

論文 横補強筋が十分に強いRC部材のせん断抵抗機構

梶原 唯史^{*1}・向井 智久^{*2}・野村 設郎^{*3}

要旨：横補強筋が十分に強い梁部材の断面形状を変化させた静的加力実験を行い、その結果に基づきコアコンクリートの変形と耐力低下の関連性を検討した。その結果、コアコンクリートの膨らみ変形が増加することによりせん断抵抗機構の形成が困難になり、部材が耐力低下するという破壊メカニズムを提案した。次に提案したメカニズムに基づき補強筋断面形状を変化させ、コアコンクリートの変形を抑制した梁部材の実験を行うことにより、その妥当性を確認し、コアコンクリートの変形を考慮したせん断耐力算出フローの概念を示した。

キーワード：せん断抵抗機構，膨らみ変形，補強筋断面形状，一方向載荷

1. はじめに

「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¹⁾」(以下、靱性指針)では、簡易で有効なマクロモデルを用いて RC 部材のせん断終局耐力(以下、終局耐力)を評価している。しかし既往の研究により、横補強筋強度が十分に強い RC 梁部材のせん断終局耐力に対する靱性指針の評価に検討の余地があることが分かっている。更に、筆者らの研究²⁾により横補強筋強度が十分に強い梁部材において、A-A'断面(図-1)内でのコアコンクリートが中子筋の影響を受けて変形し、その結果部材が耐力低下したことから、図-1に示すコアコンクリートの変形が図中の応力 P_t で表されるコンクリート斜め圧縮応力¹⁾などのせん断抵抗機構の形成そのものに大きな影響を及ぼしているという知見を得た。

そこで本論では靱性指針で定義される有効幅 b_e 、有効せい j_e の積が一定で、断面形状の異なる RC 梁部材を作成し、部材断面形状及び載荷方向がコアコンクリートの挙動に与える影響を検討した。また、コアコンクリートの変形を効果的に抑制できる横補強筋断面形状を有した RC 梁部材の静的加力実験を行い、その効果を

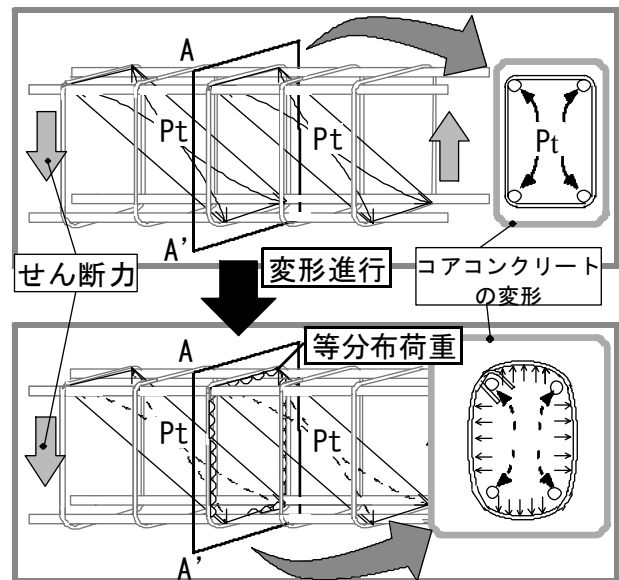


図-1 せん断抵抗機構とコアコンクリートの変形挙動

確認した。更にこれらの結果から、コアコンクリートの変形に起因するせん断破壊メカニズムを考慮し、せん断耐力を評価するための設計フローに対する基礎的検討を行った。

2. 断面形状の異なるRC梁部材の静的加力実験

2.1 実験概要

全ての試験体は、靱性指針で定義されるせん断圧縮破壊先行型に設計した。DSF, DSF-M, DSF-A の部材断面は靱性指針における有効幅 b_e 、

*1 東京理科大学 理工学部建築学科 (正会員)

*2 東京理科大学 理工学部建築学科助手 工博 (正会員)

*3 東京理科大学 理工学部建築学科教授 工博 (正会員)

有効せい j_e の積が一定で、断面形状のみをそれぞれ変化させた（図-2）。全ての試験体で主筋に高強度鉄筋 D16を、横補強筋には高強度鉄筋 U7.1を使用し、主筋端部はスタブ及びベースを作成することにより十分な定着余長をとった。載荷方法は全ての試験体で片持ち梁形式の一方方向単調載荷とする。

