

論文 隅角部補強ユニットを利用した L 形隅角部の耐荷性能に関する実験的検討

渡部 孝彦*1・村田 裕志*2・武田 均*3・佐藤 靖彦*4

要旨: ボックスカルバート隅角部の配筋省力化および隅角部の構造性能の改善を目的として、隅角部の主鉄筋及び隅角部補強鉄筋の代替として隅角部補強ユニットを提案し、隅角部コンクリートの拘束度を変化させた 2 ケースの試験体で耐荷性能を検証した。その結果、いずれのケースにおいても隅角部のひび割れが抑制されることを確認した。また、隅角部コンクリートの拘束度が高い Case1 では従来配筋以上の耐力およびエネルギー吸収性能を有していることを確認した。一方で、拘束度の低い Case2 では主鉄筋と隅角部補強ユニットの接続部の損傷により負側の耐力及びエネルギー吸収量の低下が見られた。

キーワード: ボックスカルバート隅角部, 配筋省力化, 隅角部補強ユニット, 正負交番載荷実験

1. はじめに

近年、土木構造物に対する要求性能が高まり、部材接合部等では配筋が高密度になっているものがある。例えばボックスカルバートの隅角部は、側壁・頂版・底版の主鉄筋、隅角部補強鉄筋、ハンチ筋により配筋が高密度化し、配筋作業が非常に煩雑で高度な技術を要するものとなっている。また、外側主鉄筋は側壁から底版へと連続しており配筋作業に時間を要している。そこで筆者らは隅角部補強鉄筋並びに主鉄筋の配筋作業を簡素化する目的で、隅角部鉄筋のユニットブロック化を提案してきた¹⁾²⁾。これにより、側壁から底版へと連続する主鉄筋を配筋する手間が省け、隅角部補強鉄筋の配筋作業も省略できるという作業時のメリットがあるほか、隅角部の構造性能も従来配筋と比べて向上する傾向があることを報告した。

一方で、既報における鉄筋ユニットブロックは主鉄筋相当の鉄筋に対しフレア溶接を多用していることや、鉄筋ユニットブロックと機械式定着を有する主鉄筋との接続部分は鋼材を直接接触させるものであり、施工時の検査が難しいことが課題であった。そこで、従来の鉄筋ユニットブロックを改良し、平鋼及び山形鋼で隅角部ユニ

ットを形成することで鉄筋のフレア溶接を行わない構造を開発した。また、隅角部補強ユニットと機械式定着を有する主鉄筋はコンクリートを介して接続する構造とし、コンクリートの充填性に配慮して十分な隙間を設けるものとした。

本検討では、上記の改良された隅角部補強ユニットを用いた RC 隅角部の構造性能を検証するため、L 形試験体の正負交番載荷実験を実施した。また、同条件で実施された村田ら³⁾の従来配筋の試験体（以下、従来型）との比較を行った。

2. 実験概要

2.1. 隅角部補強ユニットの詳細

(1) 概要

隅角部補強ユニットの構成を図-1 及び図-2 に示す。また、製作した隅角部補強ユニットを含む配筋状況を写真-1 に示す。隅角部補強ユニットは隅角部補強鋼板 (SM490)、接続部山形鋼 (SS400)、接続部平鋼 (SS400) からなる。隅角部補強鋼板は隅角部内の主鉄筋および隅角部補強鉄筋の代替として配置し、接続部山形鋼は、主鉄筋から伝達される力を隅角部補強鋼板へと伝達する目的で

