

# PC 合成桁のせん断伝達機構に関する検討

村越 潤 \*1・田中 良樹 \*2・横田 勉 \*3・大山 博明 \*4

## 1. はじめに

近年、現場施工の省力化を目的として、プレストレストコンクリート (PC) 合成桁と、PC 合成床版を組み合わせた、PC コンポ橋の採用事例が増加している。PC コンポ橋は、従来の PC 合成桁に比べて主桁と床版間の接合面の幅が広いことから、接合面に作用するせん断応力度が従来よりも確実に小さくなるが、現行の設計法によれば、最小ずれ止め鉄筋比の規定により、むしろ従来の PC 合成桁に比べてより多くのずれ止め鉄筋を配置しなければならない場合がある<sup>1, 2)</sup>。一方、PC コンポ橋にかぎらず、コスト削減や品質の確保などを目的として PC 橋の構造が多様化するなかで、鋼・コンクリート間もしくはコンクリート間の接合部に関して、構造の安全性や施工の省力化に着目したさまざまな検討が行われている<sup>3)</sup>。

著者らを含む(独)土木研究所および(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会(PC建協)は、「橋梁用プレキャスト PC 部材の接合技術に関する共同研究(2005～2006年度)」<sup>1, 4, 5)</sup>において、コンクリート間の接合部におけるせん断伝達機構をより明確にするため、せん断伝達に及ぼす接合面の表面粗度の影響およびずれ止め鉄筋のダウエル効果について新たに実験的検討を行うとともに、既往の試験データの再分析を行った。また、その結果を踏まえて、PC 合成桁の主桁と床版間の接合面のせん断伝達についても改めて検討を行い、新たな知見を得た。本文では、道路橋 PC 合成桁の接合面のせん断伝達に関する関連基準をまとめるとともに、既往の研究と本共同研究で得られた接合面のせん断伝達に関する主な検討結果、およびその結果を踏まえた PC 合成桁接合面のせん断伝達耐力の算定法(試案)を示す。

## 2. PC 合成桁のせん断伝達に関する道路橋示方書規定の変遷および関連基準類との比較

### 2.1 せん断伝達に関する許容応力度または耐力

#### (1) 道路橋示方書規定の変遷

図 - 1 に道路橋 PC 合成桁の主な研究と基準の変遷を示す。PC 合成桁の実用化に向けた研究プロジェクトとしては、1950 年代後半から 1960 年代にかけて実施された米国セメント協会 (PCA) の一連の研究がある<sup>6, 7)</sup>。同研究を参考に日本でも実験的検討が加えられ<sup>8)</sup>、その成果を踏ま

PC 合成桁の研究 (PCA, 1960)<sup>6)</sup>  
 ACI-ASCE 333 合成桁に関する勧告 (1960)<sup>7)</sup>  
 PC 合成桁の研究 (乙藤ら, 1967)<sup>8)</sup>  
 PC 合成桁設計要領 (案) (御子柴ら, 1968.2)<sup>9)</sup>

プレストレストコンクリート道路橋示方書 (1968.3)<sup>10)</sup>

PC 合成桁の規定を含む

道路橋示方書 III コンクリート橋編 (1978)<sup>11)</sup>

接合面の許容せん断応力度が変更された

道路橋示方書 III コンクリート橋編 (1990)<sup>13)</sup>

接合面の許容せん断応力度が変更された

図 - 1 道路橋 PC 合成桁の主な研究と基準の変遷

注) 枠内は旧建設省より通達された基準

えて、1968 年に PC 合成桁設計要領 (案) が雑誌に紹介された<sup>9)</sup>。また、ほぼ同時期に通達されたプレストレストコンクリート道路橋示方書 (PC 道示) にも PC 合成桁の規定が示された<sup>10)</sup>。

PC 合成桁設計要領 (案)<sup>9)</sup>では、床版と PC 桁の接合面の水平せん断に対するコンクリートの許容せん断応力度  $\tau_{ba}$  を  $0.5 \text{ N/mm}^2$  (当時 cgs 単位系であったものも SI 単位で示す、以下同様) と定めるとともに、ずれ止め鉄筋比  $p$  ( $= A_s / A_c$ ,  $A_s$ : ずれ止め鉄筋量,  $A_c$ : 接合面積) が 1% 増すごとに  $\tau_{ba}$  を  $0.3 \text{ N/mm}^2$  の割合で増してよいとされた。これらは、 $p$  の最小量を 0.2% とし、木ごて仕上げ程度で接合面を打放しにし、レイタンスを取って十分に清掃した場合を想定して設定された。

PC 道示<sup>10)</sup>では、接合面の設計に関して次のとおり規定された。また、ずれ止め鉄筋比  $p$  が 1% 増すごとに  $\tau_{ba}$  を  $0.25 \text{ N/mm}^2$  の割合で増してよいとされた。

$\tau_{ba} = 0.5 \text{ N/mm}^2$  (最小鋼材量 0.15% を入れ、接合面を打放しにし、レイタンスを取ってきれいにそうじした場合)

$\tau_{ba} = 1 \text{ N/mm}^2$  (最小鋼材量 0.15% を入れ、接合面を骨材が露出するまでチッピングしてきれいにそうじした場合)

1978 年に通達された道路橋示方書 III コンクリート橋編 (道示)<sup>11)</sup>において、 $\tau_{ba}$  は次のとおり改訂された。

$\tau_{ba} = 0.5 \text{ N/mm}^2$  ( $p < 1\%$ )

$\tau_{ba} = 0.75 \text{ N/mm}^2$  ( $1\% \leq p < 2\%$ )

$\tau_{ba} = 1 \text{ N/mm}^2$  ( $p \geq 2\%$ )

\*1 Jun MURAKOSHI : 独立行政法人土木研究所 構造物研究グループ 上席研究員

\*2 Yoshiki TANAKA : 独立行政法人土木研究所 構造物研究グループ 主任研究員

\*3 Tsutomu YOKOTA : (株)プレストレスト・コンクリート建設業協会

\*4 Hiroaki OYAMA : (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会

現行道示<sup>12)</sup>の $\tau_{ba}$ の算定式は1990年の改訂<sup>13)</sup>において式(1a)のとおり示された。

$$\tau_{ba} = 0.38 + 12 p \sqrt{\sigma_{ck}} \quad (H/D \geq 5.5) \quad (1a)$$

$$\tau_{ba} = 0.38 + 2.18 (H/D) p \sqrt{\sigma_{ck}} \quad (H/D < 5.5) \quad (1b)$$

ここに、 $\sigma_{ck}$ ：床版に使用するコンクリートの設計基準強度(N/mm<sup>2</sup>)、 $H$ ：ずれ止め鉄筋の高さ、 $D$ ：ずれ止め鉄筋の直径

一般には条文の式(1a)が使用されるが、解説において $H/D < 5.5$ の場合は式(1b)によるとされている。これらは、ずれ止め鉄筋がスタッドと同様な効果があるとして、スタッドの許容せん断力の式から導かれたとされている<sup>14)</sup>。

図-2に、道示におけるPC合成桁接合面の許容せん断応力度の変遷を示す。図中の横軸は、 $p \cdot f_y$  ( $f_y$ ：ずれ止め鉄筋の降伏点)で表した。現行の規定では、設計基準強度が30 N/mm<sup>2</sup>で、ずれ止め鉄筋比が最小(0.2%)である場合に許容せん断応力度が従来の規定と同様、約0.5 N/mm<sup>2</sup>となるように設定されている。なお、図中には参考として、PC合成桁設計要領(案)における提案値およびPCコンポ橋(PC合成桁の一種)の一般的な $p \cdot f_y$ の範囲(単純桁の場合、おおむね0.7~1.7 N/mm<sup>2</sup>)を示す<sup>1)</sup>。

