

論文 アラミド繊維で補強したRC柱の三次元ひずみと内部ひび割れ

ルクマン^{*1}・市之瀬 敏勝^{*2}・武田 三弘^{*3}・大塚 浩司^{*4}

要旨: アラミド繊維で補強した鉄筋コンクリート柱がせん断破壊する時の最大耐力前・後の変形と内部ひび割れ性状について考察し、せん断伝達機構のメカニズムを把握する実験を行った。載荷終了後に造影剤を注入し、X線造影撮影を行って内部ひび割れを観察した。アラミド繊維の補強量が多いほど柱断面の中心とアラミド繊維付近の内部ひずみの差が大きくなった。主圧縮ひずみは、特に柱断面の四隅において顕著であった。また、内部ひび割れはアラミド繊維近傍において細かく均等に発生していた。このことから、高補強試験体では、アラミド繊維近傍でトラス機構が強く働いていることが分かった。

キーワード: アラミド繊維, せん断補強量, せん断ひび割れ, X線造影撮影, 主圧縮ひずみ分布

1. はじめに

現在、高層鉄筋コンクリート建物では、高強度せん断補強筋が多用されており、既存建物の柱においても、炭素繊維、アラミド繊維などの高強度材料がせん断補強のために使用されている。しかし、高強度材料がせん断補強のために多用される中、コンクリートに生じる内部ひび割れおよびせん断伝達機構のメカニズムの関係についてはまだ解明されていない。

筆者らは、昨年度、最大耐力前のアラミド繊維を施した試験体の内部ひび割れについて検討を行った。その結果、アラミド繊維で補強した試験体の内部ひび割れは、特に引張主筋の周辺からアラミド繊維近傍で細かく複雑であった。さらに、X線造影撮影によって微細なひび割れが引張主筋から放射状に発生していることが確認できた¹⁾。

そこで本論では、最大耐力前・後の変形と内部ひび割れ性状について考察し、せん断伝達機構のメカニズムを把握することを目的とした。

2. 実験概要

2.1 試験体形状

試験体は、せん断補強量が異なる3種類の試験体をそれぞれ2体ずつ、合計6体を製作した。全試験体ともせん断破壊が先行するように計画した。使用した試験体概要を図-1(a)~(c)に示す。主筋は、X線造影撮影に備えて炭素繊維強化プラスチック(以下をCFRPとする)ロッドφ20を使用し、横補強筋は用いていない。また、主筋定着のためCFRPロッドの先端に鋼管φ51を設けた。CFRPロッドおよびコンクリートの材料特性を表-1、表-2に示す。

2.2 試験体の補強方法および算定強度

試験体SLは低補強として、図-1(b)に示す通り幅40mmのアラミド繊維AK10を20mmの隙間を空けて全周補強した。試験体SM, SHは、中・高補強として

表-1 CFRPの材料特性

| 引張強度 (N/mm ²) | 弾性係数 (N/mm ²) |
|---------------------------|---------------------------|
| 1.1x10 ³ | 1.9x10 ⁵ |

表-2 コンクリートの材料特性

| 圧縮強度 (N/mm ²) | 弾性係数 (N/mm ²) | 最大寸法 (mm) | 材齢 (日) |
|---------------------------|---------------------------|-----------|--------|
| 19.3 | 2.5x10 ⁴ | 20 | 25 |

表-3 アラミド繊維の材料特性

| 繊維名 | 引張強度 (N/mm ²) | 弾性係数 (N/mm ²) | 設計厚さ (mm) |
|------|---------------------------|---------------------------|-----------|
| AK10 | 2670 | 1.3x10 ⁵ | 0.05 |
| AK40 | 2670 | | 0.19 |
| AK90 | 2800 | | 0.43 |

表-4 強度計算値と実験値

| 試験体 | アラミド補強パターン | P _{nf} (%) | せん断強度 (kN) | | 曲げ強度 (kN) | 最大荷重 (kN) |
|--------|------------|---------------------|--------------------|--------------------|-----------|-----------|
| | | | 算定式1 ²⁾ | 算定式2 ³⁾ | | |
| SL-A,B | AK10@60 | 0.03 | 50 | 99 | 579 | 152 |
| SM-A,B | AK40@60 | 0.1 | 121 | 119 | | 152 |
| SH-A,B | AK90@60 | 0.2 | 208 | 139 | | 210 |

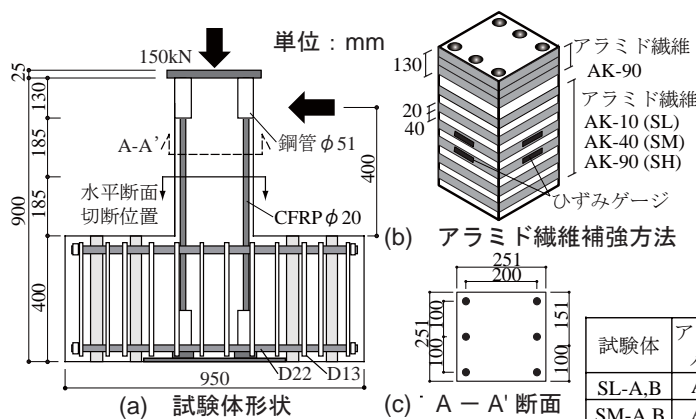


図-1 試験体の概要

*1 名古屋工業大学大学院 博士前期課程社会工学専攻 (正会員)

