

論文 せん断キーを有する超高強度コンクリートプレキャスト部材のせん断伝達耐力

盛田 行彦*1・一宮 利通*2・平 陽兵*3・日紫喜 剛啓*4

要旨：本研究では、自己収縮を低減させた圧縮強度 150N/mm² レベルの超高強度コンクリートをプレキャスト部材に適用する場合を想定し、せん断キーとエポキシ樹脂を用いた継目のせん断伝達耐力を定量的に評価することを目的として、高軸応力下におけるせん断伝達耐力の確認実験を実施した。実験の結果、破壊モードはせん断キーのせん断破壊および継目のずれであり、既往の評価式を用いて評価できることが分かった。

キーワード：超高強度コンクリート、プレキャスト部材、せん断キー、せん断伝達耐力

1. はじめに

近年、高性能減水剤の発達などにより、特別な養生なしで圧縮強度が 100 N/mm² を超える超高強度コンクリートの製造が可能となっている。

この超高強度コンクリートの圧縮強度特性を有効利用するためには、プレストレストコンクリート構造物への適用が考えられる。すなわち、プレストレスを大きくできるため、構造部材の曲げ耐力やせん断耐力を向上させることができ、部材厚を薄くして構造物全体の軽量化を図ることができる。特に、プレキャスト部材として適用する場合、軽量化によってさらなるコストダウンや施工の省力化に資するものと考えられる。

現在、著者らは、圧縮強度 150 N/mm² レベルの超高強度コンクリートをプレキャスト部材に利用することを目的として、自己収縮の低減方法¹⁾や、プレテンション部材の有効プレストレスなどの検討を行っている。その一環として、本研究では、プレキャスト部材の継目におけるせん断伝達耐力について検討した。ここでは、せん断キーとエポキシ樹脂を用いた場合を対象として、高軸応力下におけるせん断伝達耐力の確認実験を実施し、既往の評価式の適用性を検討した。

2. せん断伝達耐力の評価式

本研究では、せん断キーの効果を含むせん断伝達耐力 V_{cwd} の評価式として、以下に示す 2 つの式の適用性を検討した。

(1) 土木学会²⁾の提案式

$$V_{cwd} = (\tau_c \cdot A_c + V_k) / \gamma_b \quad (1)$$

ここで、 $\tau_c = \mu \cdot f_{cd}^b \cdot (\sigma_{nd} / 2)^{1-b}$

$$V_k = 0.1 A_k \cdot f_{cd}'$$

A_c はせん断面の断面積(mm²)、 μ は固体接触に関する平均摩擦係数(=0.45)、 b は面形状を表す係数(ここでは 0.5)、 f_{cd}' はコンクリートの圧縮強度(N/mm²)、 σ_{nd} はせん断面に垂直に作用する平均圧縮応力度(N/mm²)、 A_k はせん断キーのせん断面の断面積(mm²)、 γ_b は部材係数(ここでは 1.0)である。ただし、鉄筋に関する項は無視している。

式(1)の第 1 項はひび割れ面を想定して骨材の噛み合わせや摩擦を考慮した式であるが、 b を 0.5 とすることによってエポキシ樹脂で接着された継目にも適用できるとされている。また、式(1)の第 2 項はせん断キーの効果を簡易的に表したものである。

(2) 中條ら³⁾の提案式

$$V_{cwd} = \tau_r \cdot A_r + \tau_k \cdot A_k \quad (2)$$

*1 鹿島建設(株) 技術研究所 土木構造グループ 研究員 工修 (正会員)

*2 鹿島建設(株) 技術研究所 土木構造グループ 主任研究員 工修 (正会員)

*3 鹿島建設(株) 東北支店 常磐自動車道前田川橋(PC上部工)JV 工修 (正会員)

*4 鹿島建設(株) 技術研究所 土木構造グループ グループリーダー 工修 (正会員)

