下において様々な繰返し載荷を受けると同時に、雨水や雪水といった外面からの液状水(以下、外来液状水)が作用する状況が少なくない。1960年代からは道路橋床版の疲労問題が深刻化し、近年ではコンクリートのセメント成分が流出し、骨材が分離する砂利化現象も確認されている。このような背景から、外来液状水の影響に着目したRC床版の疲労性状に関する研究が行われてきた。最近では、実際の損傷事例を基に、タワー基礎アンカー鋼材とコンクリートとの定着性能に外来液状水が与える影響についても検討されている²⁾。

コンクリート中の異形鉄筋の付着は、主に鉄筋の節で伝達される機械的作用によるものであり、スケールこそ異なるものの、その応力状態は、既往の研究²⁾によるアンカー鋼材の引抜き破壊と類似性がある。しかし、外来液状水が異形鉄筋の付着疲労性状に及ぼす影響は、これまでほとんど検討されていない。そこで本研究では、外来液状水がコンクリート中の異形鉄筋の付着疲労特性に及ぼす影響を明らかにするため、外来液状水の有無、マトリクスの種類と特性、載荷方法をパラメータとした異形鉄筋の疲労引抜き試験を実施した。

2. 実験概要

2.1 実験シリーズ

表-1に、実験シリーズの一覧を示す。供試体数は計14体で、A, B, C, Dの4シリーズで構成されている。

実験シリーズAでは、水セメント比60%のコンクリートを用いて、外来液状水の有無が異形鉄筋の疲労引抜き性状に及ぼす影響を検討した。試験体S2は気中での疲

勞試験を実施したが、後述のように300,000回載荷後に損傷が見られなかったため、外来液状水作用下での疲労試験に途中で変更した。荷重の大きさは、鉄筋降伏荷重260kN(降伏強度513MPa)の約20%に相当する±50kN(±99MPa)と低応力の正負交番載荷を基本とし、試験体S5は片引き50kNで300,000回載荷後に±50kNに変更した。周波数は1.0Hzとした。

実験シリーズBでは、マトリクスとして粗骨材の代わりに短繊維を混入した、ひずみ硬化型セメント系複合材料(以下、ECC)を用いて疲労試験を行った。ECCはひび割れに対する繊維の架橋効果を有するため、異形鉄筋の静的引抜き強度がコンクリートよりも大きいと考えられる。一方、ECCは骨材を有していないため、スラッジ化に対する抵抗性が低い可能性がある。本シリーズでは、繊維および骨材の存在が外来液状水作用時の引抜き疲労に与える影響を検討した。なお、試験体S6, S7ともに、片引き50kNで300,000回載荷後、正負交番の±50kNに変更している。

実験シリーズCでは、作用荷重の大きさの影響を検討するため、載荷条件を片引き100kNに設定した。コンクリートの特性はシリーズAと同様である。試験体S11には、鉄筋端部に直径が鉄筋径の約2.5倍の大きさの円形機械式定着具を使用し、片引き100kNで300,000回載荷後に正負交番の±50kNに変更した。

実験シリーズDでは、コンクリート強度の影響を検討するため、水セメント比が45%, 30%のコンクリートを用いた試験体を作製し、疲労引抜き試験を行った。

2.2 試験方法

試験体設置の様子を図-1に、試験体側面図を図-2に

*1 東京大学 大学院工学系研究科社会基盤学専攻 (学生会員)

*2 東京大学 生産技術研究所都市基盤安全工学国際研究センター准教授 博(工) (正会員)

*3 東京大学 生産技術研究所都市基盤安全工学国際研究センター特任講師 博(工) (正会員)

*4 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻助教 博(工) (正会員)