*2 名古屋工業大学 工学部建築・デザイン工学科教授 工博 (正会員)

*3 東北学院大学 工学部環境土木工学科准教授 博士 (工学) (正会員)

*4 東北学院大学 工学部教授 工博 (正会員)

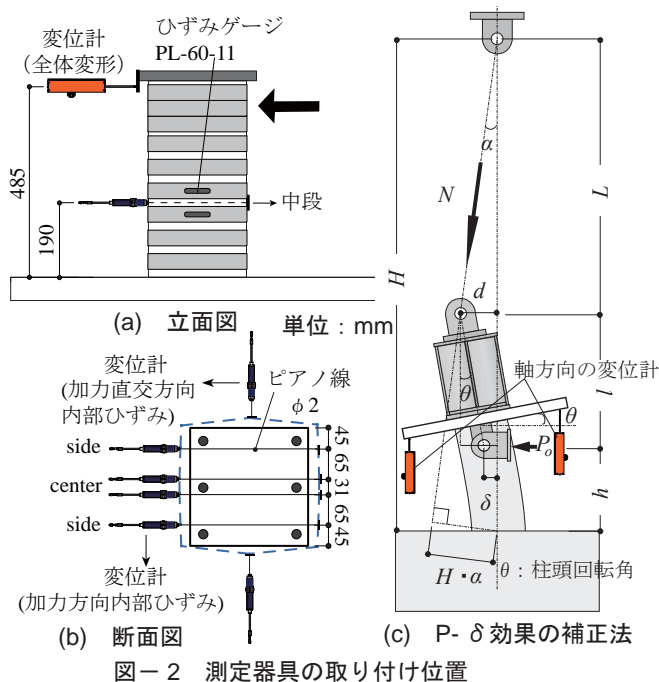


図-2 測定器具の取り付け位置

アラミド繊維 AK40, AK90 を試験体 SL と同様に用いた。なお、主筋定着部での破壊を防ぐために全試験体ともアラミド繊維 AK90 で柱上部を補強した。アラミド繊維の材料特性を表-3 に示す。また、試験体の強度計算値を表-4 に示す。表中の算定式 1 および 2 は、それぞれ文献²⁾³⁾による算定式である。

2.3 荷重方法および測定方法

荷重は、150kN の一定軸力下において単調荷重とした。ここで、最大耐力前の 90% で荷重を終了した試験体名を S○-A とし、最大耐力後まで荷重を行った試験体名を S○-B とした。

中段におけるアラミド繊維のひずみを測定するため、図-2(a)のように、柱脚より 3 本目のアラミド繊維に検長 60mm のひずみゲージを貼り付けた。なお、図-2(a)における柱の正面方向とその裏面方向を合わせて加力方向、それ以外の 2 面がなす方向を加力直交方向とした。試験体は、図-2(b)に青い破線で示すように膨らむことが予想されるので、加力方向に貫通させたピアノ線を介して取り付けられた変位計で変形量を測定した。また、プレートを用いて試験体に接着したピアノ線を介して変位計を取り付け、加力直交方向の変形量を測定した。さらに、試験体の上部にアルミアングルを介して柱頭の回転角を測定した。

3. 水平荷重-変形関係

荷重-変形関係を図-3 に示す。なお、図中の右下に示すグラフは、元のグラフを全体変形 5~10mm 付近で拡大したものである。水平荷重 P は、試験体の変形による影響を考慮し、次式 (1) で補正した。

$$P = P_0 + \frac{N \cdot H \cdot \alpha}{h} = P_0 + \frac{N \cdot H}{h} \times \frac{l \sin \theta + \delta}{L} \quad (1)$$

P_0 : 水平力 N : 軸力 δ : 全体変形

H, a, h, l, θ, L は図-2(c) に示す値とする。

試験体の初期剛性は、全試験体ともほぼ同じであった。初期せん断ひび割れ(シートの隙間で確認)は、概ね 80~90kN で発生し、試験体 SL-B のみ 110kN で発生した。せん断補強量が多いほどひび割れ発生時の荷重低下が小さかった。また、試験体 SL-B は、補強量が少ないにも関わらず、試験体 SM-B より最大荷重が大きかった。

試験体 SL-B, SM-B は最大変形直前のステップでアラミド繊維が破断して終局し、試験体 SH-B は最大耐力の 90% まで耐力が低下した時点で荷重を終了した。

