

ヒンジリロケーションの導入により ハンチを省略したRC隅角部の構造性能

村田 裕志*¹・畑 明仁*¹

Keywords : corner part, joints in members, hinge relocation, steel fiber reinforced concrete (SFRC)

隅角部, 部材接合部, ヒンジリロケーション, 鋼繊維補強コンクリート (SFRC)

1. はじめに

兵庫県南部地震以降, 耐震基準の見直しとともに, RCボックスカルバート構造物において塑性ヒンジ化が想定される壁部材や版部材の基部の鉄筋量が増加している¹⁾²⁾。RCボックスカルバート構造物の隅角部(L形接合部)では壁部材と版部材からの主鉄筋が交差し, さらに各部材基部と同量のせん断補強鉄筋に加えて隅角部補強鉄筋が配置される。これらに加え, 隅角部破壊を防止するために一般的にはハンチが設けられることが多く, ハンチ筋も配置されるため, 隅角部の配筋は非常に高密度となりやすい。

高密度配筋となることによって鉄筋の組立てが困難となるばかりでなく, ハンチがあることで特に底版側では浮き型枠が必要となり, 打込みが困難になることによる構造物の品質低下のリスクが高まっている。このため, 隅角部の配筋合理化が求められている。

配筋を簡素なものとする有効な手段はハンチの省略である。しかしながら, ハンチを単純に省略すると隅角部への負担が大きくなり, 隅角部破壊の危険性が増加する。RCボックスカルバートのようなラーメン構造では, 隅角部が剛域であることを前提として設計されるため, 隅角部破壊を回避する必要がある。ハンチを有する場合と同等な構造性能を保持する必要がある。

一方, 建築分野での柱梁接合部では, 接合部降伏破壊³⁾を回避するために, 梁端の塑性ヒンジ発生位置を柱面から移動させ, 柱梁接合部を降伏させない手法について様々な研究が行われている⁴⁾。この手法はヒンジリロケーションと呼ばれており, 具体的な手法とし

ては梁の鉄筋量を部分的に増加させる, あるいは部分的に高強度化させることで, 柱梁接合部内で梁の主鉄筋が降伏しないようにしたものである。

本研究では, このヒンジリロケーションの手法を土木分野のRCボックスカルバートの隅角部へと適用し, ハンチを有する隅角部と同等の構造性能を保ったままハンチを省略することを試みたものである。そのイメージを図-1に示す。すなわち, 元々ハンチが存在していた領域まで部材耐力を向上させ, 塑性ヒンジの形成位置をハンチ端であった位置よりも上部へとシフトさせるものである。

この効果を確認するため, RCボックスカルバートを想定し, 各種のヒンジリロケーションの手法を適用した8体のL形試験体で正負交番荷重を実施した。ヒンジリロケーションの手法としては, 部分的な多段配筋化, 部分的な高強度鉄筋の使用, さらに隅角部の配筋量を低減するために鋼繊維補強コンクリート(以下, SFRC)の適用を組み合わせたものを検討した。

