

論文 SRC 造 PCa 梁における水平打継ぎの影響に関する実験的研究

鈴木英之^{*1}・西原 寛^{*2}・松本智夫^{*1}・田畑 卓^{*2}

要旨：スラブ下で水平打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において、主筋比・あばら筋比・打継ぎ界面の状態を要因とした曲げせん断実験を行った。その結果、水平打継ぎを有する試験体は部材降伏前に水平ずれが生じたが、鉄骨比の大きい試験体では良好な履歴性状を示し、差し筋を施すことによって、ずれ量を低減することが可能であった。梁端部が下端引張の曲げモーメントを受ける場合に、圧縮域のコンクリートにずれが生じると曲げ終局耐力が低くなり、その耐力は水平打継ぎ部のずれ耐力を考慮した圧縮域を仮定することによって評価することが可能であった。

キーワード：鉄骨鉄筋コンクリート造, プレキャスト, 水平打継ぎ, 曲げ終局耐力, 差し筋

1. はじめに

鉄骨鉄筋コンクリート構造(SRC構造)の梁をプレキャスト(Pca)化するにあたって、スラブ下までをハーフPCa梁とする工法が考えられる。この時、水平打継ぎ面に鉄骨フランジの上面が露出し、またSRC構造のあばら筋比は一般的にRC構造の場合よりも小さく、その打継ぎ条件としては厳しいことが想定され、梁としての一体性が問題となる。本実験ではSRC構造の梁をPCa化するにあたって、梁主筋量・あばら筋比・水平及び鉛直打継ぎ部の影響等を要因とした梁試験体を製作し、水平打継ぎ部を有するSRC梁部材の構造性能を検証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

図1に試験体形状図、表1に試験体一覧を示す。試験体は8体で、断面を $b \times D = 255 \times 400 \text{ mm}$ に片側17.25mmのスラブを持つT型とし、せん断スパン比(a/D)を2.5とした。水平打継ぎはスラブ下で行い、コンクリートの設計基準強度は240(kgf/cm^2)とした。変動要因は主筋をD16, D22, D25の3種類、あばら筋比(P_w)を0.1~0.3とし、P22-4は $P_w = 0.2\%$ に差し筋を P_w に換算して0.2%施した。P22-2・P16

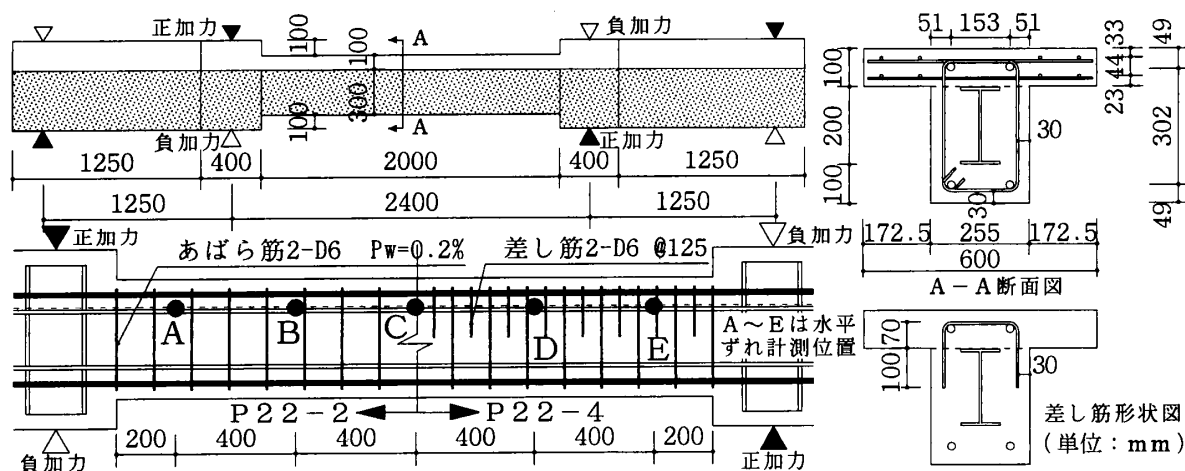


図1 試験体形状図

*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)