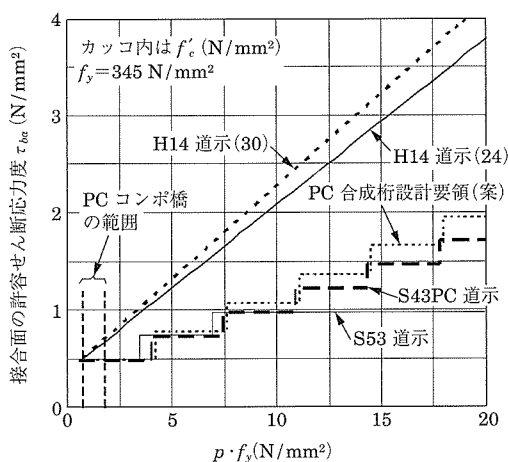


図-2 道示におけるPC合成桁接合面の許容せん断応力度の変遷

## (2) コンクリート標準示方書の規定

土木学会コンクリート標準示方書では、限界状態設計法へ移行した1986年の設計編<sup>15)</sup>からせん断伝達耐力 $V_u$ の算定式が示された。1996年の改訂<sup>16)</sup>で、前川らの検討<sup>17)</sup>を踏まえて、式(2)のとおり変更され、現在<sup>18)</sup>に至っている。

$$V_u = (\tau_c + p \cdot \tau_s) \cdot A_c / \gamma_b \quad (2)$$

$$\tau_c = \mu \cdot f_c^B (\alpha \cdot p \cdot f_y - \sigma_n)^{1-B}$$

$$\tau_s = 0.08 f_y / \alpha$$

$$\alpha = 0.75 \{1 - 10(p - 1.7 \sigma_n / f_y)\}$$

$$\text{ただし, } 0.08 \sqrt{3} \leq \alpha \leq 0.75$$

ここに、 $f_c$ ：コンクリートの圧縮強度、 $\sigma_n$ ：せん断面に垂直に作用する平均応力度、 $\alpha$ ：鉄筋軸方向剛性の低減係数<sup>17)</sup>、 $A_c$ ：接合面の面積、 $B$ ：面形状を表す係数、打継面(処理あり)の場合1/2、 $\mu$ ：固体接触に関する平均摩擦

係数(=0.45)、 $\gamma_b$ ：部材係数(=1.3)

本報告では、一般的な合成桁を想定して、接合面と鉄筋のなす角度を90°とした場合の $V_u$ を示す(以下、同様)。

## (3) AASHTO LRFD 橋梁設計示方書の規定

米国AASHTOの荷重抵抗係数設計法(LRFD)による橋梁設計示方書(以下、AASHTOという)<sup>19)</sup>では、式(3)が規定されている。

$$V_u = c \cdot A_c + \mu (A_s \cdot f_y + P_c) \leq \min(0.3 f_c A_c, 12.4 A_c) \quad (3)$$

ここに、 $c$ ：付着係数(=1.9 N/mm<sup>2</sup>)、 $\mu$ ：摩擦係数(=1.0)、 $P_c$ ：接合面に作用する圧縮力(引張の場合は0)、括弧内の数値は普通コンクリートで粗面仕上げ(最大凹凸振幅が約6mm)とした場合の値を示す。

## (4) Eurocode 2 の規定

Eurocode 2 (EN)<sup>20, 21)</sup>では、PC合成桁接合面のせん断強度 $v_u (= V_u / A_c)$ の算定式として式(4)が規定されている。

$$v_u = c \cdot f_{ct} + \mu \sigma_n + \mu \cdot p \cdot f_y \leq 0.5 v \cdot f_c \quad (4)$$

ここに、 $c = 0.45$ 、 $\mu = 0.7$ 、 $f_{ct} = 0.7 \cdot 0.3 f_{ck}^{(2/3)} / \gamma_c \geq 0.5$  ( $f_c \leq 50$  N/mm<sup>2</sup>の場合)、 $v$ ：強度低減係数(=0.6 -  $f_c / 250$ )、 $\gamma_c$ ：材料係数(通常1.5)これらの数値は粗面仕上げ(レーキを用いて、約40mm間隔に、最大深さが少なくとも3mmとなるへこみを設ける)とした場合の値を示す。

## (5) 基準間の比較

図-3に接合面のせん断強度に関する基準間の比較を示す。縦軸は、せん断伝達耐力 $V_u$ を接合面積で除したせん断強度 $v_u$ に換算して示した。図中には参考として、現行道示の許容せん断応力度 $\tau_{ba}$ と既往のプッシュオフ試験の結果<sup>1, 8, 22~26)</sup>を示す。プッシュオフ試験結果は接合面を粗面に仕上げたもの(ほうき目仕上げを含む)を○で、平滑にしたもの(こて仕上げ)を△で、それぞれ記号を変えて示した。

荷重係数や抵抗係数などの諸係数が異なることから、単純に比較はできないが、いずれもずれ止め鉄筋比の増加に応じてせん断強度を大きく設定している。

## 2.2 PC合成桁のずれ止め鉄筋比の制限

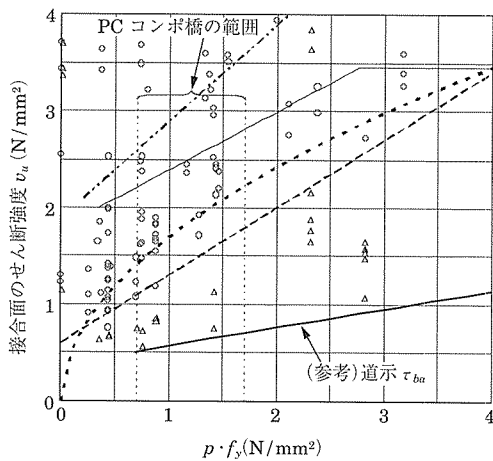
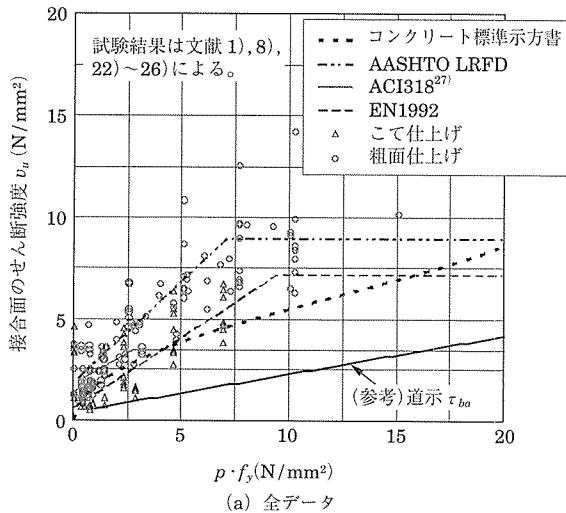
ACI-ASCE 333委員会の合成桁に関する勧告(1960年)では、PC合成桁の最小ずれ止め鉄筋比を接合面積の0.15%以上とされた<sup>7)</sup>。PC道示ではこれと同じ値であったが<sup>10)</sup>、1978年以降の道示では0.2%以上と規定している<sup>11~13)</sup>。

