

論文 FRC を用いた鉄筋重ね継手の破壊性状に関する解析的検討

磯部 岳*1・竹山 忠臣*2・横井 晶有*1・内田 裕市*3

要旨: 本研究では、プレーンコンクリートと繊維補強コンクリートを用いた鉄筋重ね継手を対象として引張試験と FEM 解析を行い、重ね継手の破壊性状の検討を行った。重ね継手の破壊耐力は解析値の方が実験値を上回る結果となった。しかし、鉄筋のひずみ分布はいずれのコンクリートの場合も実験値と解析値は概ね一致した。また、パラメータ解析の結果から重ね継手の破壊耐力はコンクリートの引張強度および破壊エネルギーに依存していることが示された。

キーワード: 繊維補強コンクリート, 重ね継手, 有限要素法, 付着割裂ひび割れ, 破壊エネルギー

1. はじめに

鉄筋の重ね継手はコンクリートを介して鉄筋の引張力を伝達する構造であり、継手の破壊耐力はコンクリートの特性に依存することは言うまでもない。したがって、重ね継手部にじん性の高い繊維補強コンクリート(FRC)を用いることで継手の耐力が向上し、プレーンコンクリートを用いた場合に比べ継手長を低減できることが示されてきた。そこで本研究では、プレーンコンクリートと FRC を用いた重ね継手部を模擬した引張試験体を用いて載荷試験を行い、重ね継手の破壊性状に対する繊維補強コンクリートの効果を確認した。

また、将来、重ね継手の設計に繊維補強コンクリートの効果を取り入れるためには、実験データの蓄積だけではなく、重ね継手の破壊性状に関する解析的な検討も必要であると考えられる。既往の解析的検討では林¹⁾らや山本²⁾による剛体バネモデル(RBSM)を用いた付着、定着に関する解析的な検討もなされているが、現状は重ね継手に関する研究は実験的に検討した事例が多いのに対して、解析的に検討したものは非常に少ないのが実情である。

そこで本研究では重ね継手の破壊性状に関して FEM 解析を行い、実験結果と比較するとともにパラメータ解析を行い、特に材料パラメータが重ね継手の耐力に及ぼす影響について検討した。

2. 実験と FEM 解析の比較

2.1 試験体

本実験で使用した重ね継手を想定した一軸引張試験体を図-1 に示す。引張試験時に偏心荷重が生じないように重ね継手は2組とし、断面内で鉄筋を上下、左右対称に配置した。鉄筋は D19(SD345)を使用した。断面は 200×140mm とし、内側の鉄筋中心間隔を 60mm、外側の鉄

筋のかぶりを 40mm とした。

重ね継手長はプレーンコンクリート(以下, PL と表記)の場合、鉄筋径 ϕ の 15 倍(=285mm, 以下 15 ϕ と表記)と 25 倍(=475mm, 以下 25 ϕ と表記)の 2 種類とし FRC の場合は 15 ϕ のみとした。鉄筋ひずみの測定では、鉄筋とコンクリートの付着性能に与える影響を小さくするため、試験体 5 ϕ (=95mm)間隔にひずみゲージを設置した。また、鉄筋の抜け出し変位を計測するため、試験体の両端部の抜け出し側の鉄筋に鋼板を点付け溶接し、コンクリートの打込み時にはこの鋼板を妻型枠として用いた。

使用したコンクリートは既往の検討³⁾を参考とし、目標圧縮強度を 80N/mm² とした PL と FRC の 2 種類である。コンクリートの使用材料は早強ポルトランドセメント、シリカフューム、砕砂、砕石 1505 の骨材、高性能 AE 減水剤、消泡剤、水およびフック付き鋼繊維(ϕ 0.62mm, 長さ 30mm, 混入率 0.75vol.%) から構成されている。

2.2 一軸引張試験

載荷装置を図-2 に示す。載荷は試験体の鉄筋を荷重分配ビームに固定し、PC 鋼棒を介してセンターホールジャッキで引っ張った。なお、試験時には図-1 の断面図を 90 度回転させた状態で、外側の鉄筋が油圧ジャッキ側、内側の鉄筋がロードセル側となるようにして載荷した。計測項目は荷重、鉄筋の抜け出し変位、鉄筋ひずみである。荷重の計測には容量 300kN のロードセルを用いた。鉄筋の抜け出し変位は試験体両端部の鉄筋に溶接し