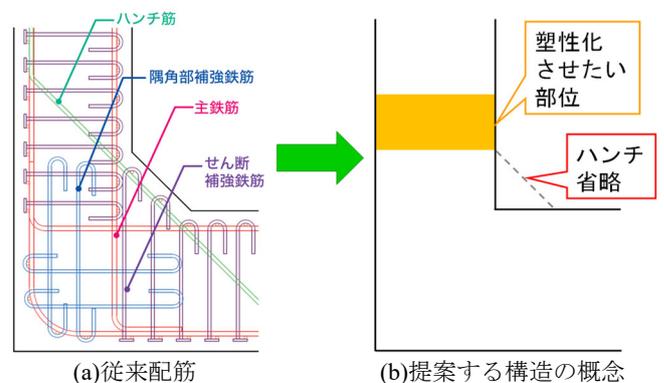


図-1 RC隅角部でのヒンジリロケーション
Fig.1 Hinge relocation method in RC corners

*1 技術センター 社会基盤技術研究部 材工研究室

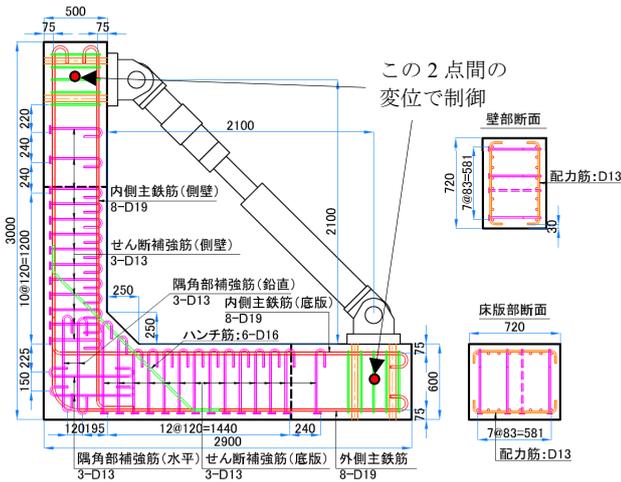
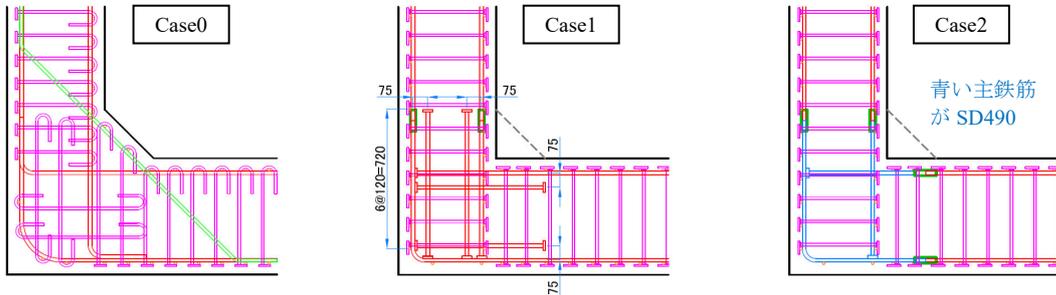


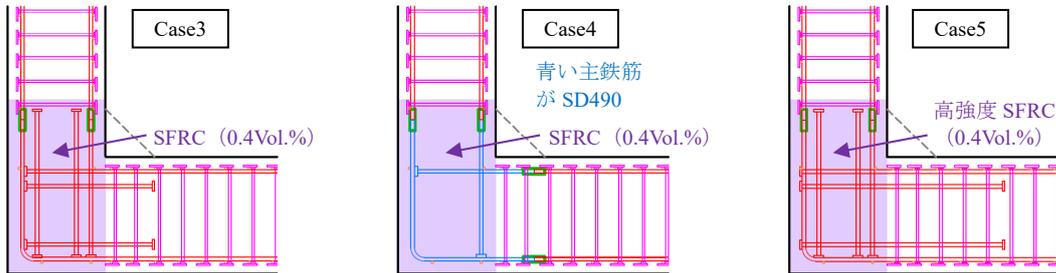
図-2 実験概要
Fig.2 Experimental summary

表-1 実験ケース
Table 1 Test cases

ケース名		説明
比較用	Case0	ハンチを有する比較ケース ⁵⁾
シリーズ I	Case1	部分的な 1.5 段配筋化
	Case2	部分的な高強度鉄筋化
	Case3	Case1 に SFRC 適用 (せん断補強鉄筋省略)
	Case4	Case2 に SFRC 適用 (せん断補強鉄筋省略)
シリーズ II	Case5	Case3 に対し SFRC を高強度化
	Case6	Case1 に対し底版側を高強度コンクリートへと変更
	Case7	Case4 にせん断補強鉄筋を組み合わせ
	Case8	Case4 の SFRC を高靱性化 (鋼繊維混入量を増加)



※1 ヒンジリロケート位置 (ハンチ端) の設計降伏耐力: 299kN・m, 設計終局耐力: 324kN・m (全試験体共通)



※2 底版上面位置の設計降伏耐力: 383kN・m, 設計終局耐力: 465kN・m (1.5 段配筋タイプ: Case1,3,5,6)

※3 底版上面位置の設計降伏耐力: 423kN・m, 設計終局耐力: 442kN・m (高強度鉄筋タイプ: Case2,4,7,8)