4. 試験体の変形状態

4.1 ひずみ-変形関係

中段におけるひずみ ϵ_x -変形関係を試験体別に比較したグラフを図-4 に示す。center のひずみは、中段に各 4 体取り付けられた変位計のうち内側 2 体の測定値の平均を柱せい 251mm で除した値である。一方、side のひずみは、外側 2 体の変位計を用いて同様に求めた値である。また、アラミド繊維下 2 段の加力方向のひずみゲージ計 4 体の測定値の平均がアラミド繊維ひずみの値である。

試験体 SL-B では、center, side, aramid のひずみに大差がないのに対して試験体 SL-A では、center, side と aramid とのひずみの差が見られた。また、試験体 SM-B, SH-B では、せん断補強量が多いほど center, side と aramid とのひずみの差が大きくなった。これにより、アラミド繊維のせん断補強によって柱断面が樽型に変形していることが確認できた。

試験体 SL-B, SM-B では 6 層全てのアラミド繊維が破断し、試験体 SH-B では一部が破断した。しかし、繊維に貼り付けたひずみゲージの値の急激な増加は、最終ステップ付近で見られていない。また、破断したアラミド繊維は試験体 SL-A の 2ヶ所がせん断ひび割れ上で破断したのを除いて、全て柱の角で破断した。すなわち、

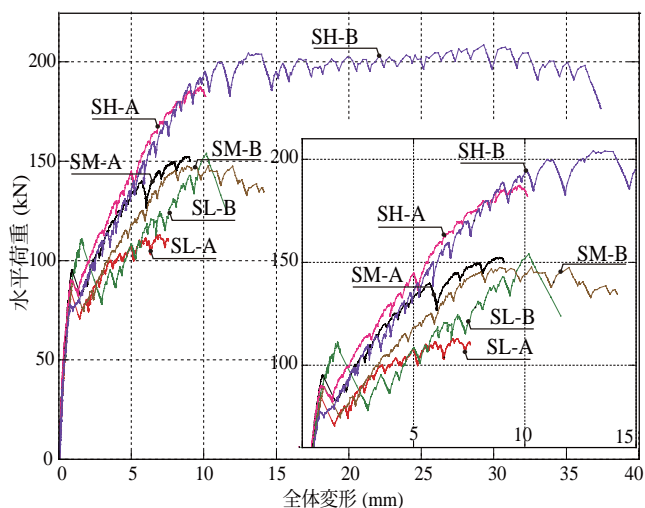


図-3 水平荷重-変形関係

柱が樽型に変形したことで柱の角が直角から鈍角に変形し、エポキシ樹脂により柱に付着しているアラミド繊維に亀裂が入り、破断の原因の一つになったと考えられる。

4.2 モールのひずみ円

モールのひずみ円を描くため、全体変形角 R から曲げ変形角 θ (図-2(c) 参照) を差し引いた残りをせん断変形成分 γ_{xz} と定義する。そして、図-4 に青い破線で示したステップの各種ひずみの値を用いて作成した。

中段におけるモールのひずみ円を図-5 に示す。試験体 SL-B ではすべてのモールのひずみ円がほぼ一致した。

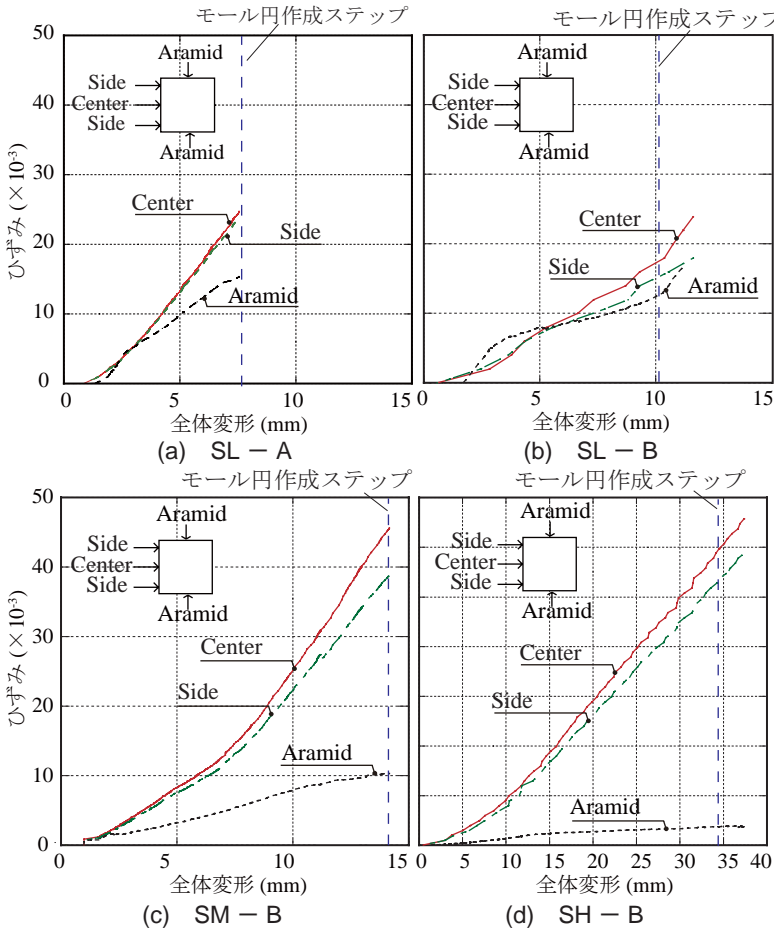


図-4 中段におけるひずみ ε_x - 全体変形 (試験体別)