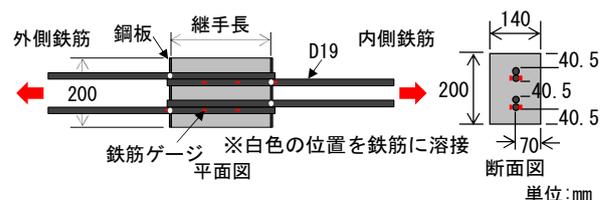


図-1 試験体

*1 岐阜大学大学院 自然科学技術研究科 環境社会基盤工学専攻 (学生会員)

*2 三井住友建設株式会社 技術本部 技術研究所 修(工) (正会員)

*3 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 教授 博(工) (正会員)

た鋼板の四隅にそれぞれ容量 5mm のクリップ型変位計を取付け、鋼板とコンクリートの開きを抜け出し量として計測した。なお、抜け出し変位は四隅で計測された値の平均値で表すこととした。

2.3 解析モデル

解析は汎用有限要素解析プログラム DIANA を用いた。解析モデルは、図-3 に示すように対称性を考慮して試験体の半分をモデル化した。境界条件は、試験体の対称面と試験体の内側の鉄筋を固定し、試験体の外側の鉄筋に強制変位を与えた。また垂直方向の回転を拘束するため対象面の端部 2 点を垂直方向に固定した。

鉄筋表面の界面要素を図-4 と表-1 に示す。既往の筆者らの研究⁴⁾では異形鉄筋の節形状を実物通りにモデル化した検討を行ってきたが、本検討ではモデルを簡単にするため鉄筋は丸形状として、異形鉄筋の節とコンクリートの付着を再現するために界面要素を設けた。異形鉄筋の場合、接着作用および摩擦作用による抵抗は小さく、鉄筋の節前面における機械的抵抗作用によって付着力が発生する。そこで、異形鉄筋の節にあたる部分の界面 A は支圧抵抗力が発揮されるように、せん断方向の剛性を十分に高くした。また、節と節の間の界面 B は粘着力と摩擦は発生しないと仮定し、せん断方向の剛性を十分に低くした。界面 A、B ともに垂直方向の圧縮に対しては十分に高い剛性、引張に対してはほぼゼロの剛性を仮定した。なお、本モデルは鉄筋の節を直接的にモデル化したものではないため、節前面の支圧破壊や鉄筋の節を乗り越えていく現象は再現できない。図-5 に界面要素の特性を示す。なお、界面要素の特性は筆者らの研究⁴⁾で行った鉄筋コンクリートの一軸引張試験体のひび割れの分散性を再現できるように同定したものである。

鉄筋の構成則は von mises の降伏基準を用いたパイリニアのモデルとし、降伏強度は材料試験で得られた 356N/mm²、ヤング率は 184kN/mm²、ポアソン比を 0.3 と仮定した。降伏以降は傾きをヤング率の約 1/200 とし引張強度は 573N/mm² とした。

コンクリートの材料特性値は材料試験結果から値を決定し、ポアソン比は 0.2 とした。ひび割れモデルについては応力とひずみの主軸が常に一致するようにした全ひずみ理論に基づく回転ひび割れモデルを用いた。圧縮側の構成則は完全弾塑性モデルとし、引張側の構成則はひび割れ発生強度まで線形弾性、ひび割れ後は材料試験の結果を近似した引張軟化モデルとした(図-6)。本解析で使用した材料定数を表-2 に示す。コンクリートのヤング率、ポアソン比、圧縮強度は PL と FRC で同程度であったことから、本解析では同一の特性を与えることとし、引張強度は割裂引張試験時のひび割れ発生強度とした。

