

論文 打ち継ぎ面に存在する鉄骨面がすべり耐力に与える影響

鈴木英之*¹ 西原 寛*² 南 宏一*³

要旨：スラブ下で水平打ち継ぎを施した鉄骨鉄筋コンクリート構造のプレキャスト梁では、その打ち継ぎ界面に鉄骨の上フランジが露出する場合が考えられる。そこで鉄骨面を含んだ打ち継ぎ面を持つ試験体を製作し、内蔵される鉄骨の幅が、打ち継ぎ面の水平すべり耐力に及ぼす影響を調べる目的で直接せん断実験を行った。試験体に与えた要因は、鉄骨の幅、接合筋比、打ち継ぎ界面の仕上げの状態とした。その結果、打ち継ぎ面に鉄骨面が存在すると水平すべり耐力が低下することがわかり、鉄骨幅を考慮した打ち継ぎ面のひび割れ強度、水平すべり強度、大変形時の強度の評価式を示した。

キーワード：鉄骨鉄筋コンクリート, プレキャスト, 水平打ち継ぎ, 直接せん断実験, 接合筋比

1.はじめに

鉄骨鉄筋コンクリート(以下SRC)構造の施工合理化技術の一つとして、大梁をプレキャスト(以下PCa)化する構法が一般的に考えられる。筆者等は水平打ち継ぎ面を有するSRC梁の実験を行い、打ち継ぎ面の水平すべりが梁部材に与える影響について報告した^[1]。この場合、水平打ち継ぎはスラブ下で行い、その打ち継ぎ界面には鉄骨の上フランジが露出しており、鉄骨面とコンクリート面が並列した水平打ち継ぎ面となっていた。PCa化されたSRC梁の部材実験は、これまでも実施されているが^[2]、その打ち継ぎ面耐力について言及されたものはない。PCa部材の接合部の応力伝達については古くから問題となっており、打ち継ぎを意図した直接せん断実験は、数多く実施されている^{[3]~[7]}。これらの研究の多くは打ち継ぎ面のすべり強度を、せん断摩擦効果及びダボ効果等によって説明している。しかし、既往の研究は鉄筋コンクリート構造を対象としている場合がほとんどであり、打ち継ぎ面に鉄骨面が混在した研究は少ない。本研究は、SRC構造の大梁をPCa化するに当たって、PCa部材と後打ちコンクリート間の水平打ち継ぎ面を想定し、打ち継ぎ面に鉄骨面が存在する試験体で直接せん断実験を行い、鉄骨幅が打ち継ぎ面の水平すべり耐力に与える影響について把握することを目的とした。

2.試験体及び実験方法

2.1 試験体

表1に試験体及び実験結果一覧、図1に試験体形状の一例を示す。試験体の形状は、25.5x52x25(cm)のブロックを2つ重ねた形状とし、先打ち部と後打ち部から構成される。先打ち部はPCa部材を意図し、鉄骨フランジを模した鉄板(厚さ12mm)に定着用のアングルを溶接した物を埋め込んだ。打ち継ぎ面のコンクリートの仕上げは鉄板上面と同じ高さとした。打ち継ぎ面の加力方向の両端に長さ10mmのひび割れ誘発目地を設けたので、有効な打ち継ぎ長さ(L)は50cmとなり、打ち継ぎ面積は25.5x50(cm)=1275cm²である。計画した実験変数は打ち継ぎ面の処理として、金ゴテ仕上げ(以下P試験体)、粗面仕上げ(同W試験体)及びグリース塗布(同G試験体)の3種類、接合筋比(p_w)を0.1,0.2,0.4,0.6,0.8%の5種類、埋め込まれる鉄板の幅を100,50mm及び鉄板無しの3種類とした。打ち継ぎ面の処

*1 安藤建設(株)技術研究所、工修(正会員)

*2 安藤建設(株)技術研究所(正会員)

*3 福山大学工学部建築学科教授、工博(正会員)

理方法は、いずれの試験体も打設後に金ゴテで平滑に仕上げ、W試験体はコンクリートの硬化直前に、ワイヤーブラシを用いて目荒らしを行った。この方法によって加力方向と直交方向に2~3mm程度の凹凸がある仕上げとなった。G試験体は後打ちコンクリート打設直前に打ち継ぎ面全面にグリースを塗布した。使用材料の試験結果を表2に示す。接合筋はD6を使用し、135°フック付きの閉鎖型とした。