表-1 自己収縮を低減した超高強度コンクリートの配合

| 水結合材比 W/B (%) | 空気量 Air (%) | 細骨材率 s/a (%) | 単位量 (kg/m ³) | | | | | RA (C×%) | SP (C×%) |
|------------------|----------------|-----------------|--------------------------|-----|-----|-----|-----|-------------|-------------|
| | | | W | C | S | G | JL | | |
| 17.0 | 1.5 | 43.8 | 155 | 912 | 618 | 636 | 113 | 0.5 | 1.6 |

C：シリカフェームセメント，S：細骨材，G：粗骨材，JL：人工軽量骨材
RA：収縮低減剤，SP：高性能減水剤

$$\text{ここで, } \tau_k = \frac{f'_c - f_t}{2\sqrt{f'_c \cdot f_t}} \cdot \sigma + \frac{\sqrt{f'_c \cdot f_t}}{2} \quad (3)$$

τ_k はコンクリートとエポキシ樹脂との接着強度(文献3)より 5.7 N/mm²), A_r はせん断キーを除くせん断面の断面積(mm²)である。また, A_k はせん断キーのせん断面の断面積(mm²), τ_k は式(3)で表されるせん断強度(N/mm²), f'_c は圧縮強度(N/mm²), f_t は引張強度(N/mm²), および σ はせん断面に垂直に作用する応力(N/mm²)である。

式(2)の第1項はエポキシ樹脂の接着力を表したものであり, 式(2)の第2項はせん断キーのせん断強度から算出されるせん断耐力である。

3. 実験の概要

超高強度コンクリートのせん断キーについて前述の評価式の適用性を検討するために, せん断キーを有する継目のせん断伝達耐力確認実験を行った。また, 式(2)ではせん断強度を用いるため, 超高強度コンクリートのせん断強度についても, せん断強度試験を行って検討した。

3.1 超高強度コンクリートの配合

表-1 に本実験に用いた超高強度コンクリートの配合を示す。配合は, 水結合材比 W/B を 17% とすることで圧縮強度 150 N/mm² を得るものである。コンクリートの使用材料は, 超高強度コンクリートに適したものを選定した。セメントには低熱ポルトランドセメントベースのシリカフェームプレミックスセメントを使用した。

一般に, 超高強度コンクリートは水結合材比が極めて小さいため大きな自己収縮が生じ, 耐力の低下や鋼材の拘束によるひび割れが生じる可能性がある。そこで, 自己収縮を低減する方法として, 人工軽量骨材と収縮低減剤を併用する方法¹⁾を採用した。なお, 人工軽量骨材は, 骨

