

論文 連続繊維シートで補強された RC 部材の付着割裂強度に与える軸力の影響

矢野 琢也*1・角 徹三*2

要旨：連続繊維シートで補強された RC 柱の付着割裂時のせん断耐力に与える軸力の影響および曲げ降伏後に付着割裂破壊する部材の靱性能についてより明確にするために、シート補強比と軸力レベルを実験変数とする RC 柱の正負交番曲げせん断実験を行った。実験の結果、軸力の増加に伴い付着割裂耐力は増加し、シート補強比増による付着割裂の抑止効果も顕著に現れた。また、シート補強した全ての試験体が曲げ降伏後に付着割裂破壊となり、その時の靱性能は建築学会の評価式を満足した。

キーワード：連続繊維シート、付着割裂強度、せん断余裕度、終局塑性率、軸力

1. はじめに

炭素繊維やアラミド繊維といった材料を建築構造材に利用しようとする研究の成果は、1980年代の中頃から発表されている。既存建築物の耐震診断および耐震補強の社会的需要が高くなり、シート状連続繊維補強材による既存建築物の耐震補強技術の研究も進められてきた。シートで補強された RC 部材のせん断補強ならびに付着割裂破壊の抑止効果の設計方法も提案されている。しかしながら、付着割裂破壊時のせん断強度評価式においては軸力の効果に関する項が含まれていない。そこで本研究では RC 柱に釣合破壊以下の軸力を導入し、シートによる付着割裂抑止効果が軸力の有無、大小によって影響を受けるかどうかを実験的に検討した。また、試験体はシート補強により、曲げ降伏

先行となるように計画され、曲げ降伏後の付着割裂破壊時の靱性能にも着目し、日本建築学会で提案されている評価式との適合性についても検討した。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体一覧表を表-1 に、試験体の形状、試験区間断面と連続繊維シート貼付要領を図-1 に示す。試験体は 10 体作成し、連続繊維シート補強量と軸力をパラメーターとした。引張側鉄筋の降伏と圧縮縁コンクリ

表-1 試験体一覧

| 試験体名 | FRPシート 補強比 (%) | 軸力 (kN) | 主筋 | 横補強筋 |
|--------------------------|----------------------|------------|------------------------------|---------------------------|
| | | | 本数-径 | 本数-径 補強比 |
| R・00・00 | 0 | 0 | 8-D19 $p_t=p_c$ =2.21% | 2-D10 @120 pws=0.6% |
| R・00・28 | | 280 | | |
| R・00・56 | | 560 | | |
| R・00・00 ⁽²⁾ ※ | | 0 | | |
| R・16・00 | 0.16 | 0 | | |
| R・16・28 | | 280 | | |
| R・16・56※ | | 560 | | |
| R・32・00※ | 0.32 | 0 | | |
| R・32・28※ | | 280 | | |
| R・32・56 | | 560 | | |

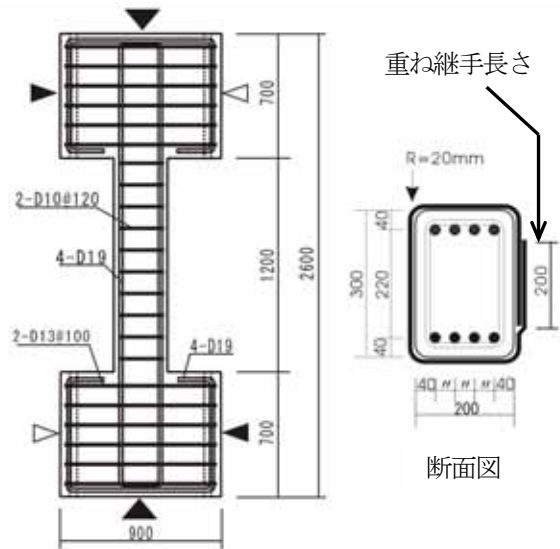


図-1 試験体詳細図

*1 豊橋技術科学大学大学院建設工学専攻 (正会員)