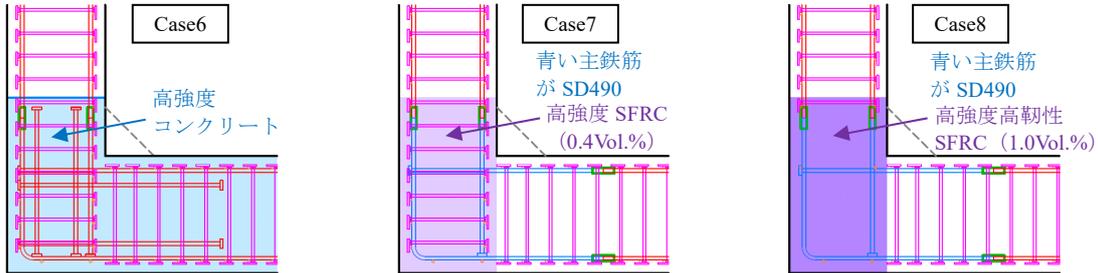


図-3 各実験ケースでの隅角部配筋
Fig.3 Arrangement of reinforcement of corners

2. 実験概要

2.1 試験体概要

本研究では 8 体の試験体で実験を実施したが、比較対象とした既往の研究⁵⁾での L 形部材試験体の概要を図-2 に示す。この試験体は実物の 1/2 サイズ程度の側壁と

底版との隅角部を想定しており、側壁厚は 500mm、底版厚は 600mm、ハンチサイズは側壁厚の 1/2 として 250mm となっている。部材幅 (奥行き) は 720mm であり、主鉄筋は D19 が 8 本、ハンチ筋は D16 が 6 本 (主鉄筋量の約 1/2 の量)、せん断補強鉄筋には 3 本の D13 が 120mm 間隔で配置されている。せん断補強鉄筋にはプ

レート定着型の鉄筋が用いられている。この比較用のケースを Case0 とした。

比較用の Case0 に対してハンチを省略し、様々なヒンジロケーションの手法を適用した 8 体の実験ケースを表-1 に、それぞれのケースの隅角部の配筋を図-3 に示す。合計 8 ケースの試験体はシリーズ I とシリーズ II の 2 つでそれぞれ 4 体ずつである。シリーズ II はシリーズ I での結果を受けてさらにヒンジロケーションの手法に改良を施したケース群である。図-3 には、ヒンジロケートした位置での設計降伏耐力と設計終局耐力および底版上面位置（壁基部）での設計降伏耐力と設計終局耐力を示している。なお、設計耐力はコンクリートの圧縮強度を $f'_c=30\text{N/mm}^2$ 、鉄筋の降伏強度を $f_y=345\text{N/mm}^2$ または 490N/mm^2 として求めた。

シリーズ I の 4 ケースについては以下のとおりである。Case1 は部分的に 1.5 段配筋とすることで、Case2 は部分的に高強度鉄筋とすることでそれぞれヒンジロケーションを実現するケースである。Case3 と 4 はそれぞれ Case1 と 2 に対して隅角部+旧ハンチ端のエリアまで SFRC とすることでせん断補強鉄筋を省略したものとなっている。SFRC には長さ 60mm、直径 0.9mm の鋼繊維を 0.4Vol.% 混入した（写真-1 および写真-2）。隅角部に適用する SFRC は先に製作し、その他の側壁・底版部分は SFRC に打継処理をしてから普通コンクリートを打ち継いだ。

シリーズ II の 4 ケースについては以下のとおりである。4 ケースともに、より塑性ヒンジを壁部材側基部へと誘導するため、隅角部側へ用いるコンクリートと SFRC をすべて高強度化した。Case5 は Case3 の SFRC を高強度化したものである。Case6 は、Case1 に対して隅角部側のコンクリートを高強度化し、SFRC を用いずにヒンジロケーションを実現できないか試みたケースである。Case7 については、Case2 と 4 で生じた隅角

部破壊を防止するために、高強度 SFRC とせん断補強鉄筋を併用したケースとなる。Case8 については、Case4 の SFRC を高強度化し、鋼繊維混入量 1.0Vol.% へと増加させたケースとなる。SFRC の破壊エネルギー試験から求めた引張軟化曲線は図-4 に示す。

また、シリーズ II では、開く側の剛性を向上させるため、底版の主鉄筋の定着プレートを、外側主鉄筋の外に掛けるように改良した。また、シリーズ I において底版側で部材降伏直前まで至ったため、シリーズ II では底版の 2 段目主鉄筋あるいは高強度鉄筋はシリーズ I よりも長くした。