表1 試験体一覧

No	試験体名	主筋		あばら筋		鉄骨 (材質はSS400)	打継ぎ面		備考
		種類	Pt(%)	種類:SD295	Pw(%)		水平	鉛直	
1	N22-2	2-D22 SD345	0.86	2-D6 @125	0.20	H-200*100*8*12	無し	無し	一体打ち
2	P22-2	2-D22 SD345	0.86	2-D6 @125	0.20	H-200*100*8*12	有り	無し	$sM/(rM+sM) = 45\%$
3	P16-1	2-D16 SD345	0.44	2-D6 @250	0.10	H-200*100*8*12	有り	無し	曲げ降伏耐力に対する鉄骨負担割合 = 60%
4	P25-3	2-D25 SD390	1.14	2-D6 @84	0.30	H-200*100*5.5*8	有り	無し	30%
5	P22-4	2-D22 SD345	0.86	2-D6 @125	0.20	H-200*100*8*12	有り	無し	差し筋0.2%
6	V22-2	2-D22 SD345	0.86	2-D6 @125	0.20	H-200*100*8*12	有り	有り	梁端1.0Dで鉛直接合
7	G22-2	2-D22 SD345	0.86	2-D6 @125	0.20	H-200*100*8*12	有り	無し	グリース塗布
8	G22-2X	2-D22 SD345	0.86	2-D6 @125	0.20	H-200*100*8*12	有り	無し	グリース塗布, 上端主筋切断

-1・P25-3は、部材の曲げ降伏耐力に対する鉄骨の負担する割合(鉄骨の曲げ耐力比)を各々45・60・30%として計画した。水平打継ぎ面は鉄骨の上フランジ面と同じ高さで金ゴテ仕上げとし、G22-2、G22-2Xはコンクリート相互の付着を低減する目的でグリースを塗布した。なお、G22-2Xは上端主筋・スラブ筋を梁端部で切断した。V22-2は梁端部から1.0D(D:梁せい)位置で鉛直接合部を設け、N22-2は比較のための一体打ち試験体である。使用した材料の試験結果は表2,表3に示す。

表2 コンクリート材料試験結果

打設箇所	圧縮強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (kgf/cm ²)	割裂引張強度 (kgf/cm ²)
PCa部	30.7	2.60×10^5	27.8
後打ち部	24.2	2.39×10^5	25.3
備考 ・N22-2は「PCa部」のコンクリートを打設 ・V22-2の梁中央部は「PCa部」のコンクリート、 梁端部とスラブ部は「後打ち部」のコンクリートを打設した。			

表3 鉄筋・鉄骨の材料試験結果

種類		降伏応力度 (kgf/cm ²)	引張耐力 (kgf/cm ²)	降伏歪み (μ)	ヤング係数 (kgf/cm ²)
鉄筋	D25	4320	6160	2310	1.91x10 ⁶
	D22	3790	5510	2070	1.87x10 ⁶
	D16	3770	5710	2120	1.88x10 ⁶
	D6	4150	5640	2240	1.89x10 ⁶
鉄骨	PL12	2750	4520	1370	2.00x10 ⁶
	PL8	3160	4200	1520	2.05x10 ⁶
PL12はH-200・100・8・12, PL8はH-200・100・5.5・8より採取					

2.2 加力及び計測方法

加力は門型の加力フレーム内に設置した2本の押し引き油圧ジャッキで試験体の左右の加力スタブの絶対変位が逆対称となるような変位制御とし、表4に示す加力サイクルに従い各相対変形角で正負交番繰り返し载荷を行った。計測は、水平打継ぎ部のずれ変位を図1に示すA～Eのスラブ付け根で計測し、支点間相対変位、

表4 加力サイクル

相対変形角 R(rad)	繰り返し数 (Cycle)	相対変形角 R(rad)	繰り返し数 (Cycle)
1/400	±1	1/33	±2
1/200	±1	1/25	±2
1/100	±2	1/20	±1
1/50	±2		

