

# 論文 短スパンRC・SFRC梁に関する実験的研究

櫻井 智清\*1・朱 星鍵\*1・平田 延明\*2・石川 裕次\*3

**要旨:** 本研究では、主に超高層免震RC造建物で設計される短スパン梁の設計に当たって損傷制御を踏まえた構造設計を行う場合に、これまで行われてきた平行配筋短スパンRC梁、X形配筋短スパンRC梁に加えて、コンクリートに鋼繊維を混入した場合に、コンクリートの損傷状態の改善や曲げ降伏後のせん断強度への影響を検討するために、実施設計に準じて6体の試験体を設計し、梁部材実験を実施した。実験結果から、X形配筋の効果に加え、鋼繊維補強コンクリートの適用により、試験区間のひび割れ分散効果による梁部材の損傷制御が可能である実験結果が得られた。

**キーワード:** 鉄筋コンクリート構造, 短スパン梁, X形配筋, 鋼繊維補強コンクリート

## 1. はじめに

これまで、短スパン梁（主に、シアスパン比2.0未満）の設計は、1964年アラスカ地震における2つの耐震壁を繋ぐ境界梁の被害事例を鑑み、1970年代にニュージーランドにてT.Paulay教授らによってX形配筋が提案され、その優れた構造性能が実験的研究<sup>1)</sup>によって実証された。我が国では、1990年を前後してチューブ構造（主に耐震構造）を用いた高層RC造建物に短スパン梁を適用するために、せん断応力度の大きい短スパンRC梁の実験的研究<sup>例えば2), 3)</sup>が実施された。現在は、免震構造の超高層化が進められており、せん断応力度が相対的に小さい短スパン梁の実験的研究も必要となってきた。そこで、本研究では比較的主筋量の少ない短スパン梁（平行配筋およびX形配筋）を対象とし、鋼繊維補強コンクリートの適用による損傷制御を含めた実験的研究を行った。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験目的

本研究の目的は、主として免震構造を想定した超高層RC造建物の短スパン梁（梁主筋：平行配筋およびX形配筋）について、地震時における梁部材の損傷制御を目的とした鋼繊維補強コンクリートの効果、および梁端部開孔を設けた場合の構造性能を検討することである。

### 2.2 試験体

試験体は、約1/2スケールとし、梁主筋引張鉄筋比を0.9%程度とした6体の短スパン梁（M/QD=1.13）である（図-1および表-1参照）。試験体は、まず試験区間を、実験変数に従って、Fc36相当のプレーンコンクリートおよび鋼繊維補強コンクリート打設（横打ち）した。その後、スタブ（非試験区間）をFc60相当のプレーンコンクリートで打設して試験体製作を行った（図-2参照）。

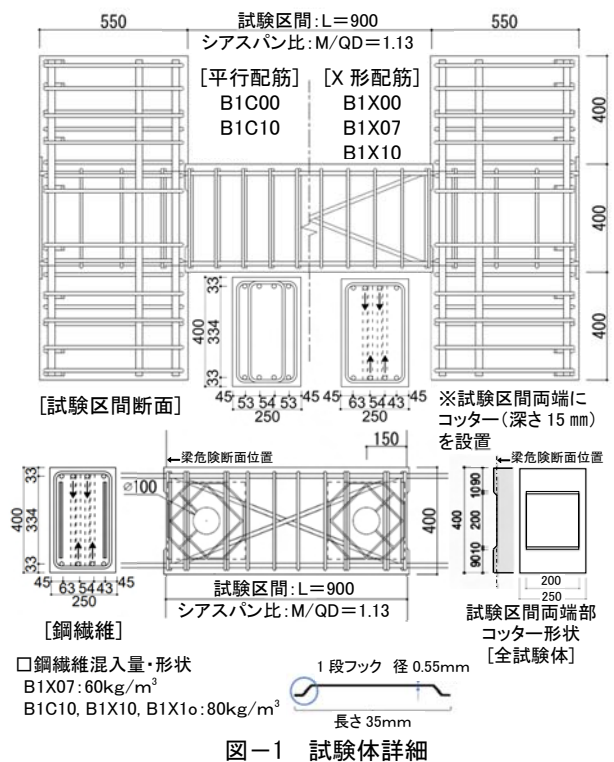


図-1 試験体詳細

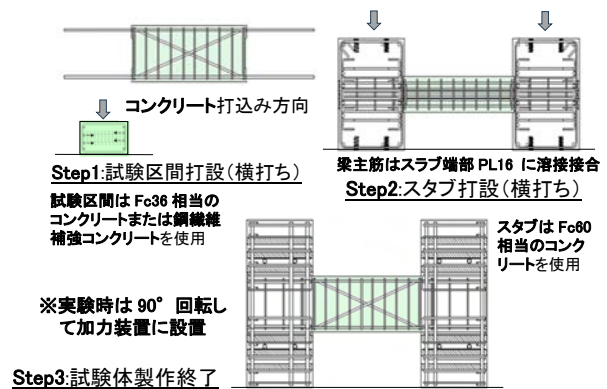


図-2 試験体製作手順

\*1 株式会社 竹中工務店 大阪本店 工修 (正会員)  
 \*2 株式会社長谷工コーポレーション 技術研究所 工博 (正会員)  
 \*3 芝浦工業大学 システム理工学部 環境システム学科 教授 博士 (工学) (正会員)