表-1 実験シリーズと疲労試験結果

シリーズ	試験体	試験条件	マトリクス特性		荷重条件	試験結果	
			W/C (%)	圧縮強度 (MPa)		引抜き破壊時の荷重回数	破壊モード
A	S1	水中	60	33.4	±50kN	3,331	滑動
	S2	気中	60	34.9	±50kN	No failure (300,000)	—
		気中後に水中				24,914	滑動
	S3	水中	60	36.2	±50kN	29,648	M ひび割れ
	S4	気中	60		±50kN	No failure (300,000)	—
S5	水中	60	34.2	0-50kN	No failure (300,000)	—	
				→ ±50kN	19,203	滑動	
B	S6	水中	ECC	42.6	0-50kN	No failure (300,000)	—
					→ ±50kN	142	滑動
	S7	気中			0-50kN	No failure (300,000)	—
					→ ±50kN	No failure (300,000)	—
C	S8	水中	60	34.2	0-100kN	30,630	M ひび割れ
	S9	水中	60	34.7	0-100kN	73,500	M ひび割れ
	S10	気中	60		0-100kN	115,788	滑動
	S11	水中 機械式定着具	60		0-100kN	No failure (300,000)	—
				→ ±50kN	No failure (700,000)	—	
D	S12	水中	45	55.3	±50kN	No failure (1,000,000)	—
					→ ±100kN	500	M ひび割れ
	S13	水中	45	53.2	±50kN	874,108	M ひび割れ
	S14	水中	30	75.2	±50kN	No failure (1,000,000)	—
						→ ±100kN	4,812

※破壊モードの分類：滑動＝マクロなひび割れ（コーン破壊に伴うひび割れや割裂ひび割れ）を伴わず、主としてスラッジ化のみにより生じる引抜き破壊、
M ひび割れ＝マクロ(M)なひび割れを伴う引抜き破壊

示す。試験体は一辺 400mm の立方体、あるいは断面形状 300mm×300mm、高さ 400mm のコンクリートの中央に、降伏強度 513MPa、公称直径 25.4mm のネジシ異形鉄筋（D25）一本を定着長 300mm で配置したものである。図-2 (d)に示す試験体 S3, S4, S13 においては 100mm 間隔で D13 の横補強筋を 3 本配置した。また図-2 (c), (d)に示す試験体にはコンクリート上面から深さ方向に 50mm のアンボンド区間を設け、定着長は図-2 (a), (b)と同様に 300mm で一定とした。

鉄筋節周りのコンクリートに作用するリングテンションを計測し、水中疲労時に生じる引抜き破壊特性を把握することを目的として、図-2(c), (d)に示すように、外径 100mm、肉厚 2mm、高さ 10mm のアクリル製のパイプリングをコンクリート上面から深さ方向に 100mm、200mm あるいは 150mm、250mm の位置に配置し、各リングに 2 枚のひずみゲージを貼付した。