*2 豊橋技術科学大学建設工学系 教授・工博 (正会員)

表-2 コンクリートの力学的性質

| シリーズ | 圧縮強度 (N/mm ²) | 引張強度 (N/mm ²) | 弾性係数 (N/mm ²) | ポアソン比 | 試験体 |
|------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------|-----------------------------------|
| 1 | 34.0 | 3.01 | 2.62×10 ⁴ | 0.20 | R・00・28 R・32・56 |
| 2 | 31.3 | 2.43 | 2.27×10 ⁴ | 0.20 | R・00・00 R・16・00 |
| 3 | 33.2 | 2.85 | 3.11×10 ⁴ | 0.21 | R・00・56 R・16・28 |
| 4 | 39.7 | 2.84 | 2.92×10 ⁴ | 0.20 | R・00・00 ⁽²⁾ R・16・56 |
| 5 | 28.9 | 2.57 | 2.63×10 ⁴ | 0.19 | R・32・00 R・32・28 |

表-3 鉄筋の力学的性質 (N/mm²)

| | 降伏点 | 引張強度 | 弾性係数 |
|-----------|-----|------|----------------------|
| D19(主筋) | 376 | 618 | 1.80×10 ⁵ |
| D10(横補強筋) | 369 | 594 | 1.90×10 ⁵ |

表-4 連続繊維シートの力学的性質

| 項目 | 炭素繊維シート |
|-----------------------------|----------------------|
| 繊維比重 | 1.8 |
| 設計厚さ (mm) | 0.167 |
| 引張強度 (N/mm ²) | 3400 |
| 引張弾性係数 (N/mm ²) | 2.30×10 ⁵ |
| 破断伸び率 (%) | 1.8 |

ートの圧壊が同時に生じるとされる場合の軸力を釣合破壊時の軸力と定義し、釣合破壊時の軸力の 1/3, 2/3 を設定軸力とした。試験区間の部材長さは 1200mm, 断面は 200×300mm²とした。横補強筋は、曲げ破壊および付着割裂破壊に先行するせん断破壊を防止するために十分な量を配した。連続繊維シートは炭素繊維を使用し、試験区間全域に巻き付けた。試験体の呼称を R・16・28 を例にして説明する。下に示すように、「16」は補強比=0.16%, 「28」は軸力=280 kN である。また、R・00・00 の実験は 2 体行ったため、名称を区別した (表-1 および表-5)。

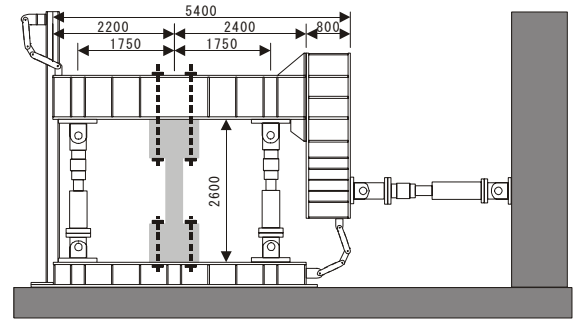
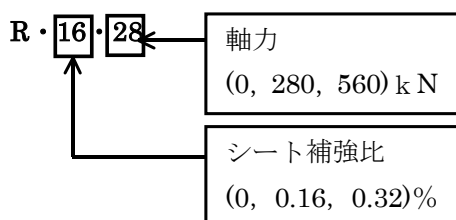
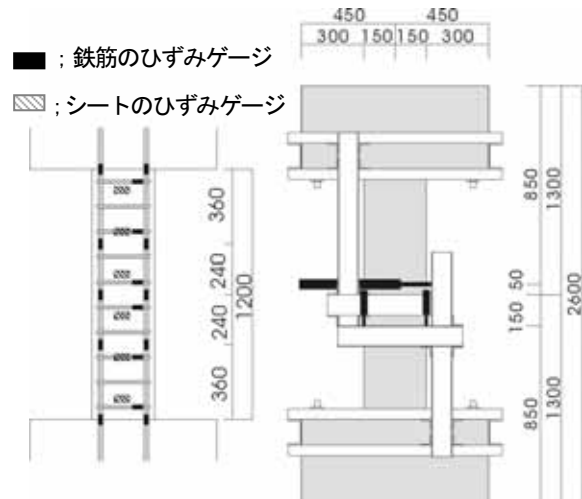