表-1 試験体諸元一覧

| 試験体   | コンクリート強度<br>上段:試験区間<br>下段:スタブ                          | 鋼繊維混入率<br>$\rho$ [Vol%] | 平行配筋(主筋)<br>引張鉄比:ptc [%]               | X形配筋(主筋)<br>X形引張鉄筋比<br>:ptD [%]            | せん断補強筋<br>せん断補強筋比<br>:pw [%]       | X形配筋(せん断補強筋)<br>換算比<br>:pwo [%]             | 梁貫通孔<br>開孔補強筋 |
|-------|--|-------------------------|--|--|------------------------------------|---|---------------|
| B1C00 | 37.7 [N/mm <sup>2</sup> ]<br>66.4 [N/mm <sup>2</sup> ] | 0.00                    | 4-D16(SD490)<br>ptc=0.87[%]            | ----                                       | 4-D10@100<br>(SD785)<br>pw=1.14[%] | ----  | ----          |
| B1C10 | 35.0 [N/mm <sup>2</sup> ]<br>56.2 [N/mm <sup>2</sup> ] | 1.02                    |  | ----                                       |                                    |   |               |
| B1X00 | 38.7 [N/mm <sup>2</sup> ]<br>66.4 [N/mm <sup>2</sup> ] | 0.00                    | 2-D16(SD490)<br>[平行筋のみ]<br>ptc=0.44[%] | 2-D16(SD490)<br>[X形筋水平方向成分]<br>ptD=0.41[%] | 2-D10@100<br>(SD785)<br>pw=0.57[%] | 2-D16 (SD490)<br>[X形筋鉛直方向成分]<br>pwo=0.33[%] |               |
| B1X07 | 33.1 [N/mm <sup>2</sup> ]<br>65.3 [N/mm <sup>2</sup> ] | 0.75                    |  |  |                                    |   |               |
| B1X10 | 36.8 [N/mm <sup>2</sup> ]<br>65.3 [N/mm <sup>2</sup> ] | 1.02                    |  |  |                                    |   |               |
| B1X1o | 38.5 [N/mm <sup>2</sup> ]<br>56.4 [N/mm <sup>2</sup> ] |                         |  |  |                                    |   |               |

□共通因子 梁断面: B×D=250[mm]×400[mm], シアスパン比: M/QD=1.13 □鋼繊維(両端フック): 鋼繊維長さ: L=35mm, 径:  $\phi$  =0.55mm

□鉄筋降伏強度: (主筋)D16(SD490)  $f_y=528$ [N/mm<sup>2</sup>], (せん断補強筋) D10(SD785)  $f_{wy}=849$ [N/mm<sup>2</sup>], (開孔補強筋) S6(SD785)  $f_{oy}=940$ [N/mm<sup>2</sup>]

### 2.3 実験変数

主な実験変数を以下に示す。

#### (1) 主筋配筋: 平行配筋・X形配筋

M/QD $\approx$ 1.0 短スパン平行配筋梁の場合に、通常の RC 梁と同様な付着設計を行う時に、設計用付着応力度<付着強度を満足できない場合と、X形配筋を行った場合の履歴特性について比較した。

#### (2) 鋼繊維補強コンクリート

コンクリートひび割れ発生時に鋼繊維の架橋効果によってひび割れの分散による部材全体の損傷制御の効果と共に、曲げ降伏後のせん断強度への影響について検討する。なお、鋼繊維混入量は、コンクリート 1m<sup>3</sup>あたりに混入する鋼繊維混入率:  $\rho$  [Vol. %]によって管理する。

#### (3) 鋼繊維混入率 ( $\rho$ )

本研究では、両端フック(径 0.55 mm, 長さ 35 mm, アスペクト比 65)の両端 1 段フックの鋼繊維を使用し、鋼繊維混入率を:  $\rho=0, 0.75, 1.02$  [Vol. %]の 3 変数として設定し、短スパン梁の構造性能への影響を検討した。

#### (4) 短スパン両端の端部領域の開孔の有無

短スパン梁の端部に梁貫通孔が設けられるかを検討した。開孔部周辺のひび割れ防止のため、指定評価機関における技術評価取得済みの開孔補強筋を配筋した。

### 2.4 試験体の設計

全試験体共に、実施設計に準じて試験体の設計を行っており、曲げ降伏先行型の試験体として、「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説」<sup>4)</sup>(以下、靱性指針)のせん断強度式を用いて、曲げ降伏後に塑性回転角  $R_p=1/50$ [rad]前後でせん断破壊するようにせん断補強筋量を定めた。鋼繊維を混入した試験体もプレーンコンクリート試験体と同様に、せん断強度(計算値)を計算した。

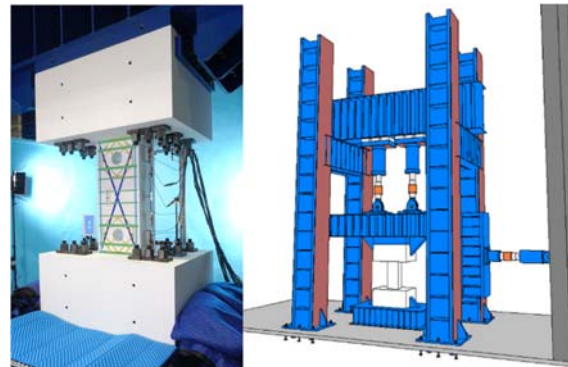


図-3 実験状況・加力装置 (試験体は 90 度回転させ、建研式加力装置を用いて実験を実施)