表1 試験体及び実験結果一覧

試験体名	打ち継ぎ面	接合筋比 pw(%)	鉄骨幅 bs(mm)	τ_{cr} (MPa)	τ_{slip} (MPa)	δ_{slip} (mm)	τ_{peak} (MPa)	δ_{peak} (mm)
W100-1	粗面仕上げ	0.1	100	1.47	←	0.0	0.71	12.2
W100-2		0.2	100	1.46	1.87	0.2	1.40	10.7
W100-4		0.4	100	1.75	2.46	0.2	2.30	12.3
W100-6		0.6	100	1.60	2.54	0.3	2.46	16.8
W100-8		0.8	100	1.38	2.62	0.5	2.99	16.8
W050-2		0.2	50	2.11	←	0.1	1.39	12.3
W050-4		0.4	50	2.29	2.85	0.1	2.45	15.5
W000-2		0.2	0	2.47	←	0.1	1.47	12.7
W000-4	0.4	0	2.60	2.88	0.2	2.48	10.7	
P100-1	金ゴテ仕上	0.1	100	1.15	←	0.1	0.67	15.7
P100-2		0.2	100	1.38	1.53	0.2	1.30	11.9
P100-4		0.4	100	1.15	1.53	0.2	2.09	12.9
P100-6		0.6	100	1.22	1.43	0.5	$\delta_h=2.5mm$ で中止	
P050-2		0.2	50	2.08	←	0.0	1.36	14.0
P050-4		0.4	50	2.10	←	0.0	2.23	11.9
P000-2	0.2	0	2.23	←	0.0	1.41	12.9	
P000-4	0.4	0	2.21	2.35	0.2	2.28	12.4	
G100-1	グリース塗布	0.1	100				0.51	20.3
G100-2		0.2	100				1.16	15.3
G100-4		0.4	100				1.44	14.3

試験体名 接合筋比 $p_w=n \cdot a_w / (b \cdot L')$
 P100-4 n:接合筋本数 a_w :鉄筋断面積(mm²)
 ① ② ③ b:部材幅(mm) L':有効打ち継ぎ長さ(mm)
 ①P:金ゴテ W:粗面 G:グリース塗布
 ②鉄骨幅 100:100mm 50:50mm 0:鉄骨無し
 ③接合筋比 -1:0.1% -2:0.2% -4:0.4%...

← $\tau_{cr}=\tau_{slip}$ の試験体
 τ_{cr} :ひび割れ発生時のせん断応力度
 $\tau_{slip}, \delta_{slip}$:水平すべり発生時のせん断応力度, 同水平変位
 $\tau_{peak}, \delta_{peak}$: $\delta_h > 10mm$ における荷重のピーク点のせん断応力度, 同水平変位

2.2 加力及び計測

図2に加力及び計測模式図を示す。打ち継ぎ面に対して平行な方向の水平すべり変位を図中の δ_{h1}, δ_{h2} 、打ち継ぎ面に対して直交方向の鉛直変位(目開き)を δ_{v1}, δ_{v2} として各2ヶ所で計測した。他に、油圧ジャッキの荷重、及び打ち継ぎ部位置の接合筋の軸方向の歪みを計測した。加力は、試験体の両端に鉄骨を取り付けたS型加力とし、表3の加力サイクルに基づく一方向繰り返し載荷を行った。

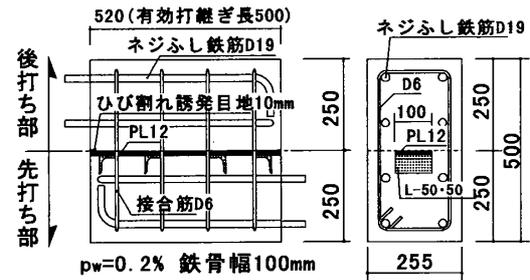


図1 試験体形状図

表2 材料試験結果

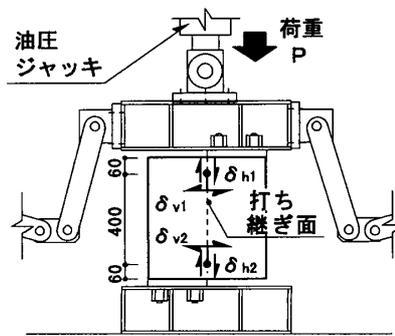
コンクリート	圧縮強度 σ_{cb} (MPa)	割裂引張強度 σ_{ct} (MPa)	ヤング係数 E (GPa)
先打ち部	23.3	2.00	23.8
後打ち部	27.7	2.20	24.2