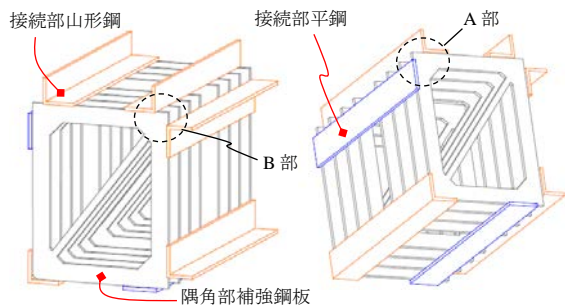


図-1 隅角部補強ユニットの構成

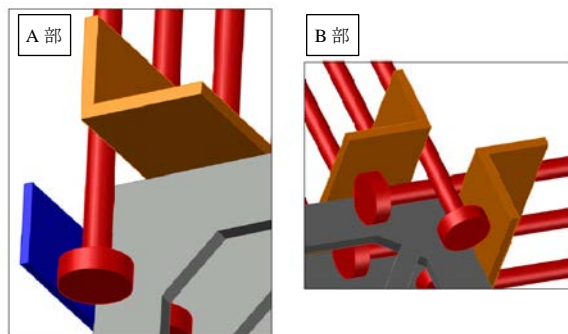


図-2 主鉄筋と隅角部補強ユニットの接続部

*1 大成建設 (株) 技術センター生産技術開発部 工修 (正会員)

*2 大成建設 (株) 技術センター社会基盤技術研究部 博士 (工学) (正会員)

*3 大成建設 (株) 技術センター生産技術開発部 博士 (工学) (正会員)

*4 早稲田大学理工学部 社会環境工学科 教授 博士 (工学) (正会員)

配置した。また、接続部平鋼は外側主鉄筋の機械式定着およびその周囲のコンクリートを拘束する目的のため配置した。

(2) 設計方法の詳細

本設計の特性値には道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編(H29)で示される各鋼材種の特性値を用いた。隅角部補強鋼板は主鉄筋降伏相当の力が作用した際に、鋼材の応力度が降伏強度の特性値以下であるように寸法を定めた。各種鋼材の斜め方向の鋼材部分の寸法は、従来型の隅角部補強鉄筋と同程度の降伏耐力となるように定めた。接続部山形鋼の寸法は猪口ら¹⁾、渡部ら²⁾が使用した鉄筋ユニットブロックの接続部鋼板Bと同じ厚みとした。また、溶接部は、主鉄筋降伏相当の力が作用した際に、溶接部の応力度が降伏強度の特性値以下となるよう母材の厚さおよび溶接長を決定した。接続部平鋼は、主鉄筋に作用する力の主方向と直行する方向であるため、特別に設計は行わず、2.2節で示すケースによらず厚みを10mmとした。

2.2. 正負交番載荷実験の概要

(1) 試験体諸元および実験ケース

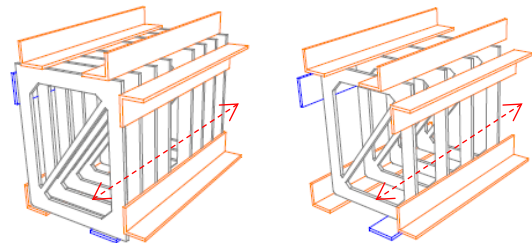
L形試験体の諸元を図-3及び図-4に示す。試験体の製作方法は村田ら³⁾が実施した従来の配筋方法により製作した試験体(以下、従来型)に倣い実施している。本試験体は実物の1/2サイズ程度の底版と側壁を模擬しており、底版厚は600mm、側壁厚は500mmとし、軸方向の試験体幅は720mmとした。鉄筋は実物と同様の鉄筋

比となるように径と本数を決定した。主鉄筋として機械式定着を有するD19(SD345, $f_y=374\text{N/mm}^2$)を8本、せん断補強鉄筋としてD13(SD345, $f_y=378\text{N/mm}^2$)3本を120mm間隔で配置した。ハンチ筋は主鉄筋の1/2の量とし、D16(SD345, $f_y=381\text{N/mm}^2$)を6本配置した。

実験では隅角部補強鋼板の奥行方向の配置間隔が異なる2ケースを実施した(表-1および図-5)。隅角部補強鋼板の間隔が異なることで隅角部コンクリートの拘束度が変化するが、この拘束度の違いが隅角部コンクリートに生じるひび割れに及ぼす影響や、塑性ヒンジが生

表-1 実験ケース

| 項目 | 隅角部補強鋼板間隔 | 隅角部補強鋼板厚 |
|-------|-------------|----------|
| Case1 | 主鉄筋間隔相当 | 12 mm |
| Case2 | Case1の約2.3倍 | 22 mm |