図-2(b), (c)の鉄筋には、アンボンド区間の位置と、コンクリート上面から 100,150,200,250,300mm の位置にひずみゲージを貼付した。

全シリーズ共通の試験中の測定項目は、荷重、引抜き変位、目視によるひび割れ観察である。図-1 に示すよ

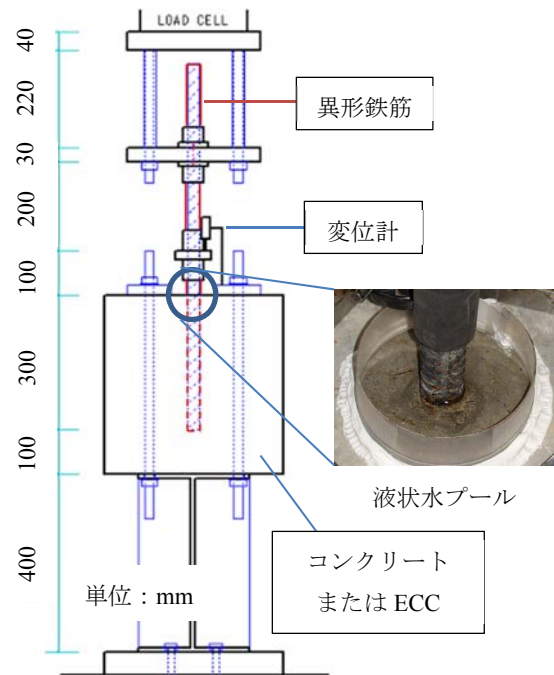


図-1 試験体設置の様子

うに、コンクリート上面に接触型変位計を設置し、鉄筋の引抜き変位を測定した。

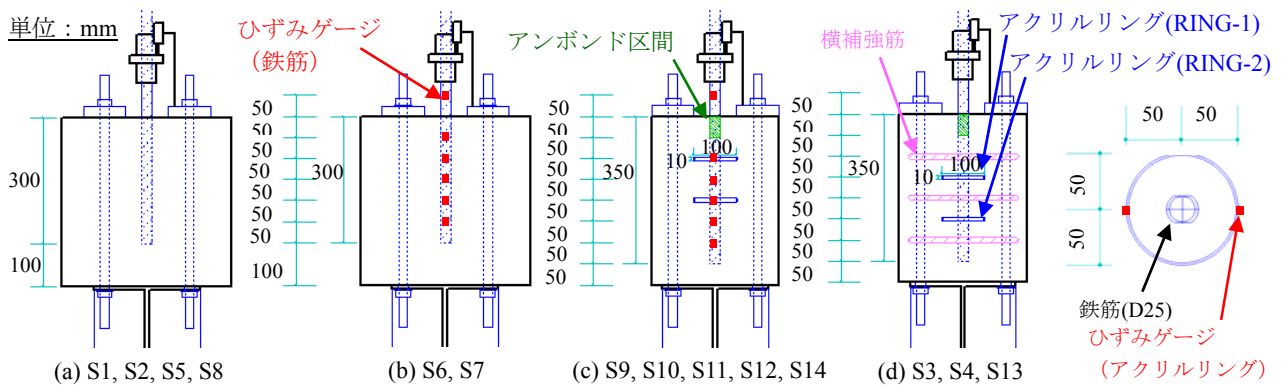


図-2 アクリルリングおよび鉄筋ひずみゲージの配置位置 (左: 側面図, 右: 上面図)

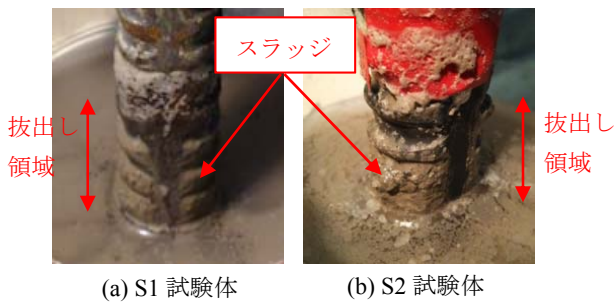


図-3 破壊時の状況

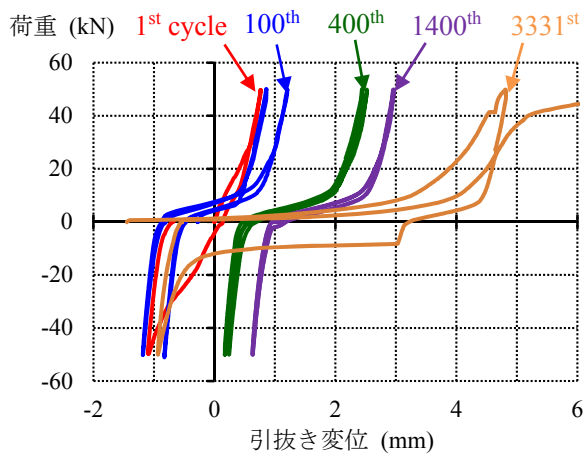


図-4 荷重-引抜き変位関係(S1)

外来液状水を作用させた試験体については、コンクリート上面に鉄筋を中心として直径約 100mm、高さ約 15mm の液状水プールを設けた (図-1)。なお、コンクリート打設後から荷重試験直前まで湿潤養生を施しており、荷重試験開始時のコンクリートおよび ECC は湿潤状態であったと考えられる。