図-2 荷装置



(a) ひずみ測定方法 (b) 柱変位測定方法

図-3 変形測定方法

2.2 使用材料の性質

1) コンクリート

使用したコンクリートの力学的性質を表-2に示す。粗骨材最大粒径は20mm, 目標スランプは18cmである。

2) 鉄筋

使用した鉄筋の力学的性質を表-3に示す。主筋にはD19を, 横補強筋にはD10を用いた。

3) 連続繊維シート

連続繊維シートの力学的性質を表-4に示す。試験区間コーナー部の面取りはR=20mmとし, 継手の重ね長さを200mmとした。

2.3 荷方法

荷装置を図-2に示す。荷は全試験体とも一定軸力の下で, 逆対称正負繰り返し荷を行った。水平力荷は, 曲げ降伏荷重と付着割裂破壊時荷重の計算値のいずれか小さいほうの値に達するまでは1/3, 2/3, 1の順で荷重制御を行い, 以降は変位制御とし, 降伏変位の2倍, 4倍…と2サイクルずつ行った。

表-5 実験結果の概要

| No. | 試験体名 | 計算値(kN) | | | 実験値(kN) | 破壊形式*4 | Qu.exp/Qu.cal | Qu.exp/Qbu.cal |
|-----|--------------------------|-------------------|----------------------|--------------------|---------|--------|---------------|----------------|
| | | 曲げ耐力 Qmu.cal*1 | 付着割裂耐 力 Qbu.cal*2 | せん断耐力 Qsu.cal*3 | Qu.exp | | | |
| 1 | R・00・00 | 166.5 | 186.5 | 205.8 | 115.5 | B | 0.69 | 0.62 |
| 2 | R・00・28 | 214.8 | 195.1 | 209.4 | 143.0 | B | 0.67 | 0.73 |
| 3 | R・00・56 | 243.6 | 192.8 | 208.4 | 168.5 | B | 0.69 | 0.87 |
| 4 | R・00・00 ⁽²⁾ ※ | 168.0 | 212.8 | 216.5 | 165.0 | F→B | 0.98 | 0.78 |
| 5 | R・16・00 | 166.5 | 211.3 | 330.2 | 165.5 | F→B | 0.99 | 0.78 |
| 6 | R・16・28 | 214.5 | 218.4 | 340.8 | 208.0 | F→B | 0.97 | 0.95 |
| 7 | R・16・56※ | 260.7 | 240.8 | 371.6 | 231.0 | F→B | 0.89 | 0.96 |
| 8 | R・32・00※ | 164.8 | 204.7 | 338.5 | 180.0 | F→B | 1.09 | 0.88 |
| 9 | R・32・28※ | 212.8 | 204.7 | 338.5 | 200.5 | F→B | 0.94 | 0.98 |
| 10 | R・32・56 | 244.8 | 223.9 | 368.8 | 230.0 | F→B | 0.94 | 1.03 |

*1：終局強度型設計指針¹⁾による曲げ耐力時のせん断力 *2：FRP 施工指針²⁾による付着割裂破壊時せん断力

*3：FRP 施工指針²⁾によるせん断終局耐力 *4：B=付着割裂破壊・F→B=曲げ降伏先行後付着割裂破壊

※；主筋の歪ゲージの貼付数を半減した試験体

2.4 計測方法

主筋、横補強筋の歪度測定のためのゲージ位置を図-3に示す。試験区間の部材変位は図-3に示す計測フレーム変位計を取り付け、フレーム間の水平変位、鉛直変位を測定した。主筋の歪ゲージは、表-5の※印のない試験体では120mm間隔で貼付したが、過度の貼付による付着性状の劣化が認められたので、※印のある試験体では図-3に示すように、鉄筋降伏の確認、付着応力度の算定に必要な最低限量にとどめた。

