

論文 鋼板と目地モルタルを介した PCaPC 柱・梁圧着接合面のせん断すべり実験

山下 仁*1・高瀬裕也*2・和田俊良*3・上田正生*4

要旨：スチールバンドを有する PCaPC 柱・梁圧着構造の接合面を想定し、目地モルタルを介するこの種の圧着接合面のせん断すべり実験を行った。試験体は、1)目地モルタルを挟んで両面が鋼板で被覆された「両面鋼板型」、2)片面が鋼板で他面がコンクリートの「片面鋼板他面コンクリート型」の接合面形態を模擬した2種のシリーズで構成され、これら各接合面のせん断摩擦挙動が計測され、その応力 - 変位性状及び破壊性状が明らかにされている。

キーワード：PCaPC, PC 圧着接合, せん断すべり, 摩擦作用

1. はじめに

優れた原点指向性ゆえに、近年、アンボンド PCaPC 柱・梁圧着構造が注目されているが^{1),2)}、著者らは、この種の構造の弱点の一つである、曲げ繰返し載荷後に見られる接合部近傍の梁上・下部に生じるコンクリートの圧縮破壊損傷を可能な限り回避し得る方法を模索している。

既報³⁾において著者らは、この圧着接合部が強地震経験後も補修を要しない程度の性能を保持し得る方法の一つとして、接合部の柱にスチールバンドを巻きつけ、更に梁端部近傍にスチールキャップやバンドを付加した PCaPC 圧着接合構造（以下、スチールバンドを有する PCaPC 圧着接合構造と略記）を提案している。

本研究は、スチールバンドを有する PCaPC 圧着接合構造の要となる柱と梁の圧着接合部に焦点を当て、2種の接合形態を対象として圧着接合部のせん断すべり実験を実施し、これら両接合部のせん断摩擦挙動について調べ、検討・考察を加えたものである。

2. スチールバンド（キャップ）を有するアンボンド PCaPC 柱・梁圧着接合方式の解説

通常アンボンド PCaPC 柱・梁圧着構造の柱と梁端部を鋼板で被覆すると、そのコンファインド効果によってコンクリートの損潰を抑止し、最大荷重経

験後であっても「柱と梁が共に補修を要しない程度に健全性を保持し得る」ことが期待され、更にはリユースの可能性もあるので、著者らは、これを図 - 1 の形で提案している³⁾。

同図に示すように、柱の接合部近傍はスチールバンドで被覆され、梁のスチールキャップとバンドについては、図 - 2 に示すように、1)梁端がキャップ状に被覆される形態と、2)梁端がバンド状に被覆される形態が考えられる。

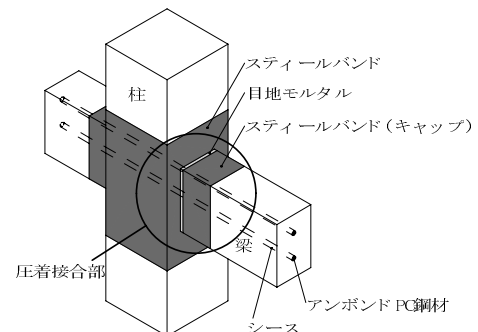
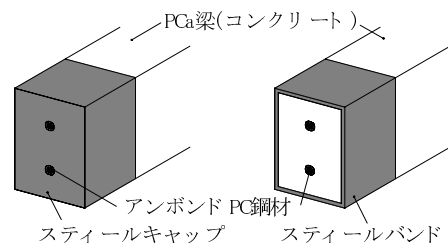


図 - 1 スチールバンド（キャップ）を有するアンボンド PCaPC 柱・梁圧着接合



(a) スチールキャップ (b) スチールバンド
図 - 2 梁端部のスチールキャップとバンド

*1 北海道職業能力開発大学校 建築科講師 工修（正会員）

*2 北海道大学大学院 工学研究科都市空間デザイン専攻 工修（正会員）

*3 北海道職業能力開発大学校 建築科講師 工博（正会員）

*4 北海道大学大学院 工学研究科教授 工博（正会員）

従って本論文では「スチールキャップとバンドを有するPCaPC構造を模擬する上記2種の接合部」を対象として、そのせん断摩擦すべり挙動を調べることとする。上で明らかなように、これらの接合形態は目地モルタルを介して接合されることになるので、上述の2種の接合形態を、目地に視点を置いて区別し、順に1)両面鋼板型接合、2)片面鋼板他面コンクリート型接合と呼称する。