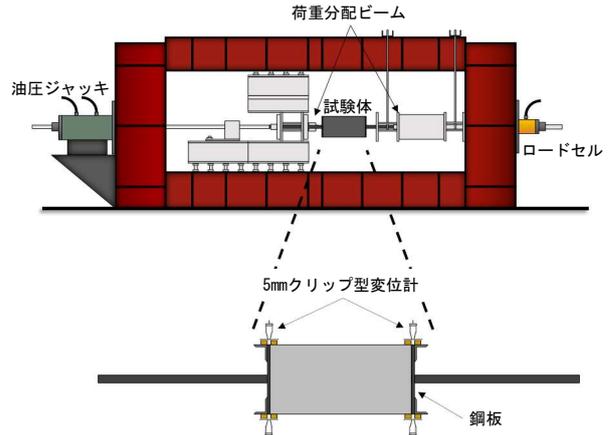


図-2 載荷装置

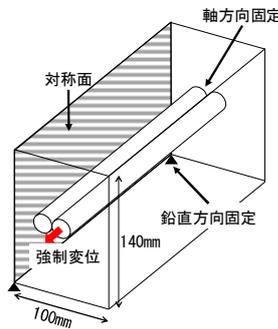


図-3 解析範囲

表-1 界面形状値

節寸法(mm)		
a	b	P
3	10.5	13.5

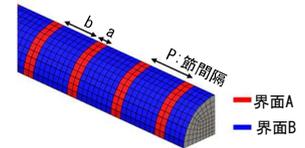


図-4 界面要素図

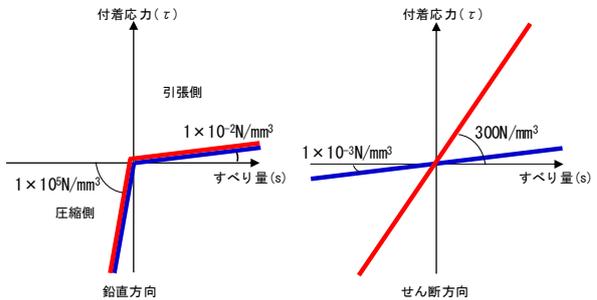


図-5 界面要素の特性

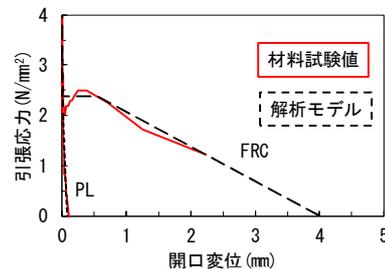


図-6 引張軟化モデル

表-2 材料定数

	コンクリート		鉄筋	
	PL	FRC	ヤング率	降伏強度
ヤング率	39.6kN/mm ²		ヤング率	184kN/mm ²
ポアソン比	0.2		ポアソン比	0.3
圧縮強度	90.6N/mm ²		降伏強度	356N/mm ²
引張強度 (ひび割れ発生強度)	3.38N/mm ²	4.38N/mm ²	引張強度	576N/mm ²

2.4 実験と解析の結果

(1) 実験結果

図-7 に実験と解析の荷重-鉄筋端部の抜け出し変位関係を示す。実験においてはいずれの試験体も最大荷重時に鉄筋軸方向の割裂ひび割れが大きく開口して破壊した。鉄筋降伏までの区間で外側鉄筋と内側鉄筋を比較すると、内側鉄筋で外側鉄筋とのかぶり差の影響によって同一荷重時の変位が小さい部分が見られた。PLの15φ(以下 PL-15φと表記)のケースでは鉄筋降伏直前に破壊したのに対して、継手長を25φとしたケースでは、鉄筋降伏後も荷重を維持し、抜け出し変位が1mm程度に達した時点で破壊した。一方、FRCの15φ(以下 FRC-15φと表記)のケースではPLの25φ(以下 PL-25φと表記)よりさらに抜け出し変位が大きくなった時点で破壊した。このことより、繊維補強コンクリートを用いることで、プレーンコンクリートに比べて重ね継手長を低減できる可能性のあることが示された。

(2) 解析結果

PL-15φのケースでは鉄筋降伏直後に最大荷重に達し、解が発散した。実験でも降伏直前に破壊が生じていることから耐力は概ね一致する結果となった。一方、PL-25φとFRC-15φのケースでは実験で破壊が生じた荷重よりも高くなり、抜け出し変位が実験での破壊時の値の2倍以上に達するまで解析しても最大耐力に達しなかったため計算を打ち切った。すなわち、PL-25φとFRC-15φのケースではいずれも破壊時の抜け出し変位は実験値を大きく上回り、実験値に一致しない結果となった。

降伏までの抜け出し変位を比較すると、PL-15φのケースでは荷重の増加とともに変位量に差が生じ、解析の方が抜け出し変位が小さくなる結果となった。一方、PL-25φ、FRC-15φのケースでは外側鉄筋の抜け出し変位は実験と解析ではほぼ一致し、内側鉄筋の抜け出し変位は降伏荷重付近では実験値と解析値はほぼ一致したが、荷重の低い段階では解析値の方が大きくなる結果となった。なお、抜け出し変位の差に関しては同一試験体内の2組の継手間でばらつきがあったことが原因の一つとして考えている。

