

高靱性繊維補強セメント複合材料を用いた梁の構造実験

Structural Experiment of Reinforced Beams using Strain-hardening Cementitious Composites

細矢 博* 岸本 剛* 河野政典* 起橋孝徳*

要 旨

近年、高層集合住宅では、プラン計画上の自由度に優れ、かつ居住空間を広く取れるコア壁構造形式の建物の開発が進められている。この高層建物におけるコア壁の連結梁は短スパンであり、地震時には高応力下で大きな変形角を強いられることから、梁に変形性能に優れた高靱性繊維補強セメント複合材料 SHCC (Strain-Hardening Cementitious Composites)を用いることを計画し、実験的にその構造性能を検討した。その結果、SHCC 梁では微細なひび割れが多数発生するものの被りの剥離は無く、損傷は RC 梁に比べ軽微であること、SHCC 梁の Q-R 曲線は $R=1/20\text{rad}$ まで安定した履歴を示し、履歴吸収エネルギーは RC 梁に比べて大きいこと、SHCC 梁の最大曲げ耐力は、既往の諸式で 20~30%程度安全側に評価されること、せん断耐力は、終局強度型耐震設計指針のせん断耐力式を SHCC による引張強度上昇を考慮し修正した式により安全側に概ね精度良く評価できること、などがわかった。

キーワード：高靱性繊維補強セメント複合材料、SHCC、梁、加力実験、構造性能

1. まえがき

近年、高層集合住宅では、プラン計画上の自由度に優れ、かつ居住空間を広く取れる構造形式の開発が求められている。このニーズに応えるべく、ラーメン構造ではなく地震力の大半をコア壁に負担させる図-1に示すような構造形式の建物が増加しつつある。この建物では、コア壁とコア壁を連結する梁は、平面計画上の制約から短スパン梁にならざるを得ない。短スパン梁は、地震時に高応力下で大きな変形角を強いられる。このため、従来のRC梁ではなく、せん断耐力と変形性能に優れ、更にはエネルギー吸収能力にも優れた新材料を用いた高靱性梁を適用する試みが進められている。この背景の下、筆者らは、モルタルに有機繊維PVA (Polyvinyl Alcohol)を混入した高靱性繊維補強セメント複合材料SHCC (Strain-Hardening Cementitious Composites)を用いた短スパン梁の開発を行なっている。本研究では、SHCC梁の構造性能を把握することを目的に、曲げ破壊型とせん断破壊型の梁部材を対象にした加力実験を行ったので報告する。

2. 曲げ破壊型梁部材の加力実験計画

2.1 試験体

試験体の諸元を表-1に、形状・寸法、配筋例を図-

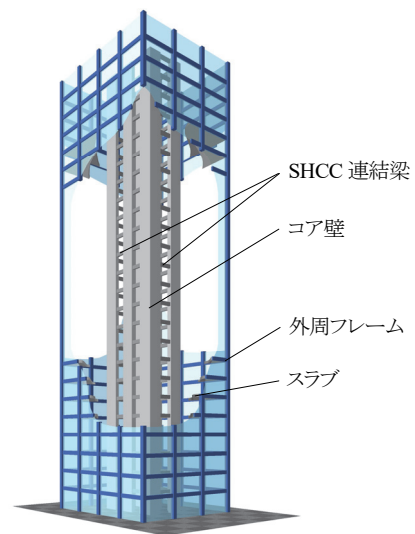


図-1 建物の架構のイメージ

2に示す。試験体は、梁試験区間のコンクリートもしくは SHCC の設計基準強度が $F_c=48\text{N/mm}^2$ と $F_c=30\text{N/mm}^2$ の2シリーズから構成されている。また、両シリーズは基準用の RC 試験体、比較用の X 形配筋 RC 試験体、ならびに開発対象の SHCC 試験体から構成されている。SHCC 試験体は、せん断余裕度を実験因子としている。全ての試験体は、曲げ破壊型に計画されている。

*技術研究所

表-1 曲げ破壊型試験体の諸元

| 試験体 | 設計基準強度 F_c (N/mm ²) | 試験体寸法 | | | シアスパン比 L/2D | 梁主筋 | | 横補強筋 | | |
|-----|-----------------------------------|----------|----------|-----------|-------------|-----------|-------|-----------|-----------|------|
| | | 幅 B (mm) | 成 D (mm) | 長さ L (mm) | | 配筋 | 鋼種 | 配筋 | p_w (%) | 鋼種 |
| M1 | 48 | 320 | 420 | 1260 | 1.5 | 上端筋 | SD490 | 4-D10@120 | SD785 | 0.74 |
| M2 | | | | | | X形RC | | 2-D10@120 | | 0.37 |
| M3 | | | | | | SHCC | | 4-D10@120 | | 0.74 |
| M4 | | | | | | | | 2-D10@120 | | 0.37 |
| M5 | | | | 4-D10@120 | 0.74 | | | | | |
| M6 | RC | 30 | 320 | 380 | 1.5 | 上端筋 | SD390 | SD295 | 4-D10@120 | 0.74 |
| M7 | X形RC | | | | | 2-D10@120 | | | 0.37 | |
| M8 | SHCC | | | | | 4-D10@120 | | | 0.74 | |
| M9 | | | | | | 2-D10@120 | | | 0.37 | |