鉄筋	降伏強度 σ_{sy} (MPa)	降伏歪み ϵ_y (μ)	引張強度 σ_u (MPa)	ヤング係数 E (GPa)
D6	433	2330	544	189

3.実験結果

3.1 実験経過

図3にせん断力(Q)-水平すべり変位(δ_h)関係の一例を示す。ここに示したのは δ_h が1mm以下の範囲を拡大した図である。P及びW試験体は加力開始後、ほとんど水平方向の変位を示さずにせん断力だけが增加了。続いて打ち継ぎ面に沿ったひび割れが生じ、この時のせん断応力度を τ とする。 $\tau=0 \sim \tau_{cr}$ までは、鉛直変位(δ_v)、及び接合筋の歪みはほとんど0であった。比較的接合筋比(p_w)が小さい試験体は、ひび割れの発生と同時に荷重低下



せん断力 $Q = P$
 水平すべり変位 $\delta_h = (\delta_{h1} + \delta_{h2}) / 2$
 鉛直変位 $\delta_v = (\delta_{v1} + \delta_{v2}) / 2$

図2 加力及び計測模式図

表3 加力サイクル

Cycle	制御目標変位 δ_h (mm)
1	2.5
2	5.0
3	10.0
4	20.0

各Cycleの目標変位に到達後、荷重0まで除荷

と水平すべりが生じたが、比較的 p_w の大きい試験体は、水平変位を生じながら荷重が増加し、接合筋の軸歪みも徐々に大きくなった。しかし、いずれの試験体も $\delta_h=1\text{mm}$ 以下で水平方向にすべりが生じ、荷重の低下が見られた。この水平すべり応力度を τ_{slip} とする。P試験体は p_w が大きい場合でもひび割れ後の荷重の増加が少なかった。図4に最終加力時までのせん断力(Q)–水平すべり変位(δ_h)関係の一例を示す。水平すべり発生後はいずれの試験体も荷重の低下が見られ、更に加力を続けると若干荷重が上昇し、 $\delta_h=10\text{mm}$ 以上で荷重のピーク点が存在する。この点を τ_{peak} として図中に示す。G試験体は加力初期からすべりが見られ、接合筋比に応じた剛性で、

$\delta_h=10\text{mm}$ 以上まで荷重が増加した。図5に試験体のひび割れ状況の一例を示す。 $\delta_h=5\text{mm}$ 以下では、打ち継ぎ面に沿った1本のひび割れ以外はほとんど発生しなかった。 $\delta_h=10\text{mm}$ 以上で試験体側面が盛り上がるようなひび割れが発生し、これらは接合筋が多い試験体ほど顕著であり、 τ_{peak} 時には試験体側面のコンクリートが剥離した。なお、 $p_w=0.2\%$ 以下の試験体では接合筋が破断した。

3.2 鉛直変位 δ_v

図6に各試験体のすべり発生時及び $\delta_h=5, 10\text{mm}$ の時の鉛直変位(δ_v)を示す。ここで鉛直変位とは打ち継ぎ面の目開きを表す。水平すべり発生時の δ_v は、いずれの試験体もほとんど0であった。すべり発生後の $\delta_h=5, 10\text{mm}$ の時は、W試験体の δ_v が大きく、続いてP試験体となり、G試験体は最も小さかった。接合筋比及び鉄骨幅による影響は顕著でなかった。