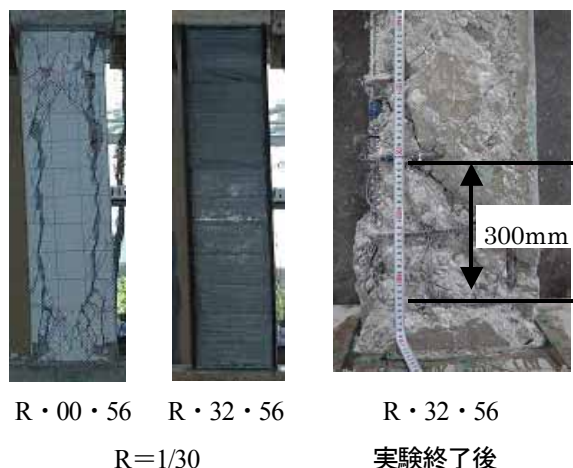


図-4 破壊状況

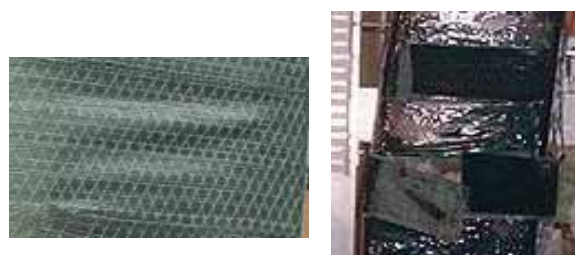
3. 実験結果

3.1 概要

表-5に実験結果の概要を示す。シート補強した試験体はいずれも主筋の降伏が先行し、最終的には付着割裂破壊に至った。試験区間は連続繊維シートで覆われているため付着割裂ひび割れは確認できなかったが、実験終了後にシートを剥して試験体を確認したところ、主筋位置でのコンクリートが剥落しており、最終的には付着割裂破壊を呈したと推定できた。シート補強をしない試験体であるR・00・00、R・00・28、R・00・56の最大せん断力は曲げ耐力計算値の70%となった。

3.2 ひび割れ・シートの損傷・破壊状況

図-4にR・00・56とR・32・56のR=1/30の破壊状況を、図-5にシートの損傷状況を示す。R・00・56では、最大せん断力直前にせん断ひび割れ、付着ひび割れが発生し、付着割裂破壊となった。R・32・56では、



(a) シートの浮き上がり (R・32・56) (b) 重ね継手の剥離 (R・16・56)

図-5 シートの損傷状況

柱頭付近にシートの浮き上がりを確認した。R=1/30の時点では耐力低下・付着割裂強度の低下はなかった。R・32・56の実験終了後にシートをはがしたところ、一部のかぶりコンクリートが付着ひび割れに沿って剥

がれ落ち、また、柱頭・柱脚部から 300mm の区間で大きなせん断ひび割れを確認した。補強試験体は最大せん断力以降において、試験区間のコーナー部においてシートが繊維方向沿いに裂けていることが確認された。実験が終了するまでシートが破断することがなかったが、繊維方向に大きく裂けた。