ここで、M1～M3、M6～M8は条件をほぼ同一にし、RC梁、X形配筋RC梁、SHCC梁の構造特性を対比できるように設定している。

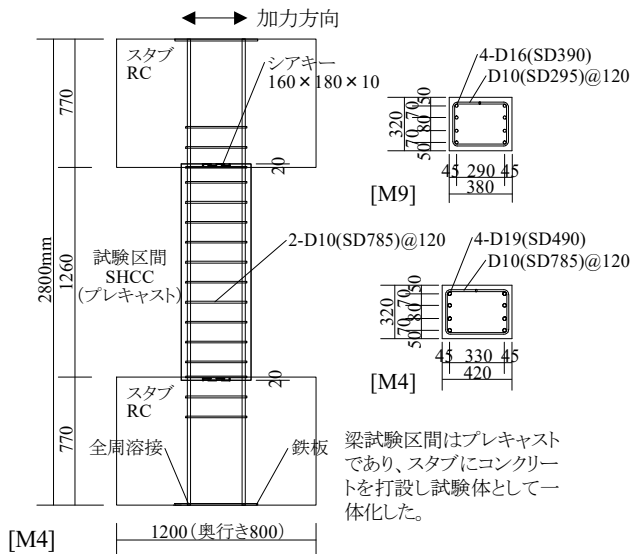


図-2 試験体の形状・寸法、配筋例

表-2 コンクリートおよびSHCCの材料試験値

| 試験体 | 圧縮強度 (N/mm ²) | 圧縮強度時ひずみ度 ($\times 10^{-3}$) | ヤング係数 (kN/mm ²) | 引張強度 (N/mm ²) |
|-----|---------------------------|--------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| M1 | 55.9 | 2.52 | 36.2 | 3.53 |
| M2 | 53.0 | 2.56 | 34.1 | 4.43 |
| M3 | 58.4 | 3.64 | 21.9 | 2.23 |
| M4 | 60.3 | 3.70 | 21.9 | - |
| M5 | 60.6 | 3.61 | 22.4 | - |
| M6 | 32.9 | 1.93 | 30.3 | 2.87 |
| M7 | 32.7 | 2.14 | 28.4 | 2.45 |
| M8 | 45.3 | 3.69 | 18.6 | - |
| M9 | 44.4 | 3.63 | 18.5 | 1.98 |

コンクリートの引張強度は割裂試験により、SHCCの引張強度は建築研究所方式による引張試験¹⁾により求めた。

表-3 PVAの物理的性質

| 品番 | 直径 (mm) | 長さ (mm) | 引張強度 (N/mm ²) | 切断伸び (%) | ヤング率 (kN/mm ²) |
|----------|---------|---------|---------------------------|----------|----------------------------|
| REC15×12 | 0.04 | 12 | 1600 | 6 | 40 |

2.2 使用材料

コンクリートおよびSHCCの材料試験値を表-2に、SHCCに使用した有機繊維PVAの物理的性質を表-3に示す。本実験のSHCCには、PVAがモルタルに2.0vol%混入している。また、鉄筋の材料試験値を表-4に示す。

2.3 加力方法

図-3に示す建築研究所方式の加力実験装置を用い、軸力を零として、水平方向に2サイクルずつの正負交番漸増繰返し加力を行い、梁試験区間に逆対称曲げモーメントとせん断力を作用させた。

3. 曲げ破壊型梁部材の加力実験結果

3.1 破壊状況

R=1/20rad 終了時のひび割れ状況例を写真-1に示す。RC試験体やX形配筋RC試験体ではひび割れ幅が拡大し、梁材端部では被りコンクリートが剥離するなど損傷が激しかった。SHCC試験体では、微細なひび割れが多数発生するが、SHCCの被りの剥離は生じず損傷は軽微であった。その一方で、梁材端部付け根ではひび割れが大きく開口し、この部位に損傷が集中した。