4.強度の検討

4.1 ひび割れ強度 τ_{cr}

図7に打ち継ぎ面ひび割れ強度 τ_{cr} と打ち継ぎ

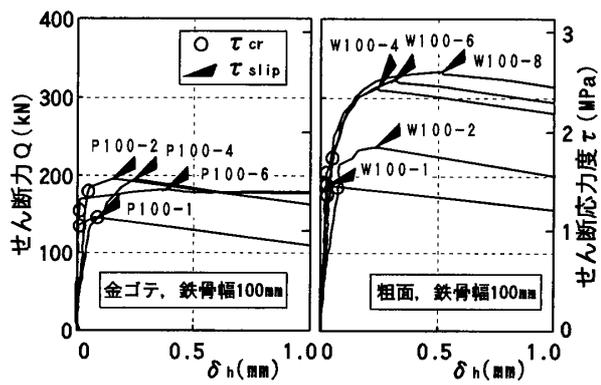


図3 Q- δ_h 関係($\delta_h \leq 1\text{mm}$)

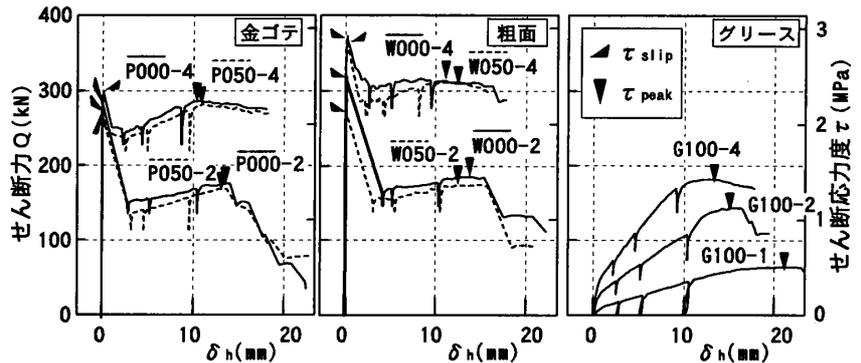


図4 Q- δ_h 関係(最終加力時まで)

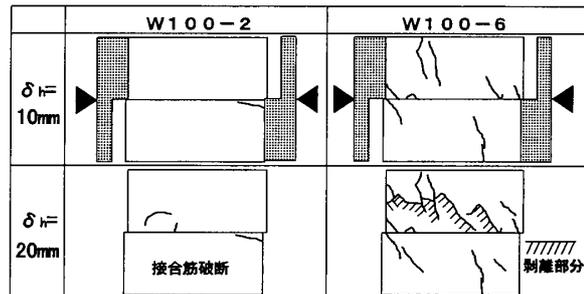


図5 ひび割れ状況の一例

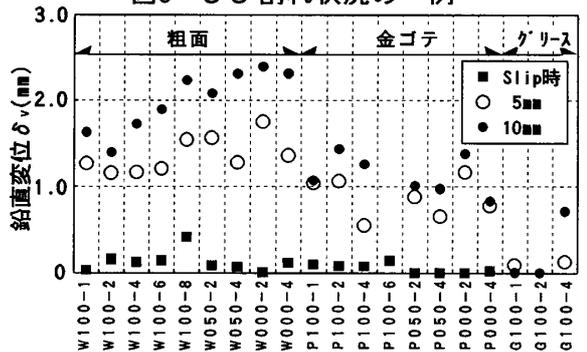


図6 各試験体の鉛直変位(δ_v)

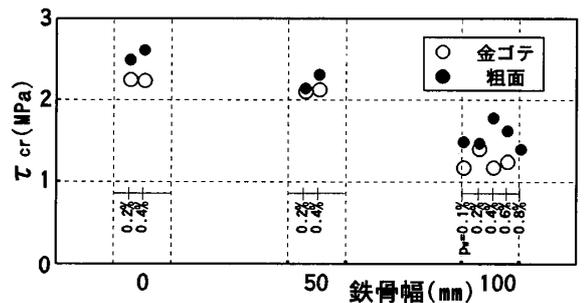


図7 τ_{cr} -鉄骨幅関係

面に内蔵された鉄骨幅の関係を示す。ここで、 τ_{cr} は式(1)で表される。

$$\tau_{cr} = \frac{Q_{cr}}{b \cdot L'} \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