3. 実験結果

3.1 シリーズ A : 外来液状水の影響

実験結果の一覧を表-1 に示す。気中疲労試験(S2)では荷重 300,000 回でも破壊せず、鉄筋近傍に生じたコンクリート表層のひび割れにとどまった。一方、外来液状水を作用させたケース(S1)では荷重初期から気泡の発生とともに水が濁り始め、わずか 3,331 回で異形鉄筋の引

抜け破壊に至った。図-3(a)に示すように、破壊後には鉄筋の節周りでコンクリートのスラッジ化が確認された。破壊時は、静的引抜き試験で一般的に生じるようなマクロなひび割れを伴うコーン破壊は観察されず、鉄筋がコンクリートから滑り抜けるように破壊した。またコンクリートの損傷は表層のみであったため、異形鉄筋からの応力の影響範囲は小さかったものと思われる。S1 の荷重-引抜き変位関係を図-4 に示す。引抜き破壊に至る直前に、急激な剛性の低下が確認された。また、破壊に近づくほど、荷重の正負が逆転する荷重ゼロの付近で曲線形状が水平形を呈する傾向があり、付着が消失した鉄筋とコンクリートの間で滑動が生じていたものと推察される。

気中での荷重 300,000 回でも破壊しなかった S2 に、試験体 S1 と同様に外来液状水を供給したところ、24,914 回で引抜き破壊に至り、水中疲労による異形鉄筋の引抜き破壊現象が確認された (図-3(b))。

試験体 S4 は気中での荷重 300,000 回でも破壊せず、一方の外来液状水を作用させた試験体 S3 は 29,648 回で引抜き破壊が生じた。

試験体 S5 は若干の施工不良による鉄筋片面に沿った空隙が見られたが、片引き 50kN で 300,000 回後も破壊せず、正負交番の ± 50 kN に切り替えたところ、19,203 回で引抜き破壊に至った。

3.2 シリーズ B : 短繊維と骨材の有無の影響(ECC)

ECC 中の異形鉄筋についても、シリーズ A (S5) と同様、片引き 50kN の荷重では、外来液状水の有無を問わず、破壊は生じなかった。気中試験体の S7 は、荷重振幅を ± 50 kN に変更後さらに 300,000 回荷重したが破壊せず、目立った損傷は見受けられなかった。一方、外来液状水を作用させた試験体 S6 は、荷重振幅を ± 50 kN に変更後、わずか 142 回で引抜き破壊に至った。その際の破壊モードは、シリーズ A の外来液状水を作用させたケースと同様、マトリックスのスラッジ化を伴うものであった。図-5 に、S6 試験体の荷重-引抜き変位関係を示す。片引き荷重中に破壊は生じなかったが、荷重サイクル数の増加

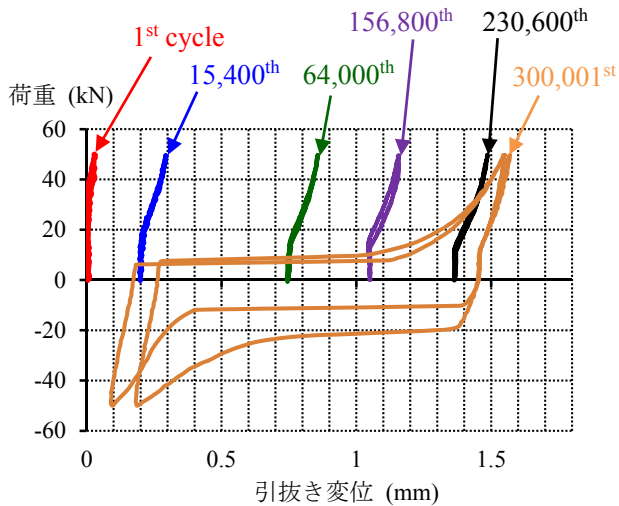


図-5 荷重-引抜き変位関係(S6)



図-6 引抜き破壊後の内部の様子(S9)