平均鋼板間隔 約90mm 平均鋼板間隔 約210mm

Case1

Case2

図-5 各ケースの隅角部補強ユニットのイメージ

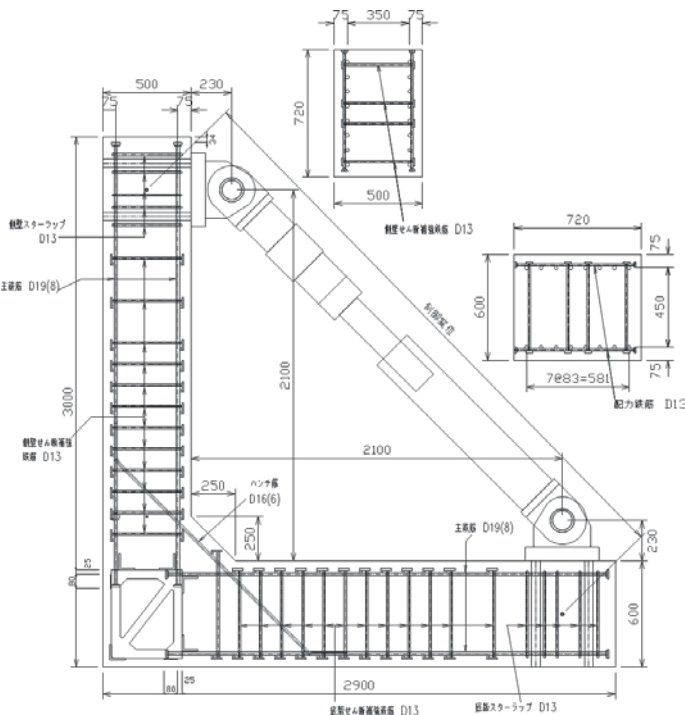


図-3 試験体の概要 (Case1, 2 共通)

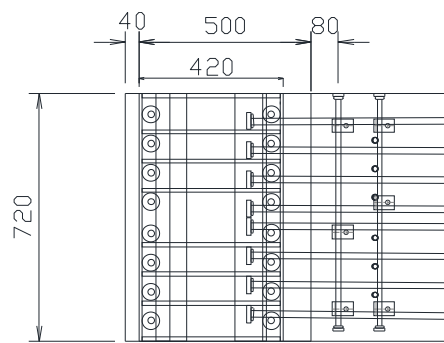


図-4 Case1 隅角部 底版図

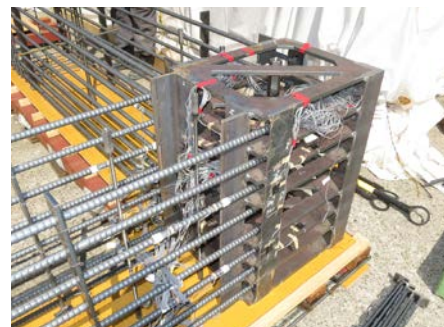


写真-1 隅角部補強ユニット

じる位置に及ぼす影響を実験にて確認することとした。ここで、Case1 では隅角部補強鋼板の配置間隔を主鉄筋間隔相当とした。Case2 では隅角部補強鋼板の配置間隔を主鉄筋間隔の約 2.3 倍とし鋼板枚数を半分とした。鋼板厚は Case1 では主鉄筋 1 本の降伏相当、Case2 では主鉄筋 2 本の降伏力相当の耐力となる厚さと設定した。これにより、隅角部補強鋼板の鋼材量は Case1 および Case2 でほぼ同量となっている。また参考として本実験と、従来配筋型の材料強度をそれぞれ表-2 に示す。

(2) 荷重方法

荷重方法は、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、ジャッキの押す方向(内側引張)を正荷重、引く方向(外側引張)を負荷重として加力した。正負交番荷重においては、ハンチ上断面の主鉄筋の降伏変位を $1\delta y$ とし、以降 $\pm 2\delta y$, $\pm 3\delta y$ ・・・と同一変位で 3 サイクルずつ正負に繰り返し、安全に荷重が可能で

ある範囲まで荷重した。以下では 3 サイクルの荷重については、 $+1\delta y-1$, $+1\delta y-2$ ・・・のように表現する。変位制御における降伏変位は正負でそれぞれ $+1\delta y=+18\text{mm}$, $-1\delta y=13\text{mm}$ となった。測定項目ジャッキに取り付けたロードセルの荷重、及び図-3 に示した位置での制御変位を記録した。また、3.2 節に示す位置の鉄筋、隅角部補強鋼板及び接続部平鋼に貼り付けたひずみゲージにより鋼材のひずみを測定した。各ひずみは奥行き方向に 2 断面を測定したが、結果として各断面の同位置でほぼ同等のひずみが測定されたことから、以降の章では片側 1 断面分の測定結果のみを示す。