図-8 に解析で得られた外側鉄筋の端部側から見たひび割れ状況、図-9 に試験終了後の試験体の破壊の状況を示す。図-8 よりいずれのケースでも荷重の増加とともに鉄筋周囲に複数の付着割裂ひび割れが発生し、そのうちの1本ないし2本が試験体の表面まで達する様子が見られた。なお、試験体の表面まで達する割裂ひび割れは、外側の鉄筋側(図中手前側)では水平方向に進展するのに対して、内側の鉄筋側(図中奥側)では縦方向に進展する結果となった。PLとFRCのケースを比較するとPLのケースでは鉄筋周囲に放射方向のひび割れ

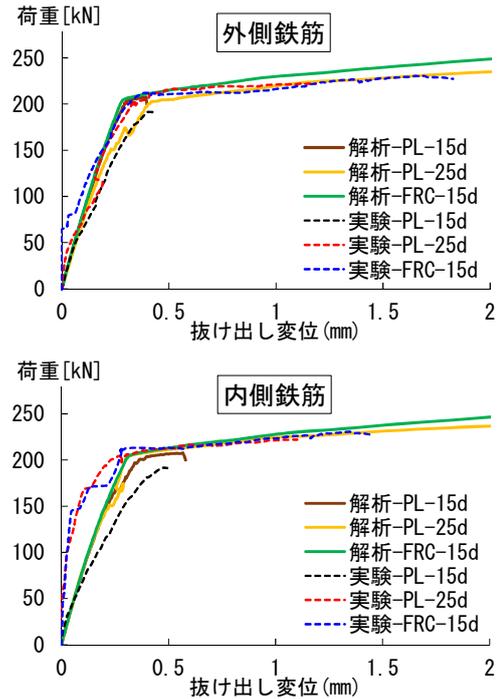


図-7 荷重-鉄筋端部の抜け出し変位関係

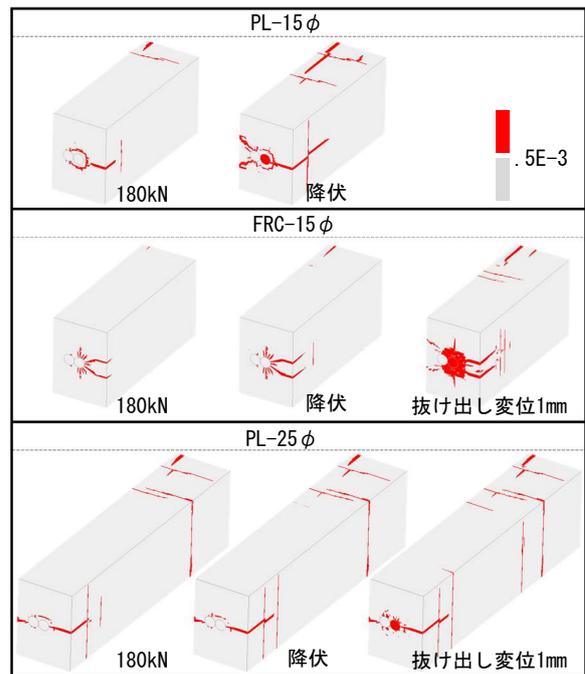


図-8 コンクリートのひび割れ状況

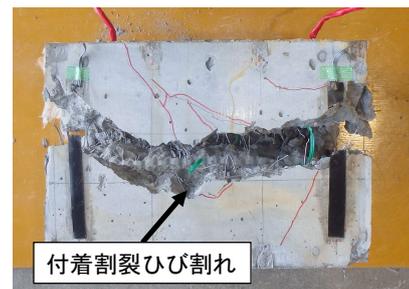


図-9 試験終了後の試験体(FRC)