Q_{cr} : ひび割れ発生時せん断力(N)
 L' : 有効打ち継ぎ面長さ(=500mm)

p_w と τ_{cr} の相関性は無いが、金ゴテ・粗面の両者とも鉄骨幅が大きくなるにつれ τ_{cr} が低下している。そこで部材幅(b)から鉄骨幅(b_s)を控除した断面でせん断応力度(τ_{cr2})を算出する。 τ_{cr2} を式(2)に示す。

$$\tau_{cr2} = \frac{Q_{cr}}{(b - b_s) \cdot L'} = \frac{b}{(b - b_s)} \cdot \tau_{cr} \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

図8に τ_{cr2} と鉄骨幅の関係を示す。鉄骨幅の影響が無くなり、その平均値は粗面で2.57(MPa)、金ゴテで2.21(MPa)となった。ここで、ひび割れ強度を $\sqrt{c \sigma_B}$ ($c \sigma_B$: コンクリート圧縮強度)の関数で表すと、材料試験結果より $c \sigma_B = 23.3(\text{MPa})$ を代入し式(3)が導かれる。図9に τ_{cr} の実験値と式(3)による計算値の比較を示す。

$$\tau_{cr} = \alpha \cdot \sqrt{c \sigma_B} \cdot \left(1 - \frac{b_s}{b}\right) \quad (\text{MPa}) \quad (3)$$

$$\alpha = \begin{cases} 0.46(\text{金ゴテ}) \\ 0.53(\text{粗面}) \end{cases}$$

4.2 接合筋効果

図10に、各試験体のひび割れ強度(τ_{cr})を接合筋量($p_w \cdot w \sigma_y$)で除したものを示す。図中の●はひび割れ発生と同時にすべりが生じた試験体で、 $\tau_{slip} = \tau_{cr}$ となる。その時の $\tau_{cr} / (p_w \cdot w \sigma_y)$ の値は概ね2.0以上である。つまり、ひび割れ発生後に接合筋による強度の負担を期待する場合は、 $p_w \cdot w \sigma_y > \tau_{cr} / 2$ となる接合筋が必要である。図11に各試験体の接合筋の負担せん断応力度(τ_w)を示す。ひび割れ発生時まで接合筋の負担せん断応力はほとんど無いとして、 τ_w を式(4)で表す。

$$\tau_w = \tau_{slip} - \tau_{cr} \quad (4)$$

図11によると界面が粗面の場合には p_w が大きくなるにつれ τ_w が高くなっている。金ゴテの場合は τ_w が低く、 p_w との相関性は少ないと思われる。鉄骨幅の影響を見ると、鉄骨幅が大きいほうが τ_w が高い傾向があるが、試験体数が少ないため定量的なことは言えない。図12は、水平すべり発生直前の