図-3 実験状況・加力装置

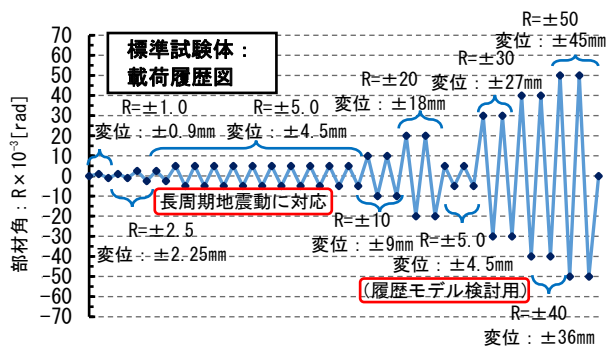
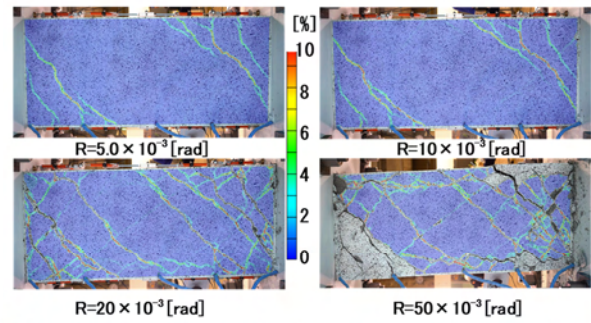
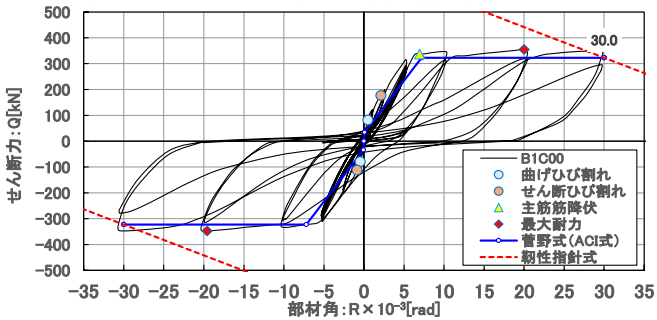
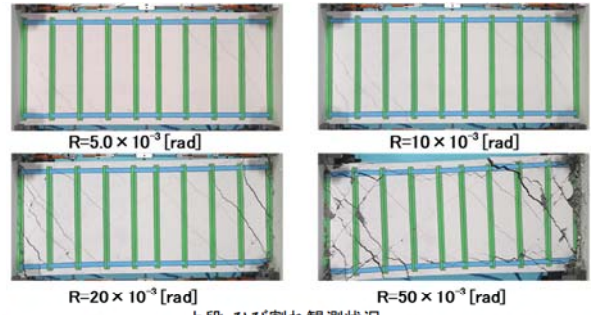
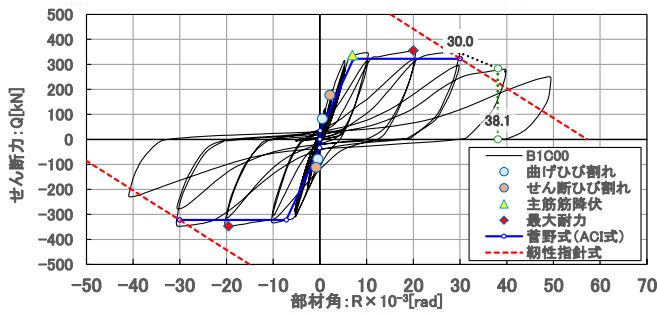


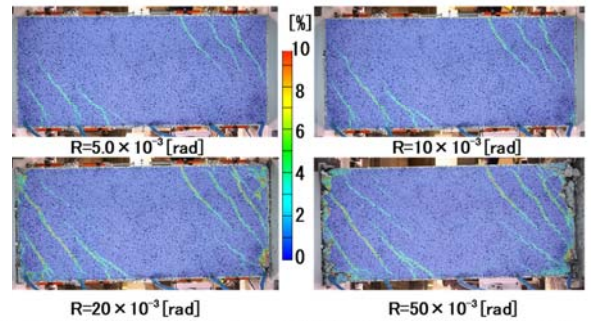
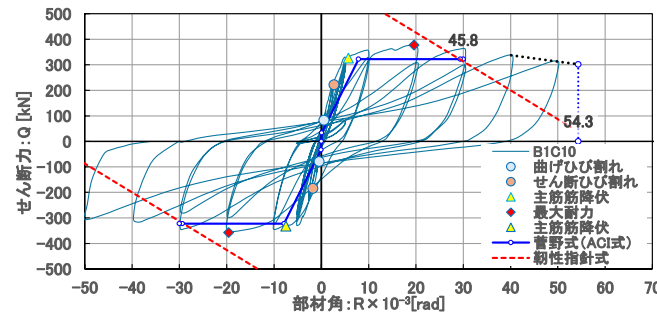
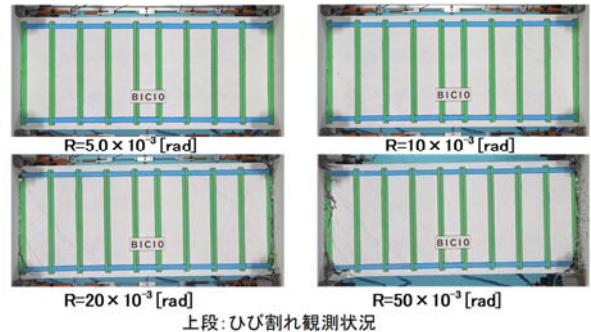
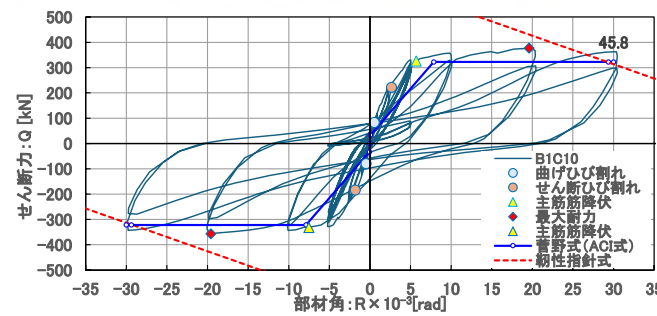
図-4 載荷履歴

