

論文 自己充填型高強度高耐久コンクリートを用いた RC 梁のせん断耐力

原 夏生^{*1}・三島 徹也^{*1}・山田 尚義^{*2}・近藤 眞生^{*3}

要旨：自己充填型高強度高耐久コンクリートと高強度せん断補強鉄筋を組み合わせた RC 梁のせん断耐力について、実験を実施し、既往の実験結果を含めて耐力に関する検討を行った。その結果、せん断補強鉄筋を持たない棒部材のせん断耐力は、コンクリート強度 50N/mm^2 程度で頭打ちになるものの、せん断補強鉄筋により受け持たれるせん断耐力については、規格降伏強度 785N/mm^2 程度の高強度せん断補強鉄筋を使用した場合についても、全強でのせん断補強効果が期待出来ることが判明した。

キーワード：自己充填コンクリート、高強度コンクリート、高強度鉄筋、せん断耐力

1. はじめに

コンクリート構造物のライフサイクルコストの低減、施工の合理化を目的として、自己充填、高強度、高耐久などの特性を有するコンクリート（自己充填型高強度高耐久コンクリート）が開発されている¹⁾。本コンクリートと高強度鉄筋を組み合わせた鉄筋コンクリート（RC）構造物は、断面の縮小が可能となることから、初期建設コストの低減、および変形性能の向上も期待できる。しかしながら、構造物の設計をより合理的に行うためには、これらの材料の特性を十分に考慮した設計手法の確立が必要である。

高強度化による小断面化が導入された場合、せん断耐力に関する照査が重要となる。現在、土木学会コンクリート標準示方書（RC 示方書）²⁾においては、棒部材のせん断耐力は、修正トラス理論を仮定して評価されているが、コンクリートの受け持つせん断耐力およびせん断補強鉄筋の応力度にそれぞれ上限値が設定されている。一方、近年実施された下野ら³⁾の実験によれば、自己充填コンクリートと高強度せん断補強鉄筋の組み合わせにおいて、コンクリートの受け持つせん断耐力には頭打

ち現象が見られるものの、せん断補強鉄筋の応力度は全強で評価出来る結果が示されている。しかしながら、これらは、コンクリート強度 72N/mm^2 以上の RC 梁試験体の実験結果より得られたものである。そこで、本研究では、コンクリート強度の適用範囲を明確にすることを目的とし、 50N/mm^2 および比較のために 30N/mm^2 の通常のコンクリートを使用した梁試験体の載荷実験を実施した結果の検討、および既往の実験結果を踏まえたせん断耐力評価手法の提案を行う。

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体の一覧を表-1に示す。試験体は5体で、No.5を除く4体は目標強度 50N/mm^2 （自己充填）であり、No.5は目標強度 30N/mm^2 （通常）である。また、No.1を除く各試験体のせん断スパン部には、規格降伏強度 685N/mm^2 の高強度せん断補強鉄筋を配置している。修正トラス理論を仮定する場合、No.2,3,4の耐力からNo.1の耐力を引くことで、せん断補強鉄筋により受け持たれる耐力を求めることも可能である。No.2,5の試験体図を図-1に示す。