AASHTOでは、PC合成桁接合面のずれ止め鉄筋量は、 $1.33 V_u / \phi$  ( $V_u$ ：接合面の作用せん断力、 $\phi$ ：抵抗係数0.9)を式(3)の左辺 $V_u$ に置き換えて求まる所要鉄筋量 $A_{s1}$ と $A_{s2}$  (=0.35  $A_c / f_y$ )のうち、小さい方の値を満足すればよいとしている<sup>19)</sup>。これは、単にフランジ幅が広がっただけで鉄筋を追加することがないように設けたと解説に記述されている。また、接合面に作用するせん断応力度が1.4 N/mm<sup>2</sup>以下で、ウェブのスターラップをすべて床版内に定着させる場合にはこの最小ずれ止め鉄筋比の照査を省略してよいとしている。

## 2.3 作用せん断応力度

### (1) 限界状態

現行道示<sup>12)</sup>では、PC合成桁接合面のせん断伝達に関する照査は、設計荷重作用時について式(1a)により行い、



(b)  $v_u \cdot p \cdot f_y$  が  $4 \text{ N/mm}^2$  以下の範囲の拡大図

図-3 接合面のせん断強度  $v_u$  に関する基準間の比較  
注) 基準類は粗面仕上げ, 普通コンクリート,  $f_c = 30 \text{ N/mm}^2$ ,  $f_t = 345 \text{ N/mm}^2$  とした場合の値を示す。

終局荷重作用時については最小ずれ止め鉄筋量を配置することで省略してよいとしている。一方, AASHTO や EN では, いずれも終局限界状態の照査と位置付けられており, 終局限界状態における荷重を考慮している<sup>19, 20)</sup>。なお, 照査の対象とする荷重として, 現行道示では, 死荷重, 活荷重のほか, 前死荷重の 1/2, クリープ, 乾燥収縮の影響および温度の影響を考慮することとしている。

(2) 作用せん断応力度の算定方法

現行道示では, 荷重を載荷したときの接合面の作用せん断応力度  $\tau_b$  を次式により算定することとしている<sup>12)</sup>。

$$\tau_b = V \cdot Q / (b \cdot I) \quad (5)$$

ここに,  $V$ : 桁断面に作用する設計せん断力,  $Q$ : 合成断面の図心軸に関する床版(接合面から上の部分)の断面一次モーメント,  $b$ : 接合面の幅,  $I$ : 合成断面の断面二次モーメント

一方, AASHTO では式(6)<sup>19)</sup>, EN では式(7)<sup>20)</sup>をそれぞれ適用している。

$$v_u = V / (b \cdot d_v) \quad (6)$$

ここに,  $v_u$ : 接合面の作用せん断応力度,  $d_v$ : 引張鉄筋の

中心から床版中心までの距離

$$v_u = \beta \cdot V / (b \cdot z) \quad (7)$$

ここに,  $\beta$ : 床版コンクリートの軸力と圧縮領域(または引張領域)の軸力の比(通常 1.0),  $z$ : 合成断面のアーム長

道示では設計荷重作用時に曲げひび割れの発生がないものとして式(5)を適用していると考えられる。一方, AASHTO と EN では, 終局限界状態の照査であることから, 曲げひび割れ発生を考慮した作用せん断応力度の算定式としている。

3. PC 合成桁のせん断伝達挙動

3.1 接合面における附着, 摩擦, ダウエル効果の分担

PC 合成桁の接合面は, 通常, せん断伝達を受けもつ接合面が比較的大きく, ずれ止め鉄筋比が相対的に小さくなる傾向にある。支間 25 ~ 45 m の単純 PC コンポ橋の場合, 多くは最小ずれ止め鉄筋比が 0.2 % であり, 大きくとも 0.5 % 程度までの範囲である<sup>1)</sup>。図-4 に, ずれ止め鉄筋比が 0.2 % で, 標準的なほうき目仕上げを施した場合のプッシュオフ試験(せん断試験)の結果例を示す<sup>1)</sup>。この場合, 接合面の平均せん断応力度の最大値はずれ変位のごく小さいうちに発生しており, その後再び荷重が増加するものずれ変位が著しく大きくなる。乙藤らの試験報告<sup>8)</sup>によれば, 接合面のずれ変位が 0.05 mm 程度までであれば, PC 合成桁が一体の桁と同様とみなせるとしている。

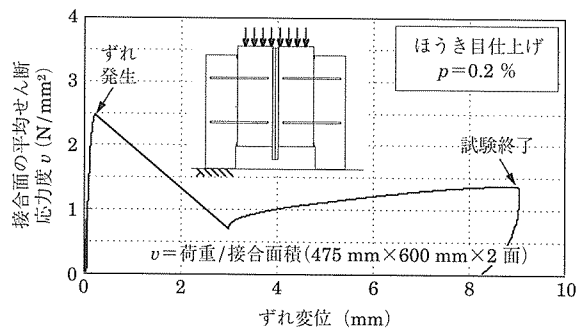
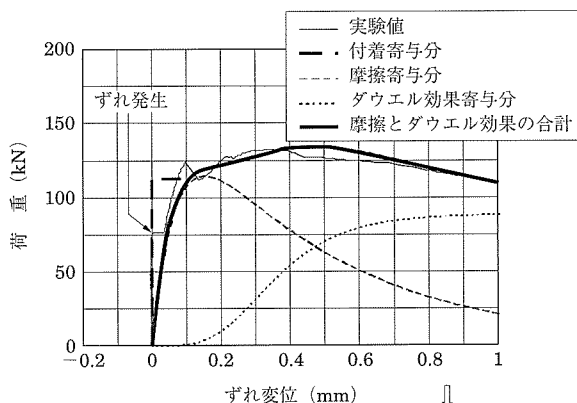


図-4 ほうき目仕上げの場合の荷重-ずれ変位<sup>1)</sup>  
注) 変位はずれ変位以外の供試体変形分も含まれる。

PC 合成桁のせん断伝達は, 接合面におけるコンクリート間の附着, 摩擦およびずれ止め鉄筋のダウエル効果で構成されるが<sup>28, 29)</sup>, 荷重あるいはずれ変位が増加していくなかでそれぞれの寄与は明確にされていない。図-5 に, 本共同研究で実施した, 供試体 W (標準的なほうき目仕上げで, ずれ止め鉄筋比は 1.33 %) の 1 面プッシュオフ試験の結果を, 附着, 摩擦, ダウエル効果それぞれの挙動と合わせて示す(詳細の計算方法はいずれも文献 4)に記した)。ダウエル効果(鉄筋がダウエル効果で受けもっていた荷重)は, ずれ止め鉄筋の曲げひずみ分布測定結果から算定した。また, 実験値からダウエル効果寄与分を差し引いた値を摩擦寄与分とした。ただし, 摩擦寄与分については, 鉄筋の平均ひずみ測定結果から鉄筋に作用していた軸力を算定するとともに摩擦係数を算定し, 鉄筋軸力と摩擦係数を個別

に定式化した上で図示した。付着寄与分（太い破線）は、後述の図 - 8 の関係式から得られた付着の効果によるせん断伝達耐力（図 - 8 から得られる  $v_u/f_c$  に  $f_c$  と  $A_c$  を乗じた値）を示したものである。図中、計算値を明確にするため横線を付加した。図 - 5 に示すとおり、鉄筋のダウエル効果、鉄筋軸力の増加を伴う摩擦はいずれも、初期のずれが発生するまではごく軽微であり、大部分はずれが発生した後に増加し始めることがわかった。このことから、供試体 W の初期のずれは、コンクリート間の付着に依存しており、その発生荷重は接合面の付着によるせん断強度で表されることが考えられる。