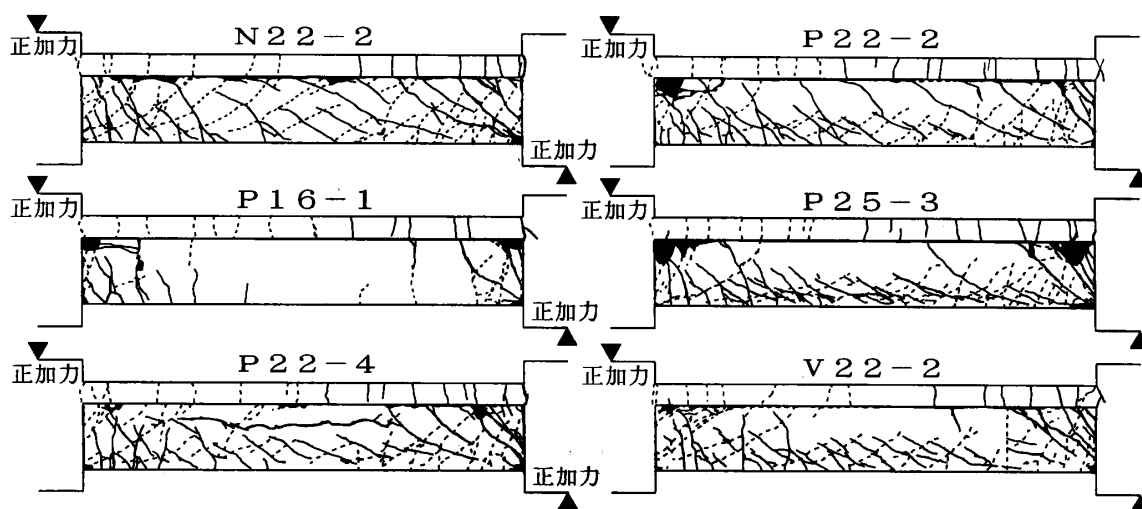


図2 最終破壊状況

鉄筋・鉄骨の歪み、油圧ジャッキの荷重等を各ステップで計測した。

3. 実験結果

3.1 実験経過及び、破壊性状

図2に最終破壊状況、表5に実験結果一覧を示す。実験経過を以下に示す。

①スラブ付け根の水平打継ぎ部のひび割れはP16-1が $R=1/400\text{rad}$ 、P22-2・P25-3・P22-4・V22-2は $R=1/200\text{rad}$ で発生し、相対変形角の増加に伴いずれ変位が大きくなった。グリースを塗布した試験体(G22-2・G22-2X)は加力初期からずれが生じた。N22-2は $R=1/33\text{rad}$ で大きくずれが生じた。

② $R=1/100\text{rad}$ 以前に全ての試験体で下端主筋が降伏し、鉄骨フランジは上端・下端とも $R=1/125\sim 1/67\text{rad}$ で降伏した。上端主筋の降伏はN22-2は下端主筋とほぼ同時だったが、他の試験体は鉄骨フランジの降伏よりも遅れ $R=1/67\sim 1/33\text{rad}$ で降伏した。

③P16-1・P22-2・P25-3・G22-2の4試験体は $R=1/50$ から $1/33\text{rad}$ にスラブ付け根の梁端部に圧壊が発生した。スラブ下の圧壊は変形角の増加に伴い大きくなった。

④最終加力時には一体打ちのN22-2試験体も含めて全ての試験体が水平打継ぎ部に大きなずれが発生した。P25-3は $R=1/20\text{rad}$ 時に下端主筋付近でコーナー割裂破壊した。