3. 実験結果と考察

3.1. 荷重変位曲線および履歴吸収エネルギー

Case1, Case2 及び従来型の実験終了後の外観を写真-2 に示す。いずれのケースも予備荷重で曲げひび割れが生じ、 $1\delta y$ で側壁ハンチ上断面の主鉄筋が降伏した。次に正負の曲げひび割れが進展して貫通し、コンクリートの損傷が進んだ。その後、Case1, Case2 は、それぞれ $+6\delta y-3$, $+3\delta y-3$ で側壁の外側主鉄筋の座屈が生じ、最終的に、それぞれ $-7\delta y-3$, $+6\delta y-1$ までに数本の鉄筋破断が生じたため荷重を終了した。座屈箇所はいずれも側壁基部の外

表-2 材料値

| 材料 | 項目 | 本実験 | 従来型 |
|--------|------------|------|------|
| コンクリート | 圧縮強度 f_c | 40.0 | 35.2 |
| 鉄筋 D13 | 降伏強度 f_y | 378 | 391 |
| 鉄筋 D16 | 降伏強度 f_y | 381 | 391 |
| 鉄筋 D19 | 降伏強度 f_y | 374 | 391 |

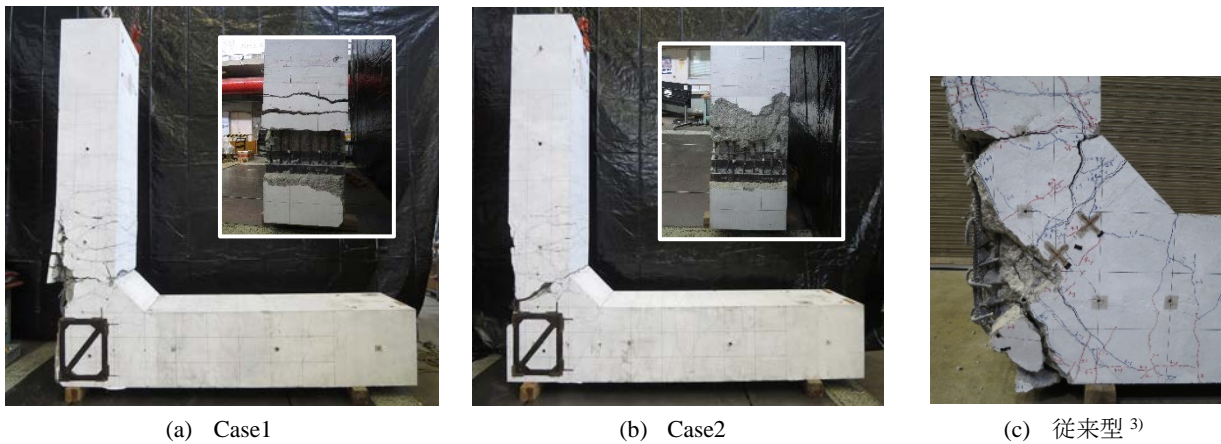


写真-2 荷重終了後の外観

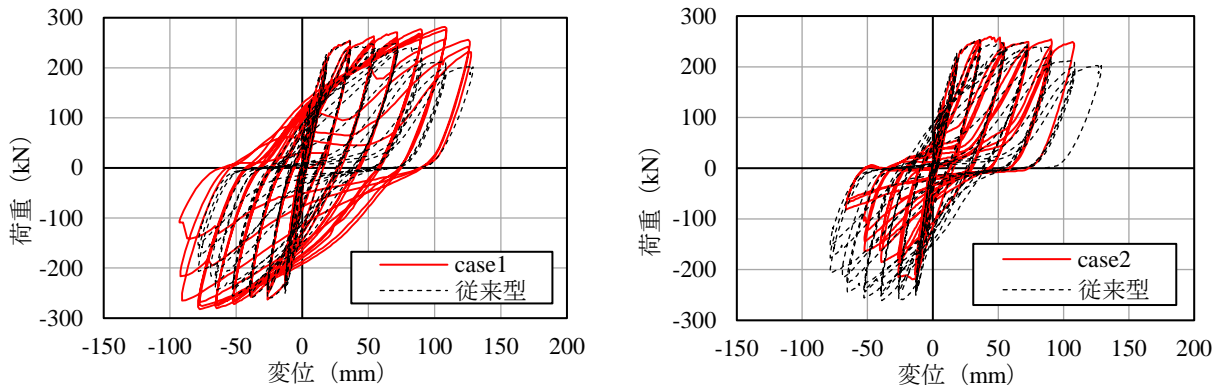


図-6 荷重変位曲線

側であった。なお、従来型は+5 δ y-1で側壁外側主鉄筋に座屈が生じた。早期に座屈が生じたCase2では側壁の外側主鉄筋と隅角部ユニットの接続部のコンクリートの損傷が顕著であり、該当箇所の接続部平鋼が変形している様子が確認された。また、従来型で隅角部コンクリートの損傷が顕著であったのに対し、Case1及びCase2のいずれも隅角部内にはひび割れが観測されず、隅角部の損傷は抑制されていた。