*1 前田建設工業（株）技術本部技術研究所課長代理 工博（正会員）

*2 前田建設工業（株）技術本部技術研究所研究員 工修（正会員）

*3 前田建設工業（株）中部支店 工修（正会員）

表-1 試験体一覧

| 試験体 | 試験体寸法 | | | コンクリート | | | | 軸方向鉄筋 | | | せん断補強筋 | | |
|------|-----------|--------------|----------------|--------------------------------|-----|--------------------------------|----|------------------------------|-----|--------------------------------|--------------|------------------------------|--|
| | 幅 (mm) | 有効高さ (mm) | せん断スパン (mm) | 目標圧縮強度 (N/mm ²) | 呼び径 | 規格降伏強度 (N/mm ²) | 本数 | 鉄筋比 P _c (%) | 呼び径 | 規格降伏強度 (N/mm ²) | 鉄筋間隔 (mm) | 鉄筋比 P _w (%) | |
| No.1 | 400 | 350 | 1050 | 50* | D29 | 685 | 4 | 1.84 | — | — | — | — | |
| No.2 | 400 | 350 | 1050 | 50* | D29 | 685 | 4 | 1.84 | D6 | 685 | 100 | 0.16 | |
| No.3 | 400 | 350 | 1050 | 50* | D29 | 685 | 4 | 1.84 | D10 | 685 | 200 | 0.18 | |
| No.4 | 400 | 350 | 1050 | 50* | D29 | 685 | 4 | 1.84 | D6 | 685 | 75 | 0.21 | |
| No.5 | 400 | 350 | 1050 | 30 | D29 | 685 | 4 | 1.84 | D6 | 685 | 100 | 0.16 | |

*: 自己充填コンクリート使用(他は、通常コンクリート)

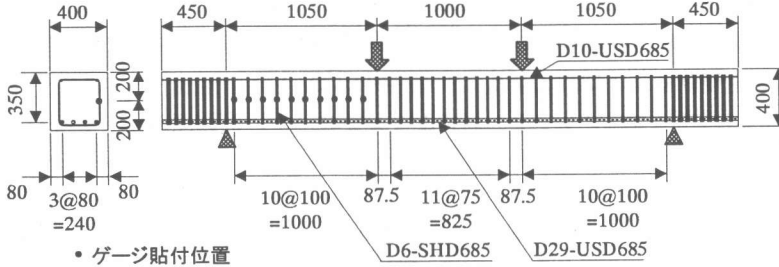


図-1 試験体図

表-2 コンクリートの配合表

| 種類 | 配合強度 (N/mm ²) | フロースランプ (cm) | Air (%) | W/C (%) | s/a (%) | 単用量 (kg/m ³) | | | | |
|-------------|------------------------------|-----------------|------------|------------|------------|--------------------------|-----|-----|-----|-------------|
| | | | | | | W | C | S | G | SP C×1/4 |
| 高強度 自己充填 | 72 | 60±5 | 5.5±1.5 | 33.0 | 51.9 | 165 | 500 | 846 | 801 | 1.6 |
| 通常強度 | 26 | 12±2.5 | 4±1.5 | 60.5 | 47.1 | 168 | 278 | 862 | 982 | - |

使用材料: セメント 高強度自己充填: 低熱ポルトランドセメント
通常強度: 早強ポルトランドセメント

粗骨材: 秩父郡皆野町産砕石

細骨材: 大里郡大里村産陸砂, 秩父郡皆野町産砕砂

混和剤 SP: 高性能AE減水剤SP-8S(B)

表-3 使用鉄筋の機械的性質

| 呼び径 | 記号 | 降伏強度 (N/mm ²) | 引張強さ (N/mm ²) | 弾性係数 (kN/mm ²) |
|-----|--------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| D6 | UHD685 | 746.6 | 964.3 | 193.1 |
| D10 | UHD685 | 803.0 | 1001.1 | 213.0 |
| D29 | USD685 | 698.2 | 1058.2 | 197.1 |

2.2 使用材料

表-2 に使用したコンクリートの配合表を
表-3 に鉄筋の機械的性質を示す。

2.3 荷重方法

荷重は、せん断スパン 1050mm, 等曲げ区間
1000mm の単純梁形式での単調荷重とした。

3. 実験結果

3.1 実験結果の概要

実験結果の一覧を表-4 に示す。同表にお
ける計算値は、以下に示す RC 示方書式⁴⁾
によるものである。

$$V_{y,cal} = V_{c,cal} + V_{s,cal} \quad (1)$$

$$V_{c,cal} = f_{vc} \sqrt[3]{100p_w} \sqrt[4]{100/d} \left(0.75 + \frac{1.4}{a/d}\right) b_w d \quad (2)$$

$$f_{vc} = 0.20 \sqrt[3]{f'_c} \quad (3)$$

$$V_{s,cal} = \left\{ A_w \cdot f_{wy} \cdot (\sin \theta_s + \cos \theta_s) / S_s \right\} \cdot z \quad (4)$$