3.3 せん断力一部材変形角関係

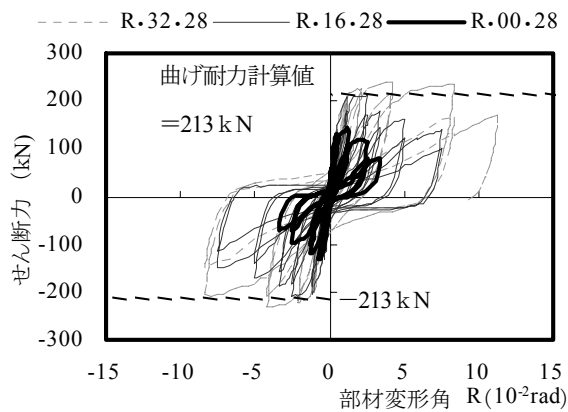
図-6 にせん断力一部材変形角関係を示す。同一軸力下においては、シートの有無に関わらず初期剛性は同一の挙動を示しており、シート補強による影響はほとんど見られない。これに対し、最大せん断力は 50% 程度の耐力上昇がみられる。R・00・00, R・00・28, R・00・56 では付着耐力計算値を大幅に下回った。歪ゲージを 120mm 間隔で貼付したことによる付着性状の劣化が、その一因と思われる。図-6(a) より、シート補強することによって靱性能が向上する効果が顕著にあらわれている。また、主筋降伏後の耐力低下の度合い

をみると、補強量が大きくなるほど緩やかである。

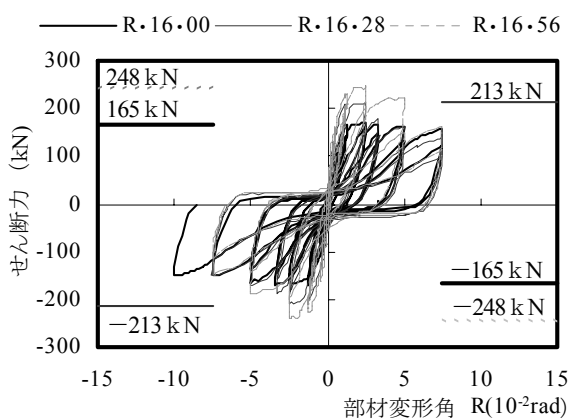
図-6(b) より、軸力が作用することによる最大耐力の上昇が確認できた。また、鉄筋降伏後に耐力低下しているが、軸力が大きいほどその度合いが著しいことが確認できる。R・16・56 では最大耐力の約 60% の耐力低下が見られたが、軸力のないシート補強された試験体である R・16・00 は大幅な低下は見られなかった。

3.4 鉛直変位一部材変形角関係

図-7 に 280 kN と 0.16% の鉛直変位一部材変形角関係をそれぞれ示す。いずれの試験体も最大耐力に達するまでの間は V 字型となる。最大耐力以降の挙動は逆 V 字型になっており、部材変形角の増大に伴って鉛直変位が縮む方向に大きくなっている。同図(a) ではせん断力ゼロから最大せん断力までの間の軸変形量がシート補強量によって異なることが示された。同図(b) では軸力が增大すると鉛直変位が負（縮み）の方向にシフトしていることが示されている。