表-4 鉄筋の材料試験値

| 部位 | 呼び名 | 種類の記号 | 降伏強度 (N/mm ²) | 降伏ひずみ度 ($\times 10^{-3}$) | ヤング係数 (kN/mm ²) | 引張強度 (N/mm ²) | 破断伸び (%) |
|------|-----|-------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------|----------|
| 梁主筋 | D16 | SD390 | 452 | 2.54 | 194 | 639 | 20.4 |
| | D19 | SD490 | 541 | 3.05 | 191 | 705 | 18.2 |
| 横補強筋 | D10 | SD295 | 355 | 2.01 | 180 | 475 | 29.3 |
| | D10 | SD785 | 1045* | - | 191 | 1216 | 7.4 |

(注) *は0.2%オフセット強度

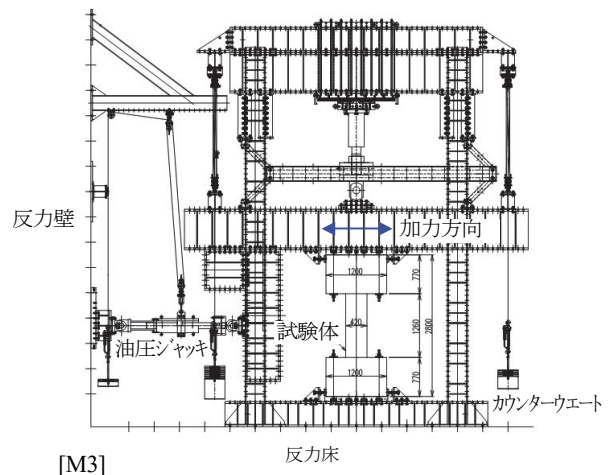
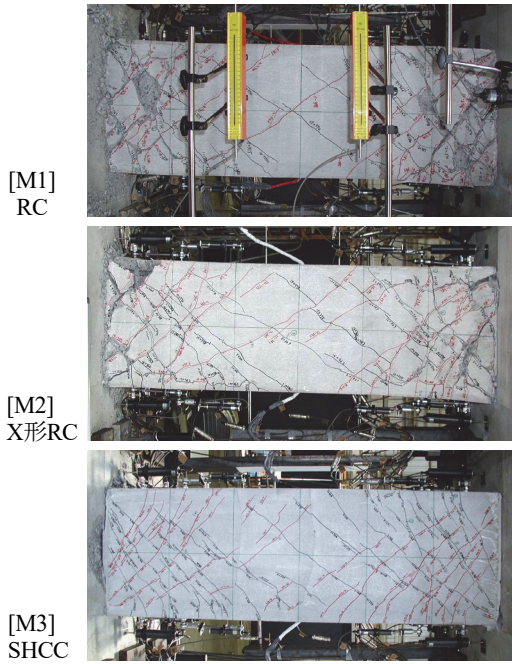


図-3 加力実験装置

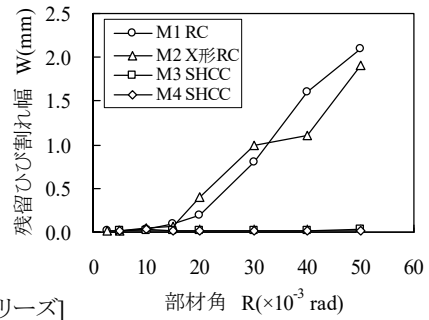


ひび割れを油性ペンでなぞっているため太く見えるが、[M3]の実際のひび割れは極めて微細である。

写真-1 ひび割れ状況例 (R=1/20rad 終了時)

3.2 残留ひび割れ幅

梁試験区間に生じた最大残留ひび割れ幅と部材角の関係を図-4に示す。F_{c48} シリーズの RC 試験体 M1、X 形配筋 RC 試験体 M2 では、レベル 2 の地震時に連結梁が経験すると想定される部材角 R=1/33rad でひび割れ幅が 1.0mm 程度に達しているが、SHCC 試験体 M3、M4 では 0.1mm 以下であった。また、マトリクスの強度



[F_{c48} シリーズ]

図-4 残留ひび割れ幅-部材角関係

が低い F_{c30} シリーズの M6~M9 試験体でも類似した結果であった。SHCC 梁では、残留ひび割れ幅が 0.3mm 以下であることから、梁材端部付け根以外は大地震後にひび割れ補修の必要がないものと判断される。

3.3 せん断力-部材角曲線

F_{c48} シリーズの RC 試験体 M1、X 形配筋 RC 試験体 M2、SHCC 試験体 M3 のせん断力(Q)-部材角(R)曲線を代表例として図-5に示す。また、Q-R 曲線の正方向側の包絡線を図-6に示す。試験体 M1、M2、M3 とも、降伏後 R=1/20rad まで耐力の低下がほとんど無い安定した Q-R 曲線であった。降伏部材角は、試験体種別では大差なく、F_{c48} シリーズでは約 1/140rad、F_{c30} シリーズでは約 1/190rad であったことから、塑性率 7~10 程度まで曲げ耐力を保持することがわかる。また、曲線の形状をみると、M1 は痩せている、M2 はほぼ紡錘形でエネルギー吸収力に優れている、M3 は M1 と M2 の中間的な性状を示すことがわかる。