ここで、 $V_{y,cal}$: 棒部材のせん断耐力、 $V_{c,cal}$:
せん断補鋼材を用いない棒部材のせん断耐力、
 $V_{s,cal}$: せん断補強鉄筋により受け持たれるせん断耐力、 f'_c : コンクリートの圧縮強度、 p_w :
軸方向鉄筋比、 a : せん断スパンの長さ、 d :
有効高さ、 b_w : 幅、 A_w : 区間 S_s におけるせん断補強鉄筋の総断面積、 f_{wy} : せん断補強鉄筋
の降伏強度、 S_s : せん断補強鉄筋の配置間隔、

表-4 実験結果一覧

| 試験体 | 材料強度 | | | 計算値 | | | 実験値 | | 比較 | |
|------|-----------------------------------|--------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------------------|---|--|
| | コンクリート強度 f_c (N/mm^2) | 鉄筋降伏強度 | | せん断耐力 | | | せん断耐力 | | せん断耐力 | |
| | | f_{sy} (N/mm^2) | せん断補強鉄筋 f_{wy} (N/mm^2) | 斜めひび割れ発生耐力 $V_{c cal}$ (kN) | せん断補強筋受持耐力 $V_s cal$ (kN) | 終局せん断耐力 $V_y cal$ (kN) | 斜めひび割れ発生耐力 $V_{c exp}$ (kN) | 終局せん断耐力 $V_y exp$ (kN) | 斜めひび割れ発生耐力比 $V_{c exp} / \sqrt{V_{c cal}}$ | 終局せん断耐力比 $V_y exp / \sqrt{V_y cal}$ |
| No.1 | 51.0 | 698.2 | — | 201.1 | — | 201.1 | 194.7 | 194.7 | 0.97 | 0.97 |
| No.2 | 49.4 | 698.2 | 746.6 | 198.9 | 143.9 | 342.8 | (178.9) | 381.0 | 0.90 | 1.11 |
| No.3 | 51.0 | 698.2 | 803.0 | 201.1 | 174.3 | 375.4 | (169.1) | 376.8 | 0.84 | 1.00 |
| No.4 | 55.2 | 698.2 | 746.6 | 206.5 | 191.9 | 398.4 | (186.2) | 437.4 | 0.90 | 1.10 |
| No.5 | 27.8 | 698.2 | 746.6 | 164.3 | 143.9 | 308.2 | (144.6) | 274.5 | 0.88 | 0.89 |

・()内は、ひび割れ観察による斜めひび割れ発生せん断力

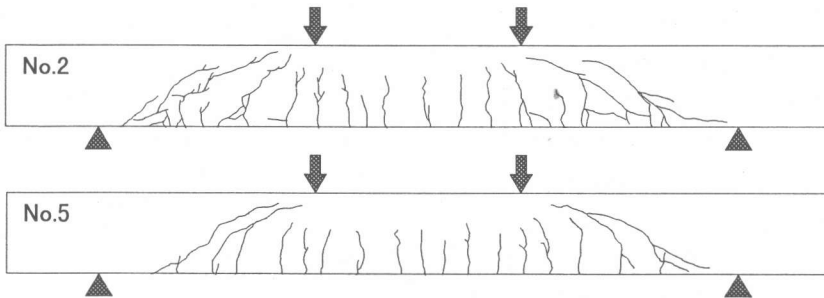


図-2 ひび割れ図(終局時)

θ_s : せん断補強鉄筋が部材軸となす角度, z : 圧縮応力の作用位置から引張鋼材図心までの距離, である。なお, RC 示方書においては f_{vc} および f_{wy} に $f_{vc} \leq 0.72N/mm^2$, $f_{wy} \leq 400N/mm^2$ の制限値が設定されているが, ここではこれらの制限値を適用せず外挿して求めている。表-4 に示すように No.5 を除く全ての試験体で終局せん断耐力比が 1.0 以上となっている。