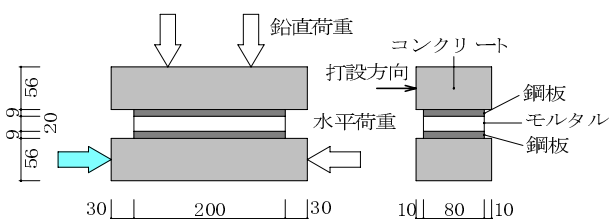
3. 圧着接合部のせん断すべり実験と結果の検証

PCaPC 柱・梁接合(例えば⁴⁾)は、コンクリート面の間に目地モルタルを挟んで圧着する施工が普通である。一方、著者らの「スチールバンドを有するPCaPC 圧着接合構造」は、柱接合部と梁端部の両面もしくは柱面だけに鋼板が露出することになるが、この鋼板とモルタルで構成される接合形態のせん断性状に関する研究は、極めて少ないのが現状のようである。

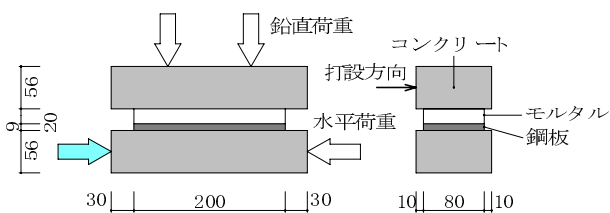
3.1 圧着接合部のせん断すべり実験の概要

本研究では、前掲図 - 1 の柱・梁接合部の一部を取り出し、その梁端を先の図 - 2 の1)両面鋼板型と2)片面鋼板他面コンクリート型とした2種の模擬試験体を作製することとした。

図 - 3 に本接合部試験体の詳細を示す。図 - 3(a) の両面鋼板型の F シリーズ試験体は、「鋼板 - モルタル - 鋼板」のサンドイッチ状の接合方式である。



(a) 両面鋼板型試験体 (F シリーズ)



(b) 片面鋼板他面コンクリート型試験体 (L シリーズ)

図 - 3 圧着接合部試験体の詳細

試験体作製手順は、まず上下のコンクリート部を個々に打設する。その打設方向は、図 - 3 左図の表側から裏側であり、所謂平打ちする。このとき試験体の接合表面はウレタン塗装合板型枠に密着しているが、脱枠後、無処理のままとする。次に、コンクリート硬化後に鋼板(厚さ9mm)をエポキシ樹脂接着剤と貫通ボルトによって固定する。なお、鋼板への表面処理は施していない。最後に、上下2枚の鋼板に挟まれる目地部(厚さ20mm)に無収縮モルタルを充填する。図 - 3(b)の片面鋼板他面コンクリート型のLシリーズ試験体もFシリーズと同一の作製手順とし、上記の両面鋼板型から上側の鋼板(梁端面側)を取り除き、「鋼板 - モルタル - コンクリート」の接合形式としている。なお、両シリーズ試験体ともに受圧面積は $1.6 \times 10^4 \text{mm}^2$ である。

表 - 1 に本試験体の一覧を掲げる。同図より、F シリーズとLシリーズ各6体、計12体の試験体を作製した。試験体名称は、先頭文字がシリーズ名、続く数値が圧着応力値であり、そして接合形態を鋼板のSとコンクリートのCとの組合せで表示しており、最後の数値は繰返しサイクル数を示している。

本実験では、パラメータである「圧着応力」を段階的に変動させ、一定圧着応力下での1)せん断応力 - せん断変位 関係、2)目開き量、3)破壊状

表 - 1 圧着接合部試験体の一覧

番号	シリーズ	試験体名	圧着応力 σ (N/mm ²)	サイクル数 c
1	Fシリーズ	F20SS8	2.0	±8
2		F35SS8	3.5	±8
3		F54SS8	5.4	±8
4		F75SS8	7.5	±8
5		F54SS5	5.4	±5
6		F54SS3	5.4	±3
7	Lシリーズ	L20CS8	2.0	±8
8		L35CS8	3.5	±8
9		L54CS8	5.4	±8
10		L75CS8	7.5	±8
11		L54CS5	5.4	±5
12		L54CS3	5.4	±3

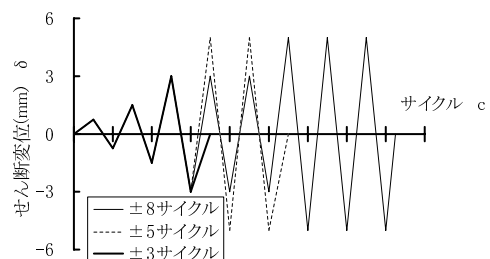


図 - 4 载荷サイクル数 c とせん断変位

況の確認と4)せん断摩擦性状を同定する。圧着応力の大きさは「設計施工規準⁵⁾」では 2N/mm^2 以上が推奨されているが、通常は $5 \sim 6\text{N/mm}^2$ 以上の圧着応力が使用されることも少なくないようである。この理由より、本研究では表-1に掲げるように圧着応力を、 2.0N/mm^2 、 3.5N/mm^2 、 5.4N/mm^2 、 7.5N/mm^2 の4段階に設定している。