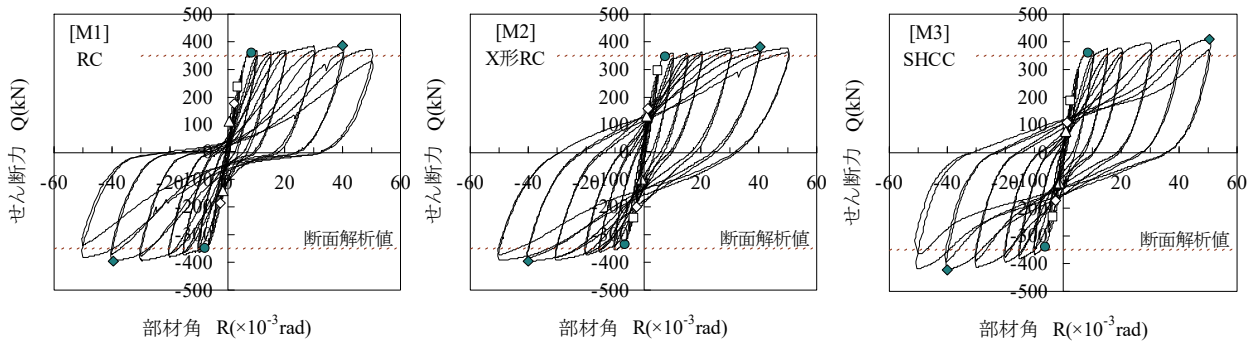


図-5 せん断力-部材角曲線例 (F_{c48} シリーズ)

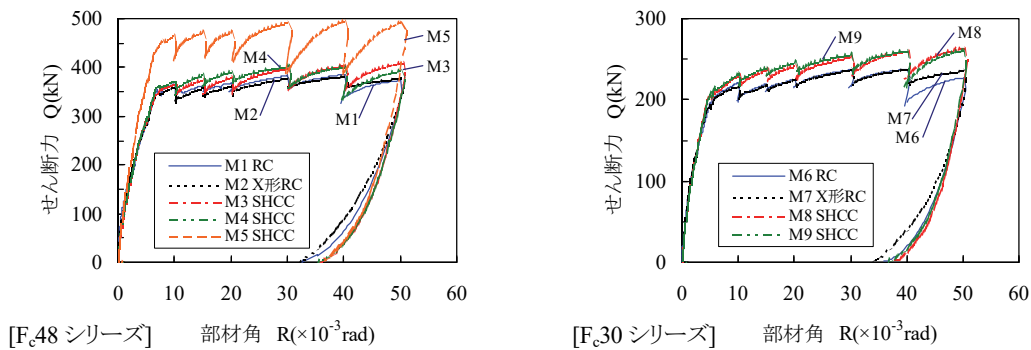


図-6 せん断力-部材角曲線の包絡線

包絡線の図からは、SHCC 試験体と RC 試験体では、降伏時の耐力に差はほとんど認められないが、それ以降のサイクルでは、SHCC 試験体は RC 試験体、X 形配筋 RC 試験体より耐力が上回ることがわかる。SHCC 試験体では梁材端部に圧壊がほとんど生じないため、圧壊が生じる RC 試験体に比べ応力中心間距離が大きいものとなり、その差が耐力差になったものと考えられる。

3.4 初期剛性

初期剛性の実験値と計算値との関係を図-7に、実験値を表-5に示す。実験値は、Q-R 曲線の立ち上がりの領域で剛性が変化し点と原点を結ぶ直線の傾きから求めた。計算値は、コンクリートと梁主筋を考慮した初期剛性式²⁾から求めた。表-5で SHCC 試験体と RC 試験体の初期剛性の実験値を比較すると、前者は後者の 56~70%であった。これは、表-2に示すように、SHCC はコンクリートに比べヤング係数が 40%程度小さいためと考えられる。一方、実験値と計算値を比較すると、概ね良い対応を示している。SHCC 梁に対しては既往の初期剛性式で評価できることが確かめられた。

3.5 降伏時部材角、降伏時剛性

Q-R曲線で剛性が急激に変化し降伏したと判定される点を降伏点とし、その部材角を図-8に示す。また、降伏時剛性を表-6に示す。SHCC試験体は、RC試験体やX形配筋RC試験体に比べ初期剛性は小さいが、降伏時の部材角は、RC試験体、X形配筋RC試験体と大差なく、したがって、降伏時剛性にも大差ないことがわかる。