3.2 ひび割れ性状

図-2 に No.2 および No.5 の終局時におけるひび割れ図を示す。等曲げ区間のひび割れ本数, せん断スパンの斜めひび割れの角度など, 目視におけるひび割れ性状にはコンクリートの違いによる顕著な影響は見られない。

3.3 変位性状

図-3 に作用せん断力とスパン中央のたわみの関係を示す。表-4 に示す実験時の観察結果より, せん断補強鉄筋を配置していない No.1 は, 斜めひび割れの発生とともに直ちに耐力を失っている。他の試験体はせん断補強

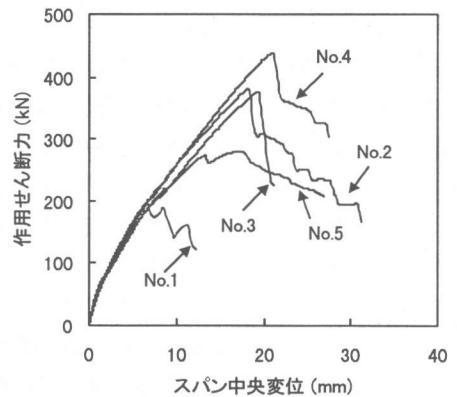


図-3 せん断力-スパン中央のたわみ

鉄筋を配置しているため, 斜めひび割れ発生後もせん断力が上昇している。最終的には斜めひび割れが圧縮縁まで貫通し, せん断破壊をしている。No.2 と No.5 は, せん断補強鉄筋比を等しくし, 使用コンクリートの違いについて着目した試験体である。最大耐力に顕著な違いが認められる。両試験体の実験時の観

察結果による斜めひび割れ発生せん断力の差は 34kN であるのに対し、終局せん断耐力の差は 107kN である。すなわち、せん断補強鉄筋による補強効果に差があるのである。また、No. 2 と No. 4 の比較より、自己充填コンクリート試験体においては、せん断補強鉄筋比の増加に応じて、終局せん断耐力が上昇している。

3.4 せん断補強鉄筋のひずみ

図-4 は各試験体のせん断補強鉄筋のひずみ分布をせん断力レベル毎に示したものである(測定位置は図-1 に示す)。50N/mm² の自己充填コンクリートを使用した No.2, 3, 4 は、せん断補強鉄筋比、鉄筋径、配置間隔によらず、いずれも 0.8V_{y,exp} 近傍で降伏ひずみを越えている。一方、30N/mm² の通常のコンクリートを使用した No.5 は V_{y,exp} 時においても降伏に至っていない。図-5 は No.5 の支点より 450mm の位置のせん断補強鉄筋のひずみ履歴を示したものである。最大せん断耐力を記録した後に降伏ひずみを越えている。RC 示方書においては、前述したように f_{wy} ≤ 400N/mm² の制限値が設定されている。これは、高強度せん断補強鉄筋を使用した場合にせん断補強鉄筋の降伏ひずみに斜めひび割れ幅が過大となり、骨材のかみ合いや鉄筋のほぞ作用等によって伝達されるせん断耐力が低下することが考慮されたものであるが、No.5 の実験結果はこれを裏付けるものとなった。

山本ら⁹⁾は鉄筋の引抜き実験を実施し、自己充填コンクリートと高強度鉄筋の組み合わせによる鉄筋の付着力-ひずみ-すべり関係を示している。それによれば、ブリーディングのない自己充填コンクリートにおいては、通常のコンクリートに比べ、圧縮強度を考慮してもなお、鉄筋の弾性域における付着力が大きく、ひび割れ位置における鉄筋のすべり(抜けだし)が小さくなることが示されている。斜めひび割れ位置のせん断補強鉄筋においても同様な現象が生じ、斜めひび割れの開口が自己充填コンクリートの場合に抑えられ