表5 実験結果一覧

試験体名		曲げひび割れ		せん断ひび割れ		水平打継ぎ		曲げ降伏*1		曲げ終局*2	
		上端	下端	正加力	正加力	上端	下端	上端	下端	上端	下端
		Mc2 (tf·m)	Mc1 (tf·m)	Qsc (tf)	Qhc (tf)	My2 (tf·m)	My1 (tf·m)	Mu2 (tf·m)	Mu1 (tf·m)		
N22-2	実験値	5.3	2.6	12.4	18.8	24.2	21.4	29.4	26.9		
	変形角	0.6	0.3	2.6	5.0	8.0	6.4	20.2	18.6		
	計算値	4.5	3.3	9.7	*****	19.5	16.1	20.8	19.2		
	実/計	1.16	0.79	1.27	*****	1.24	1.33	1.42	1.40		
P16-1	実験値	3.8	1.1	不明	8.3	17.8	13.0	24.4	15.6		
	変形角	0.5	0.2		2.5	11.0	7.1	50.3	20.3		
	計算値	3.9	3.2	9.9	*****	15.0	11.6	16.7	15.0		
	実/計	0.97	0.35	*****	*****	1.19	1.11	1.47	1.04		
P22-2	実験値	3.4	2.7	14.6	17.3	22.5	19.8	27.5	20.8		
	変形角	0.3	0.3	3.3	4.4	8.1	7.0	30.3	10.2		
	計算値	4.0	3.3	9.7	*****	19.5	16.1	20.8	19.2		
	実/計	0.83	0.82	1.50	*****	1.15	1.23	1.32	1.09		
P25-3	実験値	4.2	3.4	17.5	15.4	21.9	21.3	26.5	21.3		
	変形角	0.5	0.4	4.6	3.7	13.9	9.0	30.3	10.2		
	計算値	4.0	3.3	9.7	*****	22.7	19.4	23.1	21.5		
	実/計	1.05	1.03	1.81	*****	0.97	1.10	1.15	0.99		
P22-4	実験値	3.8	3.1	16.3	15.0	26.5	20.3	29.3	24.3		
	変形角	0.5	0.4	4.5	4.0	13.7	6.0	40.4	10.1		
	計算値	4.0	3.3	9.7	*****	19.5	16.1	20.8	19.2		
	実/計	0.93	0.93	1.67	*****	1.36	1.26	1.41	1.26		
V22-2	実験値	2.4	1.9	14.9	13.6	23.8	18.8	27.6	21.5		
	変形角	0.3	0.3	4.3	3.8	13.6	7.3	40.4	20.2		
	計算値	4.1	3.0	9.0	*****	19.5	16.1	20.8	19.2		
	実/計	0.59	0.65	1.66	*****	1.22	1.17	1.33	1.12		
G22-2	実験値	3.1	1.8	18.2	*****	17.8	16.7	27.3	18.8		
	変形角	0.7	0.4	9.7	*****	8.6	8.6	40.3	20.2		
	計算値	4.0	3.3	9.7	*****	19.5	16.1	20.8	19.2		
	実/計	0.77	0.53	1.87	*****	0.91	1.03	1.31	0.98		
G22-2X	実験値	3.5	3.5	不明	*****	15.1	18.6	17.3	23.4		
	変形角	0.6	0.6		*****	9.9	7.5	50.2	40.7		
	計算値	3.8	3.3	9.7	*****	6.8	16.1	11.7	19.2		
	実/計	0.92	1.07	*****	*****	2.21	1.15	1.47	1.22		

*1 My:SRC規準(117式)[1]のsZpをsZ(断面係数)として計算
*2 Mu:SRC規準(118式) [注]変形角の単位は($\times 1000\text{rad}$)