### 2.5 加力装置・載荷履歴

加力は地震時の梁部材の応力状態を想定し、加力装置により逆対称モーメント載荷を行った。試験体上部にある 2 本の鉛直方向ジャッキを使用して、加力梁の水平を保ちながら、試験体にせん断力を作用させた(図-3 参照)。載荷履歴は図-4 に示すように部材角  $R=\pm 1.0 \times 10^{-3}$ [rad],  $\pm 2.5 \times 10^{-3}$ [rad]を各 2 回、長周期地震動を想定して  $R=\pm 5 \times 10^{-3}$ [rad]を 10 回正負交番繰返し載荷を行った。 $R=\pm 10.0 \times 10^{-3}$ [rad],  $\pm 20.0 \times 10^{-3}$ [rad]の後には、履歴モデル検討時に必要となる小変形サイクルを行った。



(a) せん断力-部材角関係 上下段:  $R=30 \times 10^{-3}$  [rad], 実験終了時まで (b) 各サイクルピーク時コンクリート損傷状況 下段: 主引張歪み分布  
 図-5 B1C00 試験体 (平行配筋・プレーンコンクリート) の主な実験結果



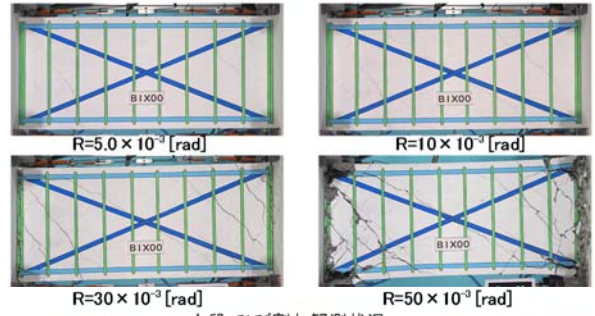
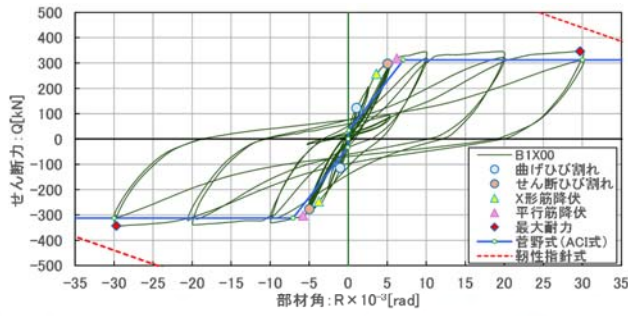
(a) せん断力-部材角関係 上下段:  $R=30 \times 10^{-3}$  [rad], 実験終了時まで (b) 各サイクルピーク時コンクリート損傷状況 下段: 主引張歪み分布  
 図-6 B1C10 試験体 (平行配筋・ $\rho=1.02$  [Vol. %]) の主な実験結果

### 3. 実験結果

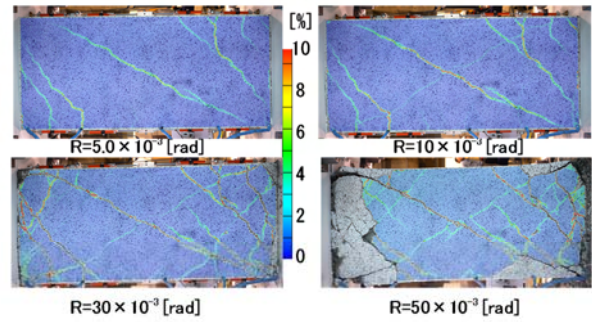
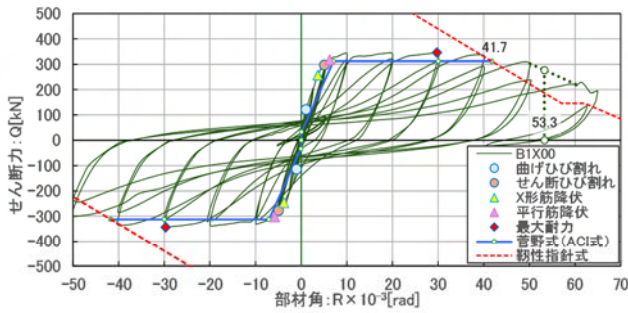
主な実験結果を、図-5から図-10に示す。各図(a)は、せん断力-部材角関係について、実施設計で主に想定する部材角  $R=\pm 30 \times 10^{-3}$  [rad] 時までと、構造実験によって終局状態を確認するために実施した実験終了時までの2つのグラフを明記した。各図には、実験観測データに加え、以下に示す計算値を併記した。