3.6 履歴吸収エネルギー、等価粘性減衰定数

F_{c30}シリーズの試験体の履歴吸収エネルギーを図-9に、等価粘性減衰定数を図-10に示す。部材角 R=1/100radまでは各試験体とも履歴吸収エネルギーに差はほとんど無いが、それ以降のサイクルでは、SHCC試験体はX形配筋RC試験体同様、RC試験体に比べ履歴吸収エネルギーは大きいことがわかる。一方、等価粘性減衰定数(h_{eq})は、SHCC試験体ではX形配筋RC試験体より小さいがRC試験体よりは大きく、ほぼ中間的な減衰定数であり、R=1/100rad以降は部材角によらずh_{eq}=20%程度であった。これは、F_{c48}シリーズも同様であった。

3.7 最大曲げ耐力の実験値と計算値との関係

最大曲げ耐力の実験値とACI式およびファイバーモデルの断面解析による計算値との関係を図-11に示す。ACI式計算値、断面解析値は互いに同程度の値を示し、実験値に対して、F_{c48}シリーズでは12~21%、F_{c30}シリーズでは22~30%程度小さめに評価した。これは、図-5にも示しているように、計算値は、曲げ降伏耐力の実験値に対しては精度良く評価するものの、試験体の曲げ耐力は降伏後も上昇するので、最大曲げ耐力の実験値に対しては、安全側の評価になっているものである。この現象は、梁主筋の引張強度/降伏強度の比が大きいF_{c30}シリーズがF_{c48}シリーズより顕著である。ここで、曲げ耐

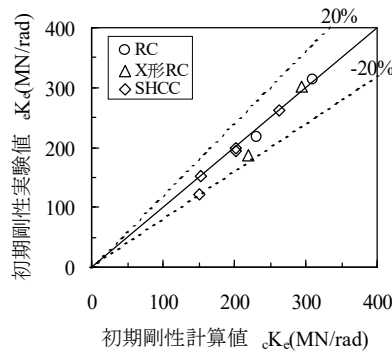


図-7 初期剛性の実験値と計算値との関係

表-5 初期剛性の実験値

| 試験体 | eKc (MN/rad) | |
|-----|--------------|-----|
| M1 | RC | 313 |
| M2 | X形RC | 302 |
| M3 | SHCC | 193 |
| M4 | SHCC | 200 |
| M5 | SHCC | 262 |
| M6 | RC | 217 |
| M7 | X形RC | 188 |
| M8 | SHCC | 151 |
| M9 | SHCC | 122 |

M5 はシアスパン比 1.2, それ以外は 1.5

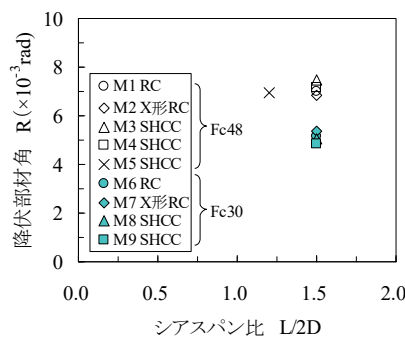
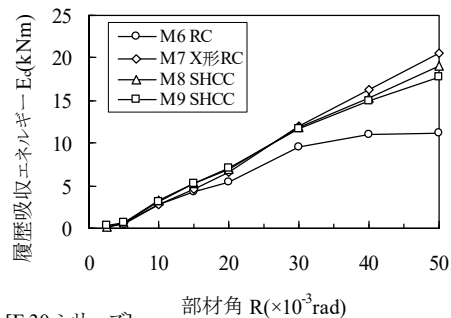


図-8 降伏時部材角の実験値の比較

表-6 降伏時剛性の実験値

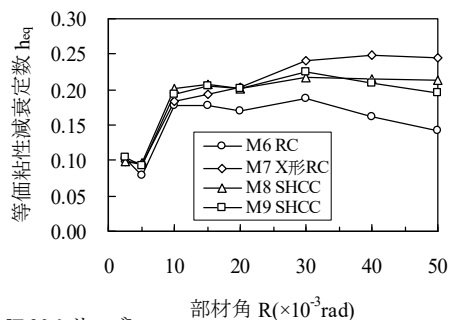
| 試験体 | eKy (MN/rad) | |
|-----|--------------|------|
| M1 | RC | 50.2 |
| M2 | X形RC | 49.9 |
| M3 | SHCC | 47.4 |
| M4 | SHCC | 49.7 |
| M5 | SHCC | 64.3 |
| M6 | RC | 38.9 |
| M7 | X形RC | 36.5 |
| M8 | SHCC | 40.8 |
| M9 | SHCC | 43.0 |