3.2 変形状

a. せん断力(Q)-相対変形角(R)関係

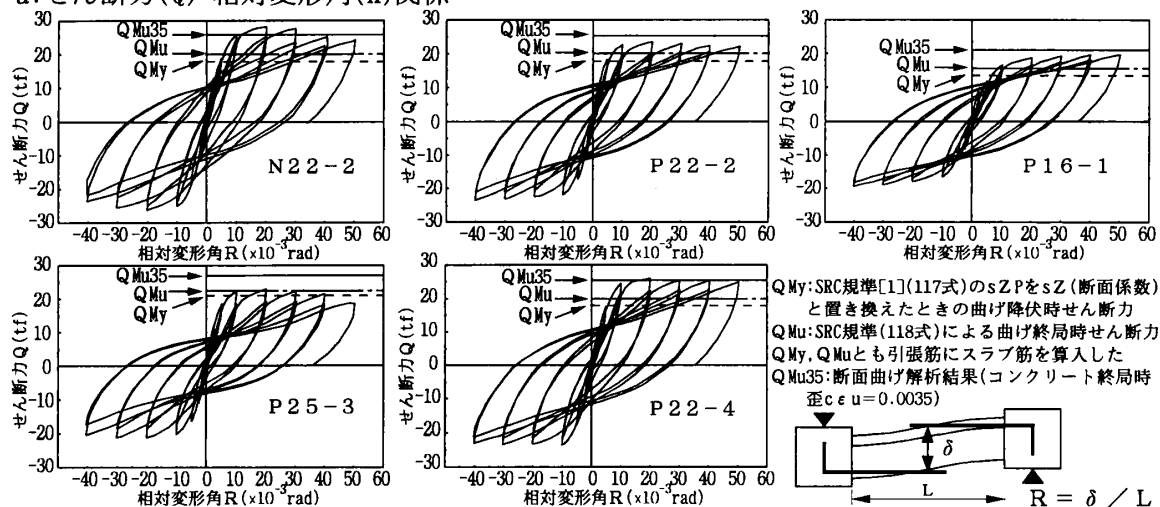


図3 せん断力(Q)-相対変形角(R)関係

図3にせん断力(Q)-相対変形角(R)関係を示す。鉄骨の曲げ耐力比が大きいP16-1は打継ぎ部にずれが生じて履歴ループは紡錘型で安定していたが、鉄骨の曲げ耐力比が小さいP25-3はややスリップ型のループとなり繰り返し载荷時の耐力低下も大きくなっていた。P22-2と主筋及び鉄骨量が同一であるN22-2・P22-4を比較すると履歴ループの形状は何れも似かよっているが、最大耐力は一体打ちのN22-2が最も高く、続いて差し筋を施したP22-4となっており、P22-2は平面保持を仮定した断面曲げ解析による曲げ終局時せん断力(図中 Q_{mu35})に達していなかった。

b. 水平打継ぎ部のずれ変位

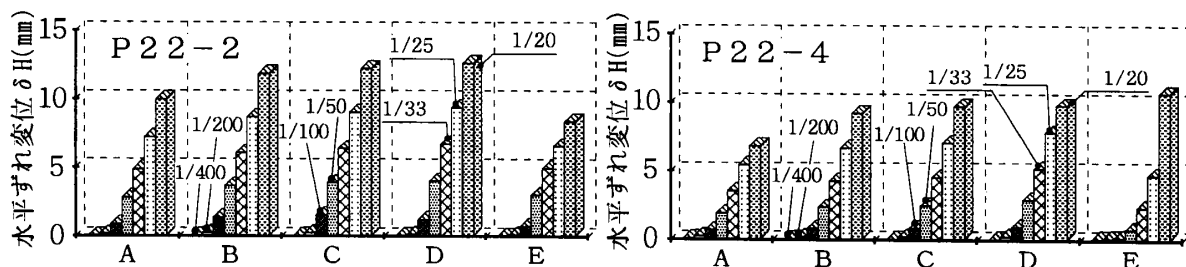


図4 水平打継ぎ部における水平ずれ変位の分布

図4に正加力時の水平打継ぎ部の水平ずれ変位の分布を示す。計測位置のA～Eは図1の●印に対応している。これによると、相対変形角の増大に伴いずれ変位も比例的に大きくなり、材軸方向に対するずれ変位の分布は、ほぼ均一であることがわかる。差し筋による効果を見ると、P22-4の方が同一変形角に於けるずれ変位が小さくなっていた。