図 - 5 に示した供試体 W の結果を用いて、コンクリート接合面積  $A_c$  およびずれ止め鉄筋 (D10) の本数が、付着、摩擦、ダウエル効果それぞれの分担に及ぼす影響をみるため、 $A_c$  または鉄筋本数を変化させた場合の推定値を図 - 6 (a) ~ (c) に示す<sup>4)</sup>。同図 (a) は、接合面積を 1/2 としたものであるが、ずれ止め鉄筋比が大きくなると、付着の影響は無視し得る程度となり、最大荷重は摩擦とダウエル効果に依存する傾向になる。ただし、最大荷重発生時にはすでにずれ変位が 0.5 mm に達している。逆に接合面積を 1.5 倍にした場合（同図 (b)）、付着による耐力が大きくなり、付着切れによりずれが発生し、荷重が急激に低下するが、摩擦とダウエル効果によって再び荷重の上昇が生じる。供試体 W の場合（図 - 5）は、摩擦、ダウエル効果の合計の最大荷重が付着切れの発生荷重よりも大きかったが、図 (b) の場合は、付着切れの荷重を再び超えることはないパターンであった。一方、接合面積はそのままとして、ずれ止め鉄筋の本数を 1/3 に減らすと（図 (c)）、付着の影響はより顕著となり、付着切れの後、摩擦、ダウエル効果によって低い荷重レベルで持続するものの、荷重の再上昇はほとんどなく、徐々に低下する傾向が見られた。図 - 4 に示したずれ止め鉄筋比 0.2 %、ほうき目仕上げの供試体はこのパ



供試体 W の諸元  
 ほうき目仕上げ,  $p=1.33\%$   
 $A_c=254\text{ mm} \times 127\text{ mm}$   
 $f'_c=41, 63\text{ N/mm}^2$   
 $A_s=428\text{ mm}^2$  (6-D10)  
 $f_y=355\text{ N/mm}^2$

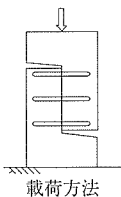
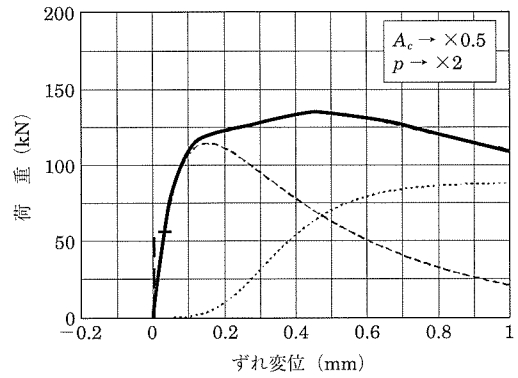
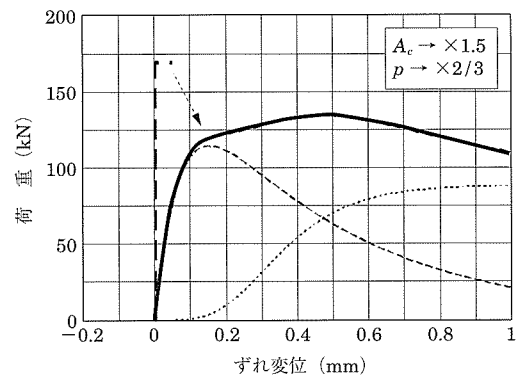


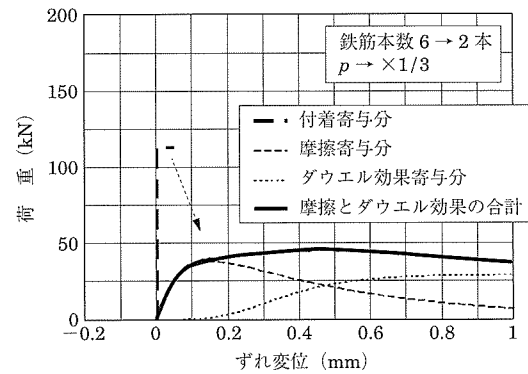
図 - 5 供試体 W の荷重-ずれ変位の関係と付着、摩擦、ダウエル効果の分担（推定値）<sup>4)</sup>



(a) 接合面積を 1/2 とした場合



(b) 接合面積を 1.5 倍とした場合



(c) 接合面積を 2 本とした場合

図 - 6 荷重-ずれ変位の関係における付着、摩擦、ダウエル効果の分担イメージ<sup>4)</sup>  
 (接合面積および鉄筋本数の影響)

ターンであった。これらの図から、ほうき目仕上げや洗い出しを施して、かつずれ止め鉄筋比が比較的小さい場合（図 (c)）のせん断伝達耐力は、接合面の付着に依存していること、付着切れの直後から摩擦とダウエル効果が寄与し始めるが、耐力（最大荷重）には寄与しないことがわかった。Hanson<sup>6)</sup>、乙藤ら<sup>8)</sup>、岡田<sup>25)</sup>の試験結果を整理したところ、せん断伝達耐力が付着で決まる条件は、ずれ止め鉄筋比、接合面の仕上げの程度によって異なるが、これらのデータの範囲では、ずれ止め鉄筋比がおおむね 0.4 ~ 0.6 % 以下の場合であることがわかった。PC コンポ橋のようにずれ止め鉄筋比が 0.5 % に満たない場合には、そのせん断伝達耐力（最大荷重）は接合面の付着に大きく依存すると

考えられる。

### 3.2 付着によるせん断伝達耐力

#### (1) 表面仕上げの影響

Birkeland<sup>28)</sup> や Mast<sup>29)</sup> によって提案されたせん断摩擦理論では、コンクリート間の付着の影響を無視することとしている。Mast はずれ止め鉄筋比が小さい場合、せん断伝達耐力のばらつきが大きく、付着による影響が現れていた可能性があると述べている<sup>29)</sup>。上記 3.1 の検討から PC 合成桁ではむしろコンクリート間の付着を無視せずに、その特性をよく把握すべきと考える。

ここでいうコンクリート間の付着の強度は、無筋コンクリートの打継目のせん断強度と同義と考えられる。伊東らの研究では、仕上げを丁寧に行うことで打継ぎのない一体のコンクリートと同等のせん断耐力（軸力が作用しない場合  $v_u/f_c = 0.13 \sim 0.22$ ）が得られることが報告されている<sup>30)</sup>。ただし、伊東らの接合面（打継面）は、コンクリート打設から約 24 時間後に、ワイヤブラシで骨材が露出するまで入念に削って、水でよく洗ったとしており、比較的丁寧に表面処理されたものと考えられる。国分の研究では、この打継方法により、接合面の引張強度が一体打ちのコンクリートの引張強度と同程度となると記されている<sup>31)</sup>。

図 - 7 に、既往のプッシュオフ試験結果のうち、付着切れが生じた荷重が最大荷重とされている可能性が高い、ずれ止め鉄筋比が 0.5 % 以下のものを選択して、 $v_u/f_c$  と接合面の表面粗度（十点平均粗さ） $R_{sj}$  の関係を示す。ここで引用した試験データのうち、本共同研究と Gohnert の結果<sup>32)</sup> 以外の表面粗度は実測されていないので、各文献に示される仕上げ方法を踏まえて推定値で示した（例、こて仕上げ：0.2 mm、5 mm 程度に目粗し：5 mm）<sup>4)</sup>。また、図中には、本共同研究の結果（図 - 8 に示す「2005」のほうき目仕上げの結果にあてはめた）から得られた  $v_u/f_c$  と  $R_{sj}$  の関係を合わせて示す（ $R_{sj}$  が 3 mm 以上の範囲は外挿）。この関係式は既往の試験結果（木ごて仕上げの結果を除く）のおおむね上限に相当する。また、道示の根拠データとな