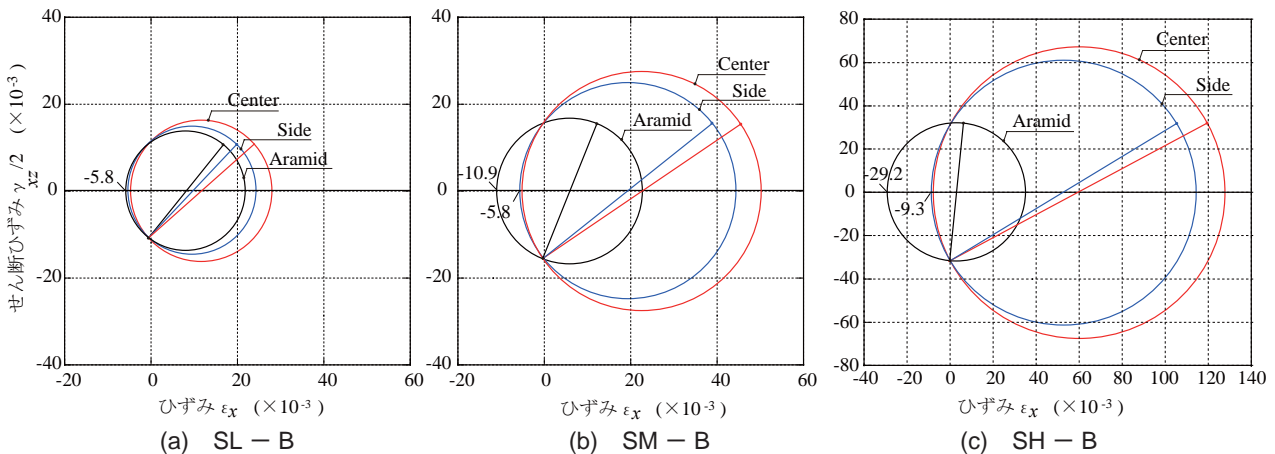


図-5 中段におけるモールのひずみ円 (最大変形直前ステップ)

一方、試験体 SM-B, SH-B の center, side での圧縮ひずみはほぼゼロで, aramid での圧縮ひずみが大きくなった。

4.3 二次元主ひずみ方向

二次元主ひずみ方向を描くため、柱の水平断面形に相当するモデル図-6(a) を用いて柱中心を固定、各辺の中心点をローラー支持と仮定した。節点 A の X 方向の変位 u_A , Y 方向の変位 v_A は、次式 (2) のように計算する。

$$\left. \begin{aligned} u_A &= \frac{\varepsilon_{AC} + \varepsilon_{MO}}{2} \cdot \overline{AB} \\ v_A &= \varepsilon_{AM} \cdot \overline{AG} \end{aligned} \right\} (2)$$

ここで、 ε_{AC} , ε_{MO} はそれぞれ AC 間, MO 間のひずみとする。また、 \overline{AB} は AB 間の距離 (=126mm) とする。

B 点, D 点の変位は、次式 (3), (4) による。

$$\left. \begin{aligned} u_B &= 0 \\ v_B &= \varepsilon_{BN} \cdot \overline{BH} \end{aligned} \right\} (3)$$

$$\left. \begin{aligned} u_D &= \frac{\varepsilon_{DF} + \varepsilon_{JL}}{2} \cdot \overline{DE} \\ v_D &= \varepsilon_{AM} \cdot \overline{DG} \end{aligned} \right\} (4)$$

他の節点の変位も同様な方法で求めた。

以上の方法より、図-6(a) のモデルにおける各節点の変形の値を算出し、有限要素法の四角形要素モデルを用いてそれぞれの主ひずみを算出した。

中段における二次元主ひずみ方向を図-7 に示す。ここで、図中に示した点線は、はらみ出し量を 10 倍に拡大したものとした。ただし、試験体 SH-B では倍率を 5 倍とした。

試験体 SL-B について、X 軸方向に対する主ひずみの角度は試験体 SL-A より小さく、樽型の変形がほとんど見られなかった。また、全断面で主圧縮ひずみはほとんど見ら

れなかった。

試験体 SM-B, SH-B では、特に柱の四隅において主圧縮ひずみが大きくなっており、柱断面が全体に膨らんでいることが分かった。また、断面の四隅では、対角線方向に主圧縮ひずみが見られた。この傾向は、特に補強量の大きい試験体ほど顕著であった。四隅以外では、主圧縮ひずみは確認できなかった。

4.4 三次元主圧縮ひずみ分布

トラス機構による斜め圧縮ひずみを調べるため、三次元主圧縮ひずみ分布を考える。図-6(a)の変形に加えて、X-Z方向（柱の鉛直断面方向）の曲げ-せん断変形を考慮するため、図-6(b)に示した高さ dz のモデルを用い