なお、シリーズ I と II の全ケースにおいて、内側主鉄筋と 2 段目主鉄筋はプレート定着型とし、外側主鉄筋の曲げ内半径を 3ϕ とすることでも配筋を合理化している。

2.2 荷重概要

荷重方法は渡辺らの研究⁹⁾を参考にし、自己反力で隅角部に正負の曲げモーメントが作用するようにした（図-2 参照）。加力はジャッキで押す方向を正荷重（内側引張）、引く方向を負荷重（外側引張）とした。主鉄筋降伏前に 2 回正負に予備加力を実施し、ヒンジロケートされた位置（旧ハンチ端）の主鉄筋の降伏変位を $\pm 1\delta_y$ として以降は $\pm 2\delta_y$ 、 $\pm 3\delta_y$ と同一変位で 3 回ずつ正負に繰返し荷重をした。なお、主鉄筋の降伏変位は軸力の影響のため正負で異なり、正荷重のほうが大きくなった。

3. 実験結果と考察

3.1 材料強度

材料強度を表-2 に示す。Case5 と 6 では、普通コンクリート部の強度がやや高かったため、高強度 SFRC や高強度コンクリートとの差が小さくなった。



写真-1 用いた鋼繊維
Photo.1 Steel fiber



写真-2 SFRC の練上り状況
Photo.2 Fresh condition of SFRC

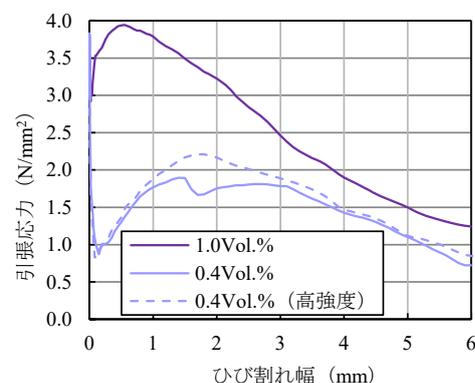


図-4 SFRC の引張軟化曲線
Fig.4 Tension softening curves of SFRC

表-2 材料強度 (N/mm²)
Table 2 Material strength

シリーズ	ケース	コンクリート	鉄筋
比較	Case0	$f_c=34.7$	D13 : $f_y=391$ D16 SD345 : $f_y=391$ D19 : $f_y=391$ (すべて SD345)
シリーズ I	Case1	$f_c=38.5$	D13 SD345 : $f_y=382$ D19 SD345 : $f_y=397$ D19 SD490 : $f_y=530$
	Case2	$f_c=39.4$	
	Case3	$f_c=41.1$ (普通), $f_c=40.1$ (SFRC)	
	Case4	$f_c=39.0$ (普通), $f_c=39.1$ (SFRC)	
シリーズ II	Case5	$f_c=45.0$ (普通), $f_c=56.7$ (高強度 SFRC)	D13 SD345 : $f_y=378$ D19 SD345 : $f_y=397$ D19 SD490 : $f_y=527$
	Case6	$f_c=46.1$ (普通), $f_c=53.5$ (高強度)	
	Case7	$f_c=40.1$ (普通), $f_c=57.4$ (高強度 SFRC)	
	Case8	$f_c=40.3$ (普通), $f_c=58.4$ (高強度高靱性 SFRC)	