3.3 曲げ終局耐力

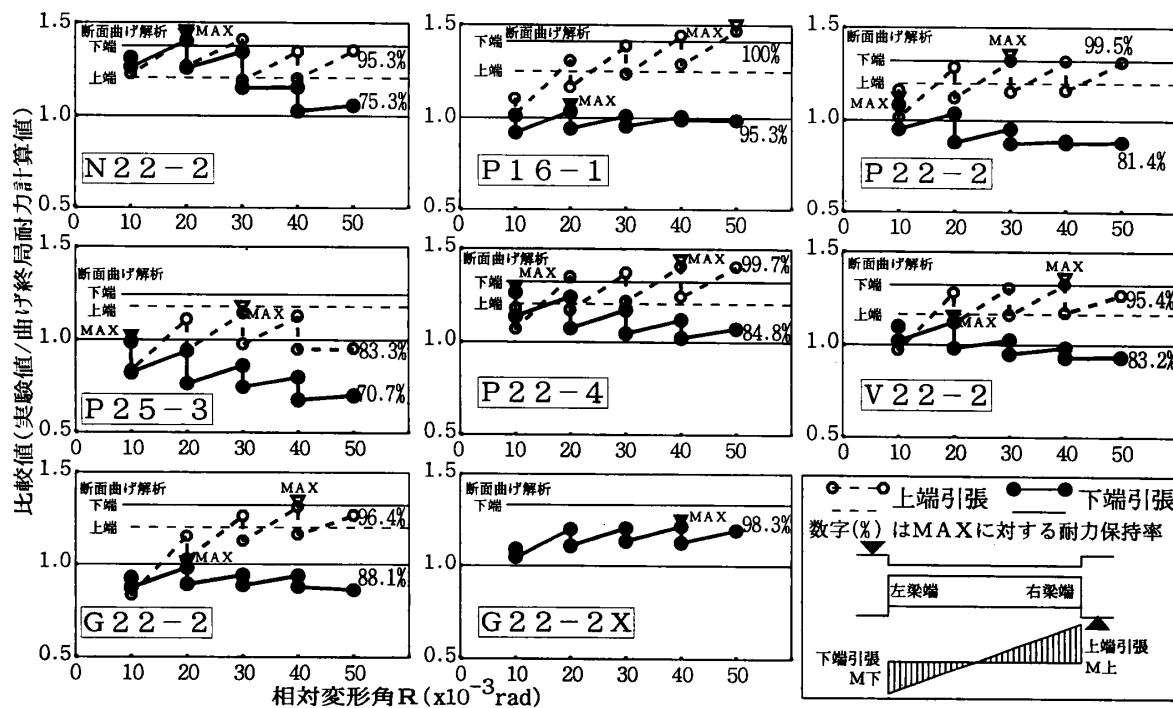


図5 各サイクルにおける曲げ耐力の比較値

図5に各サイクル毎の梁端部のモーメントを曲げ終局耐力計算値(表5参照)で除した比較値を示す。ここでは正加力時の左・右梁端部が、各々下端・上端引張として、梁端部のモーメントを算出した。上端引張側では最大耐力時は何れの試験体も比較値で1.0を越えており平均1.34となり、

R=1/20radまでの繰り返し載荷に於いては、P25-3を除いて比較値1.0以上の耐力を保持していた。一方、下端引張側では最大耐力時の比較値の平均が1.14となっていたが、R=1/20radまでの繰り返し載荷で比較値1.0を保持できたのは一体打ちのN22-2と差し筋を施したP22-4、及びG22-2Xの3試験体となった。平面保持を仮定した断面曲げ解析による精算解との比較値は、最大耐力時で上端引張側が平均1.12に対して下端引張側が0.86となり、下端引張側では大変形時の耐力低下も含めて計算値を大きく下回った。このように、梁の下端が引張となるときは水平打継ぎ部のずれ、つまり、圧縮域のコンクリートがずれることによって曲げ終局耐力が低下したと考えられる。

3.4 水平ずれ発生後の諸耐力に関する検討

図6にスラブ付け根にひび割れが伸展する模式図を示す。このひび割れは上端筋が引張となる半スパンに梁端部から徐々に伸展し、正負交番載荷によって全スパンに貫通すると考えられる。そこで反曲点がスパン中央にあると仮定し、ひび割れ貫通時の打継ぎ面せん断応力度(τa)を、反曲点から上端引張側の区間に対して、上端鉄筋の歪より算出した。図7に各試験体の τa を示す。これによると τa の値はあばら筋比や打継ぎ状態による定性的な傾向はなく、その平均値は9.9(kgf/cm²)であった。図8に逆対称曲げを受ける梁部材の両梁端の釣り合いを示す。打継ぎ上部の力の釣り合いより式(1)が導かれる。

$$\tau x \cdot L \cdot b = Tm2 + Ts1 + Csl \quad (1)$$

ここで、打継ぎ面の抵抗せん断応力度 τx は前述のひび割れ強度 τa を固着強度と考え、それにせん断摩擦の効果を付加して式(2)で表現し、引張力は上端主筋とスラブ筋が全降伏しているとして式(3)とすれば、下端引張時のスラブ圧縮力 Csl として式(4)が導かれる。

$$\tau x = \tau a + \mu \cdot Pw \cdot w \sigma y \quad (2)$$

$$Tm2 + Ts1 = am \cdot m \sigma y + asl \cdot sl \sigma y \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Csl &= \tau x \cdot L \cdot b - (Tm2 + Ts1) \\ &= (\tau a + \mu \cdot Pw \cdot w \sigma y) \cdot L \cdot b \\ &\quad - (am \cdot m \sigma y + asl \cdot sl \sigma y) \end{aligned} \quad (4)$$