M5 はシアスパン比 1.2, それ以外は 1.5



[Fc30 シリーズ]

図-9 履歴吸収エネルギー



[Fc30 シリーズ]

図-10 等価粘性減衰定数

力は梁材端部付け根の打ち継ぎ部位置で決定されているので、SHCC 試験体でもマトリックスの引張強度上昇効果による曲げ耐力への影響は無いと考え計算している。

4. せん断破壊型梁部材の加力実験計画

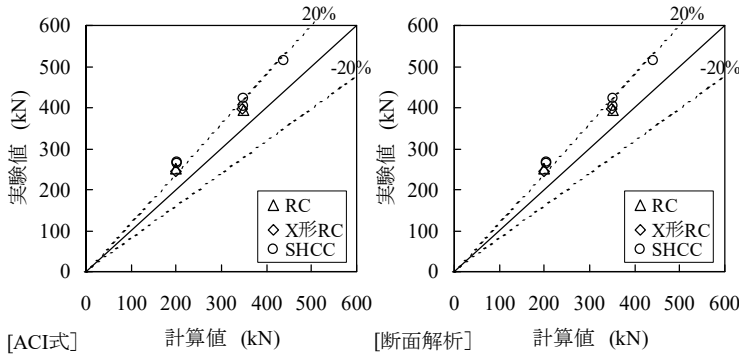


図-11 最大曲げ耐力の実験値と計算値との関係

4.1 試験体

試験体の諸元を表-7に示す。試験体は梁試験区間のコンクリートもしくはSHCCの設計基準強度が $F_c=48 \text{ N/mm}^2$ と $F_c=30 \text{ N/mm}^2$ の2シリーズから構成されている。 $F_c=48$ シリーズは基準用のRC試験体、開発対象のSHCC試験体から構成され、 $F_c=30$ シリーズはSHCC試験体のみで構成されている。全ての試験体はせん断破壊型に計画されており、横補強筋比と鋼種が実験因子となっている。

4.2 使用材料

コンクリートおよびSHCCの材料試験値を表-8に示す。鉄筋の材料試験値を表-9に示す。

5. せん断破壊型梁部材の加力実験結果

表-7 せん断破壊型試験体の諸元

| 試験体 | 設計基準強度 F_c (N/mm^2) | 試験体寸法 | | | シア スパン比 L/2D | 梁主筋 | | 横補強筋 | | |
|-----|----------------------------------|-------|-----|------|--------------|-------|-------|-----------|-----------|-------|
| | | 幅 B | 成 D | 長さ L | | 配筋 | 鋼種 | 配筋 | p_w (%) | 鋼種 |
| S1 | 48 | 320 | 420 | 1008 | 1.2 | 上端筋 | SD685 | 2-D10@100 | 0.44 | SD295 |
| S2 | | | | | | 8-D19 | | 2-D10@200 | | SD785 |
| S3 | | | | | | 8-D19 | | 2-D10@200 | SD295 | |
| S4 | | | | | | 8-D19 | | 2-D10@200 | SD295 | |
| S5 | 30 | 320 | 380 | 912 | | 8-D16 | | 2-D10@100 | 0.44 | SD295 |
| S6 | | | | | | 8-D16 | | 2-D10@200 | | 0.22 |

S1とS2は条件を同一にし、RC梁とSHCC梁の構造特性を対比できるように設定している。

表-8 コンクリートおよびSHCCの材料試験値

| 試験体 | 圧縮強度 (N/mm^2) | 圧縮強度時ひずみ度 ($\times 10^{-3}$) | ヤング係数 (kN/mm^2) | 引張強度 (N/mm^2) |
|-------|--------------------------|--------------------------------|----------------------------|--------------------------|
| S1 | 55.3 | 2.32 | 37.9 | 3.69 |
| S2~S4 | 61.5 | 3.78 | 20.8 | 1.98 |
| S5,S6 | 42.3 | 3.58 | 17.2 | - |

コンクリートの引張強度は割裂試験により、SHCCの引張強度は建築研究所方式による引張試験¹⁾により求めた。

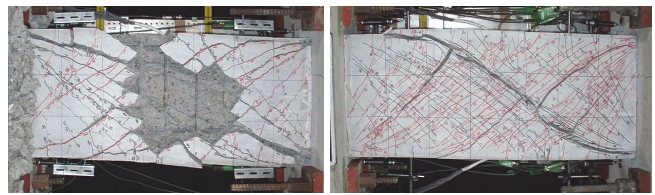
表-9 鉄筋の材料試験値

| 部位 | 呼び名 | 種類の記号 | 降伏強度 (N/mm^2) | 降伏ひずみ度 ($\times 10^{-3}$) | ヤング係数 (kN/mm^2) | 引張強度 (N/mm^2) | 破断伸び (%) |
|------|-----|-------|--------------------------|-----------------------------|----------------------------|--------------------------|----------|
| 梁主筋 | D16 | SD685 | 733 | 4.60 | 196 | 930 | 12.4 |
| | D19 | SD685 | 711 | 4.10 | 192 | 892 | 13.9 |
| 横補強筋 | D10 | SD295 | 355 | 2.01 | 180 | 475 | 29.3 |
| | D10 | SD785 | 1045* | - | 191 | 1216 | 7.4 |