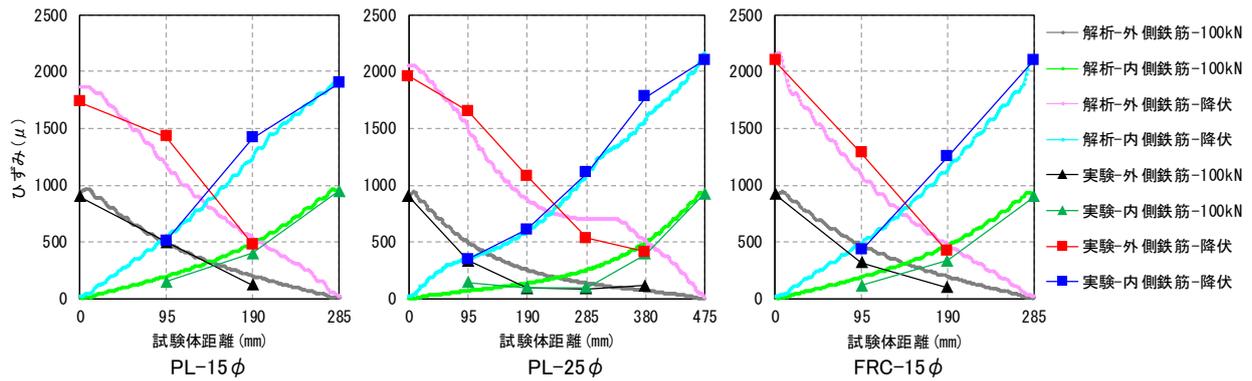


図-10 荷重 100kN, 降伏時の鉄筋主ひずみ分布

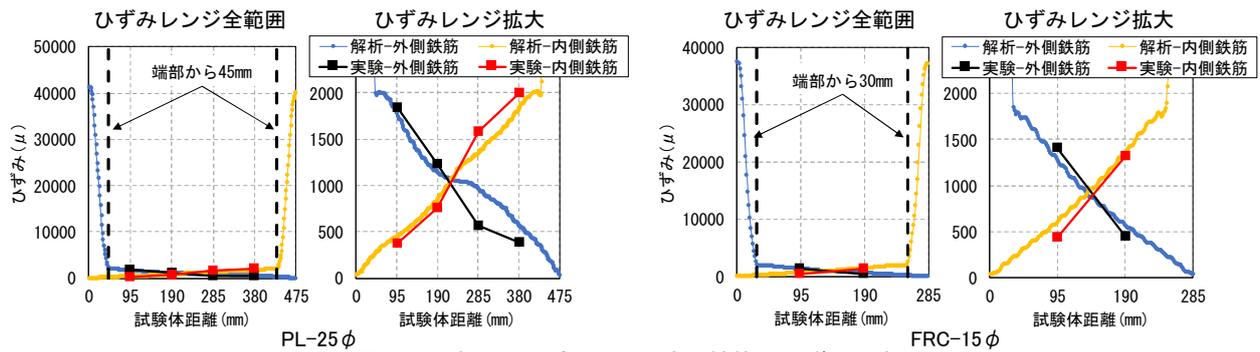


図-11 抜け出し変位 1mm 時の鉄筋主ひずみ分布

と周方向のひび割れが見られるのに対し、FRC のケースでは放射方向のひび割れが支配的となっており多方向に広がった。また、PL-15φ のケースでは鉄筋から試験体表面に進行する付着割裂ひび割れが 1 本であったのに対し、FRC-15φ のケースでは降伏までに 2 本発生した。実際の試験体では図-9 に示すとおり、主たる割裂ひび割れは水平方向のひび割れが 1 本のみである。そのため、FRC-15φ の解析ではひび割れの進展に要するエネルギーが 2 倍 (ひび割れ 2 本分) となったことが、荷重が高くなった原因の一つと考えられる。PL-25φ のケースで解析の荷重が高くなった原因については今後の課題であるが、一つの原因としては実際の試験体では 2 組の重ね継手から同時に対称的に割裂ひび割れが進展することはなく非対称に進展すると考えられるのに対して、本解析では対称性を考慮した 1/2 領域の解析としたため、PL-15φ のケースはほぼ一致したが、一般的に破壊の非対称性が考慮されないため、荷重が高くなったことが考えられる。

図-10 に荷重 100kN と鉄筋降伏時における鉄筋のひずみ分布を示す。なお、PL-15φ は実験では降伏まで達しなかったため最大荷重時のひずみ分布を示し、解析結果も実験の最大荷重時のひずみを示している。試験体距離は外側鉄筋端部を起点とし、内側鉄筋端部までの距離である。解析の結果、いずれの試験体の場合も鉄筋降伏までの鉄筋ひずみの解析結果は実験結果とほぼ一致した。なお、PL-25φ の外側鉄筋のひずみ分布の解析結果において距離 350mm 付近において変曲点が現れているが、こ