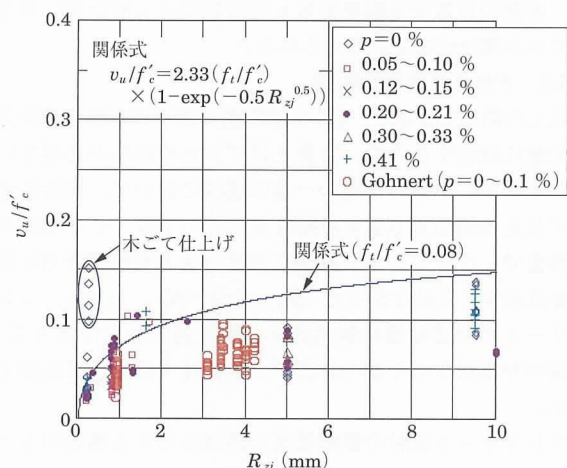


図 - 7 表面粗度  $R_{sj}$  と  $v_u/f_c$  の関係<sup>4)</sup>

(本共同研究, Hanson<sup>6)</sup>, 乙藤ら<sup>8)</sup>, 岡田<sup>25)</sup>, 旧土研・PC 建協<sup>26)</sup>, Gohnert<sup>32)</sup> から、ずれ止め鉄筋比が 0.5 % 以下のデータを示す)  
注)  $f_i$ : コンクリートの引張強度

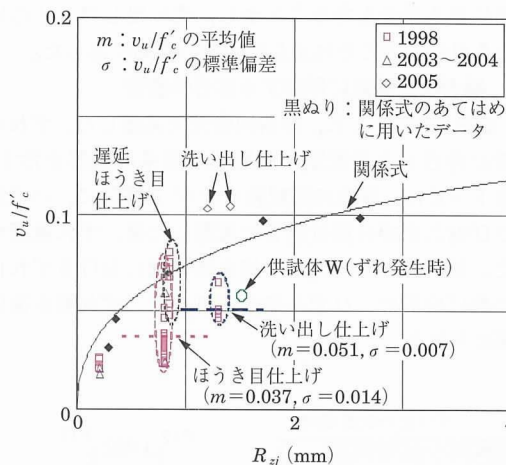


図 - 8 ほうき目・洗い出し仕上げの結果<sup>4)</sup>

注) 1998: 文献 26) より, 2003 ~ 5: 文献 1) より  
 $p = 0.1 \sim 0.2 \%$  (供試体 W のみ  $p = 1.33 \%$ )

った乙藤ら<sup>8)</sup> の木ごて仕上げの結果は  $R_{sj}$  を 0.2 mm と想定して示したが、明らかに同図の関係式から離れており、他のこて仕上げの試験結果と比べても明らかに大きい  $v_u/f_c$  であった。関係式から推定すると、その  $v_u/f_c$  は表面粗度が 5 ~ 6 mm 程度に相当し、木ごて仕上げとはいうものの伊東ら<sup>30)</sup> が実施した試験と同様にかなり丁寧な仕上げが行われた可能性がある。現行道示では、木ごて仕上げで 3 N/mm<sup>2</sup> のせん断強度が得られるとしているが<sup>12)</sup>、今日一般にいわれる木ごて仕上げとはかなり異なる可能性があることに留意する必要がある。これらの点から、表面粗度が付着強度に影響するが、付着強度の影響因子は単に表面粗度だけでないことがわかる。

図 - 7 のうち、ほうき目仕上げおよび洗い出し仕上げの結果を抽出したものを図 - 8 に示す。このうち、表面粗度  $R_{sj}$  を実測したのは図中の「2005」<sup>1)</sup> と「供試体 W」<sup>4)</sup> の結果のみである（いずれも本共同研究による）。その他のデータは図 - 7 と同様に推定値で示した。国内の道路橋に適用される PC 合成桁の接合面は洗い出しやほうき目仕上げが一般的であるが、いずれの場合も  $v_u/f_c$  のばらつきが大きい。関係式（図 - 7 と同じ）に用いた「2005」のデータはほうき目仕上げの結果であるが、他のほうき目仕上げの結果は、関係式に比べて、約 1/2 程度のもも含めて、低い傾向にあった。旧土研・PC 建協の共同研究で得られた結果（図中の「1998」）では、ほうき目仕上げの  $v_u/f_c$  の平均値が 0.037、洗い出し仕上げの  $v_u/f_c$  の平均値が 0.051 であった。また、遅延ほうき目仕上げとしている結果は、付着の改善を期待してほうき目を入れる処理の時間をやや遅らせた場合のものであり、ほうき目処理を実施する時期の違いでせん断伝達耐力に差が見られた<sup>26)</sup>。このことは  $v_u/f_c$  のばらつきの要因の一つであると考えられる。

洗い出し仕上げの結果についても、旧土研・PC 建協の共同研究の結果（図中の「1998」）<sup>26)</sup> は、本共同研究の結果の 1/2 程度であった。洗い出し仕上げの場合も、その処理方法などによって  $v_u/f_c$  に差が生じることがわかるが、レイタンスを確実に除去するとともに、洗い出された骨材が

かぎ状になる場合もあることから、洗い出しの  $v_u / f_c$  は標準ほうき目仕上げのそれよりは大きい傾向にあった。

(2) 接合面に垂直に作用する応力の影響

図 - 9 および表 - 1 に、本共同研究で実施した、ずれせん断破壊に着目した梁試験の試験体と結果の概要を示す<sup>5)</sup>。試験体 I ~ III は、従来の梁試験<sup>6, 8, 26)</sup>と同様に、いずれも曲げひび割れが接合面付近まで進展した後、ずれ破壊が発生した。梁試験においても、接合面付近におけるずれ止め鉄筋の曲げ変形は、ひずみ測定によって、ずれ発生後に明確に認められた。

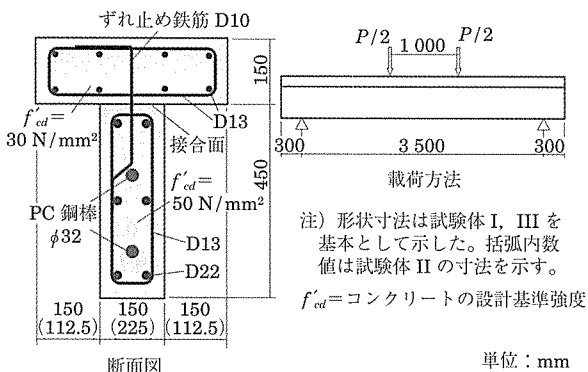


図 - 9 梁試験体の形状寸法

表 - 1 梁試験の結果  
(付着によるせん断伝達耐力およびずれ発生荷重の計算値との比較)