2.2 実験結果

各試験体の入力せん断力-部材変形角曲線及び実験値と理論値との評価を図-3に示す。全ての試験体において主筋及び横補強筋の降伏はみられず、図-3に示す様な耐力低下が確認された。また、コンクリートの剥落や顕著な付着割裂ひびがみられなかったため全試験体が設計時に想定したせん断圧縮破壊であったと考えられる。実験を行った3体の試験体のうち、DSF の最大耐力が最も高く、次に正方形断面の DSF-M、DSF-A の順であった。

3. コアコンクリート変形挙動に関する検討

3.1 コアコンクリート全体の変形挙動と耐力低下との関連性

筆者らは既往の研究³⁾において、コアコンクリートの変形を、横補強筋で囲まれた部分の面積（コアコンクリートのひび割れ・空隙による面積分を含んでいるが、以下、コアコンクリートの増加面積と呼ぶ）を用いて定量化しその挙動を検討した結果、コアコンクリートの変形は部材の耐力低下に強く影響するという知見を得た。図-4に応力 P_t （図-1）及び、各試験体（DSF, DSF-A, DSF-M）のH1～H5（図-2）のうち耐力低下点時に最も大きく変形する箇所におけるコアコンクリートの全体増加面積を示す。各試験体で算出した圧縮側、引張側の面積には顕著な増加傾向の違いがみられなかったため、本論ではコアコンクリートの面積を全体増加面積で評価した。尚、応力 P_t は補強筋各辺に添付した歪みゲージより補強筋の歪みを計測、その値を用いて算出した。全体増加面積についても軸のび成分、膨らみ成分をそれぞれ歪みゲージの

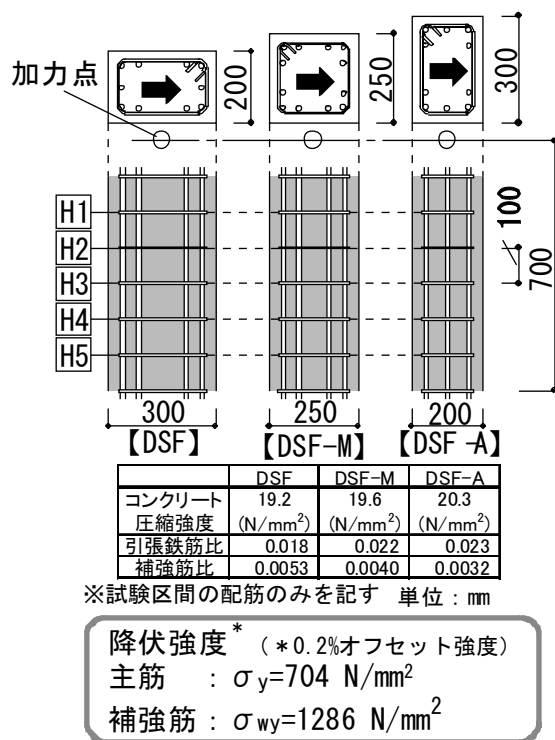


図-2 試験体概要 (DSF, DSF-M, DSF-A)