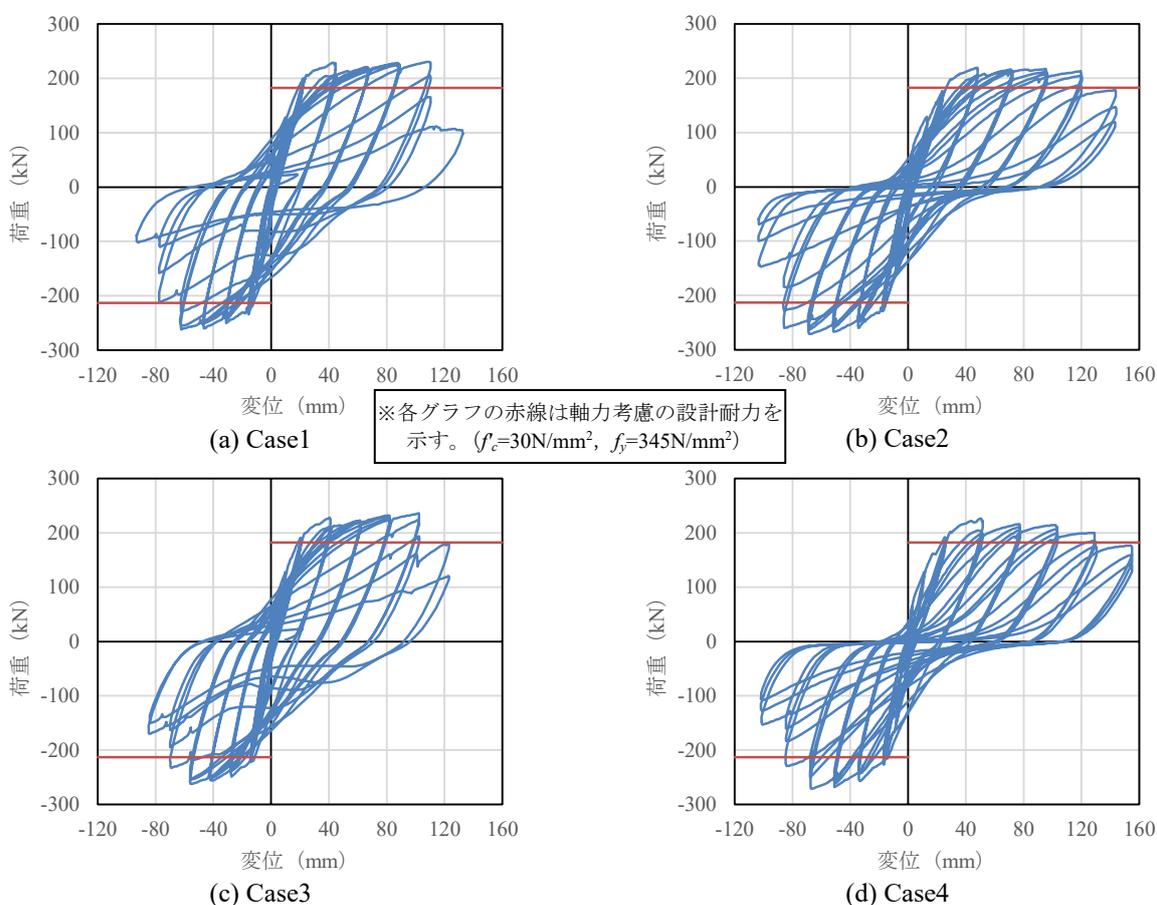


図-5 シリーズ I の荷重-変位関係
Fig.5 Load-displacement curves of Series I

3.2 シリーズ I

3.2.1 荷重-変位関係

Case1~4 の荷重-変位関係を図-5 に示す。これらを比較すると、明確に Case2 と 4 とでエネルギー吸収性能が低い（履歴ループが細くなっている）ことを確認できる。また変形能力の点では、Case2 と 4 とが正側においてより大きい変位まで荷重を保持していることがわかる。

図-6 に正側の包絡線の比較を示す。比較のため、

Case0 の結果も併せて示している。Case0 と Case1~4 を比較すると、耐力と剛性の両方がやや低下していることが確認できる。これは、設計上見込んでいないハンチ筋の効果が表れているためと考えられる。また、1.5 段配筋とした Case1 と 3 が比較的剛性が高い。なお、Case1~4 が設計上の耐力を上回っていることは確認している。

3.2.2 破壊状況

Case0 と Case1~4 の実験終了後の破壊状況を写真-3

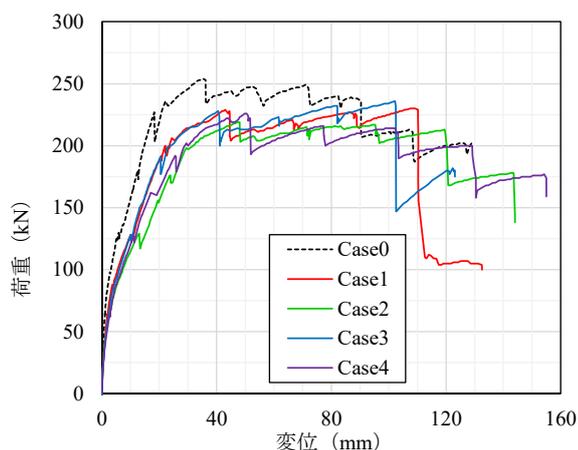


図-6 シリーズ I の正側包絡線の比較
Fig.6 Envelope curves in positive side of Series I

に示す。従来配筋を想定した Case0 では外側のかぶりが剥落し、大きな損傷が隅角部にまで進展している。これに対し、Case1 と 3 では隅角部での破壊を回避した。一方、Case2 と 4 では隅角部での破壊が生じた。このため、エネルギー吸収性能が低い結果になったものと考えられる。また、荷重-変位曲線の横軸は図-2 のような斜め方向の変位としているため、隅角部の損傷が進展することで変形しやすくなったものと考えられる。