- i) 骨格曲線 (計算値): 第1, 2折れ点は、文献4), 5) に準じて算定した (降伏点剛性は菅野式)。曲げ終局強度 (計算値) は ACI318 式<sup>例えは5)</sup> を適用した。
- ii) 曲げ降伏後のせん断強度 (計算値): 靱性指針式<sup>4)</sup>

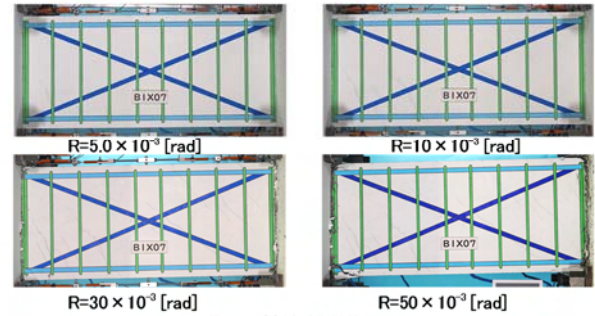
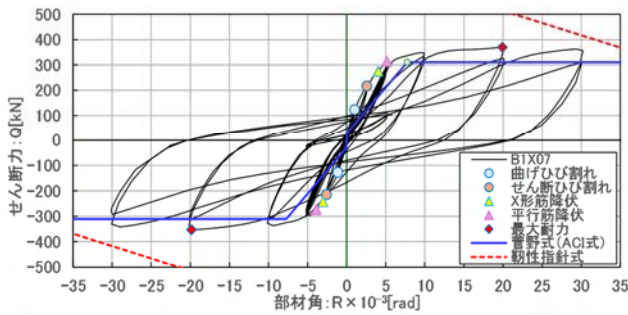
(全試験体共に、プレーンコンクリートとして算定)  
 iii) 限界部材角 (実験値): 保有水平耐力計算規準<sup>5)</sup> に準じて、最大耐力の 80% 耐力点を、各サイクルピーク点から線形補間して算出した (B1C10 のみ外挿値)。  
 各図 (b) に、各サイクルのコンクリート損傷状況として、部材角  $R=5, 10, 30, 50 \times 10^{-3}$  [rad] サイクルピーク時の観測記録写真 (目視観測によって破壊メカニズムを検討し易くするために実験前につや消し白ペンキ塗布後に配筋描写後に実験を実施) および、試験体背面にランダム塗装を行って画像相関法(DIC)によって画像解析した主引張ひずみ分布図 (左右を反転して表示) を示す。



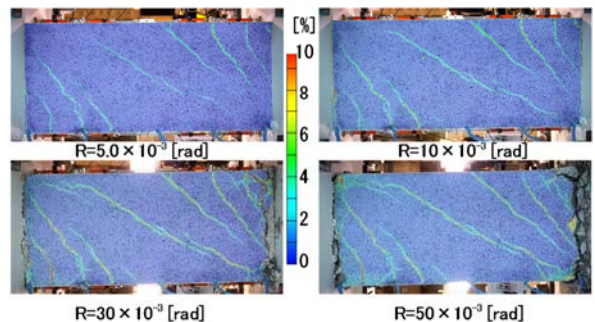
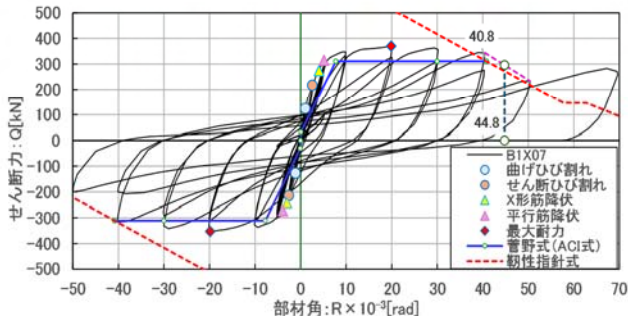
上段：ひび割れ観測状況



(a) せん断力-部材角関係 上下段:  $R=30 \times 10^{-3}$  [rad]. 実験終了時まで (b) 各サイクルピーク時コンクリート損傷状況 下段: 主引張歪み分布  
図-7 B1X00 試験体 (X形配筋・プレーンコンクリート) の主な実験結果



上段：ひび割れ観測状況



(a) せん断力-部材角関係 上下段:  $R=30 \times 10^{-3}$  [rad]. 実験終了時まで (b) 各サイクルピーク時コンクリート損傷状況 下段: 主引張歪み分布  
図-8 B1X07 試験体 (X形配筋・ $\rho=0.75$  [Vol. %]) の主な実験結果