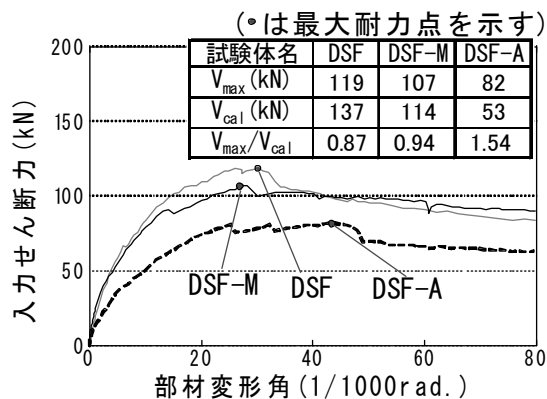


図-3 入力せん断力-部材変形角曲線

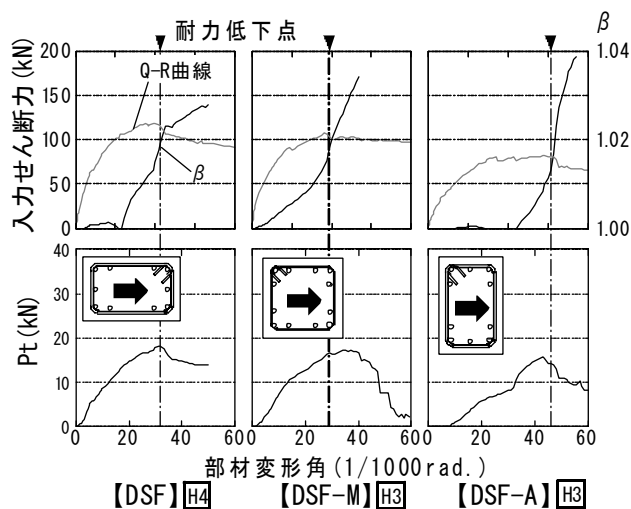


図-4 応力 P_t 及び全体増加面積

値から個別に算出し総計した（詳しくは文献3を参照）。ただし、面積は変形後の面積を変形前の面積（ $be \times je$ ）で除した割合 β として示す（本実験では β の値が1.00以下になる挙動はみられなかったため、 β の値は1.00以上のみを示す）。図-4より、各試験体において部材の最大耐力以降応力 P_t は低下しているにも拘わらず、面積は急激に増加している。よって、本報で検討した試験体においてもコアコンクリートの変形増加が部材の耐力低下に影響を与えたと考えられる。

3.2 コアコンクリート各変形成分の挙動

補強筋に図-1で示したコンクリート斜め圧縮応力 P_t 及び等分布荷重が発生していると仮定すると、文献3よりコアコンクリートの増加面積は横補強筋の軸のび成分と、横補強筋が外側に膨らむことによる膨らみ成分（図-5）とを総計した形で表される。3.2では、コアコンクリートの増加面積をこの軸のび成分、膨らみ成分に分解して詳細に検討する。

図-6に各試験体のふくらみ成分の増加割合を梁せい・梁幅毎に示す。全ての試験体の梁せい・梁幅方向において、軸のび成分はほとんど増加を見せず、膨らみ成分が大きくコアコンクリートの面積増加に寄与していることが分かる。次に図-7を用いて膨らみ成分の増加傾向を梁せい・梁幅方向別に検討する。DSF ではまず梁幅方向の膨らみ成分が先行して増加、その後せい方向の面積が急増している。DSF-A では、せい方向の面積がほとんど増加することなく、ある変形角において幅方向の面積が急増している。本論ではコアコンクリートの膨らみ成分による増加面積を式(1)で算出している。

$$A_{cb} = be \times je + 2 \times \frac{be^4}{120EI} W_b \quad (1)$$

式中の E 、 I は横補強筋のヤング係数、断面2次モーメント、 W_b は横補強筋を外側に膨らませる等分布応力（図-1、計測方法は文献3を参照）を補強筋中央位置での合力に変換したものである（尚、梁せい方向の膨らみ成分 A_{ed} は

be^4 を je^4 に W_b を W_d として算出）。式(1)より be が面積増加に大きく寄与するため、DSF はせい方向の面積 A_{ed} が、DSF-A は幅方向の面積 A_{eb} が顕著に増加している。一方、図-8に各変形角毎の補強筋を外側に膨らませる応力 W_b 、 W_d を示す。DSF では応力 W_b が DSF-A に比べて大きいにも拘わらず、前述した be の効果で面積 A_{eb} は低く抑えられているが（図-7）、DSF-A は be の効果に加え、応力 W_b の増加により A_{eb} が急増し、耐力低下に至ったも