注) *は0.2%オフセット強度

5.1 破壊状況

RC試験体S1とSHCC試験体S2について、 $R=1/33 \text{ rad}$ 終了時の破壊状況例を写真-2に示す。S1では、対角線状のひび割れが拡大し、被りコンクリートが剥離して破壊に至った。S2では、最大耐力までに0.2mm以下の微細なひび割れが多数発生し、そのうち隅角部を結ぶひび割れが拡大して破壊に至った。しかし、被りの剥離は生じずS1とは損傷の様相に違いがみられた。その他のSHCC試験体の破壊状況もS2と類似していた。最大耐力に至るまでに、S5で梁主筋1本が降伏したものの、その他の試験体では梁主筋の降伏は確認されず破壊に至ったので、全試験体ともせん断破壊と判定した。



[S1] RC

[S2] SHCC

ひび割れを油性ペンでなぞっているため太く見えるが、[S2]の実際のひび割れは極めて微細である。

写真-2 ひび割れ状況例 ($R=1/33 \text{ rad}$ 終了時)

5.2 せん断力-部材角曲線

$F_c=48$ シリーズのRC試験体S1とSHCC試験体S2のせん断力(Q)-部材角(R)曲線を代表例として図-12に示す。S2では、3本の横補強筋が降伏したためせん断耐力の頭打ちがみられ、正方向側ではS1と比べて最大耐力に差なかったが、負方向側では最大耐力の低下は小さかった。

このため、S2ではS1に比べQ-R曲線の包絡線が大きかった。これはS3でも同様であった。一方、 $F_c=30$ シリーズで、SD295を用い $p_w \sigma_{wy}=1.56 \text{ N/mm}^2$ のS5とSD785を用い $p_w \sigma_{wy}=2.30 \text{ N/mm}^2$ のS6を比較すると、S5は $p_w \sigma_{wy}$ が小さいにもかかわらずS6よりも耐力、変形性能に優れ、Q-R曲線の履歴面積は大きく、復元力特性に差がみられた。このことから、SHCC梁の復元力特性に対しては、横補強筋強度より横補強筋比の影響の度合いが強いと考えられる。

5.3 せん断耐力の評価

せん断耐力の実験値と計算値との関係を表-10と図-13に示す。せん断耐力の計算値は、日本建築学会の終局強度型耐震設計指針³⁾のせん断耐力式をベースに、SHCCのPVAによ

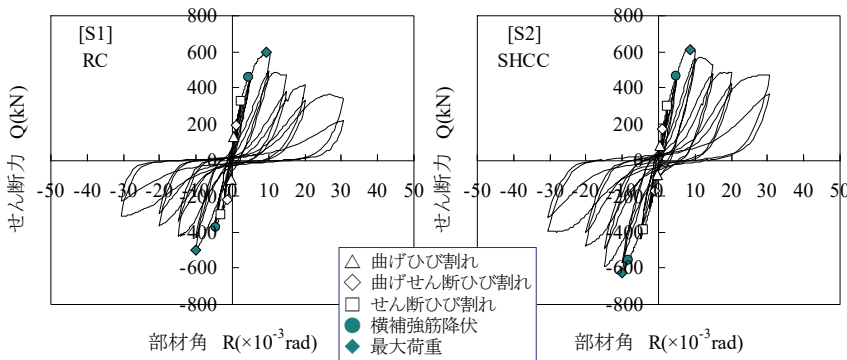


図-12 せん断力-部材角曲線

る引張強度上昇効果を考慮し修正した下式により求めた。ここで、実験時に観察されたせん断ひび割れの角度は45～50度であったことから、マトリクスの圧縮束の角度は45度と仮定し $\cot \phi = 1.0$ としている。

$$Q_{su} = b j_t (p_w \sigma_{wy} + \sigma_t) \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) b D v \sigma_B / 2 \quad (1)$$

$$\tan \theta = \sqrt{[(L/D)^2 + 1]} - L/D$$

$$\beta = \{(1 + \cot^2 \phi)(p_w \sigma_{wy} + \sigma_t)\} / (v \sigma_B) \quad (2)$$