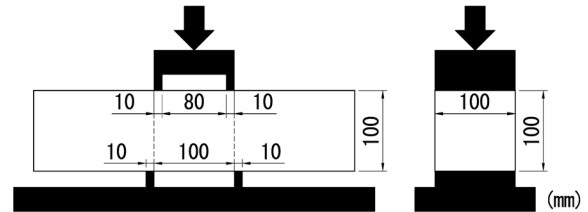


図-1 2面せん断試験の概要

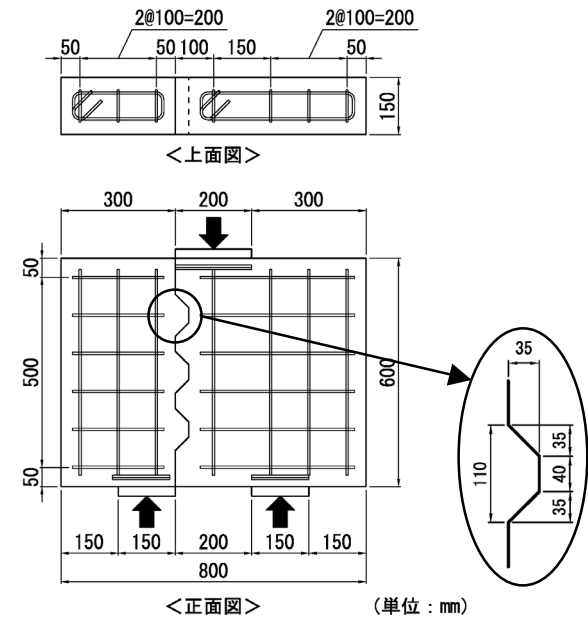


図-2 試験体の形状寸法および配筋

材内部の保有水が水和反応に伴う自己乾燥を補償するものである。この人工軽量骨材⁴⁾には, 比較的高い強度と高い吸水率を併せ持つものを使用した。

3.2 超高強度コンクリートのせん断強度試験

コンクリートのせん断強度を求めるには様々な形状の試験装置や試験方法が提案されており, 確立された試験方法はないが, ここでは, 図-1 に示すように, 簡易な試験方法である 2 面せん断試験を採用した。なお, 試験方法は, 「鋼繊維補強コンクリートのせん断強度試験方法 (JSCE-G 553-1999)」⁵⁾に準拠し, 3 体の供試体について試験を行った。

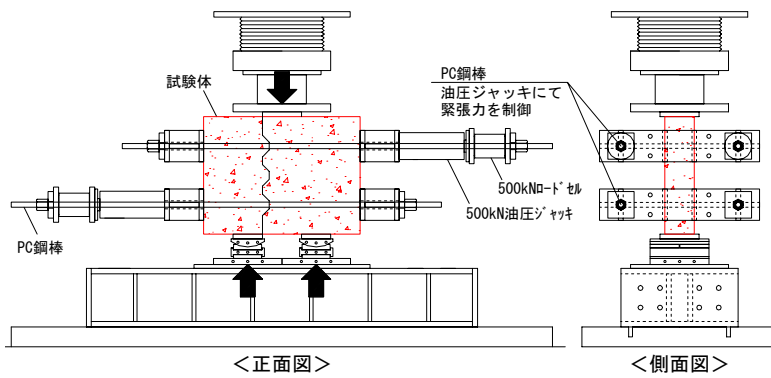


図-3 荷重概要図

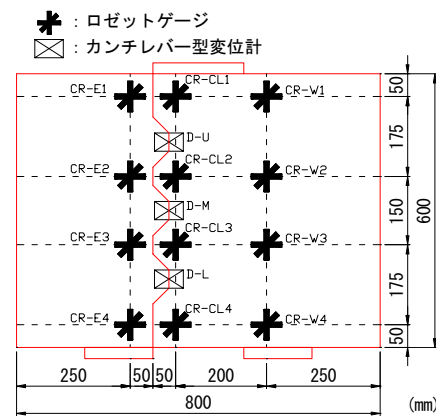


図-4 計測位置図

3.3 せん断伝達耐力の確認実験

(1) 試験体の概要

図-2 に試験体の形状寸法および配筋を示す。試験体は、せん断キーを3段配置し、継目をエポキシ樹脂で接着するものとした。試験体の幅と高さは150mmおよび600mmであり、せん断キーの形状は、高さを35mm、底辺の長さを110mmとした。また、試験体を補強するために最小鋼材量としてD6-SD345を配置したが、継目を貫通する鉄筋は配置しなかった。

(2) 試験体の製作方法

試験体の製作はマッチキャスト方式で行った。まず、荷重部を含む部分のコンクリートを打設し、1週間湿潤養生した。脱型後、継目の表面に剥離剤を塗布して、コンクリートが付着しないように処理を施した後、2回目のコンクリート打設を行った。さらに1週間の湿潤養生後に脱型して2つの部分を分離して、剥離剤を除去した後継目にエポキシ樹脂を塗布して試験体を接着した。その際、接着させてからエポキシ樹脂が硬化するまでの5日間、継目に 0.3 N/mm^2 程度の圧縮応力を作用させた。なお、せん断伝達耐力の確認実験時におけるコンクリートの圧縮強度、引張強度は、1回目に打設したものが 154 N/mm^2 、 7.3 N/mm^2 であり、2回目に打設したものが 150 N/mm^2 、 7.1 N/mm^2 であった。