τa : 打継ぎ面固着強度(kgf/cm²)

μ : 摩擦係数 Pw : あばら筋比(差し筋含む)

$w \sigma y$: あばら筋降伏応力度(kgf/cm²)

am, asl : 上端主筋・スラブ筋断面積(cm²) $m \sigma y, sl \sigma y$: 主筋・スラブ筋降伏応力度(kgf/cm²)

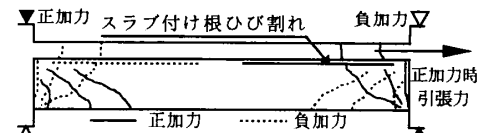


図6 スラブ付け根ひび割れの伸展

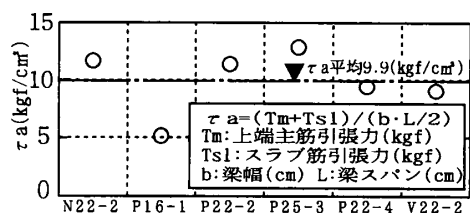


図7 水平打継ぎ部のひび割れ耐力

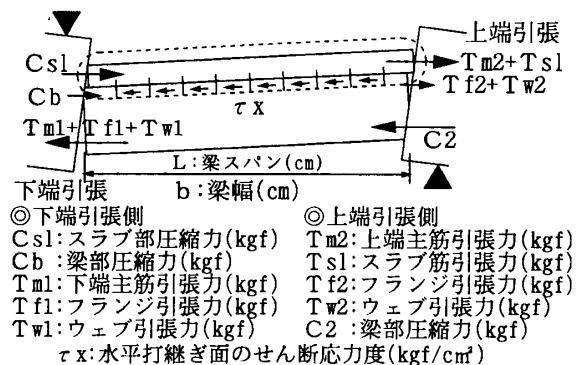


図8 逆対称曲げを受ける梁部材の釣り合い

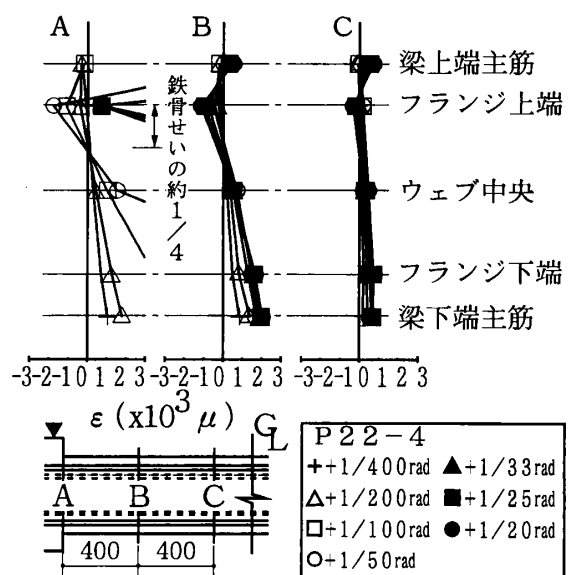
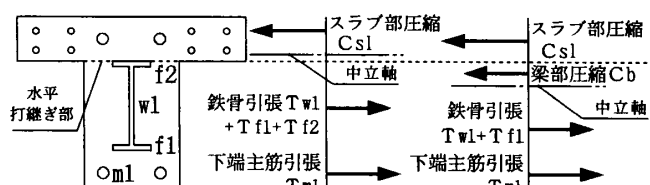


図9 梁せい方向の歪み分布(P22-4)