$$v = 1.7 \sigma_B^{-0.333} \quad (\text{CEB 式より引用})$$

$$p_w \sigma_{wy} + \sigma_t \leq v \sigma_B / 2 \quad (3)$$

$$\sigma_t = (-0.0004 \sigma_B + 0.0623) \sigma_B \quad (4)$$

v : コンクリート、SHCC の圧縮強度有効係数

b : 梁幅 j_t : 梁主筋中心間距離 p_w : 横補強筋比

σ_{wy} : 横補強筋降伏強度 D : 梁成 L : 内法長さ

σ_B : コンクリート、SHCC の圧縮強度

σ_t : SHCC の引張強度、コンクリートは $\sigma_t = 0$

式(4)は、SHCC の供試体による材料試験により得られた図-14 に示す引張強度(σ_t)/圧縮強度(σ_B)-圧縮強度(σ_B)関係を直線回帰し、導出したものである。

図-13 に示すように、計算値は実験値と概ね良い対応を示し、かつ安全側に評価することがわかる(平均値 1.16、標準偏差 0.12、変動率 0.10)。このことから、本実験で用いた SHCC の範囲においては、SHCC 梁のせん断耐力は式(1)で評価できると判断される。

6. まとめ

本実験の範囲で得られた知見を以下に示す。

- i. SHCC梁では、0.2mm以下のひび割れが多数生ずるが、被りの剥離は無く、損傷はRC梁に比べ軽微である
- ii. SHCC梁のQ-R曲線は、 $R=1/20\text{rad}$ (塑性率7～10)まで安定した履歴を示し、履歴吸収エネルギーはRC梁に比べて大きい
- iii. ACI式計算値および断面解析値は、SHCC梁の最大げん断耐力の実験値に対して20～30%安全側に評価する
- iv. SHCC梁のせん断耐力は、終局強度型耐震設計指針のせん断耐力式をSHCCによる引張強度上昇を考慮し修正した式により安全側に概ね精度良く評価できる

7. あとがき

SHCC 梁の構造特性を概ね把握することができた。また、曲げ耐力およびせん断耐力の計算方法の精度に対しても知見が得られた。今後は、更に短スパンであるシアスパン比 1.2 の SHCC 梁の加力実験を行い、構造性能に関する知見を広げたい。

表-10 せん断耐力の実験値と計算値との比較

| 試験体 | 材料 | 実験値 (kN) | | 計算値 (kN) | 実験値(最大値)/計算値 |
|------|------|----------|-----|----------|--------------|
| | | 正方向 | 負方向 | | |
| S1 | RC | 599 | 501 | 504 | 1.19 |
| S2 | SHCC | 612 | 624 | 595 | 1.05 |
| S3 | SHCC | 668 | 685 | 640 | 1.07 |
| S4 | SHCC | 608 | 539 | 546 | 1.11 |
| S5 | SHCC | 600 | 484 | 429 | 1.40 |
| S6 | SHCC | 516 | 543 | 467 | 1.16 |
| 平均値 | | | | | 1.16 |
| 標準偏差 | | | | | 0.12 |

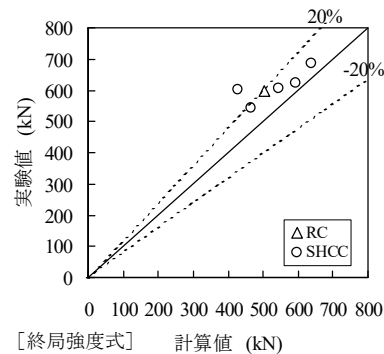
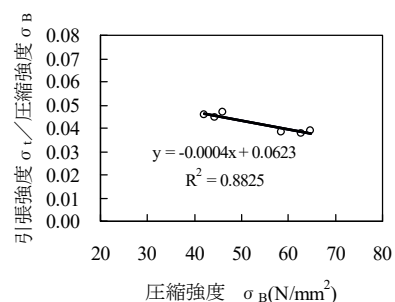


図-13 せん断耐力の実験値と計算値との関係



引張強度: 建築研究所方式による引張試験¹⁾により得られた材料試験値
 圧縮強度: JIS A 1108 により得られた材料試験値

図-14 規準化引張強度と圧縮強度との関係

【参考文献】

- 1) 佐藤幸博、福山 洋、諏訪田晴彦、「高靱性セメント系複合材料の一軸引張-圧縮繰返し試験方法の提案」、日本建築学会構造系論文集、No.539、pp.7～12、2001.1
- 2) 日本建築学会、「鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料」、pp.71、1987
- 3) 日本建築学会、「鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針・同解説」、pp.106～121、1990