(3) 荷重方法および計測

図-3 に荷重概要図を示す。試験方法は、せん断強度試験と同様に、荷重が容易な2面せん断試験とした。荷重手順は、①軸方向に 10 N/mm^2

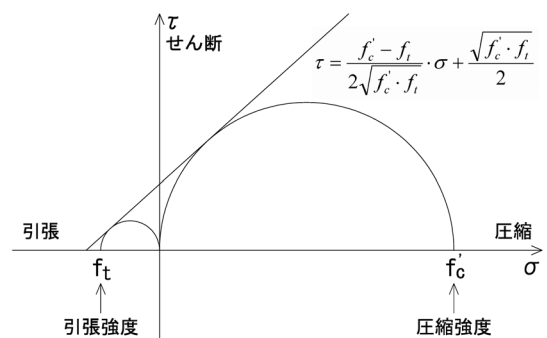


図-5 モールの応力円に基づくせん断強度

のプレストレスを偏心させないように導入し、②プレストレスを油圧ジャッキで一定に制御しながら、鉛直荷重を静的に単調荷重した。鉛直荷重の荷重部には球座を用い、支点部には水平移動および回転を拘束しないようにテフロン支承を用いた。なお、プレストレスは、試験体の外側に配置した4本のPC鋼棒を介して油圧ジャッキで作用させた。

計測は、図-4 に示すように、ロードセルを用いて鉛直荷重およびプレストレス導入荷重を、カンチレバー型変位計を用いて継目の鉛直ずれ変位を、ロゼットゲージを用いてコンクリートひずみを計測した。また、ひび割れ発生状況や破壊状況を観察した。

4. 実験結果および考察

4.1 せん断強度試験

ここでは、式(3)に示すモール・クーロン説⁶⁾に基づいて、超高強度コンクリートのせん断強度の評価手法を検討した。すなわち、図-5 に示

すように破壊規準を圧縮強度と引張強度の応力円双方に接する接線の交点としたものである。また、式(3)を圧縮強度のみで簡易に表現するために、土木学会²⁾に示される式(4)の適用性についても検討した。

$$f_t = 0.23 \cdot f_c'^{2/3} \quad (4)$$

図-6 に各試験材齢における超高強度コンクリートの圧縮強度と引張強度の関係を示す。また、図中には、式(4)で表される推定値も併せて示す。なお、試験方法については、圧縮強度は JIS A 1108-1999 に、引張強度は JIS A 1113-1999 に準拠した。試験結果から、式(4)は圧縮強度が 80 N/mm² までのコンクリートを対象としたものであるが、圧縮強度が 150 N/mm² を超える場合でも、実験値と式(4)で表される推定値は良い一致を示している。このことから、圧縮強度が 150 N/mm² レベルの超高強度コンクリートにおいても、引張強度を式(4)を用いて評価できるものと考えられる。

表-2 に圧縮強度とせん断強度の試験結果を示す。また、表中には、式(3)から σ を 0 として算出したせん断強度 τ_0 を併せて示す。なお、圧縮強度は実験値を、引張強度は式(4)を用いて圧縮強度の実験値から算出したものを用いた。せん断強度の実験値 $\tau_{0,exp}$ と計算値 τ_0 はほぼ同程度の値であった。これより、式(3), (4)を用いることにより、150 N/mm² レベルの超高強度コンクリートの圧縮応力が作用しないせん断強度を圧縮強度のみを用いて評価できるものと考えられる。