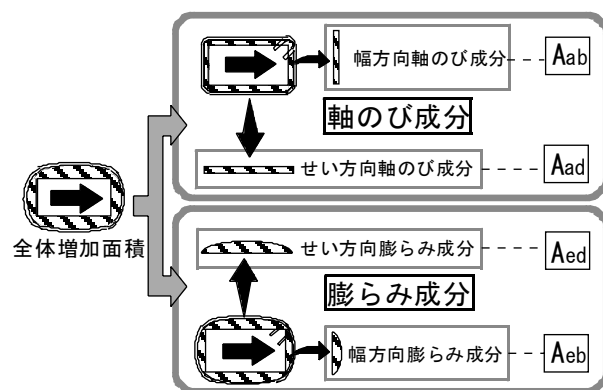


図-5 各増加面積成分への分解

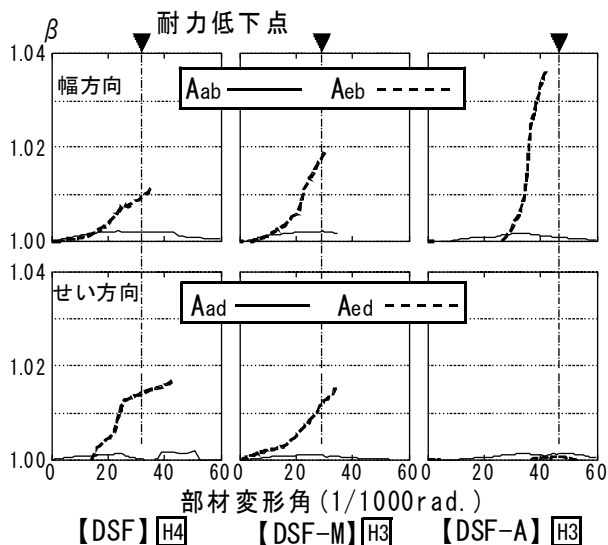


図-6 各増加面積成分

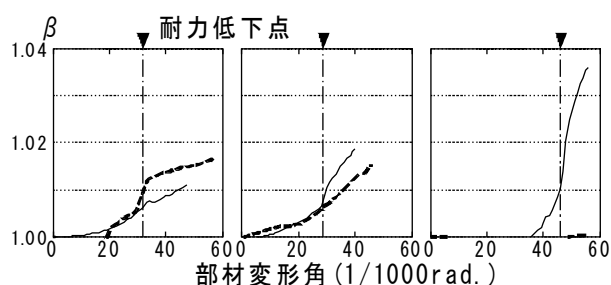


図-7 梁せい・梁幅別膨らみ成分増加割合

のと考えられる。その後、部材変形角が増加すると DSF では応力 W_d の緩やかな増加に伴い、長辺方向の面積 A_{ed} が急増し、 A_{eb} を上回り耐力低下に至っている。一方、 b_e, j_e が等しい DSF-M では図-7より耐力低下点までの増加面積はほぼ同じである。これは式 (1) より、部材内に同じ大きさの応力 W_b, W_d が発生していると解釈できる (図-8)。しかし、図-8より耐力低下点以降、応力 W_b が W_d よりも増加するため、面積 A_{eb} が A_{ed} よりも増加している (図-7)。このように耐力低下以降、梁せい・梁幅の長さが等しく断面形状の影響を受けない DSF-M において、 A_{eb} と A_{ed} の増加傾向に差異がみられたのは載荷方向の影響を受けたためと考えられる。

以上の結果より、コアコンクリートの面積は部材断面形状・載荷方向の影響を受け各箇所が変形し、コアコンクリートがはらみ出すことによって顕著に増加することが確認された。

4. コアコンクリートの変形を抑制した部材の静的加力実験

4.1 実験概要

3. では、コアコンクリートの変形の指標である面積の増加により、コアコンクリートが応力 P_t を伝達できる変形の限界点に達した後に、部材の耐力が低下すると考えた。そこで4. ではコアコンクリートの変形が生じにくい補強筋形状を提案し、3. で定義した破壊メカニズムの検証を行う。

試験体は靱性指針において同耐力でせん断圧縮破壊するように設計した (図-9)。2体の試験体は j_e, b_e を一定とし、どちらも一方単調載荷とする。図-10、表-1に DSF-N, DSF-S 試験体の補強筋断面形状及び材料特性を示す。3. において、コアコンクリートの変形挙動を詳細に検討した結果、補強筋の軸のび成分よりも、補強筋が外側に膨らむことによる膨らみ成分が面積増加に大きく寄与していることが確認された。従って、4. では膨らみ成分を抑制できる断