試験体名	I	II	III
接合面の幅 $b$ (mm)	150	225	150
ずれ止め鉄筋比 $p$ (%)	0.21	0.14	0.0 <sup>*2</sup>
フランジのコンクリート圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> ) <sup>*1</sup>	39.6	40.7	42.1
ウェブのコンクリート圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	54.1	50.6	55.2
付着によるせん断伝達耐力, 計算値 (kN)	873	1259	924
ずれ発生荷重, 計算値 $P_{u,cal}$ (kN)	595	905	629
ずれ発生荷重, 実験値 $P_{u,ex}$ (kN)	591	957	620
$P_{u,ex} / P_{u,cal}$	0.99	1.06	0.99
直応力を無視した付着によるせん断伝達耐力 (kN)	515	794	548
直応力を無視したずれ発生荷重 (kN)	351	571	373
直応力を無視したずれ発生荷重 / $P_{u,cal}$	0.59	0.60	0.60
接合面の十点平均粗さ, 実測値 $R_{af}$ (mm)	0.73	0.91	0.82

注) \*1: 耐力計算には圧縮強度が低いフランジ側の値を用いた。  
\*2: 試験体 III はずれ止め鉄筋の代わりに、接合面に高さ 30 mm × 幅 50 mm ×  $b$  の凸型コンクリートコッターを 450 mm 間隔で配置した。

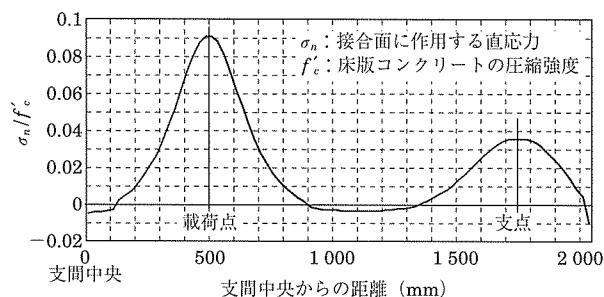


図 - 10 最大荷重時の接合面に作用する直応力  $\sigma_n$  の分布<sup>5)</sup>  
(試験体 III, ずれ発生荷重 620 kN 荷重時)

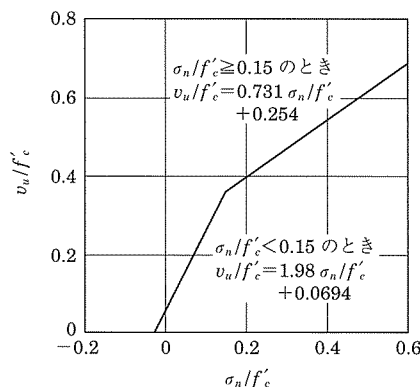


図 - 11 標準ほうき目仕上げの接合面における付着によるせん断強度  $v_u$  と直応力  $\sigma_n$  の関係<sup>4, 5)</sup>

梁試験の場合、荷重に伴う荷重点付近および支点付近の接合面に垂直に作用する応力（以下、直応力という）が生じる<sup>33)</sup>。これらの直応力は付着によるせん断強度に影響すると考えられる。図 - 10 に、接合面のない一体の梁として 3次元弾性 FEM によって算定した、試験体 I, III の接合面中心に作用する直応力分布を示す。この直応力分布の影響を考慮して接合面の各位置での付着強度を図 - 11 に示した式（修正 Cowan 理論<sup>22, 34, 35)</sup>を参考にして求めた、ほうき目仕上げの接合面を対象とした式<sup>4, 5)</sup>により算定し、荷重点から支点上まで積分した値をせん断伝達耐力とした<sup>5)</sup>。表 - 1 にはその計算結果を示した。ずれ破壊時の荷重は、計算値の 0.99 ~ 1.06 であり、実験値と比較的よく一致した。これらのことから、プッシュオフ試験と同様、梁試験においても接合面のずれ発生はコンクリート間の付着に依存していたものと考えられる。

この直応力の影響の程度を把握するため、直応力が作用しないとして計算した結果も表 - 1 に示した。これらの試験の範囲では、直応力の影響は直応力を考慮しない場合の約 1.7 倍 (1 / 0.60) であり、梁試験体のせん断伝達耐力を推定するうえで無視できないことがわかった。試験体ではフランジ自重の影響は小さかったが、実際の PC 合成桁では、床版の自重や自動車荷重も接合面のせん断伝達に寄与している部分があると考えられる。

3.3 ずれ止め鉄筋の役割

以上の結果によると、PC 合成桁接合面のせん断伝達耐力は付着に依存するので、計算上はずれ止め鉄筋が必要ないこととなる。本共同研究の一連の試験において、現行の最小ずれ止め鉄筋比 0.2 % が配置されていても、その程度の鉄筋量で、プッシュオフ試験におけるせん断伝達耐力に影響を及ぼすことはなかった（図 - 4 が一例）。しかし、コンクリートの付着破壊は脆性的かつ不可逆のものであって、架設中や供用中の不測の作用<sup>28, 29)</sup>に対する配慮は必要である。

プレキャスト部材の横桁端部を剛結合とする場合のように、接合面積が小さく、かつある程度大きいずれ変位が生じて許容される場合には、従来のせん断摩擦理論に基づき所要の鉄筋量を配置するのがよい。しかし、道路橋主桁の PC 合成桁のように接合面積が相当大きい場合に、最小

ずれ止め鉄筋比の規定に基づき接合面積に比例してずれ止め鉄筋を配置することは、安全側ではあっても実際その機能を果たす機会がほとんどないことを考えると、必ずしも適切でない場合もあると考えられる。とくに PC コンポ橋では、接合面の幅が従来の PC 合成桁よりも大きいことから、コンポ橋以前の PC 合成桁よりも作用せん断応力度が減少しているにもかかわらず、最小ずれ止め鉄筋比の規定（現行道示では 0.2 %）に従ってずれ止め鉄筋を増加させることは、なおさらその機能を果たす機会がまれである。上記の不測の作用に対する一般的な配慮としては、梁のせん断耐力に対して配置されるスターラップを現場打ち床版内に適切に定着することでよいと考えられる。

なお、AASHTO の式 (3) の係数  $c$  は付着係数 (cohesion factor) と表記されているが、本文でいうところの付着と異なるものであり、PC 合成桁接合面の付着を考えるうえでは誤解されやすい表記となっていることに留意する必要がある。AASHTO の式 (3) の係数  $c$  は付着の影響と骨材のかみ合わせを考慮したと解説に記されており<sup>19)</sup>、せん断伝達耐力に関して付着の効果とずれ止め鉄筋による効果の足し合わせが成り立つと考えている。明記はないが EN も式 (4) より AASHTO と同様の考え方と推察される。一方、式 (3) の解説で引用されている Mattock の文献<sup>36)</sup> では、提案式 (8a) が示されたが、Mattock は従来のせん断摩擦理論と同様に付着の影響を無視しており、 $p \cdot f_y$  が小さい場合の照査式として式 (8b) を式 (8a) とともに示した。

$$v_u = K_1 + 0.8(p \cdot f_y + \sigma_n) \leq \min(K_2 f_c, K_3) \quad [\text{psi}] \quad (8a)$$

ただし、 $(p \cdot f_y + \sigma_n) \leq K_1 \cdot A_c / 1.45 \text{ lb}$  の場合、

$$v_u = 2.25(p \cdot f_y + \sigma_n) \quad [\text{psi}] \quad (8b)$$

ここに、 $K_1 = 0.1 f_c$ ,  $K_2 = 0.3$ ,  $K_3 = 2400 \text{ psi}$

注) 1 lb = 4.45 N, 1 psi =  $6.89 \times 10^{-3} \text{ N/mm}^2$

式 (8a) の  $K_1$  は、値、表記ともに付着の影響を表すものと受け取られやすいが、この  $K_1 = 0.1 f_c$  は載荷試験前に強制的に接合面に割れを生じさせた試験データを再整理して得られたものであり、かつ  $p \cdot f_y$  が大きいことから、最大荷重を示した時点ですでにずれ変位が大きい試験結果に基づいていると考えられる。Mattock は Birkeland らや Mast と同様に、本文でいう付着を明確に意識して、試験データから排除していたことがわかる。