4.2 せん断伝達耐力の確認実験

(1) 実験結果

図-7 に鉛直荷重と継目の鉛直ずれ変位の関係を、図-8 に実験終了後のひび割れ状況を示す。

軸方向にプレストレスが導入されているため、鉛直荷重が 1,029kN において下縁引張応力度が 0 となり、約 2,000 kN において載荷点下縁に曲げひび割れが生じた。その後、3,250 kN において、せん断キーを有していない方のせん断面で載荷点から支承部に向かう明確な斜めせん断ひび割れが発生した。さらに最大荷重 3,950 kN におい

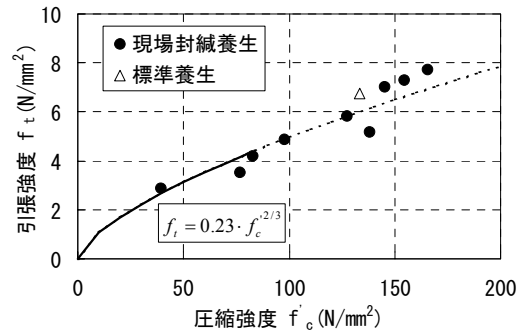


図-6 圧縮強度と引張強度の関係

表-2 圧縮強度とせん断強度の関係

| | f'_c (N/mm ²) | $\tau_{0,exp}$ (N/mm ²) | τ_0 (N/mm ²) |
|------|--------------------------------|--|----------------------------------|
| 1 | 150.4 | 14.5 | — |
| 2 | 142.3 | 14.5 | — |
| 3 | 142.5 | 15.0 | — |
| Ave. | 145.1 | 14.7 | 15.2 |

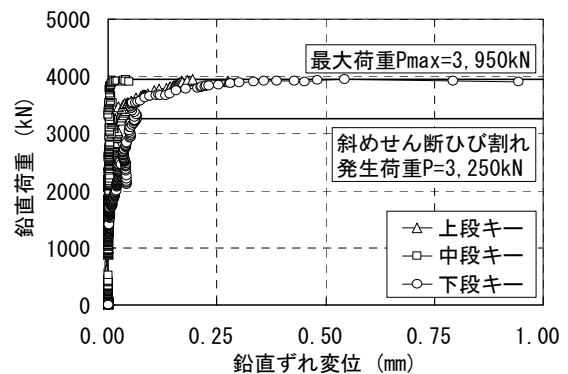


図-7 鉛直荷重と鉛直ずれ変位の関係

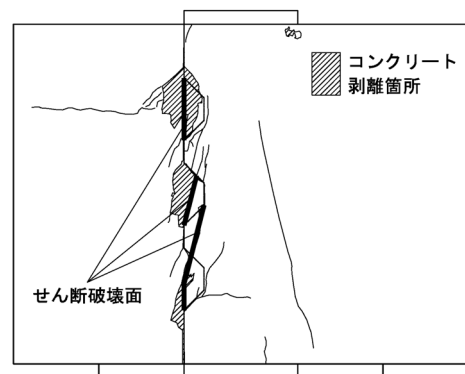


図-8 実験終了後のひび割れ状況

て、せん断キーがせん断破壊すると同時に継目全体がずれて破壊に至った。また、図-8 に示すせん断破壊面以外ではエポキシ樹脂の接着が切れており、せん断キーの一部に剥離が生じていた。

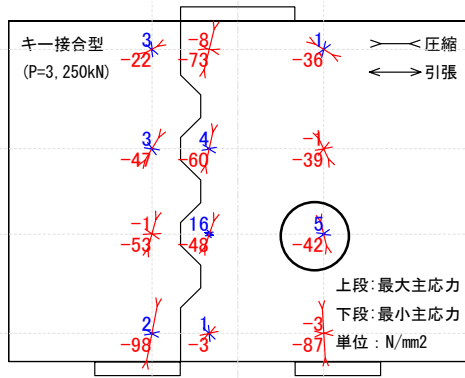


図-9 斜めせん断ひび割れ発生時の主応力分布図 (実験結果)