Case2 と 4 では、 4δ 程度で隅角部内の左上から右下への割裂ひび割れ（写真-3 の Case4 では鋼繊維の架橋効果で周囲のコンクリートが崩落しなかったため最後までこのひび割れが分かりやすく表現されている）が大きく進展したため、この割裂ひび割れの開口を抑制できなければ隅角部破壊に至ることが確認できた。なお、割裂ひび割れと称したのは、隅角部外側の圧縮応力が隅角部内で斜めに流れて割裂強度試験のようになるためである。Case1 と 3 では 2 段目の主鉄筋が隅角部補強鉄筋の役割をし、割裂ひび割れの開口を抑制したと考えられる。

3.3 シリーズ II

3.3.1 荷重-変位関係

Case5~8 の荷重-変位関係を図-7 に示す。エネルギー吸収性能が低いケースはなく、Case1~4 より改善されていることがわかる。正側の包絡線を図-8 に示す。これより、Case5 の剛性がハンチおよびハンチ筋がある Case0 と同等にまで向上していることが分かる。Case6 も荷重 100kN 程度までは同等の高い剛性を示していることから、Case1 や Case3 と比較して、1.5 段分の底版上側主鉄筋の定着プレートを外側主鉄筋にかけるように改良したことが剛性向上に寄与したのと考えられる。Case5 は唯一、 1δ の加力時点では割裂ひび割れが発生しなかった。このことから、定着方法の改良に

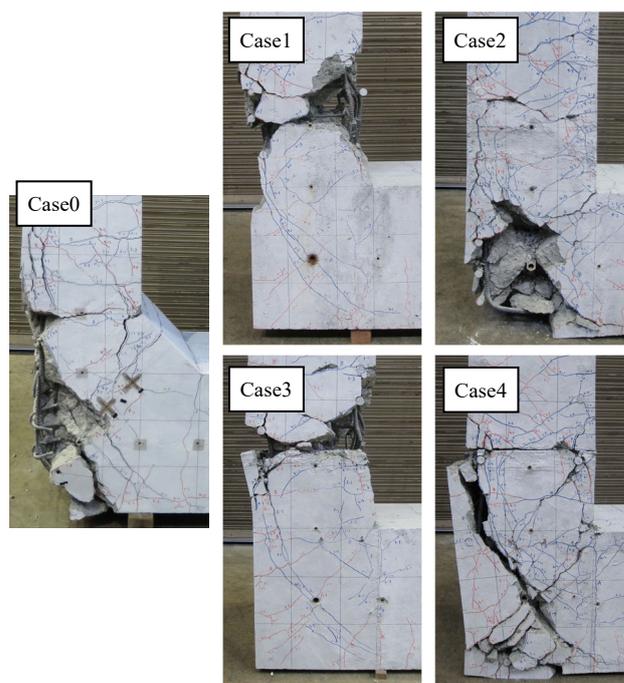


写真-3 シリーズ I の破壊状況
Photo.3 Failure modes of Series I

SFRC を組み合わせることで、より剛性向上に寄与したものと推察される。最も結果の良かった Case5 については、今後は鉄筋ひずみなどの詳細挙動についても分析をし、現象の解明に努める予定である。

3.3.2 破壊状況

Case5~8 の実験終了後の破壊状況を写真-4 に示す。全ケースとも、隅角部は破壊せず、ヒンジリロケーションを達成することができた。

Case5 では Case3 と比較して SFRC を高強度化した効果で、さらに塑性ヒンジ部より下部の損傷（圧壊）が軽微になっている。Case6 では外側のヒンジ下部の損傷が比較的大きい。コンクリートを高強度化しただけでは、塑性ヒンジより下部の損傷を抑制することは厳しいことがわかる。Case7 では Case5 と同等の損傷レベルであった。Case8 は SFRC を高靱性化した効果により、塑性ヒンジより下部の損傷は全ケースの中で最も軽微であった。また、せん断補強鉄筋を省略しても SFRC のみで隅角部破壊を回避できることを実証した。