## 4. PC 合成桁のせん断伝達耐力の算定法 (試案)

### 4.1 算定法的前提

以上の検討のまとめとして、PC 合成桁の床版と主桁のコンクリート接合面におけるずれ発生時のせん断伝達耐力の算定法を試案の形で示す。ここで示す算定法は、終局荷重作用時の荷重の組合せ (クリープ、乾燥収縮の影響を含む) に対する照査に用いることを前提とする。照査で考慮する荷重や荷重係数、安全率などの設定は別途検討が必要である。なお、終局荷重作用時を想定することから、作用せん断力は式 (6) または式 (7) により算定するのがよい。

### 4.2 PC 合成桁接合面のせん断伝達耐力の算定

せん断伝達耐力  $V_u$  は式 (9) により算定する。

$$V_u = k_c \cdot f_{cd} \cdot A_c \quad (9)$$

ここに、 $k_c$  : 付着係数 (図 - 8 の縦軸  $v_u / f_c$  に相当する指標)

標準仕上げ (洗い出し) の場合:  $k_c = 0.05$

ほうき目仕上げの場合:  $k_c = 0.035$

$f_{cd}$  : コンクリートの設計基準強度 ( $\text{N/mm}^2$ )、低い側の圧縮強度を用いる (通常は床版側)。

接合面の大きなずれ (おおむね 0.05 mm を超えるずれ) が生じた後の桁の曲げ耐力やせん断耐力の推定は難しいことから、PC 合成桁の設計では終局荷重作用時であってもこのようなずれが生じないように式 (9) によって照査することとした。なお、ずれ止め鉄筋を配置したとしても、付着切れの抑制には寄与せず、ずれ止め鉄筋のせん断伝達機能が発揮される時点ですでにずれが生じていることから、PC 合成桁接合面のせん断伝達耐力の算定には考慮しないこととした。

ここで、係数  $k_c$  の値は、図 - 8 に示した試験結果「1998」の平均値を用いた。PC 合成桁において直応力がせん断耐力に与える影響は大きい、一般にはこれを考慮しなくとも十分な耐力が得られることから、式 (9) には考慮しないこととした。

表 - 2 に式 (9) に含まれるせん断強度  $v_u (= k_c \cdot f_{cd})$  の算定例を示す。また、参考として、現行道示と対比するため、ここでは  $\tau_{ba}$  が終局荷重作用時に相当する接合面のせん断強度  $v_u$  の 1/1.7 と仮定して、 $\tau_{ba}$  を 1.7 倍した値を表 - 3 に示す。PC 合成桁で一般的に用いられているコンクリートの設計基準強度の場合 (床版 30  $\text{N/mm}^2$ , 主桁 50  $\text{N/mm}^2$ )、ずれ止め鉄筋比を 0.2 % とすると  $v_u$  は 0.87  $\text{N/mm}^2$  を確保していることになるが、式 (9) によれば、洗い出し仕上げの場合に 1.5  $\text{N/mm}^2$  の  $v_u$  が確保される。このように一般に PC 合成桁接合面の付着によるせん断強度は、現行道示で要求される値よりも大きい傾向にあると考えられる。

### 4.3 ずれ止め鉄筋の扱い

一体の梁としてせん断伝達耐力を確保するためにウェブに配置されたスターラップは、床版まで貫通させて十分な

表 - 2 PC 合成桁接合面のせん断強度  $v_u$  ( $\text{N/mm}^2$ )

$f_c$ ( $\text{N/mm}^2$ )	ほうき目仕上げ		洗い出し仕上げ	
	m $k_c = 0.035$	m - $\sigma$ $k_c = 0.02$	m $k_c = 0.05$	m - $\sigma$ $k_c = 0.04$
30	1.0	0.6	1.5	1.2
40	1.4	0.8	2.0	1.6
50	1.7	1.0	2.5	2.0
60	2.1	1.2	3.0	2.4

注) m : 平均値,  $\sigma$  : 標準偏差

表 - 3 現行道示の接合面の許容せん断応力度 ( $v_u$  は参考値)

ずれ止め鉄筋比 $p$ (%)	許容せん断応力度 $\tau_{ba}$ ( $\text{N/mm}^2$ )	$v_u$ (参考値) ( $\text{N/mm}^2$ )
0	0.38	0.65
0.1	0.45	0.76
0.2	0.51	0.87
0.5	0.71	1.20

注) 床版のコンクリートの設計基準強度  $f_c$  を 30  $\text{N/mm}^2$  とした。

定着を行う。

道示では、ウェブ断面に対して最小鉄筋比 0.2 % 以上のスターラップを配置することとしている。PC コンポ橋の場合、フランジ内に接合面を設けるため、接合面幅はウェブ幅よりもかなり広がるが、一般には接合面の面積に対して同最小鉄筋比の規定を適用しなくてもよい。接合面の面積が広がると、ずれ止め鉄筋を追加しなくても、付着の効果によってせん断伝達耐力が増すとともに、作用するせん断応力度が小さくなるためである。

斜角のきつい斜橋などのように、PC 合成桁にねじりが生じる場合や、何らかの要因により接合面に対して垂直方向の引張力が作用する場合は、接合面の処理方法やずれ止め鉄筋の配置について別途検討を行う必要がある。

#### 4.4 施工（接合面の仕上げ）

接合面の仕上げの標準は洗い出し仕上げとするのがよい。ただし、既往の研究から、ほうき目仕上げとした場合、表-2 に示したせん断強度が得られることが確認されているので、これを前提に設計した場合にはほうき目仕上げとしてもよい。

洗い出し仕上げにおいて、遅延剤を使用する場合は、散布時期、散布量、圧力水による処理の時期などにより、仕上げ具合にむらが生じたり、骨材の緩みが生じたりすることがあるので、使用する遅延剤ごとに適切な処理方法をあらかじめ確認した上で実施する。

ほうき目仕上げでは、主たるせん断力の作用方向と直角となるように、かつできるだけ凹凸が大きくなるようにほうき目を入れるのがよい。ほうき目仕上げは、ほうき目を入れる時期によって付着性能がばらつくことがあるので、適切な時期をあらかじめ確認した上で施工する。なお、付着係数  $k_c$  は、打設後約 2 ~ 3.5 時間経過した時点でほうき目を入れた場合の結果である<sup>1), 4), 26)</sup>。

## 5. あとがき

本共同研究では、プレキャスト PC 部材の接合技術のうち、とくに重要なせん断伝達機構を明らかにするため、新たな実験的検討を加えるとともに、その結果を踏まえて既往の試験データを再整理した。本文では、それらの検討の概要を示したうえで、道路橋 PC 合成桁の主桁と床版の接合面におけるせん断伝達耐力の算定法を試案の形で提示した。当然ながら、本試案は、今後、荷重や安全率などを含めた照査法として、設計に反映させるための議論が必要と考えている。