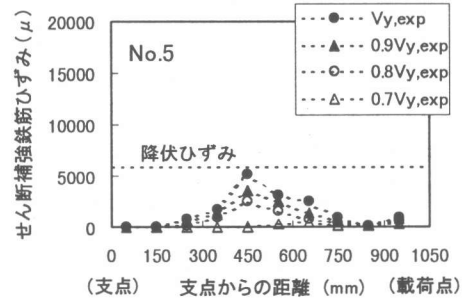
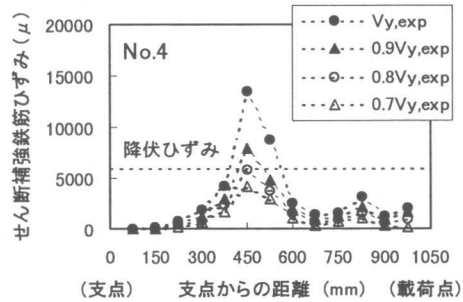
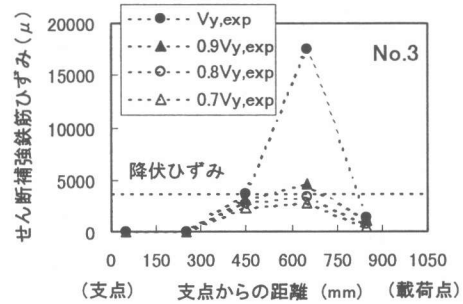
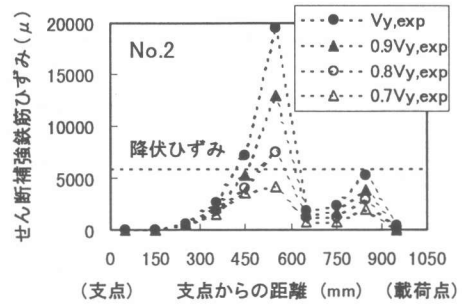


図-4 せん断補強鉄筋のひずみ分布

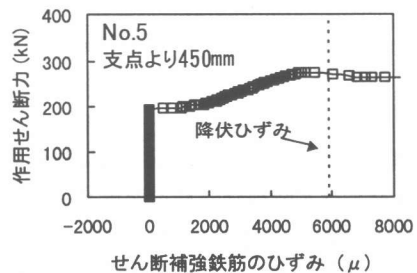


図-5 せん断補強鉄筋ひずみ履歴(No. 5)