れは図-8 に見られるようにこの位置において軸直角方向の試験体断面を貫通する引張ひび割れが発生したためである。

降伏後のひずみ分布を確認するため、PL-25φ、FRC-15φ のケースでは抜け出し変位 1mm 時のひずみ分布を図-11 に示す。実験では鉄筋端部が降伏しており正確なひずみを計測することができていないため内部のひずみ分布のみ示している。解析の結果、両端部から PL-15φ のケースでは 45mm、FRC-15φ のケースでは 30mm の位置から端部にかけて急激にひずみが生じており、図-8 の主ひずみ分布からも付着割裂ひび割れが試験体表面まで進展していることから付着割裂ひび割れが進展することで降伏域が試験体内部まで進展する状況が捉えられていると考えられる。また、ひずみの出力範囲を鉄筋降伏程度までにした拡大図では、PL-25φ の外側鉄筋の解析結果で 285mm 付近でひずみが大きくなっているが、これは前述のとおり、軸直角方向の試験体断面を貫通する引張ひび割れの影響であると考えられ、その他の部分は良好に一致している。

以上より、本解析においては鉄筋の抜け出し変位が 1mm 程度までの範囲では、いずれの試験体においても鉄筋ひずみ分布を概ね再現できることが確認できた。

3. コンクリートの材料特性値の影響

3.1 解析条件

ここでは前章で示した PL-15φ 試験体を対象としてコ

表-3 解析ケースおよび解析結果

解析ケース	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (ひび割れ発生強度) (N/mm ²)	引張破壊エネルギー (N/mm)	解析結果 (耐力)(kN)	
基準	90.6	3.38	0.051	175.2	
f _c =45.3	45.3	3.38	0.051	175.4	
f _c =181.2	181.2			168.5	
f _t =1.69	90.6			1.69	140.4
f _t =6.76				6.76	200.8
f _t =13.52				13.52	264.9
G _F =0.008	1.69	0.008	86.5		
G _F =0.025		0.025	118.5		
G _F =0.076		0.076	169.1		
G _F =0.228		0.228	212.8		