なお、本共同研究では、コンクリート中の鉄筋のダウエル挙動を把握するためのコンクリートの反力係数 ( $K$  値)、強度の異なるコンクリート間の接合面におけるずれ止め鉄筋のダウエル挙動の算定法、および表面粗度を考慮した接合面の付着強度の算定法についても検討を行った。これらの結果は本文の内容と合わせて、共同研究報告書<sup>1), 4), 5)</sup> としてとりまとめている。

#### 参考文献

1) 橋梁用プレキャスト PC 部材の接合技術に関する共同研究報告書

- (I), 共同研究報告書第 362 号, (株) 土木研究所, PC 建協, 2007.2
- 2) 阿部浩幸, 武知勉, 中島禎: PC コンポ橋の主けた-床版接合面のせん断伝達に関する実験的研究, 第 14 回 PC シンポジウム論文集, pp.147-150, 2005.11
  - 3) 例えば, 特集: 新構造技術の開発, プレストレストコンクリート, 49-2, 2007
  - 4) 橋梁用プレキャスト PC 部材の接合技術に関する共同研究報告書 (II) - ずれ止め鉄筋及びスタッドの挙動 -, 共同研究報告書第 370 号, (株) 土木研究所, PC 建協, 2008.3
  - 5) 橋梁用プレキャスト PC 部材の接合技術に関する共同研究報告書 (III) - PC 合成げたのせん断伝達に関する検討 -, 共同研究報告書第 383 号, (株) 土木研究所, PC 建協, 2008.3
  - 6) Hanson, N.W., Horizontal shear connections, Precast - prestressed concrete bridges, PCA Bulletin D35, May 1960
  - 7) ACI - ASCE Committee 333, Tentative recommendations for design of composite beams and girders for buildings, Journal of ACI, 57 - 12, pp.609 - 628, December 1960
  - 8) 乙藤憲一, 笹戸松二, 浜本富美雄, 御子柴光春, 大西清治: コンクリート合成桁の接合面に関する研究, プレストレストコンクリート, 9-2, pp.8 - 18, 1967
  - 9) 御子柴光春: プレストレストコンクリート合成ゲタ設計 (施工を含む) 要領 (案), 橋梁と基礎, pp.1 - 6, 1968.2
  - 10) プレストレストコンクリート道路橋示方書解説, (社) 日本道路協会, 1968.3
  - 11) 道路橋示方書・同解説, III コンクリート橋編, (社) 日本道路協会, 1978
  - 12) 道路橋示方書・同解説, III コンクリート橋編, (社) 日本道路協会, 2002
  - 13) 道路橋示方書・同解説, III コンクリート橋編, (社) 日本道路協会, 1990
  - 14) 小川篤生, 池田博之: 道路橋示方書の改訂について, III コンクリート橋編, 橋梁と基礎, pp.16-19, 1990.4
  - 15) コンクリート標準示方書設計編, (社) 土木学会, 1986
  - 16) コンクリート標準示方書設計編, (社) 土木学会, 1996
  - 17) コンクリート標準示方書改訂資料, コンクリートライブラリ 85 号, (社) 土木学会, 1996
  - 18) コンクリート標準示方書構造性能照査編, (社) 土木学会, 2002
  - 19) LRFD Bridge Design Specifications, 4th ed., AASHTO, 2007
  - 20) Eurocode 2: Design of concrete structures Part 1.1: General rules and rules for buildings (EN1992-1-1), 2004
  - 21) Eurocode 2: Design of concrete structures Part 2: Concrete Bridges - Design and detailing rules (EN1992-2), 2005
  - 22) Mattock, A.H. and Hawkins, N.W., Shear transfer in reinforced concrete-Recent research, PCI Journal, pp.55-75, March-April 1972
  - 23) Walraven, J.C. and Reinhardt, H.W., Theory and experiments on the mechanical behavior of cracks in plain and reinforced concrete subjected to shear loading, Heron, Vol.26, 1981
  - 24) Walraven, J.C., Frenay, J. W. and Pruijssers A., Influence of concrete strength and load history on the shear friction capacity of concrete members, PCI Journal, pp.66-84, Jan.-Feb., 1987
  - 25) 岡田武二: コンクリート接合面のせん断伝達に関する研究, 土木学会論文集, 第 502 号, pp.73-82, 1994.11
  - 26) コンクリート橋の設計・施工の省力化に関する共同研究報告書 (II) - PC 合成げた (PC 合成床版タイプ) に関する研究 -, 建設省土木研究所, (社) プレストレスト・コンクリート建設業協会, 1998.12
  - 27) ACI 318 Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, American Concrete Institute, 2005
  - 28) Birkeland, P.W. and Birkeland, H.W., Connections in precast concrete construction, Journal of ACI, pp.345-368, March 1966
  - 29) Mast, R.F., Auxiliary reinforcement in concrete connections, Proceedings of ASCE, ST6, pp.1485-1504, June 1968

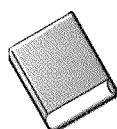


- 30) 伊東茂富, 大野利幸, 上野裕康: コンクリートのせん断強度について, 土木研究所報告, 第 100 号, pp.133-143, 1959.1.
- 31) 国分正胤: 新旧コンクリートの打継目に関する研究, 土木学会論文集, 第 8 号, pp.1-24, 1950.11
- 32) Gohnert, M., Horizontal shear transfer across a roughened surface, Cement & Concrete Composites, 25, pp.379-385, 2003
- 33) 大浜文彦, 小林和夫: プレキャストコンクリート合成ばりの打継面におけるずれ特性に関する研究, 土木学会論文集, 第 208 号, pp.85-97, 1972.12
- 34) Cowan, H.J., The strength of plain, reinforced and prestressed concrete under the action of combined stresses, with particular reference to the combined bending and torsion of rectangular sections, Mag. of Concrete Res., pp.75-86, Dec. 1953
- 35) Zia, P., Torsional strength of prestressed concrete members, Journal of ACI, pp.1337-1359, April 1961
- 36) Mattock, A.H., Shear friction and high-strength concrete, ACI Structural Journal, pp.50-59, Jan.-Feb. 2001

PC 建協, 橋梁用プレキャスト PC 部材の接合技術  
に関する共同研究委員会 名簿

- 委員長 横田 勉 (オリエンタル白石 (株))  
副委員長 大山 博明 (株)ピーエス三菱)
- 阿部 浩幸, 余 国雄 (オリエンタル白石 (株))  
平 喜彦, 浅井 洋 (三井住友建設 (株))  
竹内 祐樹, 竹中 秀樹 (株)安部日鋼工業)  
菅澤 文博, 吉松 秀和 (川田建設 (株))  
平田 雅也 (極東工業 (株))  
山下 和則 (興和コンクリート (株))  
鹿取 和雄 (昭和コンクリート工業 (株))  
今村 晃久, 安森 浩 (ドービー建設工業 (株))  
大和 満禎 (日本高圧コンクリート (株))  
寺口 秀明 (株)日本ピーエス)  
山中 待男, 雑賀 浩規,  
渡辺 浩志, 中村 定明 (ピーシー橋梁 (株))  
妹川 寿秀 (株)富士ピー・エス)  
張 建東 (株)ピーエス三菱)

【2008 年 2 月 29 日受付】



刊行物案内

第 16 回  
プレストレストコンクリートの  
発展に関するシンポジウム  
論 文 集

(平成19年10月)

本書は, 平成19年10月につくば市(つくば国際会議場)で開催された標記シンポジウムの講演論文集です。

頒布価格: 会員特価 10,000 円 (一般価格 12,000 円) (送料はいずれも 600 円)  
体 裁: B5判, 箱入り