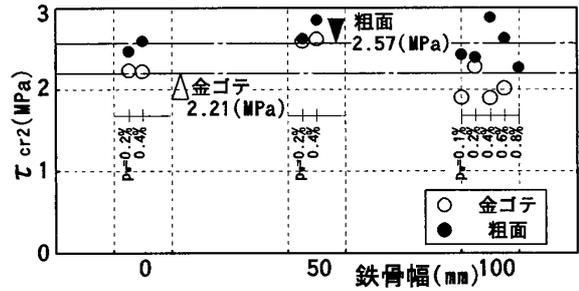


図8 τ_{cr2} -鉄骨幅関係

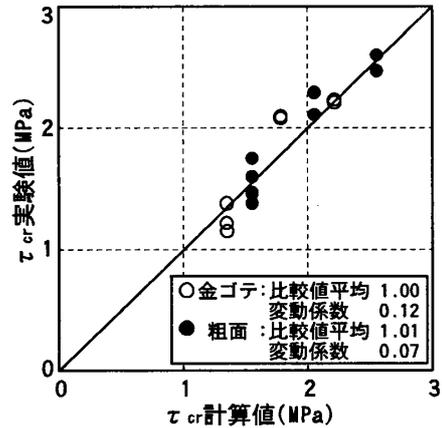


図9 τ_{cr} の実験値と計算値の比較

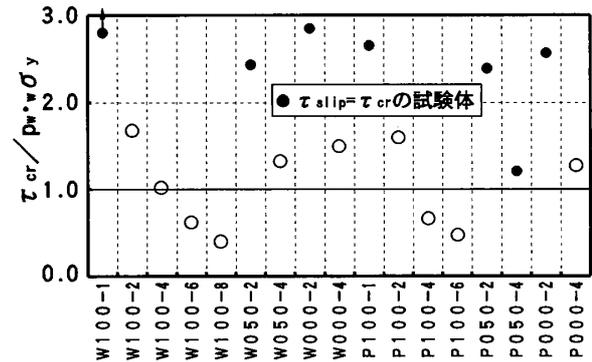


図10 各試験体の $\tau_{cr} / (p_w \cdot w \sigma_y)$

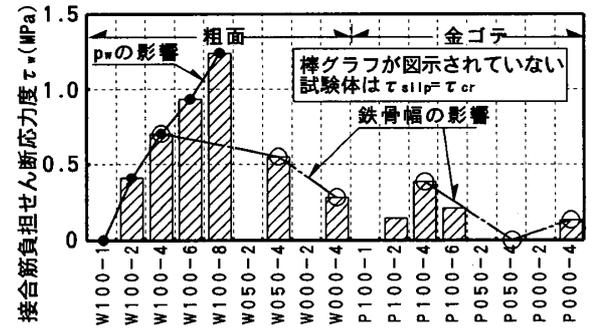


図11 接合筋負担せん断応力度(τ_w)

加力ステップにおける、打ち継ぎ位置で計測した接合筋の軸方向歪みの平均値(ϵ_{ave})を、降伏歪みで除した値と p_w の関係である。いずれの試験体もすべり発生時に接合筋の軸降伏は認められなかった。縦軸の $\epsilon_{ave}/\epsilon_y$ が0.1付近の試験体は $\tau_{slip} = \tau_{cr}$ もしくはひび割れ発生直後にすべりが生じた試験体である。図11で接合筋の効果が見られた試験体の、すべり発生時の歪みの値を調べると、 $\epsilon_{ave}/\epsilon_y$ の平均がP試験体で0.26、W試験体で0.47となる。望月らの実験^{[6][7]}では、 $\epsilon_{ave}/\epsilon_y$ の値をせん断摩擦の仮説に基づく低減係数として、コッターを有する鉛直接合部で0.64、敷モルタルで接合した水平接合部で0.39と報告されている。

4.3 水平すべり強度 τ_{slip}

図13に水平すべり強度 τ_{slip} と $p_w \cdot w \cdot \sigma_y$ の関係を示す。図中の●はひび割れ発生と同時にすべりが生じた試験体である。W試験体は $p_w \cdot w \cdot \sigma_y$ に応じて τ_{slip} も高くなり、P試験体は $p_w = 0.1 \sim 0.2\%$ で強度の上昇が見られたが、それ以上の範囲では、強度の上昇が少なかった。これらの結果より、鉄骨面を含んだ打ち継ぎ面のすべり強度は、ひび割れ強度を示す式(3)と接合筋の負担せん断応力度 τ_w を累加して式(5)で表す。

$$\tau_{slip} = \tau_{cr} + \tau_w \quad (\text{MPa}) \quad (5)$$

$$\tau_w = \beta \cdot \mu \cdot p_w \cdot w \cdot \sigma_y$$

但し、 $p_w \cdot w \cdot \sigma_y < \tau_{cr}/2$ の時は $\tau_w = 0$

$$\beta = \begin{cases} 0.26(\text{金ゴテ}) \\ 0.47(\text{粗面}) \end{cases} \quad \mu = \begin{cases} 0.8(\text{金ゴテ}) \\ 1.0(\text{粗面}) \end{cases} \quad [8]$$

ここで、 τ_w はせん断摩擦の仮説を用いた。但し、図10より $\tau_{cr}/(p_w \cdot w \cdot \sigma_y)$ の値が2以上の場合は τ_w を0とした。また、係数 β はせん断摩擦効果の低減係数とし、図12の結果より、打ち継ぎ界面を平滑な金ゴテ仕上げとした場合は0.26、粗面の場合は0.47とした。図14に τ_{slip} の実験値と計算値の比較を示す。計算強度が高くなるW000-4、W100-8試験体、及び金ゴテ仕上げで p_w の大きいP100-6試験体が危険側の評価となったが、他の試験体の適合性は良かった。