Case1, Case2及び従来型の荷重変位曲線を図-6に示す。Case1は従来型以上の部材耐力および靱性を有していることがわかる。Case1ではおおよそ6 δ yまではスリップ性状は見られず、7 δ y-1の载荷からスリップ性状が確認された。一方、Case2では負側の载荷時において従来型より耐力および靱性が低い。また、比較的初期から履歴カーブの面積が小さく、3 δ yからスリップ性状が確認された。また、従来型では5 δ yを境にスリップ性状が確認

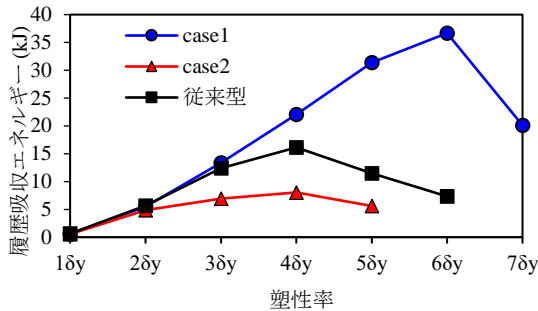


図-7 履歴吸収エネルギー

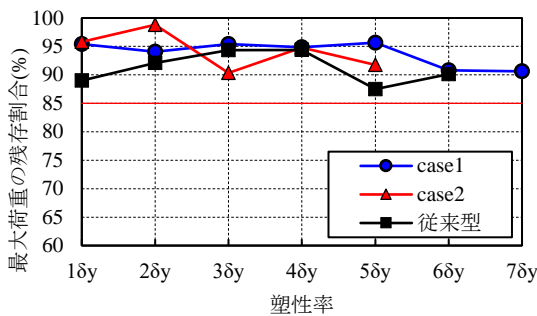


図-8 最大荷重の残存割合

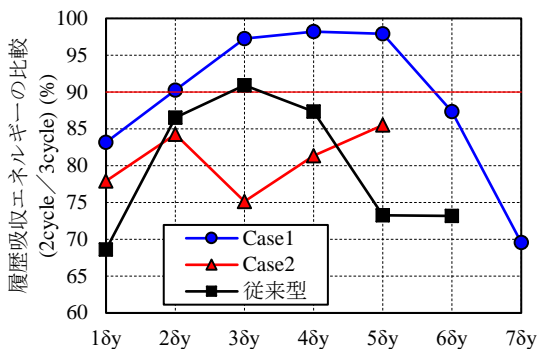


図-9 各塑性率における履歴吸収エネルギー比較

された。以上より、従来型に比べ、Case1は主鉄筋の座屈が生じにくいと、耐荷性能（耐力・靱性）がより大きいに対し、Case2では早期に座屈が生じることで、負側の耐荷性能が低下する結果となった。塑性率と3cycle目の履歴吸収エネルギーの関係を図-7に示す。Case1では従来型に比べ非常に大きなエネルギーが吸収された。一方、Case2では従来型よりもエネルギー吸収量が小さい。Case2では早期から負側で耐力低下が生じたことや、早期にスリップ性状が生じたことによりエネルギー吸収量が低下したと考えられる。