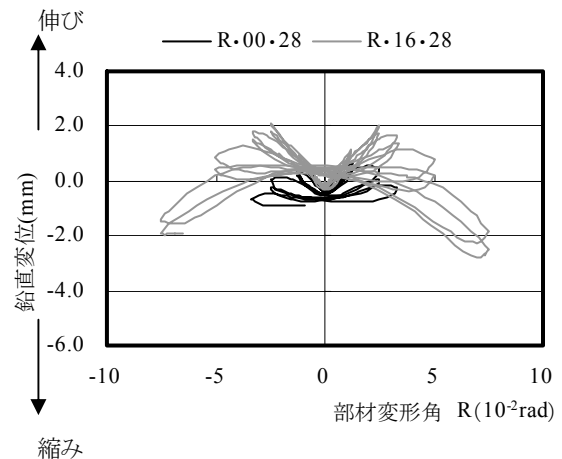


(a) 軸力=280 kN

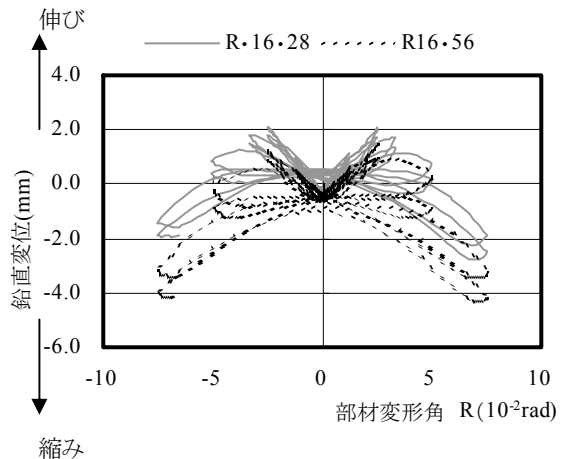


(b) 補強比=0.16%

図-6 せん断力一部材変形角関係



(a) 軸力=280 kN



(b) 補強比=0.16%

図-7 鉛直変位一部材変形角関係

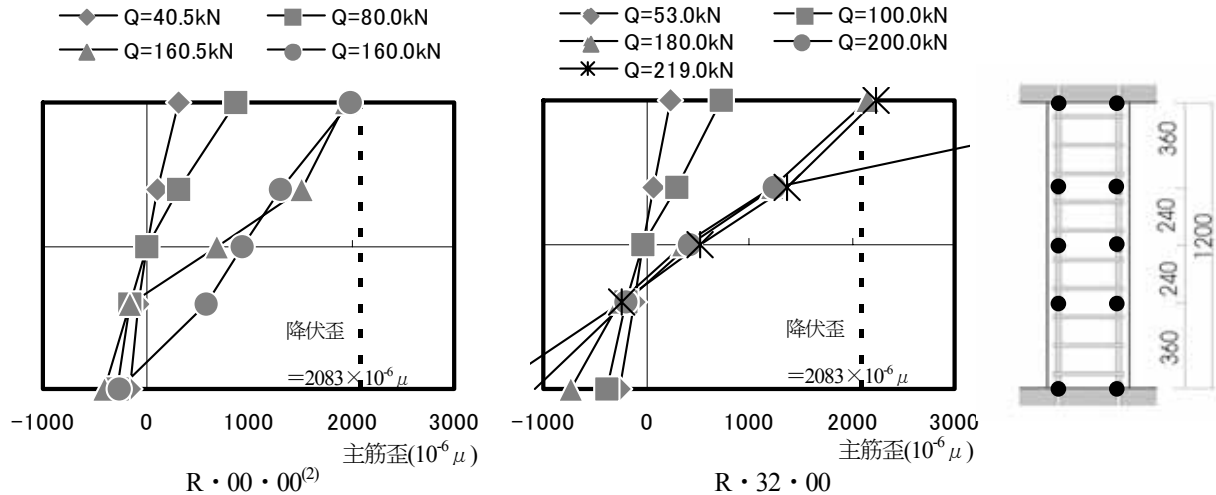


図-8 主筋の歪分布

3.5 主筋の歪分布

図-8 に R・00・00⁽²⁾, R・32・00 の主筋歪分布を示す。主筋歪分布は正載荷時における、計算値の 1/3, 2/3, 1 の到達時 (◆, ■, ▲印) と主筋降伏時の部材変形角の 2 倍, 4 倍 (●, *印) の場合について示している。鉄筋降伏時の柱中央の歪が引張側に増加しているため、テンションシフトが生じていると判断できる。R・00・00⁽²⁾ は付着割裂が生じた後も中央の歪は増加しているが、R・32・00 はほとんど変化していない。

曲げ耐力到達時における主筋歪分布の形状は、柱中央の範囲で付着勾配が一定になっており、曲げ降伏に達するまでの主筋歪勾配は全ての試験体において上昇している。曲げ降伏後についてみると、R・00・00⁽²⁾ は付着割裂破壊が生じた後に主筋歪勾配の低下が顕著となり、付着劣化を生じていることが認められる。R・32・00 では、曲げ降伏後の主筋歪勾配は曲げ降伏時のそれと比較すると低下しておらず、ほぼ同じ形状を示しており、シート補強によって付着強度が確保されていることが示された。