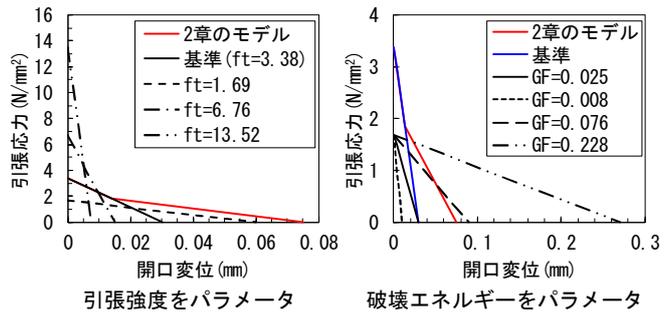


図-12 引張軟化モデル

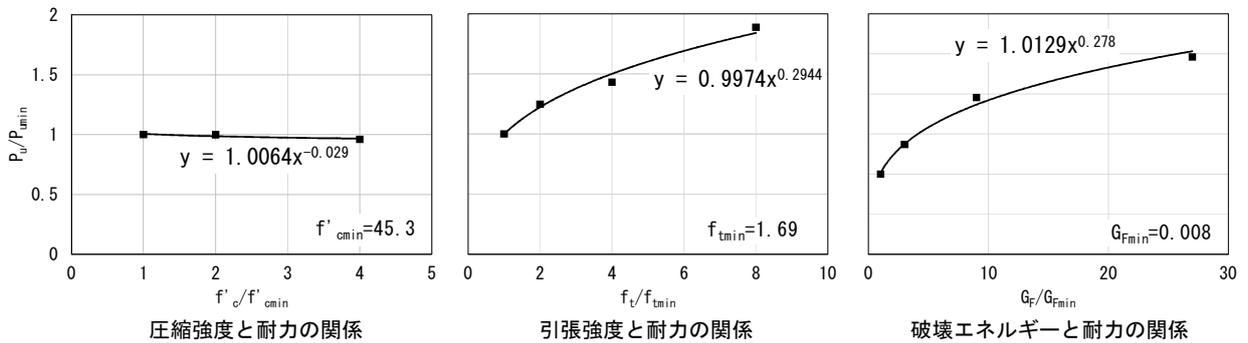


図-13 継手耐力と材料特性の関係

コンクリートの材料特性値が解析結果に及ぼす影響について検討するためにパラメータ解析を行った。解析パラメータは、表-3 に示すとおり圧縮強度、引張強度、および破壊エネルギーの3項目とした。圧縮強度は基準(90.6 N/mm²)に対して1/2倍、2倍とした値を用いた。引張強度については基準(3.38 N/mm²)に対して1/2倍、2倍、4倍とした。引張破壊エネルギーに関しては、基準(0.05N/mm)に対して1/3倍、3倍、9倍とした値を用いたケースを作成した。なお、引張軟化曲線の形状の影響を避けるために引張軟化曲線は直線軟化とし、基準とした破壊エネルギーは通常のコンクリートより小さい値としている。引張強度をパラメータとしたケースでは引張強度の違いによって破壊エネルギーが変位しないよう終局開口変位を調節した(図-12)。破壊エネルギーをパラメータとしたケースでは破壊エネルギーが大きくなると破壊耐力が大きくなり、破壊耐力を求められなくなる可能性があるため、引張強度を基準の1/2倍とした(図-12)。鉄筋は降伏すると破壊モードが変化するため弾性体でモデル化した。

3.2 パラメータ解析の結果

表-3 にパラメータ解析の結果を示す。また、図-13 に耐力と材料特性の関係を示す。図-13 では各材料特性の影響を把握するために、各パラメータの最小値を基準として正規化して整理している。圧縮強度をパラメータ

としたケースでは耐力に大きな差は生じず、最も圧縮強度が高い181.2N/mm²では耐力がやや低くなる結果となっており、圧縮強度は重ね継手の破壊耐力に影響しないことが確認された。次に引張強度をパラメータとしたケースでは引張強度が高いほど耐力も高い結果となり、正規化すると引張強度の0.29乗で増加することが確認された。また、破壊エネルギーをパラメータとしたケースではエネルギーが大きくなるほど耐力も高くなる結果となり、破壊耐力は破壊エネルギーの0.28乗で増加することが確認された。今回検討したケースでは破壊エネルギーの小さな領域でも大きく影響していることが確認できた。以上より重ね継手の耐力に対して圧縮強度は影響しておらず、引張強度および破壊エネルギーが大きく影響していることが示された。

一方、実際のコンクリートでは一般に圧縮強度が変化すれば引張強度と破壊エネルギーも変化する。土木学会コンクリート標準示方書⁵⁾では引張強度は圧縮強度の2/3乗に比例し、破壊エネルギーは圧縮強度の1/3乗に比例するとしている。そこで、この関係と本パラメータ解析で得られた引張強度と破壊エネルギーの比例関係を用いて圧縮強度と重ね継手の耐力についての関係を求めると重ね継手の耐力は圧縮強度の約0.29乗に比例することとなる。コンクリート標準示方書では重ね継手の耐力はコンクリートの圧縮強度の2/3乗に比例するとしてい

るのに対して、本解析では 0.29 乗となり示方書より圧縮強度の影響度が小さい結果となった。なお、示方書ではコンクリート圧縮強度の適用範囲を 80N/mm^2 以下としていることから、本解析の結果と直接比較することは不適當ではあるが、圧縮強度が 80N/mm^2 以上の高強度域では継手耐力に対する圧縮強度の影響度が低強度域に比べ小さくなる可能性が本解析によって示されたものと考えられる。

図-14、図-15 に各パラメータ解析時の主ひずみ分布を示す。(a)は抜け出し変位同一時で比較(図-14は 0.2mm 、図-15 は 0.1mm)し、(b)は各パラメータの最大荷重時で比較している。図-14 に示す引張強度の影響に関しては、引張強度が最も低い $f_t=1.69\text{N/mm}^2$ のケースでは鉄筋周方向に広域に渡ってひび割れ分散し、最大荷重時には付着割裂ひび割れが試験体側面にまで達した。引張強度が最も高い $f_t=13.52\text{N/mm}^2$ のケースでは付着割裂ひび割れが多方向に生じ、最大荷重時になると試験体表面に複数の引張ひび割れが生じた。引張強度が高くなるほど鉄筋周方向に広がるひび割れが局所化する傾向が見られ、引張強度が最も高いケースではじん性が向上し耐力が高くなり付着割裂ひび割れが分散して生じる結果が得られた。図-15 に示す破壊エネルギーの影響に関しては破壊エネルギーが大きくなるほど、同一抜け出し変位量時の鉄筋周方向に生じるひび割れは少なくなることが確認できる。(b)の最大荷重時で比較すると破壊エネルギーが高くなるほど付着割裂ひび割れが多方向に生じていることが確認できる。以上より、引張強度を高くするとひび割れが鉄筋周方向に広がる破壊形態から付着割裂ひび割れが支配的になる破壊形態へと変化していき、破壊エネルギーを大きくする、すなわち FRC を使用すると耐力が高くなり付着割裂ひび割れが分散して生じるという結果が得られた。