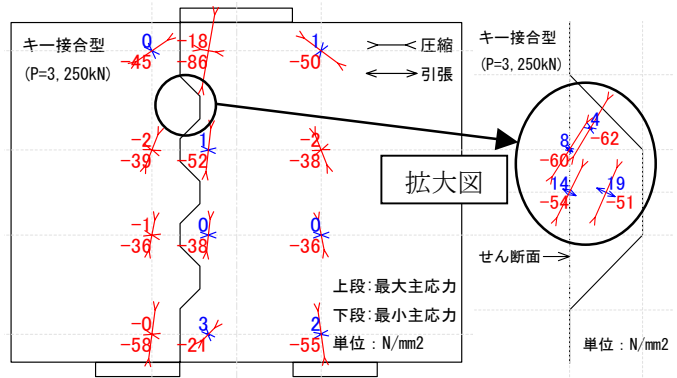


図-10 斜めせん断ひび割れ発生時の主応力分布図 (解析結果)

さらに、図-7より、斜めせん断ひび割れが発生するまで継目における鉛直ずれ変位はほとんど生じていないため、せん断キーを有する継目は十分な剛性を有していたと考えられる。

図-9に斜めせん断ひび割れ発生時の主応力分布図の実験結果を示す。なお、図中の数値は、引張を正、圧縮を負で示しており、上段が最大主応力、下段が最小主応力を表している。

せん断キーの中段の計測位置で、引張強度を超える 16.0N/mm^2 の最大主応力が生じており、ひび割れが発生していた可能性があるが、実験時には確認することができなかった。また、せん断キーを有していない方のせん断面に、斜めせん断ひび割れが発生した時点での最大主応力は、引張強度よりも若干小さい 5.0N/mm^2 (図-9の丸印)であった。

(2) 解析によるせん断キーの応力状態の検討

せん断キーに生じている応力状態を確認するために、2次元線形FEM解析を実施した。継目はエポキシ樹脂で接着していることを考慮して、界面要素を用いて、引張とせん断に抵抗するモデルとした。なお、界面要素の物性値は、圧縮弾性係数を $3,350\text{N/mm}^2$ 、厚さを 1mm 、ポアソン比を 0.2 と仮定してせん断弾性係数を算出し、引張剛性を $3,350\text{N/mm}^3$ 、せん断剛性を $1,396\text{N/mm}^3$ とした。

図-10に解析結果として、載荷実験の斜めせん断ひび割れ発生時における主応力分布図と上段のせん断キーに作用している主応力分布図の

拡大図を示す。なお、図中の数値は、図-9と同様に表示している。

解析は線形解析であるが、ひび割れ発生までは実験における主応力分布を概ね再現できると言える。また、上段のせん断キーに着目すると、せん断キーに作用している支圧応力は圧縮強度の $2/5 (=62/154)$ 程度であり、せん断キーの支圧破壊よりも接合面のせん断破壊が支配的であるものと推察される。

(3) せん断伝達耐力の評価

ここでは、本実験と同様に鉄筋で補強されていないせん断キーとエポキシ樹脂を用いた普通強度コンクリートの継目に関する既往の実験結果^{3),7)}も併せて、せん断伝達耐力の評価式の適用性を検討する。

既往の実験は、圧縮強度が $40\sim 50\text{N/mm}^2$ 、プレストレス $0\sim 4\text{N/mm}^2$ までの範囲で実験されたものである。文献3)は1面せん断試験を採用しており、本実験と同様、継目のずれとせん断キーのせん断破壊を伴う破壊モードである。文献7)は2面せん断実験を採用しており、接合面を跨ぐせん断ひび割れが生じてせん断破壊する破壊モードである。