シリーズ I と同様に、シリーズ II でも外側主鉄筋の曲げ内半径を 3ϕ としているが、すべて隅角部破壊を回避した。これより、多段配筋化や SFRC の使用、あるいはこれらの組合せで隅角部耐力を向上させることができれば、隅角部の損傷を軽微にでき、曲げ内半径を 3ϕ へと小さくできる可能性を示した。

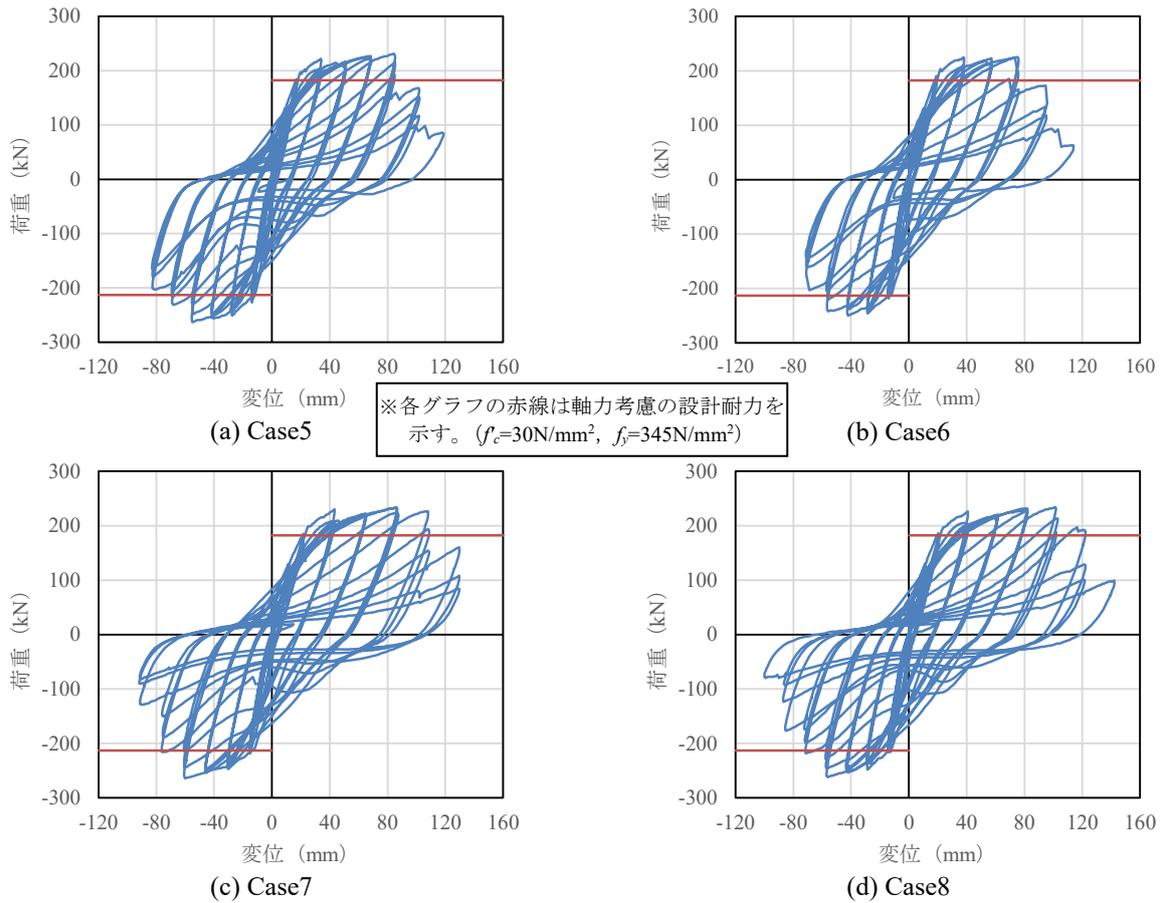


図-7 シリーズIIの荷重-変位関係
Fig.7 Load-displacement curves of Series II

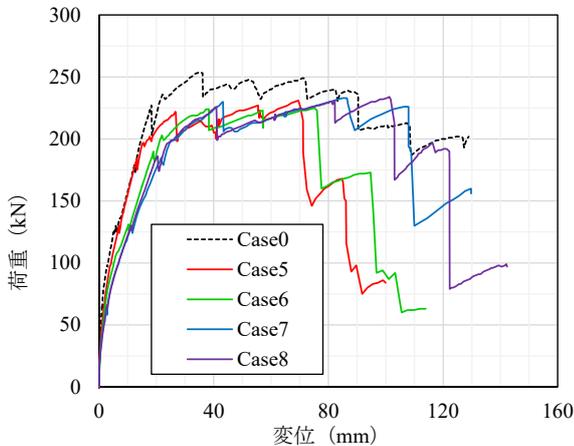


図-8 シリーズIIの正側包絡線の比較
Fig.8 Envelope curves in positive side of Series II

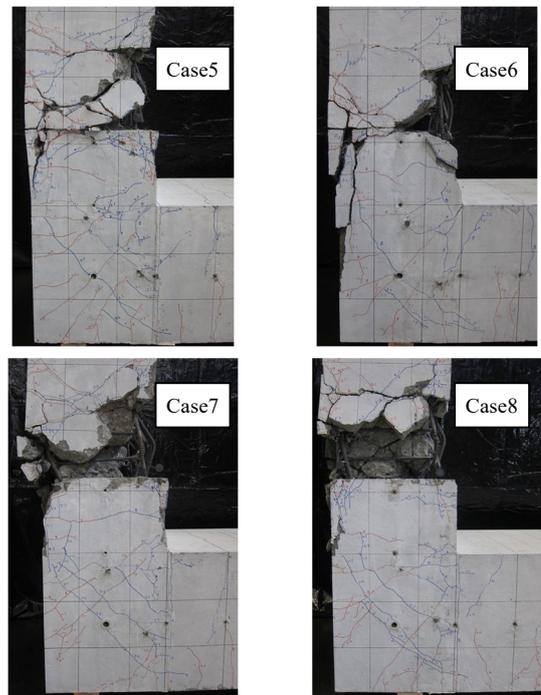


写真-4 シリーズIIの破壊状況
Photo.4 Failure modes of Series II

4. まとめ

本研究で実施した 8 体の実験結果より、以下の知見が得られた。

- (1) 部分的な多段配筋化や高強度鉄筋化による手法と SFRC を組み合わせたヒンジロケーションにより、構造性能を保持したままハンチを省略できることを示した。
- (2) 部分的に多段配筋化し、高強度 SFRC を組み合わせた Case5 が最も良い結果であった。剛性もハンチありの Case0 と同等となった。また、主鉄筋の定着プ

レートを外側主鉄筋の外に掛けることで剛性が増加したものと考えられる。

- (3) 正載荷（開く側の載荷）の際、割裂引張によるひび割れが開口すると隅角部が破壊する。