4. まとめ

本検討では、短繊維補強コンクリートを用いた鉄筋重ね継手について実験と FEM 解析によって検討を行った。また、プレーンコンクリートの継手長 15ϕ を対象としコンクリートの特性をパラメータとした解析を行った。本検討で得られた知見を以下に示す。

- (1) 短繊維補強コンクリートを用いることで、プレーンコンクリートに比べて重ね継手長を低減できる可能性のあることが実験において示された。
- (2) FEM 解析では実験値より破壊耐力を過大に評価するが、鉄筋の抜け出し変位が 1mm 程度以下の範囲では鉄筋ひずみの分布は解析と実験で概ね一致する。
- (3) パラメータ解析の結果、重ね継手の破壊耐力に対し

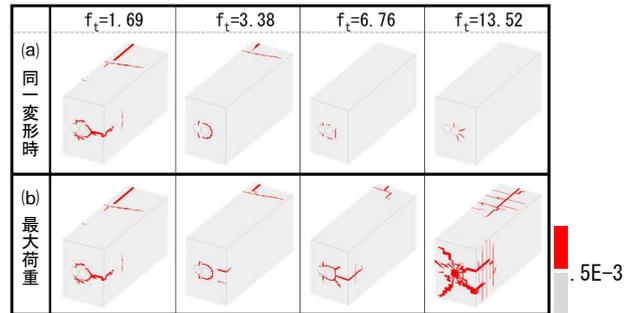


図-14 主ひずみ分布(引張強度)

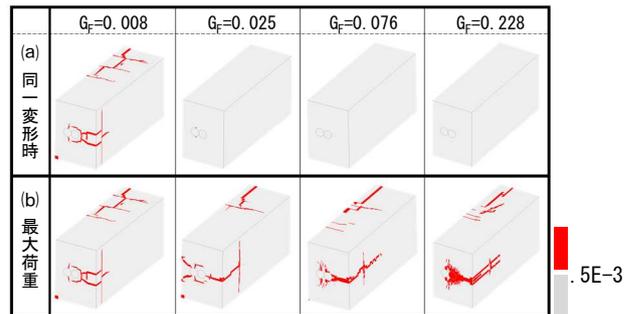


図-15 主ひずみ分布(破壊エネルギー)

てコンクリートの圧縮強度は影響せず、引張強度および破壊エネルギーが影響することが確認され、破壊エネルギーは小さな領域でも継手耐力に大きく影響することから FRC を使用すると継手耐力が高くなる。

- (4) 土木学会コンクリート標準示方書の圧縮強度と引張強度および破壊エネルギーの関係からプレーンコンクリートの場合、重ね継手の破壊耐力は圧縮強度の約 0.29 乗に比例する結果となった。

参考文献

- 1) 林大輔, 長井宏平: 三次元離散解析手法による多方向配筋時の RC 定着性能の微細構造解析, 土木学会論文集 E2, Vol.69, No.2, pp.241-257, 2013
- 2) 山本圭士, 岩田道春, 黒田一郎, 古屋信明: RBSM 解析による RC ループ継手の破壊機構の評価, 構造工学論文集, Vol.56A, pp915-927, 2010
- 3) 竹山忠臣, 佐々木亘, 篠崎裕生, 内田裕市: 鉄筋と短繊維補強コンクリートのひび割れ特性に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.1207-1212, 2018
- 4) 磯部岳, 竹山忠臣, 佐々木亘, 内田裕市: 繊維補強鉄筋コンクリート部材のひび割れ性状に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.2, pp.1159-1164, 2019
- 5) 土木学会: 2017 年制定 コンクリート標準示方書設計編, 2018.3