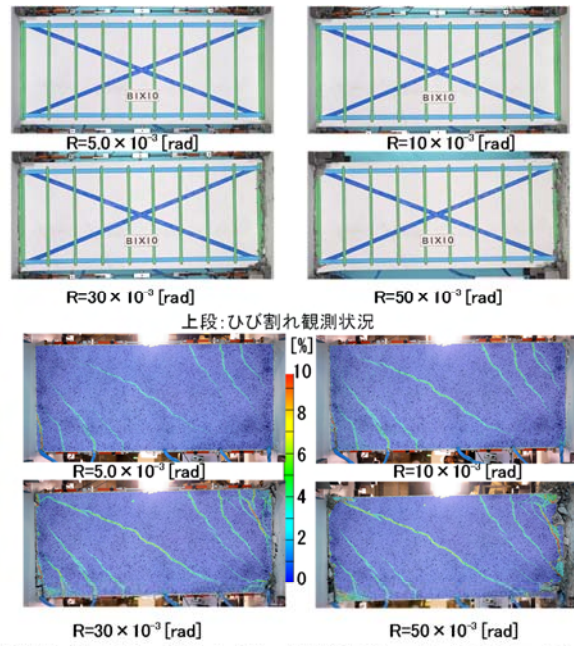
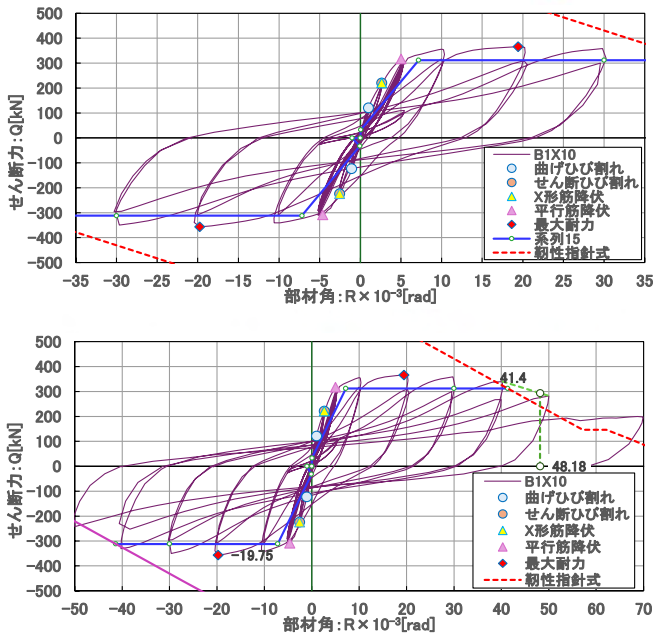
(1) B1C00 試験体の実験結果 (図-5 参照)

B1C00 試験体 (平行配筋 RC 短スパン梁) は、 $R = \pm 5.0 \times 10^{-3}$  [rad]までに、危険断面位置に曲げひび割れ、梁端部に約  $45^\circ$  方向の斜めひび割れが発生した。 $R = \pm 10.0 \times 10^{-3}$  [rad]までに主筋が降伏し、 $R = \pm 20.0 \times 10^{-3}$  [rad]に最大耐力に至った (主筋沿いに斜めひび割れが進展する傾向もみられたが、付着破壊には至らなかった)。 $R = \pm 40.0 \times 10^{-3}$  [rad]には、梁端部において曲げモーメント分布に従った曲げ変形を形成出来ずに、梁端部でのスライディングシア破壊 (端部領域の主筋の塑性化の進展に伴い、端

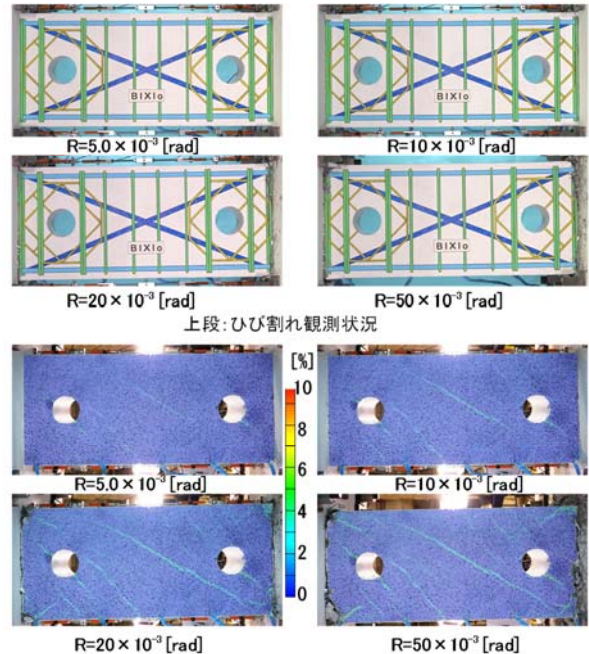
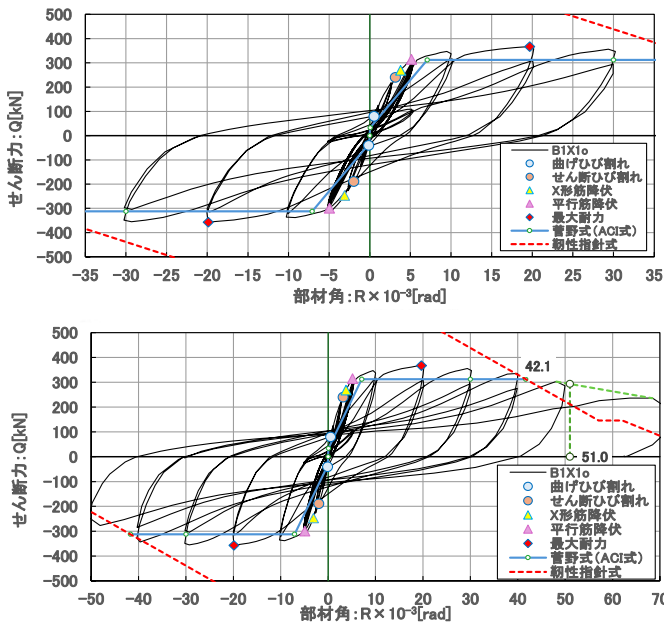
部断面が局部的に平行四辺形に変更する破壊)に移りし、耐力低下と共にスライディングシア破壊 (例えば6) に至った。