図9にP22-4における断面方向の歪み分布を示す。下端引張となる断面A・Bはずれが生じた $R=1/200$ rad以降、水平打継ぎ面を境に歪みの折れ点が存在しており、平面保持を仮定した断面曲げ解析結果では中立軸はスラブ内に存在していたが、実際の中立軸は上フランジ面から鉄骨せいの約 $1/4$ の位置であることがわかる。ここで、下端引張時の曲げ終局耐力を算出するに当たって、断面力の分布を図10のように仮定した。つまり、水平ずれが発生していない状態では(a)のように断面の圧縮力はスラブ内のみで負担しているが、ずれ発生後は(b)のように水平打継ぎ面下の梁部にも圧縮力 C_b が発生し、軸方向力の釣り合いより C_b は式(5)で表される。

$$C_b = (T_{m1} + T_{f1} + T_{w1}) - C_{s1} \quad (5)$$

ここで水平ずれ発生後の中立軸位置を上フランジ面から鉄骨せいの $1/4$ とし、圧縮力の作用位置はスラブ部圧縮力 C_{s1} をスラブ厚の中心、梁部圧縮力 C_b を中立軸と水平打継ぎ部の中心と仮定し、中立軸より下側の鉄骨・鉄筋が全て降伏しているとして下端引張時の曲げ終局耐力を算出した結果を表6、図11に示す。摩擦係数 μ は既往の文献[2]を参考にし、V22-2は一体打ち部分との面積比で換算し、グリース塗布の場合は資料が無いがここではさらに 0.5 倍とした。これによると、比較値の値は $1.00 \sim 1.30$ となり、要因によるばらつきも少なく評価できた。また、式(4)、(5)は打継ぎ面耐力が小さくなると、梁部圧縮力 C_b が大きくなることを示しており、本実験に



(a)水平ずれが無い場合 (b)水平ずれ発生後
図10 梁せい方向の断面力の釣り合い

表6 下端引張時の曲げ終局耐力

試験体名	N22-2	P16-1	P22-2	P25-3	P22-4	V22-2	G22-2	G22-2X
摩擦係数 μ	1.4	0.8	0.8	0.8	0.8	1.0	0.4	0.4
スラブ部圧縮力(tf)	70.3	42.3	44.9	47.4	78.8	55.1	28.0	67.9
下端引張時 計算値(tf)	20.7	15.5	18.9	20.5	21.4	19.6	17.7	20.6
曲げ 実験値(tf)	26.9	15.6	20.8	21.3	24.3	21.5	18.8	23.4
終局強度 比較値	1.30	1.00	1.10	1.04	1.13	1.10	1.06	1.13

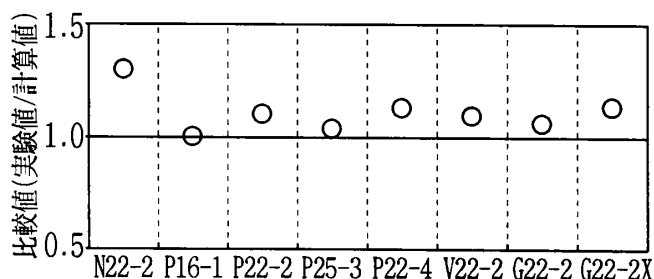


図11 下端引張時の曲げ終局耐力の比較値

においてP16-1・P22-2・P25-3・G22-2試験体の梁上部の圧縮域が圧壊していることと適合している。

4. まとめ

本実験の結果より以下に示す知見が得られた。

- (1)水平打継ぎ部を有するSRC梁では、部材降伏前に水平ずれが生じたが、せん断力(Q)-相対変形角(R)関係は良好な紡錘型を示し、その形状は鉄骨の曲げ耐力比の影響によるものが大きい。
- (2)あばら筋及び差し筋量が多いほど水平ずれを低減し、曲げ終局耐力を増加させる効果があった。
- (3)下端引張側の曲げ終局時には平面保持は成立しておらず、梁断面の圧縮域が水平打継ぎ面の下にも存在しており、曲げ終局耐力の算定は水平打継ぎ部のずれ耐力を考慮した圧縮域を仮定することにより評価が可能である。

なお、鉄骨面を含んだ打継ぎ面のずれ耐力の評価の妥当性は、今後の検討課題としたい。

参考文献

- 1)日本建築学会:鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1987.4
- 2)建設省建築研究所他:プレキャストコンクリートラーメン構造に関する研究報告書, pp.652-661,1992