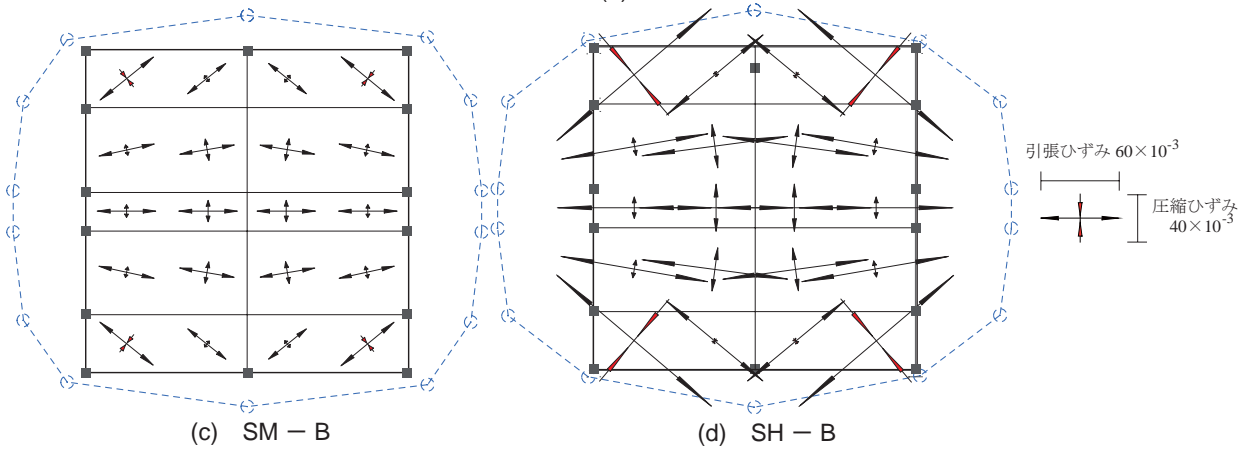
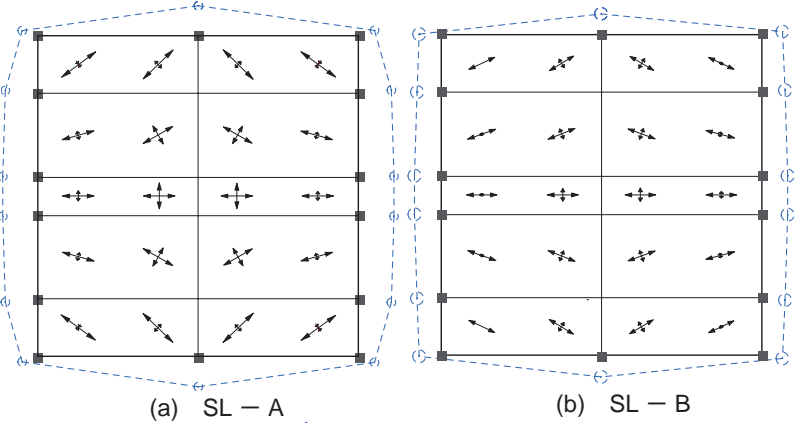
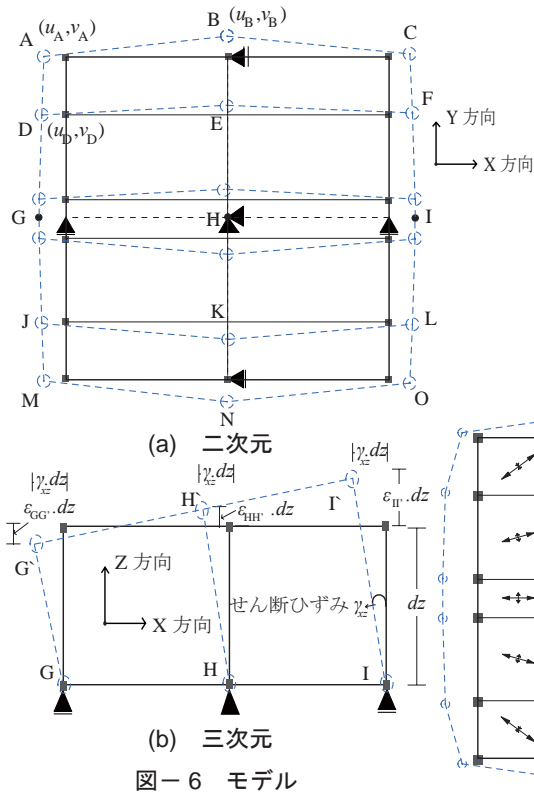