(2) B1C10 試験体の実験結果 (図-6 参照)

平行配筋 SFRC 短スパン梁のB1C10試験体は、B1C00試験体と同様に  $R = \pm 5.0 \times 10^{-3}$  [rad]までに、危険断面位置の曲げひび割れ、端部のせん断ひび割れが発生した。但し、そのひび割れ幅は、B1C00に比べて著しく小さかった。 $R = \pm 10.0 \times 10^{-3}$  [rad]サイクルまでに平行主筋およびX筋端部平行部分が降伏したが、スパン中央部ではせん断ひび割れが発生しなかった。 $R = \pm 20.0 \times 10^{-3}$  [rad]に最



(a) せん断力-部材角関係 上下段:  $R=30 \times 10^{-3}$  [rad]. 実験終了時まで (b) 各サイクルピーク時コンクリート損傷状況 下段: 主引張歪み分布  
 図-9 B1X10 試験体 (X形配筋・ $\rho=1.02$  [Vol. %]) の主な実験結果



(a) せん断力-部材角関係 上下段:  $R=30 \times 10^{-3}$  [rad]. 実験終了時まで (b) 各サイクルピーク時コンクリート損傷状況 下段: 主引張歪み分布  
 図-10 B1X10 試験体 (X形配筋・端部有開孔・ $\rho=1.02$  [Vol. %]) の主な実験結果

大耐力を記録した。その後、主な変形は、危険断面位置に集中し、主筋降伏領域がスタブ側 (RC 断面) に進展していく傾向がみられた。 $R = \pm 50.0 \times 10^{-3}$  [rad]には、梁端部においてスライディングシア破壊に移行した。

### (3) B1X00 試験体の実験結果 (図-7 参照)

X形配筋 RC 短スパン梁の B1X00 試験体は、B1C00 試験体と同様に  $R = \pm 5.0 \times 10^{-3}$  [rad]までに、危険断面位置に曲げひび割れ、梁端部に約  $45^\circ$  方向の斜めひび割れに加えて対角線方向の斜めひび割れが発生した。但し、ひび割れ幅は 0.05 mm 程度であった。その後、B1C00 と同様に  $R = \pm 10.0 \times 10^{-3}$  [rad]サイクルまでに主筋が降伏した。

スパン中央付近にもせん断ひび割れが発生した。 $R = \pm 20.0 \times 10^{-3}$  [rad]に最大耐力を記録した。その後、耐力低下には至らなかったが、対角線方向のひび割れ幅が拡大した。最終的に  $R = 65 \times 10^{-3}$  [rad]まで加力を行い、耐力低下と共に梁端部でのスライディングシア破壊の兆候が確認された。

### (4) B1X07 試験体の実験結果 (図-8 参照)

曲げ降伏までのひび割れ発生状況は、B1X00 とほぼ同様であったが、相対的に 1 本のひび割れ幅が小さく、試験区間のひび割れ損傷状況が著しく改善された。その反面、 $R = \pm 10.0 \times 10^{-3}$  [rad]サイクルまでに主筋が降伏した

が、 $R = \pm 30.0 \times 10^{-3} [\text{rad}]$ を超えると、スタブ側に主筋の塑性化の進展も見られ、試験区間は剛体回転して端部危険断面近傍での変形が集中する傾向がみられた。最終的に $R = 70 \times 10^{-3} [\text{rad}]$ まで加力を行い、耐力低下と共に梁端部でのスライディングシア破壊の兆候が確認された。

(5) B1X10 試験体の実験結果 (図-9参照)

曲げ降伏までのひび割れ発生状況は、B1X07 とほぼ同様であった。鋼繊維補強を行うことで、試験区間のひび割れは、大変形においても目視レベルでの確認も難しいレベルまでコンクリートの損傷制御が可能であることが分かった。最終的には、B1X07 と同様に主筋の塑性化がスタブ内に進行して端部に变形が集中し、危険断面近傍にも、コンクリートの損傷も見られ耐力低下に至った。スライディングシア破壊には至らなかった。

(6) B1X1o 試験体の実験結果 (図-10参照)

梁両端部に設備用の開孔(直径:梁成の1/4)を設けた B1X 1o は、ほぼ B1X10 と同様な復元力特性およびコンクリートの損傷状況を示した。端部開孔付近へのひび割れ進展は、図-10に示すように限られており、部材角が増加しても、著しいひび割れ幅の拡大も見られなかった。本実験で確認されたせん断応力度レベルであれば、梁端部に開孔を設けることが可能であることが分かった。