- (4) 1.5 段配筋としたケースでは、2 段目の主鉄筋が実質的に隅角部補強鉄筋として働き、割裂ひび割れの開口を抑制したものと考えられる。
- (5) Case8 のように鋼繊維混入量を 1.0Vol.%とした高靱性な SFRC を用いれば、高強度鉄筋化のケースで隅角部のせん断補強鉄筋がゼロのケースにおいても隅角部破壊を回避できる。
- (6) 多段配筋化や SFRC の使用、あるいはこれらの組合せで隅角部耐力を向上させることにより、外側主鉄筋の曲げ内半径を現行規準の 10ϕ よりも小さい 3ϕ へと低減できる可能性を示した。

なお、今後の展開としては、様々な条件下で本構造

形式を設計できるようにするため、数値解析によるシミュレーション技術の向上ならびにその結果を用いた耐力計算方法の構築を考えている。

参考文献

- 1) 日本道路協会：平成 24 年版道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2012.
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物，2004.
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算規準・同解説，2021.
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート部材の構造性能評価の現状と将来，2019.
- 5) 村田裕志，武田均：RC ボックスカルバート隅角部の配筋合理化に関する実験的研究，土木学会年次学術講演会講演概要集，Vol.70，V-198，2015.
- 6) 渡辺博志，河野広隆：L 型 RC 隅角部の強度と変形特性に関する検討，土木学会論文集，No.662/V-49，pp.59-73，2000.