図-7 中段における二次元主ひずみ方向

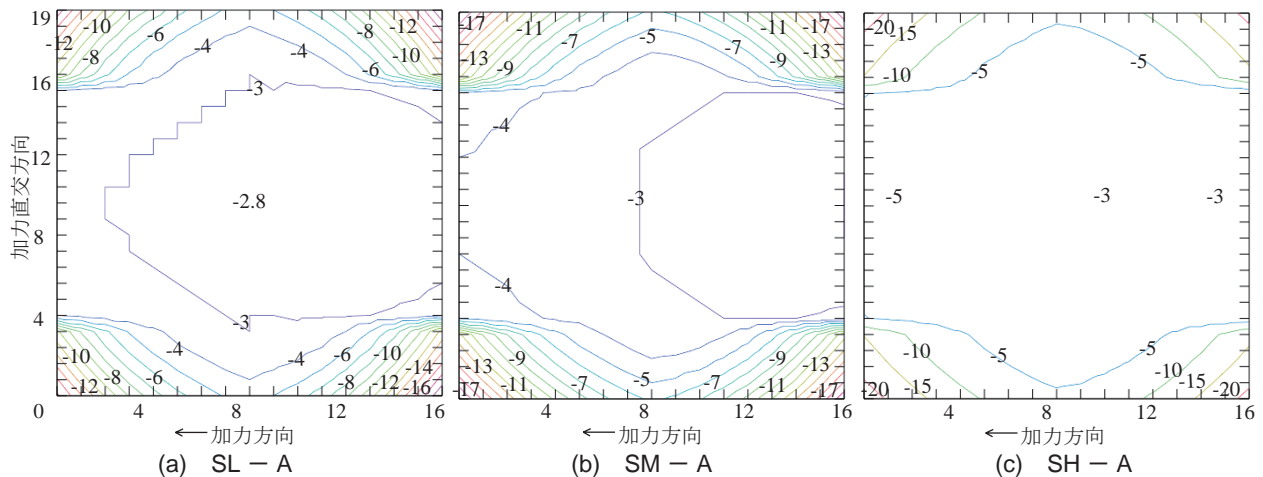


図-8 中段における最大耐力前の主圧縮ひずみ分布

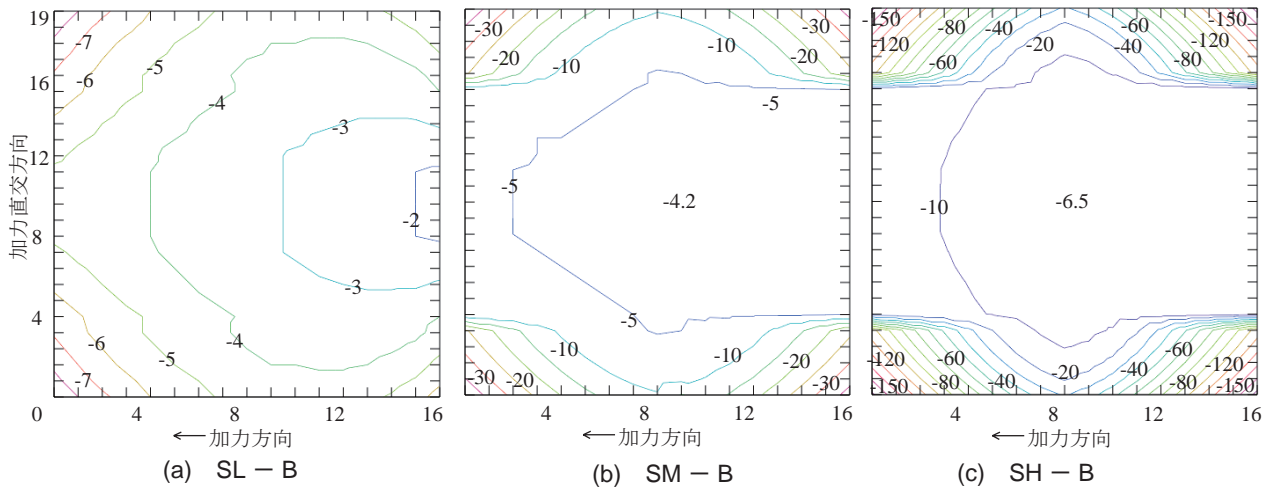


図-9 中段における最大変形直前の主圧縮ひずみ分布

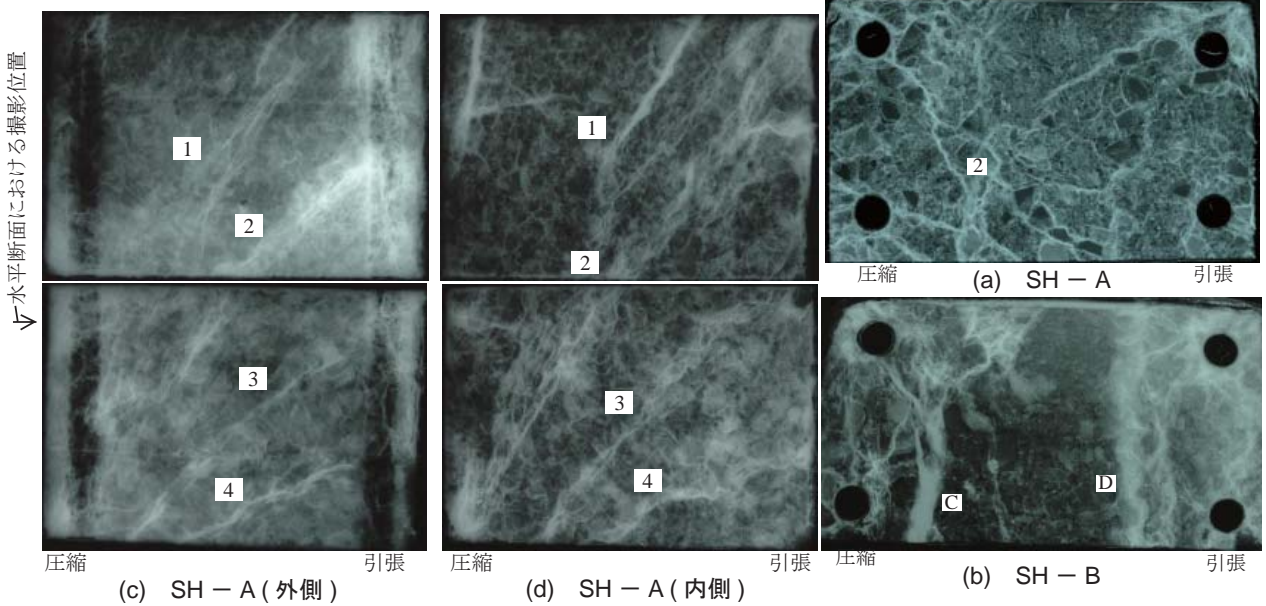
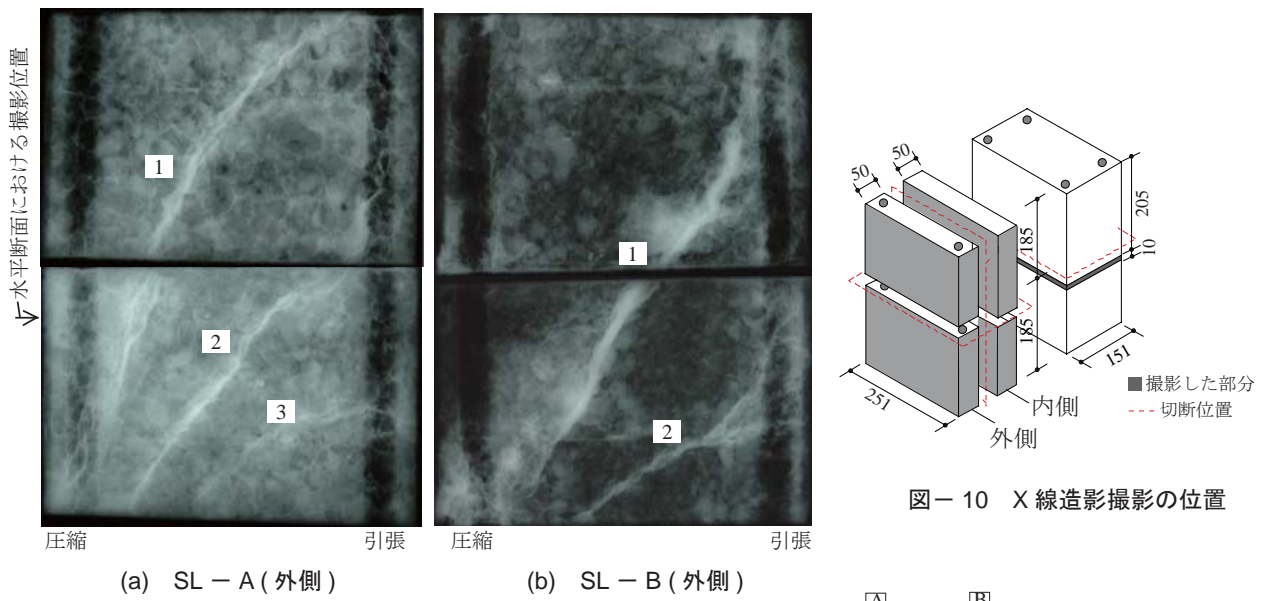


図-11 中段における鉛直方向の内部ひび割れ

図-12 中段における水平方向の内部ひび割れ

る。まず、下面 GHI における X, Y, Z 方向の変位をゼロとし、上面 G' の X 方向変位は、せん断ひずみ $\gamma_{xz}=R-\theta$ にモデルの高さ dz を乗じた値とした。そして、Z 方向の変位は、図-2(c) に示した上下方向の変位計の値から試験体左・右面での平均ひずみ $\varepsilon_{GG'}$ および $\varepsilon_{II'}$ を求め、これにモデルの高さ dz に乗じた値とした。これ以外の節点の X-Z 方向変位も同様に定めた。

以上の方法より求めた X-Z 方向変位に図-6(a) の変形を加え、有限要素法の直方体要素モデルを用いてそれぞれの主ひずみを算出した。

中段における最大耐力前の主圧縮ひずみ分布を図-8 に示す。全試験体とも断面中心から断面の四隅に近づくに伴い主圧縮ひずみが増加した。試験体 SL-A は、試験体 SM-A の主圧縮ひずみと同程度であった。また、試験体 SH-A は他の試験体に比べ主圧縮ひずみが大きかった。