4. 実験結果の検討

4.1 実験結果一覧

曲げ終局強度(正負サイクル平均)および限界部材角(正サイクル)の計算値と実験値の一覧を、表-2に示す。限界部材角の計算値は、靱性指針式<sup>4)</sup>に準じて、曲げ終局強度(計算値)を曲げ降伏後のせん断強度(計算値)を下回った時の部材角として定義した。X形配筋の効果や鋼繊維補強コンクリートの効果を確認した。

4.2 包絡線荷重の比較

平行配筋試験体とX形配筋試験体について、包絡線荷重を比較した結果を、図-11に示す。鋼繊維補強の効果については、平行配筋では、曲げ降伏後の包絡線荷重に違いがあることが確認できた。しかしながら、X形配筋試験体では、梁部材としてのせん断余裕度が十分であったため、明確な違いは見られなかった。

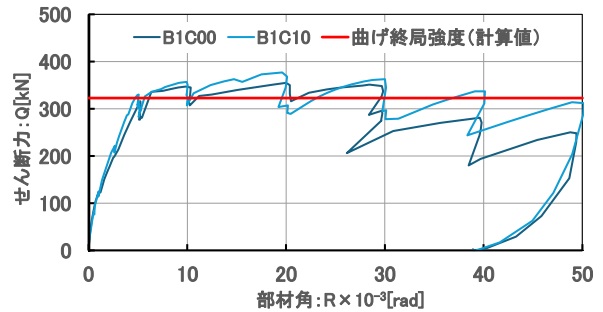
5. まとめ

シアスパン比1.13の短スパン梁について、主筋を平行配筋およびX形配筋とした場合の効果や鋼繊維混入率を変数とした実験を実施し、以下の知見が得られた。

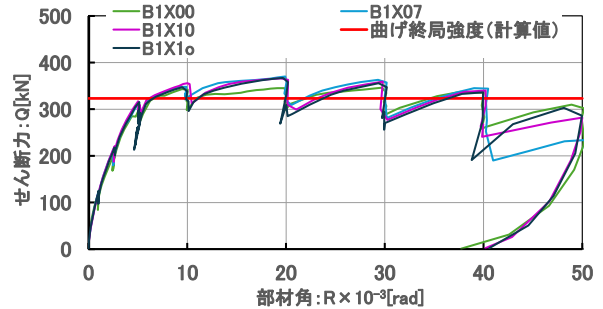
- 1) 平行配筋およびX形配筋短スパン梁において、鋼繊維補強コンクリートは、コンクリートの損傷制御に有効であることを確認した。
- 2) 平行配筋試験体でも変形性能を考慮した設計を行え

表-2 主な実験結果一覧

| 試験体   | 最大耐力(正負平均) |        |        | 限界部材角(正サイクル) |       |       |
|-------|------------|--------|--------|--------------|-------|-------|
|       | 実験値        | 計算値    | exQmu  | 実験値          | 計算値   | exRu  |
|       | exQmu      | calQmu | calQmu | exRu         | calRu | calRu |
| B1C00 | 351.5      | 323    | 1.09   | 38.1         | 30.0  | 1.27  |
| B1C10 | 367.0      | 323    | 1.14   | 54.3         | 45.8  | 1.19  |
| B1X00 | 344.5      | 312    | 1.10   | 53.3         | 41.7  | 1.28  |
| B1X07 | 361.5      | 312    | 1.16   | 44.8         | 40.8  | 1.10  |
| B1X10 | 361.9      | 312    | 1.16   | 48.2         | 41.4  | 1.16  |
| B1X1o | 362.0      | 312    | 1.16   | 51.0         | 42.1  | 1.21  |



(a) 実験変数: 鋼繊維混入率(平行配筋試験体)



(b) 実験変数: 鋼繊維混入率(X形配筋試験体)

図-11 包絡線荷重の比較(実験変数: 鋼繊維混入率)

ば、曲げ降伏先行型の短スパン平行配筋梁の設計も可能であることが分かった。

- 3) 大変形レベル(部材角 $R \geq 40 \times 10^{-3} [\text{rad}]$ )では、梁主筋の塑性化が非試験区間側へも進行した。

参考文献

- 1) T.Paulay and Bull,I.N : Shear effect on Plastic Hinges of Earthquake Resisting Reinforced Concrete Frames, Bulletin D'information132, Committee Euro Inter. du Beton, pp165-172,1979.11
- 2) 鴨川直昌, 中岡章郎, 日高雅樹ほか: X形配筋梁を用いた超高層RC造チューブ架構骨組に関する実験的研究,日本建築学会大会(関東),2001.9,pp245-246
- 3) 石川裕次, 木村秀樹, 長嶋俊雄, 菅野俊介: 短スパンの強度と靱性に関する実験的研究,コンクリート工学年次論文報告集 16(2), pp341-346, 1994.6
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指梁(案)・同解説, 1997.7
- 5) 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, 2021.2
- 6) T.Paulay and M.J.N.Priestley. SEISMIC DESIGN OF REINFORCED CONCRETE and MASONRY BUILDINGS,1992, pp158-362