に伴って引抜き変位が増加しており、損傷が進行していたことがわかる。正負交番載荷に変更直後ののはじめの載荷(300,001 サイクル目)の荷重-引抜き変位関係に着目すると、荷重の正負が逆転する直前に大きなすべり変位が生じており、片引き載荷中に導入された損傷により、鉄筋が滑動しやすい状態となっていたと推察される。また、疲労寿命が A シリーズ(コンクリート)と比べて大幅に短くなったことから、外来液状水作用下においてスラッジ化を伴う破壊が生じる際は短繊維による正の効果は小さく、逆に骨材が存在しないことによりスラッジ化が容易になるという負の効果の影響が大きいものと考えられる。

3.3 シリーズ C : 荷重振幅の影響

試験体 S8 は、片引き 100kN の載荷直後から鉄筋を中心にコンクリート上面に四方にひび割れが発生し、30,630 回で引抜き破壊に至った。コンクリート上面から深さ 50mm の領域ではコーン破壊が発生したが、50mm よりも深い領域ではコンクリートのスラッジ化が確認された。この結果を受け、試験体 S9, S10, S11 には上記のコーン破壊が発生した領域にアンボンド区間を設けて疲労試験を行った。外来液状水を作用させた試験体 S9 は、

73,500 回で破壊に至った。コーン破壊は発生せず、アンボンド区間より深い位置における鉄筋の節周りにはスラッジの付着が観察された。試験終了後に試験体を割裂して内部観察を行うと、鉄筋の自由端から 50mm までの領域ではコンクリートに鉄筋の節形状が残っておらず(図-6)、スラッジ化によって鉄筋とコンクリートの界面形状が失われたと推察できる。なお、S10 は外来液状水が存在しないにもかかわらず、115,788 回でマクロなひび割れを伴わない引抜き破壊に至った。これは、作用荷重 100kN(作用応力度 197MPa)が鉄筋降伏荷重(降伏強度)の約 40%という比較的大きい荷重レベルであったことも理由のひとつであるが、60%という高い水セメント比と試験時にコンクリートが湿潤状態であったことが影響した可能性がある。水セメント比の高いコンクリートの内部空隙構造は比較的疎であり、湿潤状態で多くの余剰水が内在していたことを考えると、外来液状水の供給がなくとも、内在液状水と繰返し載荷との複合作用により、コンクリートと鉄筋の付着劣化に影響した可能性がある。

試験体 S9, S10 の鉄筋ひずみ分布をそれぞれ図-7, 図-8 に示す。鉄筋に沿った各位置におけるひずみは、鉄筋の両サイドの 2 つのゲージの値の平均値である。鉄筋に沿った任意の点における鉄筋の付着応力 τ は、その点におけるひずみ分布の傾きを用いて、次式のように求められる³⁾。

$$\tau = \frac{E \cdot D \cdot d\varepsilon}{4 \cdot dx} \quad (1)$$

ここで、 E は鉄筋のヤング係数、 D は鉄筋径、 $d\varepsilon/dx$ はひずみ分布曲線の傾きである。

ひずみ分布曲線の傾きに注目すると、外来液状水を作用させた試験体 S9 では、5,000 サイクルという比較的載荷初期の段階で、埋込み深さ 200mm までの領域の付着が急激に消失したと推察される。一方、気中試験体の S10 では、曲線の傾きの変化が比較的緩やかで、付着応力が徐々に消失していったことがわかる。ECC を用いた試験体 S6, S7 においても、外来液状水の有無により、ひずみ分布の形状の変化に同様の傾向が見られ(図-9, 図-10)、外来液状水の作用により、付着劣化が促進されている様子が見られる。試験体 S10 はマクロなひび割れを伴わない破壊が生じたが、外来液状水が存在しないため、スラッジの噴出や粒子の移動が起こらず、破碎されたコンクリートが界面近傍にとどまり、応力の伝達に寄与していた可能性がある。

機械式定着具を鉄筋端部に有する試験体 S11 に外来液状水を作用させ、疲労引抜き試験を行った結果、片引き 100kN による載荷初期から、S9 と同様の表面ひび割れが発生し、スラッジの噴出が確認されたものの、300,000 回載荷後も破壊は生じなかった。鉄筋の引抜き変位は一貫