3.6 シートの歪分布

図-9 に曲げ降伏時の連続繊維シート歪の分布を示す。いずれの試験体も柱頭のシートの損傷は比較的小さい結果となった。R・16・28, R・32・28 を比べると、柱頭を除く位置では 2 倍以上の差が生じたため、シート補強量が多いほどシートの負担が少なくなっていることが確認できた。また、軸力の有無についてみると、軸力が作用した場合のシート歪のほうが大きく、軸力の大小によっても、若干ではあるが歪の違いが生じて

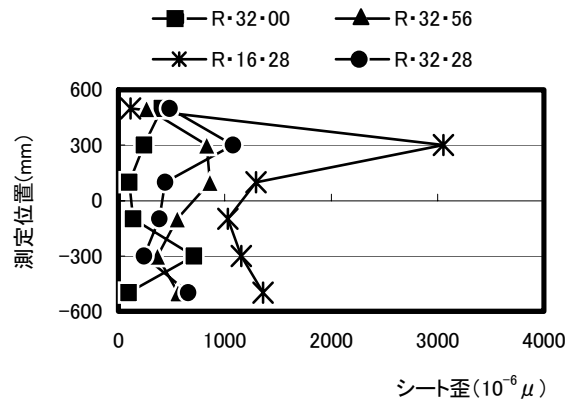


図-9 シートの歪分布

いる。したがって、軸力が増加するとシート歪も増加することが確認できた。

3.7 付着割裂耐力の検討

図-10 に部材耐力実験値と付着割裂耐力計算値を曲げ耐力計算値で除したグラフを示す。R・00・00, R・00・28, R・00・56 はゲージ貼付過多のため耐力が低下したものと想定し、ゲージを減らした R・00・00⁽²⁾ の付着割裂耐力の実験値を基準に補正を行った。破線枠内の点は補正前の数値を示している。シート補強した試験体の実験値は、ほぼ計算値の線上にプロットされている。軸力が増加すると、曲げ耐力計算値も増加する。しかし、軸力作用時では、付着割裂破壊が先行する傾向にある。そのため、軸力が増加するほど、実験値が減少する傾向にある。補強比別にみると、横軸にばらつきが生じている。これは付着割裂耐力が同じであるのに対して、曲げ耐力計算値が軸力によって増減するためである。

3.8 付着割裂強度の検討

図-11 に軸力と付着割裂強度の実験値を計算値で除したものの関係を示す。同図より、ほとんどの試験体が付着強度計算値に達していないが、補強比が大きくなるほど計算値に近づいている。また、補強した試験体の付着割裂強度は、どの軸力レベルにおいても、無補強試験体の 1.2~1.4 倍程度となった。無補強試験体の付着割裂強度は軸力の大小に関係なく一定であるのに対して、補強した試験体の付着割裂強度は軸力の増大に伴って付着割裂強度は減少する傾向を示した。

3.9 靱性能の評価

FRP 施工指針²⁾ ではシート補強された RC 部材の靱性能の評価手法として式 (1) を提案している。

$$\mu = 10 \left(\frac{Q_{bu.cal}}{Q_{mu.cal}} - 0.9 \right) \quad \text{ただし, } 1 \leq \mu \leq 5 \quad (1)$$

本式は実験値との適合性の検証によって下限を与える式であることが確認されている。しかし、検証を行った実験データのうち曲げ降伏先行後に付着割裂破壊したもの (図-12 の FB, ○印) は 3 体しかなく、十分に検証されているとは言い難い。式 (1) と本実験結果の関係を図-12 に示す。なお、ここでは FRP 設計施工指針²⁾ から引用した FS・FB のデータと本研究室の過去の実験データもプロットした。また、付着割裂先行破壊した R・00・00, R・00・28, R・00・56 は除いた。図-12 より、いずれの試験体においても式 (1) を満たしており靱性能を確保している。せん断力-部材変形角関係では、軸力作用時における試験体の耐力低下が激しかった。0.16% で比較すると軸力作用の試験体よりも R・16・00 の μ が大きいいため、終局塑性率からも軸力の影響を認めることができる。