図-11, 12に、式(1)および式(2)で算出したせん断伝達耐力の計算結果に対する実験結果の比を、プレストレスを横軸にして示す。

図-11より、式(1)を適用した場合、超高強度コンクリートを用いた本実験では、実験値と計算値がほぼ一致し、普通強度コンクリートでは

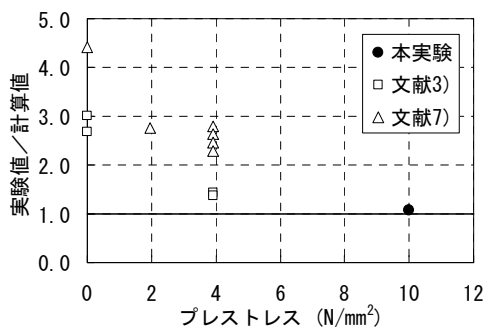


図-11 式(1)によるせん断伝達耐力の評価

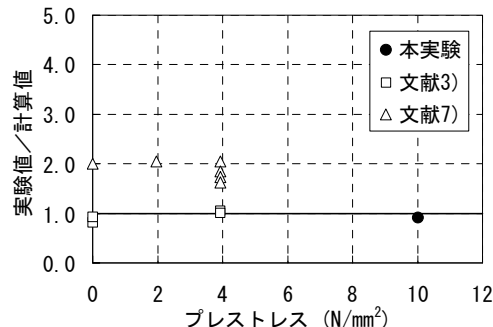


図-12 式(2)によるせん断伝達耐力の評価

安全側の評価が得られている。また、本実験の実験値/計算値は1.0程度であり、既往の実験に比べて相対的に小さく示されている。これは、コンクリートの圧縮強度の違いによる影響か、または、プレストレスによる影響と考えられる。

図-12より、式(2)を適用した場合、超高強度コンクリートを用いた本実験についても、文献3)の実験と同様、実験値と計算値はほぼ一致している。なお、破壊モードが異なる文献7)についても、ほぼ安全側に評価されている。ただし、本実験では必ずしも純せん断破壊ではないことや、圧縮応力が作用する場合の超高強度コンクリートのせん断強度については十分に明確になっていないことなどから、これらの影響について詳細に検討する必要があるものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、自己収縮を低減させた圧縮強度150 N/mm²レベルの超高強度コンクリートをプレキャスト部材として使用することを想定し、せん断キーを有する接合面のせん断伝達耐力の評価について検討した。本研究で得られた知見をまとめると、以下のとおりである。

- 1) 超高強度コンクリートの引張強度は、土木学会の圧縮強度に基づく推定式の適用範囲を広げることによって、算定可能である。
- 2) 超高強度コンクリートについても、モール・クーロン説に基づいてせん断強度が推定可能である。ただし、圧縮応力が作用する場合については別途検討が必要である。
- 3) 本検討の範囲内では、土木学会の設計式、な

らびにエポキシ樹脂の接着力とせん断キーのせん断強度を考慮した中條らの提案式を用いることによって、せん断伝達耐力を推定することができると言える。

本研究におけるせん断伝達耐力の確認は限られた実験ケースによるものであるが、今後は、さらに詳細に検討する予定である。

参考文献

- 1) 日紫喜剛啓, 大野俊夫, 一宮利通, 高田和法, 笠井 浩: 低収縮型超高強度コンクリートの開発について, コンクリートテクノ, Vol.22, No.11, pp.9-12, 2003.11
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書 [2002年制定] 構造性能照査編, 2002
- 3) 中條友義, 泉 満明, 阿部源次: コンクリート部材継目部の純せん断強度, 土木学会第41回年次学術講演会, V-127, pp.251-252, 1986
- 4) 笠井 浩, 和美廣喜, 新井一彦, 森田 哲: 石炭灰人工骨材を用いたコンクリートのセルフキュアリング効果に関する実験研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.2, pp.1273-1278, 2000
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書 [2002年制定] 規準編, 2002
- 6) 例えば, 日本コンクリート工学協会: コンクリート技術の要点'03, pp.68, 2003
- 7) 建設省土木研究所: プレキャストブロック橋の設計法に関する共同研究報告書(II), 1993