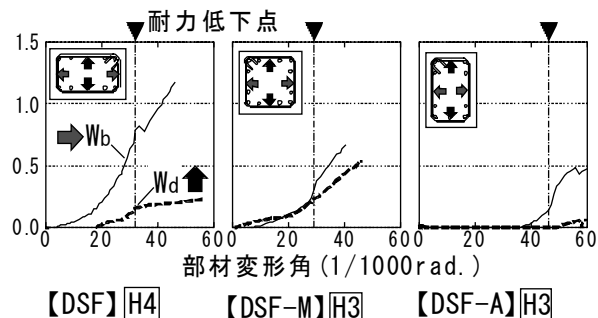
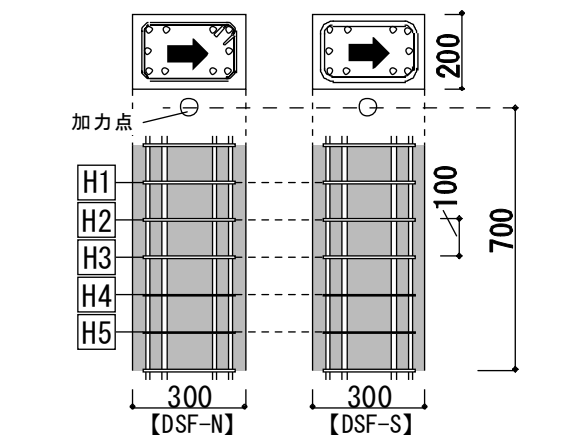


図-8 部材内に発生する応力



単位: mm ※試験区間の配筋のみを記す

	DSF-N	DSF-S
コンクリート	19.8	19.7
圧縮強度 (N/mm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)
引張鉄筋比	0.018	0.018
補強筋比	0.0097	0.0096

降伏強度* (*0.2%オフセット強度)
主筋 $\sigma_y = 699 \text{ N/mm}^2$

図-9 試験体概要 (DSF-N, DSF-S)

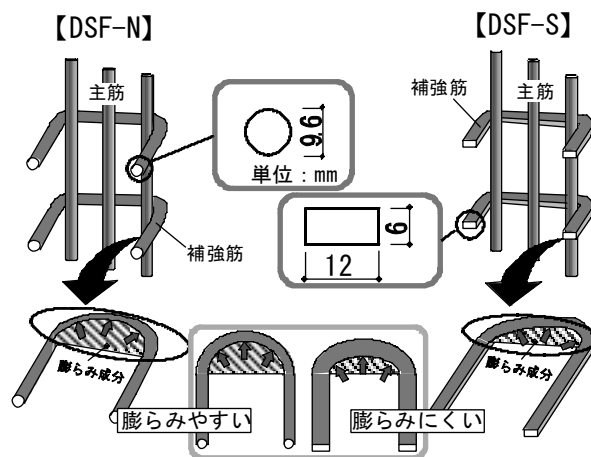


図-10 補強筋断面

表-1 補強筋材料特性

補強筋名	単位	DSF-N	DSF-S
降伏強度	N/mm ²	814	796
降伏歪み	$\times 10^{-6}$	4451	4078
ヤング係数	N/mm ²	2.10×10^5	2.12×10^5
グラフ			