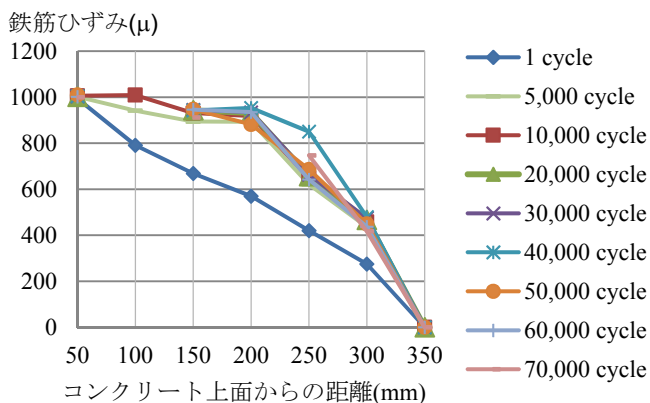


図-7 鉄筋ひずみ分布の推移(S9)

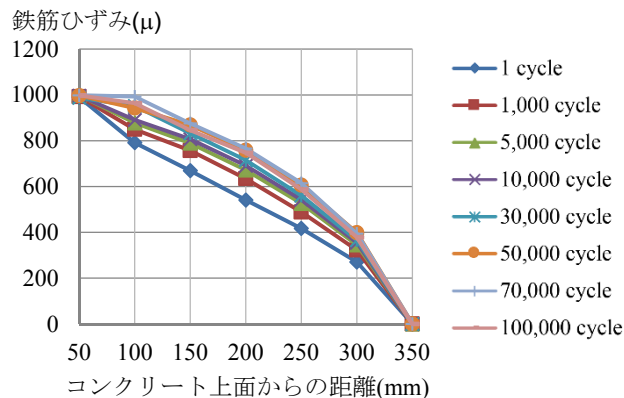


図-8 鉄筋ひずみ分布の推移(S10)

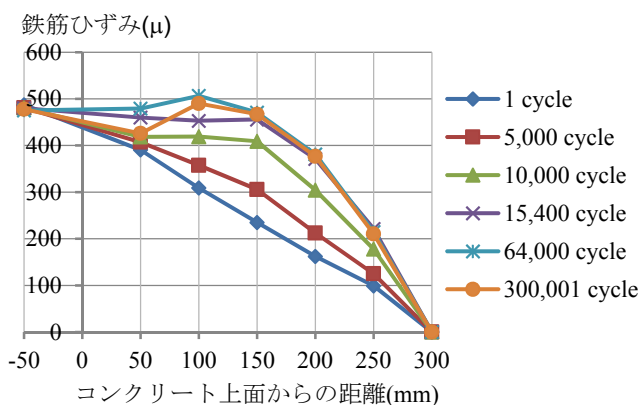


図-9 鉄筋ひずみ分布の推移(S6)

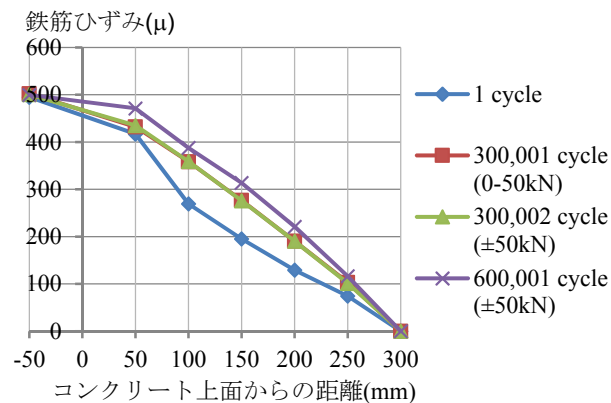


図-10 鉄筋ひずみ分布の推移(S7)

してほぼ変化がなく、常に0.2mm以下であった。図-11に示す鉄筋のひずみ分布を見ると、荷重初期の5,000～10,000サイクルの段階で、試験体S9と同様、上面から200mmの領域のひずみ分布の傾きがほぼ水平となっており、300,000サイクルの時点では機械式定着のほぼ近傍まで付着が消失していたものと推察される。荷重パターンを正負交番の±50kNに変更し、累計1,000,000回荷重した後も破壊は生じなかったことから、機械式定着は外来液状水と疲労の複合作用で生じる異形鉄筋の引抜き破壊を防ぐために有効であると考えられる。なお、フック定着も同様に引抜き破壊に対する抵抗性を有しており、直鉄筋に比べて疲労寿命が向上する可能性がある。