次に、各塑性率における耐力及び履歴吸収エネルギーの比較を行った。道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編 (H29) (以下、道示 V) によると、限界状態 2 に相当する実験時の状態について、(i)3cycle 繰返しによる最大荷重の残存割合が 85%を下回らないこと、(ii)2cycle 目と 3cycle 目の载荷における履歴吸収エネルギーを比較してエネルギー吸収量の低下が 10%程度以下であること、が目安として示されている。ここで、従来型の試験体は 14 年版の道示 V における終局曲率により設計されているため、ここで(i),(ii)の目安はあくまでも参考値として以下の図中に示した。まず、各塑性率における 1cycle 目の最大荷重に対する 3cycle 目の最大荷重の残存割合を図-8に示す。载荷を終了するまではどのケースにおいても 85%を下回っていない。次に、各塑性率における 2cycle 目の履歴吸収エネルギーに対する 3cycle 目の履歴吸収エネルギーの割合を図-9に示す。従来型では 3 δ yにおいてわずかに 90%を超えたが、4 δ y以降は 90%以下となっている。一方、Case1では 3,4,5 δ yで 90%以上となっており、Case2ではすべての靱性率において 90%を下回っている。以上より、Case1は繰返し荷重によるエネルギー吸収能力の低下が従来型よりも生じづらいことが確認された。

3.2. 鋼材のひずみ

鉄筋、隅角部補強鋼板、接続部平鋼のひずみ測定位置を図-10に示す。また各ひずみと制御変位の関係を図-11に示す。図中では、各塑性率の最大荷重時におけるひずみをプロットで示しており、正を引張ひずみとしている。主鉄筋及び隅角部補強ユニットを構成する鋼材の降伏ひずみはそれぞれ、1989 μ 、1575 μ である。側壁外側主鉄筋のひずみ (OR1 および OR2) に着目すると、Case1では負の変位（負荷）に伴い正のひずみが増加していることが確認できる。しかし、Case2ではCase1と比較するとひずみがかなり小さく、主鉄筋が引張力を伝達していないことが確認された。これはCase2で負側の最大荷重が低下したことや、エネルギー吸収量が小さいことと整合している。また、側壁外側の主鉄筋に力が伝達されていない原因として、側壁外側の接続部のコンクリートの損傷が激しかったことから、主鉄筋の定着に問題が

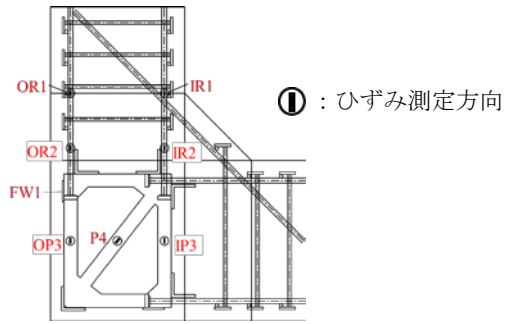
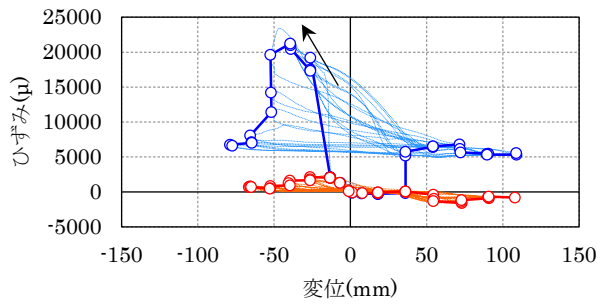
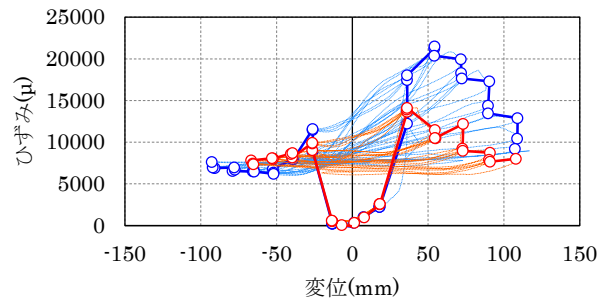