4.4 大変形時のピーク強度 τ_{peak}

図15に各試験体の τ_{peak} を示す。これによると τ_{peak} は、鉄骨幅の影響、及び粗面と金ゴテの差はほとんど見られず、 p_w の影響が支配的であることが分かる。図6において、水平すべり変位(δ_h)が10mm

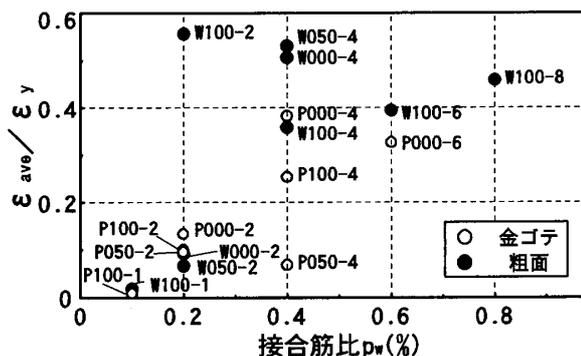


図12 $\epsilon_{ave}/\epsilon_y$ -接合筋比関係

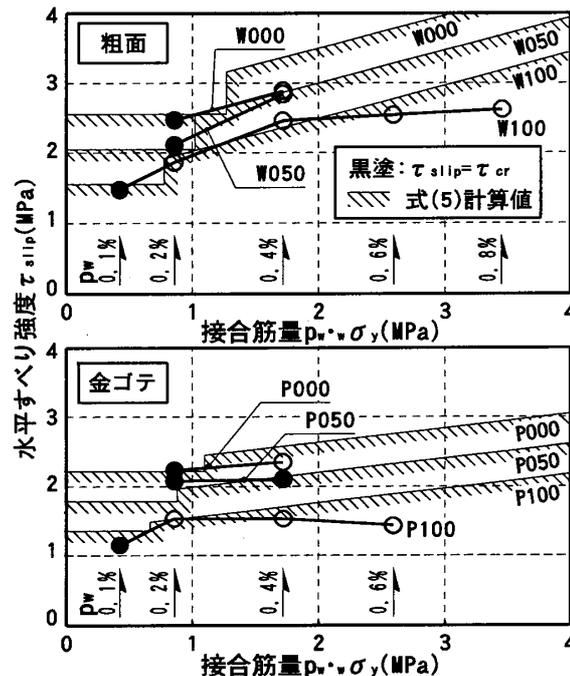


図13 τ_{slip} -接合筋量 $p_w \cdot w \cdot \sigma_y$ 関係

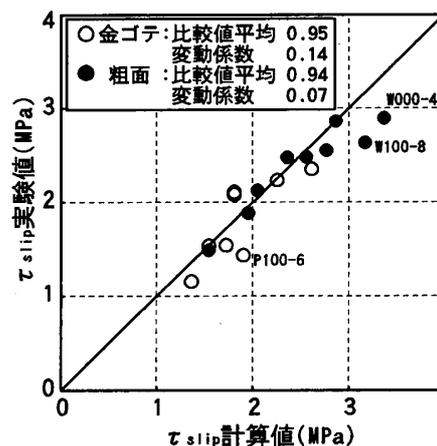


図14 τ_{slip} の実験値と計算値の比較

時の、打ち継ぎ面の目開きは粗面で2mm前後、金ゴテで1mm前後有り、界面の違いによるせん断摩擦効果は少なくなると考えられる。図16に τ_{peak} と接合筋量の関係を示す。P試験体及びW試験体では、 $p_w=0.4\%$ までは直線的に強度が上昇した。前述の通り、 $p_w \leq 0.2\%$ では接合筋が破断したことを考慮し、 τ_{peak} は打ち継ぎ界面の状態によらず式(6)で与える。

$$\tau_{peak} = p_w \cdot \sigma_u \quad (\text{MPa}) \quad (6)$$

σ_u : 接合筋引張強さ(MPa)

図16では、 $p_w \geq 0.6\%$ の範囲で式(6)による計算値を下回っている。これらの試験体は接合筋の間隔が小さく、大変形時に接合筋間のコンクリートが割裂し、側面の被りコンクリートが剥離することにより強度が決定されていると考えられる。接合筋間隔の小さい場合の τ_{peak} は別途検討を要する。