3.4 シリーズD：水セメント比の影響

水セメント比45%の試験体S12と30%の試験体S14は、ともにスラッジの噴出による水の濁りを確認したが、正負交番の±50kNで1,000,000回荷重後も破壊しなかった。その後、荷重振幅を±100kNに変更すると、試験体S12は500回、試験体S14は4,812回でマクロなひび割れを伴う引抜き破壊(図-12)に至った。S12とS14試験体は、鉄筋にひずみゲージを貼付した際、ゲージの保護テープが液状水の浸入を阻害した可能性があったことから、試験体S13では鉄筋にひずみゲージを貼付せずに、水中引抜き疲労試験を実施した。S13は、正負交番の±50kNでの荷重中に、874,108サイクルで水セメント比

60%のケースと同様の引抜き破壊に至っており、ゲージの保護テープの影響が若干懸念されるものの、水セメント比60%よりも疲労寿命が大幅に大きくなった。低水セメント比のコンクリートは内部の空隙構造が密であり、強度の高さが水中疲労によるコンクリートのスラッジ化等に対する抵抗性を高めているものと考えられる。

3.5 リングテンションから見る破壊モード特性

主に外来液状水作用時に観察された、マクロなひび割れが発生せず、鉄筋近傍のマトリックスのスラッジ化に伴い引抜き破壊が進展する現象を内部の応力状態から検討するため、リングテンションの経時的変化に着目した。試験体S3, S10, S12のアクリルリングひずみの経時変化をそれぞれ図-13(a), (b), (c)に示す。図中のひずみは、引張側が正值である。なお、アクリルリングひずみの計測頻度は1.001Hzであり、繰返し荷重の周波数1.0Hzとのずれを意図的に設けることで、約1000サイクルに1回ごとにひずみの最大値と最小値を捉えることができるようにしている。図-13(b)に示すように、スラッジ化のみで引抜き破壊が生じたケースでは、アクリルリングひずみは常に80μ以下で推移しており、大きなリングテンションは生じていなかったと推察される。図-14に、スラッジ化による引抜き破壊進展プロセスの模式図を示す。液状水の侵入とスラッジ化が徐々に深部に進展し、スラ

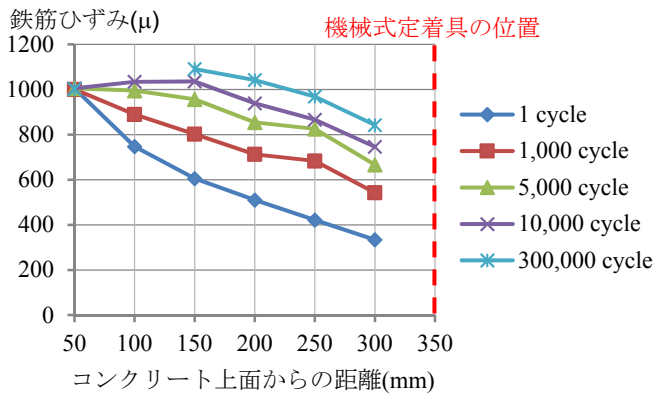


図-11 鉄筋ひずみ分布の推移(S11)



図-12 マクロなひび割れを伴う引抜き破壊(S14)