表-5 せん断耐力評価一覧

| 試験体 | | 使用材料 | | | | | 形状寸法 | | 実験値と計算値の比較 | | | | | |
|------------------|------|-------------------------|-------------------------|--------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|-----------|------------------------|---|---|---|---|---|---|
| 実施 | No. | f _c (MPa) | 主鉄筋 | | せん断補強鉄筋 | | d (mm) | b _w (mm) | 計算手法① | | 計算手法② | | 計算手法③ | |
| | | | f _y (MPa) | A _s (mm ²) | f _y (MPa) | A _w (mm ²) | | | V _{c,exp} /√V _{c,cal1} | V _{y,exp} /√V _{y,cal1} | V _{c,exp} /√V _{c,cal2} | V _{y,exp} /√V _{y,cal2} | V _{c,exp} /√V _{c,cal3} | V _{y,exp} /√V _{y,cal3} |
| 本研究 | No.1 | 51.0* | 698 | 2570 | - | - | 350 | 1050 | 1.09 | - | 1.06 | - | 1.09 | - |
| | No.2 | 49.4* | 698 | 2570 | 747 | 63 | 350 | 1050 | 1.00 | 1.49 | 0.98 | 1.17 | 1.00 | 1.18 |
| | No.3 | 51.0* | 698 | 2570 | 803 | 143 | 350 | 1050 | 0.95 | 1.42 | 0.92 | 1.05 | 0.95 | 1.08 |
| | No.4 | 55.2* | 698 | 2570 | 747 | 63 | 350 | 1050 | 1.04 | 1.55 | 0.99 | 1.15 | 1.04 | 1.18 |
| | No.5 | 27.8 | 698 | 2570 | 747 | 63 | 350 | 1050 | 0.96 | 1.21 | 0.96 | 0.93 | 0.96 | 1.21 |
| 下野 ³⁾ | No.1 | 75.0* | 742 | 5559 | 1048 | 143 | 400 | 1200 | - | 2.00 | - | 1.34 | - | 1.65 |
| | No.2 | 78.1* | 742 | 4765 | 1048 | 143 | 400 | 1200 | - | 1.91 | - | 1.24 | - | 1.54 |
| | No.3 | 78.2* | 742 | 3971 | 1048 | 143 | 400 | 1200 | - | 2.11 | - | 1.33 | - | 1.66 |
| | No.4 | 79.5* | 742 | 3177 | 982 | 253 | 400 | 1200 | - | 1.54 | - | 0.93 | - | 1.14 |
| | No.5 | 79.7* | 742 | 5559 | - | - | 400 | 1200 | 0.91 | - | 0.77 | - | 0.91 | - |
| | No.6 | 79.1* | 742 | 4765 | - | - | 400 | 1200 | 0.95 | - | 0.80 | - | 0.95 | - |
| | No.7 | 77.3* | 742 | 3971 | - | - | 400 | 1200 | 0.85 | - | 0.72 | - | 0.85 | - |
| | No.8 | 75.9* | 742 | 3177 | - | - | 400 | 1200 | 0.83 | - | 0.71 | - | 0.83 | - |
| 土屋 ⁶⁾ | No.1 | 69.5* | 711 | 573 | - | - | 260 | 780 | 0.88 | - | 0.77 | - | 0.88 | - |
| | No.2 | 29.4 | 711 | 573 | - | - | 260 | 780 | 0.83 | - | 0.83 | - | 0.83 | - |
| | No.3 | 69.5* | 333 | 573 | - | - | 260 | 780 | 0.86 | - | 0.75 | - | 0.86 | - |
| | No.4 | 29.4 | 333 | 573 | - | - | 260 | 780 | 1.00 | - | 1.00 | - | 1.00 | - |
| | No.5 | 69.5* | 1050 | 571 | - | - | 240 | 780 | 0.92 | - | 0.81 | - | 0.92 | - |
| | No.6 | 29.4 | 1050 | 571 | - | - | 240 | 780 | 1.13 | - | 1.13 | - | 1.13 | - |
| | No.7 | 69.5* | 363 | 571 | - | - | 240 | 780 | 0.90 | - | 0.79 | - | 0.90 | - |
| | No.8 | 29.4 | 363 | 571 | - | - | 240 | 780 | 1.06 | - | 1.06 | - | 1.06 | - |
| | No.9 | 69.4* | 711 | 571 | - | - | 240 | 780 | 0.86 | - | 0.75 | - | 0.86 | - |

*: 自己充填コンクリート(他は通常のコンクリート)

ていることが推測される。

4. せん断耐力の評価および提案

4.1 せん断耐力の再評価

表-5は、本研究で実施した試験結果および、下野³⁾、土屋⁶⁾が実施した自己充填コンクリートと高強度せん断補強鉄筋の組み合わせ、および比較のために実施した通常のコンクリートによる梁試験体のせん断耐力の一覧を示したものである。同表における計算値との比較は、いずれも上述した式(1), (2), (3), (4)に示す耐力評価式を用いているが、以下の3つの場合に分けて実施している。

計算手法①:

現行 RC 示方書式の制限値

$$f_{vc} \leq 0.72N/mm^2, f_{wy} \leq 400N/mm^2 \text{ を適用}$$

計算手法②:

制限値なし

計算手法③: (本研究における提案)

自己充填コンクリートの場合に

$$f_{vc} \leq 0.72N/mm^2, f_{wy} \leq 785N/mm^2 \text{ を適用}$$

通常のコンクリートの場合①と同じ制限値を適用

計算手法①での評価においては、 $V_{y,exp}$ を過小評価していることが示されている。また、計算手法②を適用すると $V_{c,exp}$ を過大評価することになる。図-6および図-7は計算手法②における斜めひび割れ発生せん断耐力および終局せん断耐力の実験値と計算値の比をそれぞれ横軸にコンクリート強度とせん断補強鉄筋降伏強度をとって示したものである。図-6よりコンクリート強度が $50N/mm^2$ を越えると耐力比が低下していることが示されている。また、図-7からは、せん断補強鉄筋の降伏強度の増加による耐力比の低下は認められない。