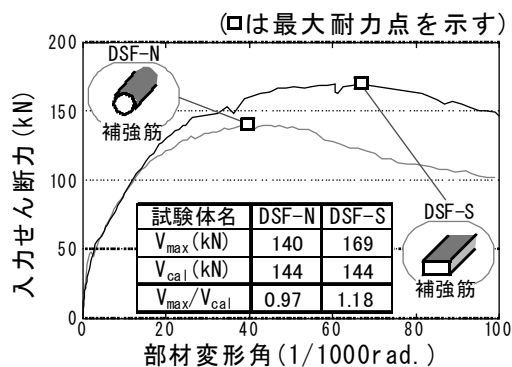


図-11 入力せん断力-部材変形角曲線

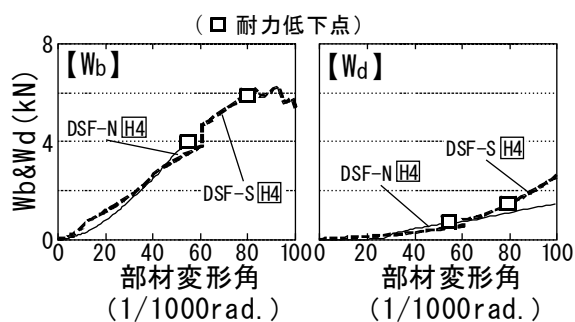


図-12 部材内に発生する応力

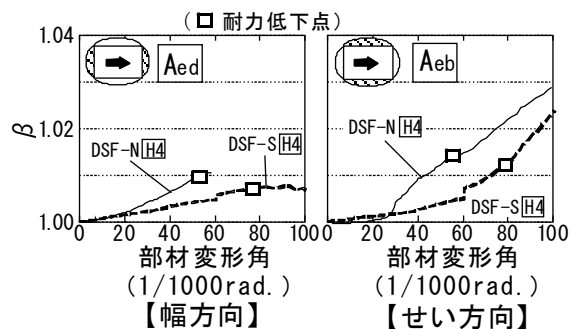


図-13 梁せい・梁幅別膨らみ成分増加割合

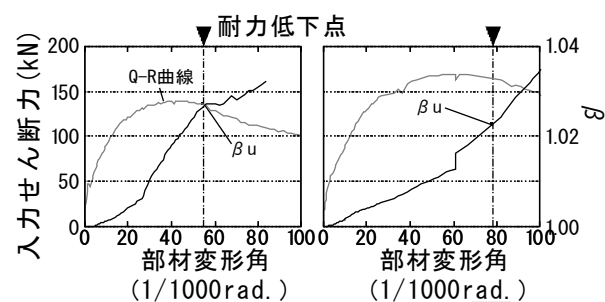


図-14 全体増加面積

面形状の補強筋を用いた。DSF-N, DSF-S の補強筋はともに材料特性及び断面積がほぼ同じで、補強筋の曲げ剛性を DSF-S は DSF-N のほぼ2倍になるように製作した。

4.2 実験結果及び破壊メカニズムの検証

両試験体において横補強筋、DSF-N において主筋の降伏はみられなかった。各試験体の入力せん断力-部材変形角曲線および理論値との評価を図-11に示す。通常の円形断面横補強筋を用いた DSF-N の最大耐力 V_{max} はほぼ理論値 V_{cal} と同じ値をとった。しかし、矩形断面の横補強筋を使用した DSF-S の最大耐力が理論値を約1.2倍上回り、引張側主筋の降伏がみられた。従って、DSF-S で用いた横補強筋はせん断耐力を上昇させ、かつ部材の破壊モードを変化させることができたが、大変形時においては耐力低下がみられたため、最終的にはせん断破壊したものと考えられる。そこで、3. で検討した応力及びコアコンクリートの増加面積と耐力低下との関連性を検討する。図-12に梁せい・梁幅方向の補強筋を膨らませる応力 W_b, W_d の増加傾向を、図-13に梁せい・梁幅別膨らみ

成分増加割合を示す。DSF-N, DSF-S 両試験体において応力 W_b, W_d の増加傾向は各部材変形角ではほぼ同じであることが分かる。これは、両試験体間で載荷方向と部材断面に差異が無いことに起因する。しかし、膨らみ成分の面積増加は図-13より梁幅・梁せい両者ともに DSF-S の方が小さく抑えられている。これは式(1)中の曲げ剛性を DSF-S で用いた補強筋は大きくなるように設計したためである。以上のことより補強筋の断面形状を変えることでコアコンクリートの変形を効果的に抑制し、それによって部材のせん断耐力の上昇を可能にした。また、図-14に各変形角毎の両試験体全体増加面積を示す。図-14より耐力低下時の全体増加面積割合 β_u を検討すると両試験体において β_u の値はほぼ変わらない。従って、コアコンクリートが応力 P_t を伝達できる限界点にコアコンクリートの変形が達し、部材は耐力低下したと考えられ、せん断圧縮破壊する部材及び主筋が降伏した DSF-S についても3. で定義された破壊メカニズムの妥当性が確認された。