図-10 ひずみ測定位置

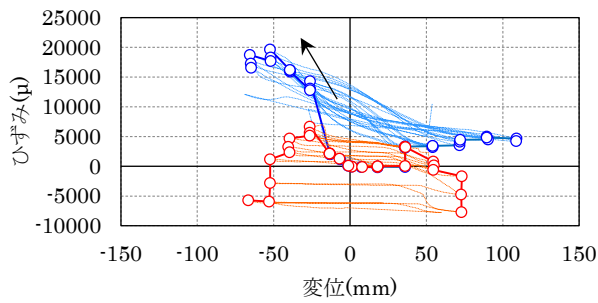
生じたと考えられる。さらに、Case2 では Case1 と異なり、側壁外側接続部平鋼のひずみ (FW1) が大きく増加し、 $-3\delta y-1$ で降伏ひずみに達している。目視でも当該の平鋼が外側にはらみ出すように大きく変形していたことから、平鋼の降伏により接続部周りのコンクリートの拘束が弱まったため、繰返し载荷により接続部周りのコンクリートの損傷が進み、主鉄筋の定着性能が低下したも



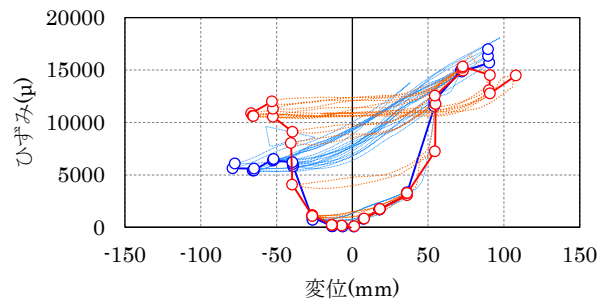
OR1 (主鉄筋 側壁外側 ハンチ上)



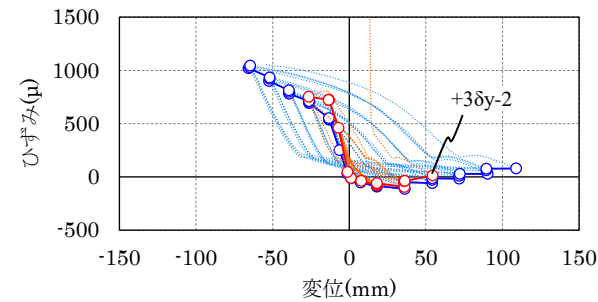
IR1 (主鉄筋 側壁内側 ハンチ上)



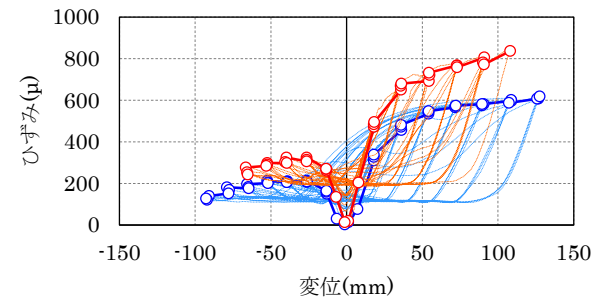
OR2 (主鉄筋 側壁外側 ハンチ下)



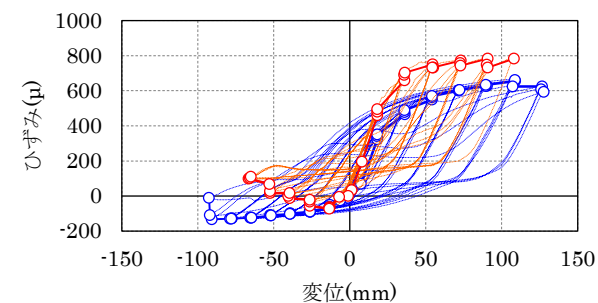
IR2 (主鉄筋 側壁内側 ハンチ下)



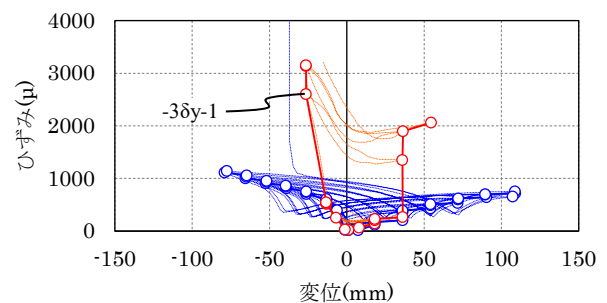
OP3 (隅角部補強鋼板 側壁外側)