4. 結論

- (1) 軸力が大きいほど付着割裂耐力は増加するが、ゲージで測定した主筋の付着応力度は軸力が大きくなるほど減少する
- (2) シート補強によって、曲げ降伏後の靱性能は増大する。
- (3) 曲げ降伏先行後に付着割裂破壊する部材の靱性能の下限値は、ほぼ建築学会の提案式で評価できる。

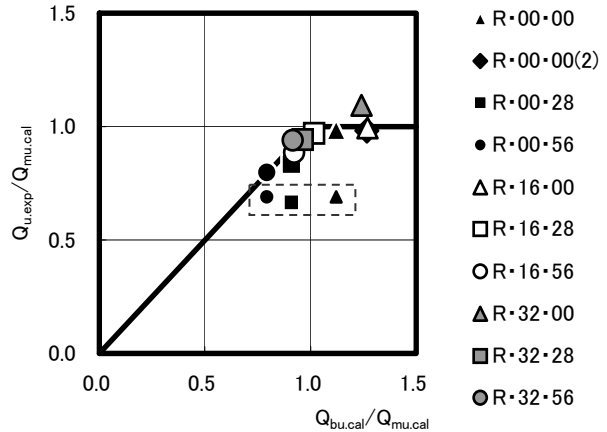


図-10 付着割裂耐力の評価

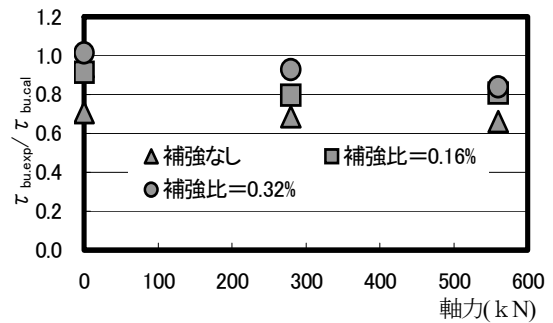


図-11 付着割裂強度の評価

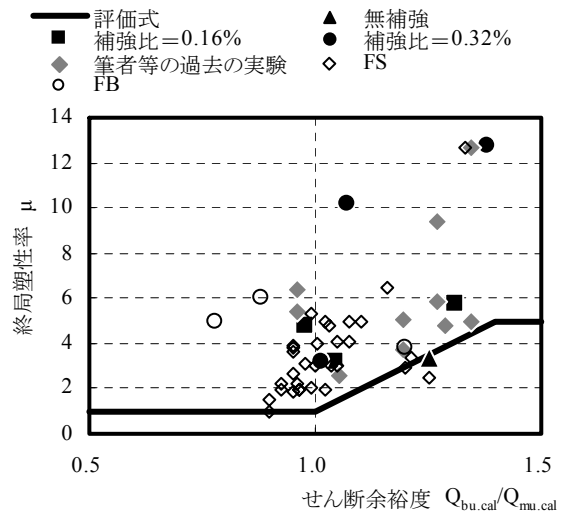


図-12 靱性能の評価

参考文献

- (1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート建物の終局強度型耐震設計指針・同解説，1990
- (2) 日本建築学会：連続繊維補強コンクリート系構造設計施工指針 pp. 288-297, 2002. 2
- (3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説
- (4) 藤井 栄, 森田司郎：異形鉄筋の付着割裂強度に関する研究 第2報 付着割裂強度算定式の提案, 日本建築学会論文報告集, 第 324 号, 1983. 2, pp.44-53
- (5) 松野一成, 河野 進, 角 徹三：連続繊維シートによる RC 部材の付着割裂強度増大効果 第1報 付着割裂強度式の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 548 号, 2001. 10, pp95-100