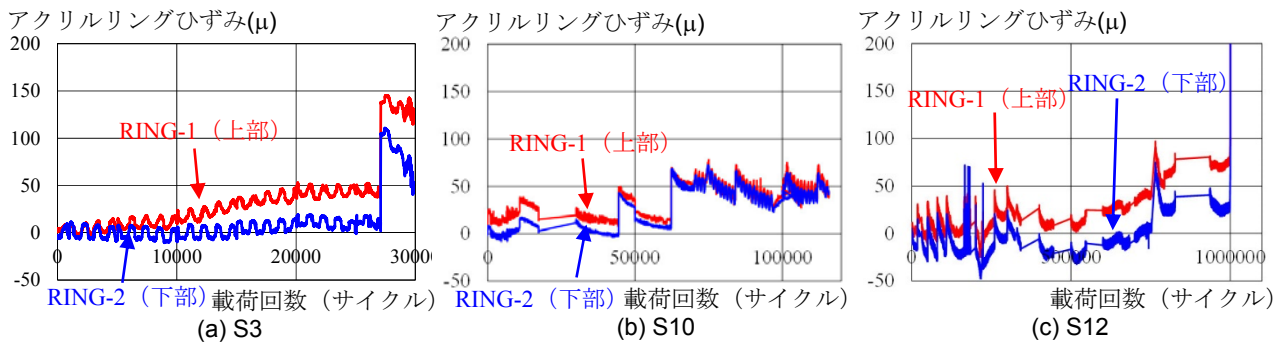


図-13 アクリルリングひずみの推移(S3)

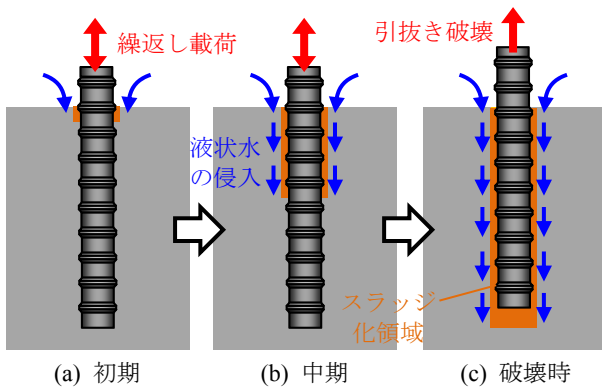


図-14 スラッジ化による引抜き破壊進展プロセス

スラッジ化領域がある領域に達した時点で引抜き耐力が作用荷重を下回り、破壊が生じるものと思われる。

一方、図-13(a), (c)に示すように、マクロなひび割れを伴う引抜き破壊が生じたケースでは、特に破壊直前にアクリルリングひずみが急激に増加している。これらのケースでは、鉄筋の節から生じる微細ひび割れがマクロなひび割れに成長し、リングテンションを生じさせるといった異形鉄筋の一般的な付着破壊モードが発現したと考えられる。

4. 結論

外来液状水作用下のコンクリートおよび ECC 中の異形鉄筋の疲労引抜き試験を行い、以下の結論を得た。

- (1) 外来液状水と疲労の複合作用により、異形鉄筋近傍のマトリクスがスラッジ化することによる付着劣化が生じ、マクロなひび割れを伴わない異形鉄筋の

引抜き破壊が生じる。その際、静的な破壊モードとは異なり、鉄筋の節から生じる応力の影響範囲は、鉄筋近傍の狭い領域に限られると考えられる。

- (2) 外来液状水と疲労による異形鉄筋の引抜き破壊は ECC 中でも生じ、その際の疲労寿命はコンクリートよりも大幅に減少する。短繊維による拘束効果は小さく、逆に骨材が存在しないためにマトリクスのスラッジ化が容易に発生するためと考えられる。
- (3) スラッジ化に伴う引抜き破壊は、片引き荷重よりも正負交番荷重の場合に、作用荷重レベルが低い場合に、水セメント比が大きい場合に顕著に発生する。
- (4) 機械式定着具は、異形鉄筋の周囲がスラッジ化した後の引抜き破壊を防止する効果があると考えられる。

参考文献

- 1) 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について、コンクリート工学年次論文報告集, 9-2, pp.627-632, 1987
- 2) N. Chijiwa et al.: Rapid Degradation of Concrete Anchorage Performance by Liquid Water, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 13, pp. 438-448, 2015.
- 3) 島 弘, 周 礼良, 岡村 甫：マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集, No.378/V-6, pp.165-174, 1987