IP3 (隅角部補強鋼板 側壁内側)



P4 (隅角部補強鋼板 斜め部)



FW1 (接続部平鋼)

—○— Case1 —●— Case2 (点線は各 Case のひずみの全データ)

図-11 鋼材のひずみ

のと思われる。Case2 は Case1 に比べて隅角部補強鋼板の間隔が広く、隅角部補強鋼板間の平鋼に作用する曲げモーメントがより大きかったことも予想される。これにより、接続部平鋼による鉄筋接続部周りのコンクリートの拘束が重要であり、接続部平鋼の適切な設計が必要であることが明らかになった。また、Case1 で接続部に問題が生じなかったことから、接続部補強鋼板の間隔や平鋼の曲げ剛性により、接続部の機械式定着及びコンクリートの拘束の程度を制御することが可能であると思われる。一方、接続部山形鋼のひずみは降伏ひずみ内に収まったため、本実験では十分な寸法及び強度であったものと思われるが、接続部平鋼同様に主鉄筋の接続に対して設計が必要であると考えられる。側壁内側の主鉄筋ひずみは Case1 と Case2 でおおむね同様の傾向を示しており、側壁内側の主鉄筋の接続部には問題がないことが確認できた。また、隅角部補強鋼板のひずみのうち、側壁内側の IP3、斜め部 P4 については Case1, Case2 で同様の傾向が確認できた。隅角部補強鋼板の側壁外側のひずみ OP3 は、Case2 の +3 δ y-2 で測定値エラーとなり、それ以降の塑性率で Case1 とひずみを比較できなかった。

以上より、Case1 および Case2 の鋼材ひずみの比較から、(1)Case2 の外側主鉄筋の接続部において平鋼が降伏し、接続部周りのコンクリートの拘束が弱まったことで、主鉄筋の定着性能が低下し主鉄筋が力を負担できていないこと、(2)主鉄筋の接続に対して、接続部平鋼及び接続部山形鋼の設計が必要であること、(3)Case1 では接続部の損傷が生じていないことから、コンクリートを拘束することによる曲げモーメントに対して、平鋼や山形鋼が降伏しないような設計をすることで、接続部における機械式定着及びコンクリートの拘束の程度を制御できることが明らかとなった。

4. まとめ

本検討では、隅角部配筋の合理化と隅角部の構造性能の改善を目標として開発された隅角部補強ユニットの耐荷性能について実験的検証を実施した。隅角部補強鋼板

の間隔を実験パラメータとした 2 体と従来型との実験結果の比較から得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 隅角部補強鋼板の間隔が広くなると、接続部平鋼に作用する曲げモーメントが大きくなることで、接続部平鋼が降伏し、接続部周りのコンクリートの拘束が弱まり機械式定着の定着性能が低下した。これにより、部材の耐力やエネルギー吸収量の低下が生じた(Case2)。そのため、軸方向鉄筋の引張力を隅角部補強ユニットに確実に伝達するために、軸方向鉄筋と隅角部補強ユニットと接続部において機械式定着及び定着領域のコンクリートの拘束力を確保する必要がある。拘束の程度は接続部平鋼及び接続部山形鋼を、適切に設計することで制御が可能であると考えられる。すなわち、コンクリートを拘束することによる曲げモーメントに対して、平鋼や山形鋼が降伏しないように設計すればよいと考えられる。
- (2) 接続部における定着及び拘束が機能している場合 (Case1)、従来型よりもエネルギー吸収量が多く、隅角部のひび割れも抑制された。

今後は、拘束力に着目した機械式定着と隅角部補強ユニットの接続性能を明らかにする必要がある。

参考文献

- 1) 猪口泰彦, 高倉克彦: 鉄筋ユニットブロックによる隅角部配筋の省力化, 大成建設技術センター報, 第 49 号, 2016.
- 2) 渡部孝彦, 猪口泰彦, 高倉克彦, 村田裕志: 鉄筋ユニットブロックを配した RC ボックスカルバート隅角部の耐荷機構に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, 2017.
- 3) 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, 土木学会第 70 回年次学術講演会, 2015.