4.2 せん断耐力評価手法の提案

以上を踏まえ、本研究における提案である、

計算手法③では、コンクリート強度 50N/mm^2 時の f_{vc} が 0.74N/mm^2 であり、現行 RC 示方書制限値とほぼ等しいことから $f_{vc} \leq 0.72\text{N/mm}^2$ としている。また、 f_{wy} の上限値には、本研究で参照した既往の実験結果におけるせん断補強鉄筋の規格降伏強度である 785N/mm^2 とした。限られた実験データの範囲ではあるが、設計で用いる上では妥当な値を与える提案であると考えている。なお、設計では、式(2)において a/d を定義するのが困難な場合が多いので、現行 RC 示方書にならない $a/d=5.6$ として安全側に評価するのが妥当である。

5. まとめ

本研究は、自己充填コンクリートと高強度せん断補強鉄筋の組み合わせによる梁部材のせん断耐力について、実験を実施し、既往の実験結果と併せて検討したものである。本研究の結果を以下にまとめる。

- (1) コンクリート強度 50N/mm^2 程度を越えた場合、斜めひび割れ発生せん断耐力に頭打ち現象があることが再確認された。
- (2) 自己充填コンクリートの場合、コンクリート強度 50N/mm^2 程度以上であれば、規格降伏強度 785N/mm^2 程度までのせん断補強鉄筋に対して全強でのせん断補強効果が期待できる。
- (3) 自己充填コンクリートと高強度せん断補強鉄筋を組み合わせた梁部材のせん断耐力に対しては、現行の RC 示方書の評価手法における f_{wy} の上限値を 785N/mm^2 に拡大可能であることが判明した。

謝辞

本研究を実施する際に東京大学前川宏一教授ならびに日本道路公団中菌明広氏、井ヶ瀬良則氏、水上善晴氏の御指導を頂きました。ここに深謝致します。

参考文献

- 1)超高性能コンクリート構造物設計施工指針

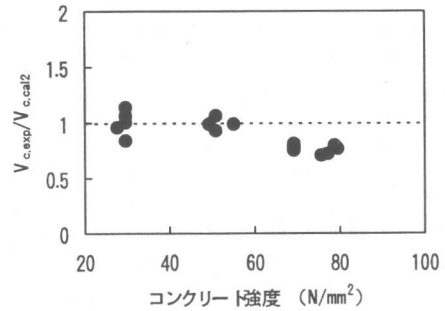


図-6 斜めひび割れ発生耐力比（計算手法②）とコンクリート強度の関係

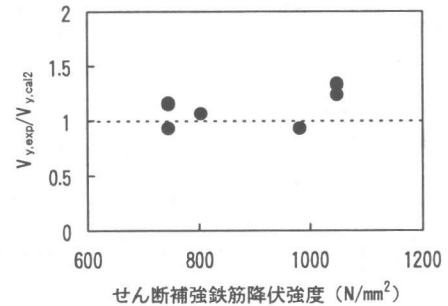


図-7 終局せん断耐力比（計算手法②）とせん断補強鉄筋降伏強度の関係

(案), 超高性能コンクリート構造物の設計施工に関する委員会, 1996.

- 2)平成8年制定コンクリート標準示方書設計編, (社)土木学会, 1996.
- 3)下野ほか:高強度材料を用いた RC 梁部材のせん断耐力に関する実験的研究,コンクリート工学年次論文報告集,Vol.21,No.3,pp.175-180,1999.
- 4)二羽ほか:せん断補強鉄筋を用いない RC 梁のせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, 第 372 号/V-5, pp.167-176, 1986.8.
- 5)山本ほか:高強度材料を用いた RC 部材の鉄筋付着特性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集,Vol.22,No.3,pp.1249-1254, 2000.
- 6)土屋ほか:高強度材料を用いた RC 梁のせん断破壊実験, 第 55 回土木学会年次学術講演会概要集 V 部, pp.1042-1043, 2000.