5. まとめ

本実験を通して以下に示す知見が得られた。

- 1) 打ち継ぎ面に沿ったひび割れ強度は、内蔵される鉄骨幅が大きく影響し、鉄骨幅を考慮したひび割れ強度式は式(3)で評価できる。但し、コンクリート強度が異なる場合は今後の検討課題である。
- 2) 水平すべり強度は、ひび割れ強度に接合筋のせん断摩擦効果による強度を累加することによって評価できる。しかし、接合筋比が小さい場合はひび割れ発生と同時にすべりが生じ、接合筋の効果が少なかった。
- 3) 打ち継ぎ界面が平滑な金ゴテ仕上げの試験体と比べ、粗面仕上げの試験体の方が、水平すべりに対する、接合筋の効果が大きく、すべり強度は式(5)で評価できる。
- 4) すべり変位が大きい領域では打ち継ぎ面の目開き量が大きく、せん断摩擦効果が減少するため、界面の違いによる差は少なくなり、大変形時のピーク時の強度は式(6)で評価できる。

参考文献

[1] 鈴木英之, 西原寛他: SRC造PCa梁における水平打継ぎ面の影響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.17, No.2, pp.195-200, 1995.6
 [2] 例えば, 松戸正士, 三瓶昭彦他: プレキャスト鉄骨鉄筋コンクリート梁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.13, No.2, pp.675-678, 1991.6
 [3] Mattok A.H. and Hawkins N.M.: Shear Transfer in Reinforced Concrete - Recent Research, PCI Journal, pp.55-75, March/April 1972
 [4] Paulay T., Park R. and Phillips M.H.: Horizontal Construction Joints in Cast-in-Place Reinforced Concrete, ACI Journal SP42-27, pp.599-616, 1974
 [5] 古屋則之, 竹本靖, 武田寿一: コンクリート打継ぎ面でのせん断伝達(その3), 日本建築学会大会学術講演梗概集(構造系), pp.1563-1564, 1978.9
 [6] 望月重, 井口雅章: 壁式プレキャスト構造の水平接合部の復元力特性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.11, No.2, pp.591-596, 1989.6
 [7] 望月重, 梅宮良之: 鉛直接合部の面外拘束効果に関する実験, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.7, pp.373-376, 1985.5
 [8] 日本建築学会: プレキャスト鉄筋コンクリート構造の設計と施工, pp.171-203, 1986

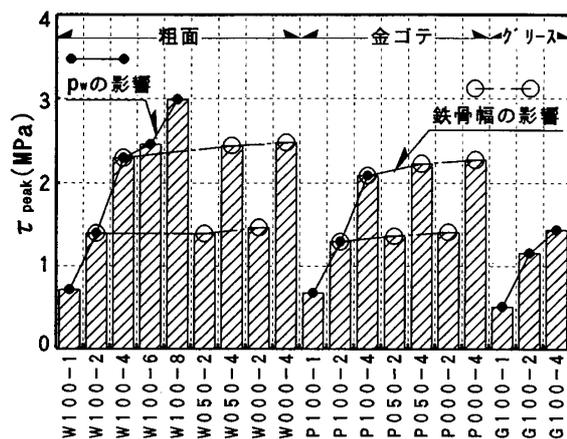


図15 各試験体の τ_{peak}

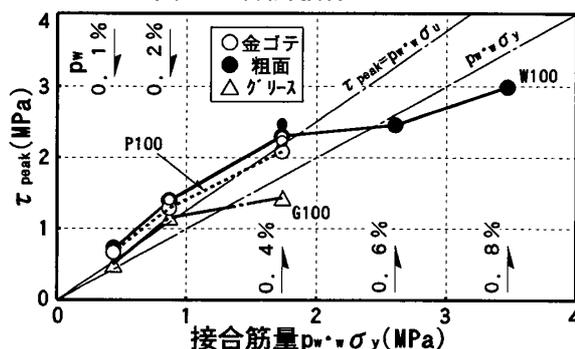


図16 τ_{peak} -接合筋量 $p_w \cdot \sigma_y$ 関係