中段における最大変形直前の主圧縮ひずみ分布を図-9 に示す。試験体 SL-B では、主圧縮ひずみが全断面に同程度の値を示した。また、試験体 SL-B は試験体 SL-A より全体変形が大きいにも関わらず、断面の四隅において約半分以下の主圧縮ひずみの差が見られた。試験体 SM-B, SH-B では、断面の四隅において主圧縮ひずみが顕著であった。これは図-5(b), (c) に示す値と対応していることから、せん断補強量が多いほどアラミド繊維近傍でトラス機構が強く働いていることが確認できた。

5. 内部ひび割れの X 線造影撮影

載荷終了後に補修剤に金属微粉末を加え、補修性能と造影性能を持つ造影補修剤を発生したひび割れに注入し、硬化後図-1(c), 図-10 に示した位置で試験体を切断した。185mm × 251mm × 50mm の鉛直断面のスライスおよび 251mm × 151mm × 10mm の水平断面のスライスを作った。X 線造影撮影の条件は文献⁴⁾と同様である。ここで、より鮮明な微細なひび割れを得るために再度造影剤に浸漬させてから X 線造影撮影を行った。

試験体 SL-A, SL-B の鉛直断面(外側)の内部ひび割れを図-11(a), (b) に示す。試験体 SL-A では、図中 1 ~ 3 に示す 3 本のせん断ひび割れが入っていた。1 のせん断ひび割れは弧を描くような形状を示した。また、圧縮主筋の近傍の微細なひび割れは広く発生していた。一方、試験体 SL-B では、図中 1, 2 に示す 2 本のせん断ひび割れが入っており、図中 2 のひび割れは直線状であった。圧縮主筋の近傍の微細なひび割れは少なかった。

試験体 SH-A の鉛直断面の外側と内側の内部ひび割れを図-11(c), (d) に示す。両側とも図中 1 ~ 4 のせん断ひび割れが見られたが、外側のせん断ひび割れは、内側より細かく、枝分かれが広く均等に発生していた。これは、図-8(c) に示した主圧縮ひずみが外側で大きかったことと対応した。

中段における試験体 SH-A の水平断面の内部ひび割れを図-12(a) に示す。試験体 SH-A では、引張・圧縮主筋から放射状に広がるひび割れが鮮明に表れていた。また、内側の図中 2 のひび割れが外側での A-B 間に広がっていることが分かった。

中段における試験体 SH-B の水平断面の内部ひび割れを図-12(b) に示す。試験体 SH-B では、主筋からアラミド繊維近傍で微細なひび割れが広く発生していた。また、図中 C, D のひび割れが柱側面まで達せず細分化していることが分かった。この様子から柱側面付近のコンクリートが圧縮破壊したことに繋がると考えられる。

4. まとめ

- (1) せん断補強量が多いほど柱断面の中心とアラミド繊維近傍の内部ひずみの差が大きくなった。このことから、アラミド繊維のせん断補強によって断面が樽型に変形していることが確認できた。また、これが原因となってアラミド繊維が柱の角で破断したと考えられる。
- (2) 低補強試験体 ($p_{wy}=0.03\%$) は、補強形式が同一だったにもかかわらず、2 つの試験体の内部ひび割れに大きな違いが見られた。一つの試験体では、断面が樽型の変形をしていた。一方、もう一つの試験体では、樽型の変形がほとんど見られなかった。後者の試験体は、 $p_{wy}=0.1\%$ の試験体より高い耐力を示した。
- (3) 高補強試験体 ($p_{wy}=0.1\%$ 以上) の内部ひび割れは、アラミド繊維近傍で細かく、枝分かれが広く均等に発生していた。また、アラミド繊維近傍(特に柱断面の四隅)において主圧縮ひずみが顕著であった。すなわち、高補強試験体では、アラミド繊維近傍でコンクリートが圧縮破壊していることが分かった。

謝辞

M-1 の松下央雅君と B-4 の吉田和也君には、本実験を行うにあたり全面的な協力をいただきました。心より感謝しています。また、X 線造影撮影の作業にあたり、東北学院大学の武田研究室の M-1 の堤佳亮君、B-4 の宍戸優羅君、持留大君には多大なご協力をいただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) ルクマン, 武田三弘, 大塚浩司, 市之瀬敏勝: アラミド繊維で補強した RC 柱の変形と内部ひび割れ性状, コンクリート工学年次大会, Vol.30, No.3, pp.229-234, 2008
- 2) AF 工法研究会: AF 工法設計・施工指針, 2007
- 3) 日本建築防災協会: 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準
- 4) 武田三弘, 大塚浩司: X 線造影によるコンクリートの劣化と凍結融解抵抗性の判定, 土木学会論文集 E, Vol.62, No.4, pp.728-738, 2006.11