5. せん断耐力算出の設計フロー概念の提案

今回実験を行った試験体5体の各変形角毎の面積増加割合 β を図-15に示す。全試験体において耐力低下点の面積増加割合 β_u は一定範囲にあり、平均すると β_u はほぼ1.02となる。これは、コアコンクリートの増加面積と耐力低下の高い相関性を示唆するものである。そこで本論ではコアコンクリートの変形に起因するせん断破壊メカニズムを考慮して、図-16においてせん断耐力算出フロー概念を提案する。このフローは仮定したせん断終局耐力から β_u を推定し、 β_u が1.02を満たす終局耐力が得られるまで収束計算を行うものであり、詳細な計算法は稿を改めて詳述する予定である。

6. まとめ

本論では、せん断圧縮破壊する梁部材の断面をパラメータにとった静的加力実験を行い、コアコンクリートの変形と部材の耐力低下との関連性を検討した結果、コアコンクリートの変形量が増加することによって、トラス圧縮束応力が十分に形成できなくなり、部材の耐力が低下するという現行の指針とは異なる破壊メカニズムを提案した。そのメカニズムを基に、コアコンクリートの面積増加に最も寄与している膨らみ成分の増加を抑制する補強筋を製作し、梁部材において加力実験を行った。その結果、コアコンクリートの変形量を抑制することによって、コアコンクリートの応力伝達能力を保持することができ、それによって部材のせん断耐力を上昇させることができた。以上の結果をふまえ、コアコンクリートの変形が部材の耐力に及ぼす影響を考慮し、せん断耐力をコアコンクリートの変形から算出する設計フロー概念を示した。

謝辞

高周波熱錬株式会社より高強度横補強筋ウルボンを製作及び提供して頂き、ここに深く感謝の意を表します。

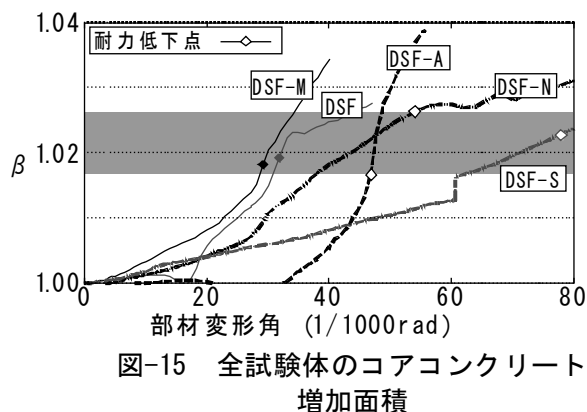


図-15 全試験体のコアコンクリート増加面積

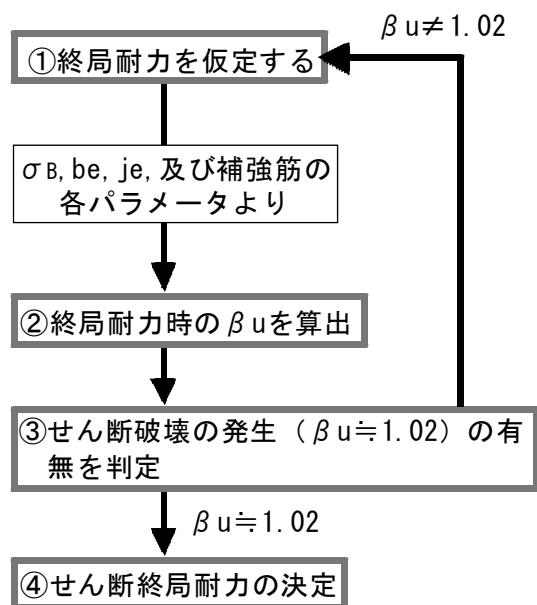


図-16 非ヒンジ部材のせん断耐力算出フロー概念

参考文献

- 1) 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針・同解説，1999
- 2) 渡辺隆弘，向井智久，野村設郎：コアコンクリートの挙動に着目した RC 梁部材のせん断抵抗機構に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp. 259-260, 2002
- 3) 渡辺隆弘，向井智久，野村設郎：せん断圧縮破壊する RC 梁部材のせん断抵抗機構に関する研究，コンクリート工学年次論文集，第24巻，第2号，pp. 307-312, 2002