図-4に载荷サイクルcとせん断変位を示すが、 $c = \pm 8$ 回(せん断変位: 0.75mm 、 1.5mm を各1回、 3.0mm 、 5.0mm を各3回)を基準とし、比較のために ± 3 回と ± 5 回のサイクルも設定している。

図-5に、試験体接合面を鉛直方向に4軸拘束し、同時にせん断力を手動で与える加力システムの概要を示す。前出の図-3の接合部試験体を鋼製箱型治具でキャップし、試験体と治具の隙間にモルタルを充填した後、加力装置に装着する。

先述のとおり、本実験対象部位は、「鋼板-モルタル-鋼板」もしくは「コンクリート-モルタル-鋼板」で構成される接合面周囲の限られた幅の狭いサンドイッチ領域である。このことから、上記の鋼製箱型治具によるコンクリートブロックのキャピ

ングが接合面の摩擦性状に影響を与えるとは考え難いと思われる。図-5の鉛直方向4本のマイクロジャッキは、表-1の一定圧着応力を加えるために独立PID制御されて、せん断面の水平が保たれる。同時に、下部コンクリートには、左右2本のオイルジャッキにより正負交番繰り返しのせん断力が与えられる。せん断変位は上下コンクリート部間の水平相対変位とし、目開き変位はパイゲージにより測定する。なお、せん断変位の制御はジャッキ操作者のモニタリングに依り、せん断変位の载荷速度は 5.0mm/min である。

3.2 圧着接合部のせん断すべり実験の実験結果

表-2に、コンクリートとモルタルの材料性状を掲げる。コンクリートの圧縮強度は 47.2N/mm^2 で、目地に用いた無収縮既調合モルタルは、その強度がコンクリート強度を下回らないように調合されている。また表-3に示す通り、使用鋼板の降伏強度は、 388.5N/mm^2 の一般鋼材である。

3.2.1 スティールキャップを想定したFシリーズせん断すべり性状

図-6(a)~(f)に、PCa梁端部を両面鋼板型である

表-2 コンクリートとモルタルの材料性状

種類	圧縮強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)	割裂強度 (N/mm^2)
コンクリート	47.2	31.0	3.4
モルタル	68.8	26.4	2.5

表-3 鋼板の材料性状

規格	降伏強度 (N/mm^2)	伸び (%)
SS400	388.5	46

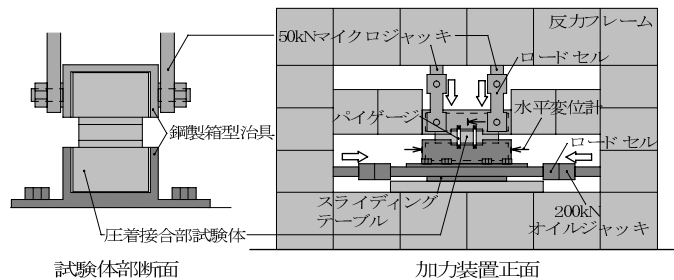


図-5 せん断加力装置の外観

表-4 PCaPC 圧着接合部を模擬したせん断実験結果の一覧

番号	シリーズ	圧着応力 σ (N/mm^2)	試験体名	初期すべり		最大せん断応力		降伏応力棚 τ_s (N/mm^2)	最大目開 変位 ω_{\max} (mm)	最終破壊 パターン
				せん断応力 τ_{is} (N/mm^2)	せん断変位* δ_{is} (mm)	せん断応力 τ_{\max} (N/mm^2)	せん断変位* δ_{\max} (mm)			
1	Fシリーズ	2.0	F20SS8	0.76	0.14	1.15	0.33	1.14	0.69	すべり・圧潰
2		3.5	F35SS8	1.13	0.40	1.50	0.77	1.04	0.86	すべり・圧潰
3		5.4	F54SS8	2.11	0.27	2.54	0.76	2.28	0.36	完全圧潰
4		7.5	F75SS8	2.49	0.61	2.98	0.74	3.04	0.74	完全圧潰
5		5.4	F54SS5	0.29	1.71	0.75	2.73	2.51	0.66	すべり
6		5.4	F54SS3	0.30	1.76	0.56	3.07	2.75	0.69	すべり
7	Lシリーズ	2.0	L20CS8	0.89	0.43	1.32	0.70	0.85	0.97	すべり・圧潰
8		3.5	L35CS8	1.76	0.36	1.79	0.74	1.43	0.56	すべり
9		5.4	L54CS8	2.55	0.34	2.68	0.45	2.20	0.26	すべり・圧潰
10		7.5	L75CS8	2.54	0.42	3.25	0.61	2.26	0.64	すべり・圧潰
11		5.4	L54CS5	0.24	3.22	0.32	3.50	2.67	0.71	すべり・圧潰
12		5.4	L54CS3	0.21	1.70	0.34	3.44	1.98	0.76	すべり・圧潰

*)「せん断変位」は「せん断すべり変位」の略記形

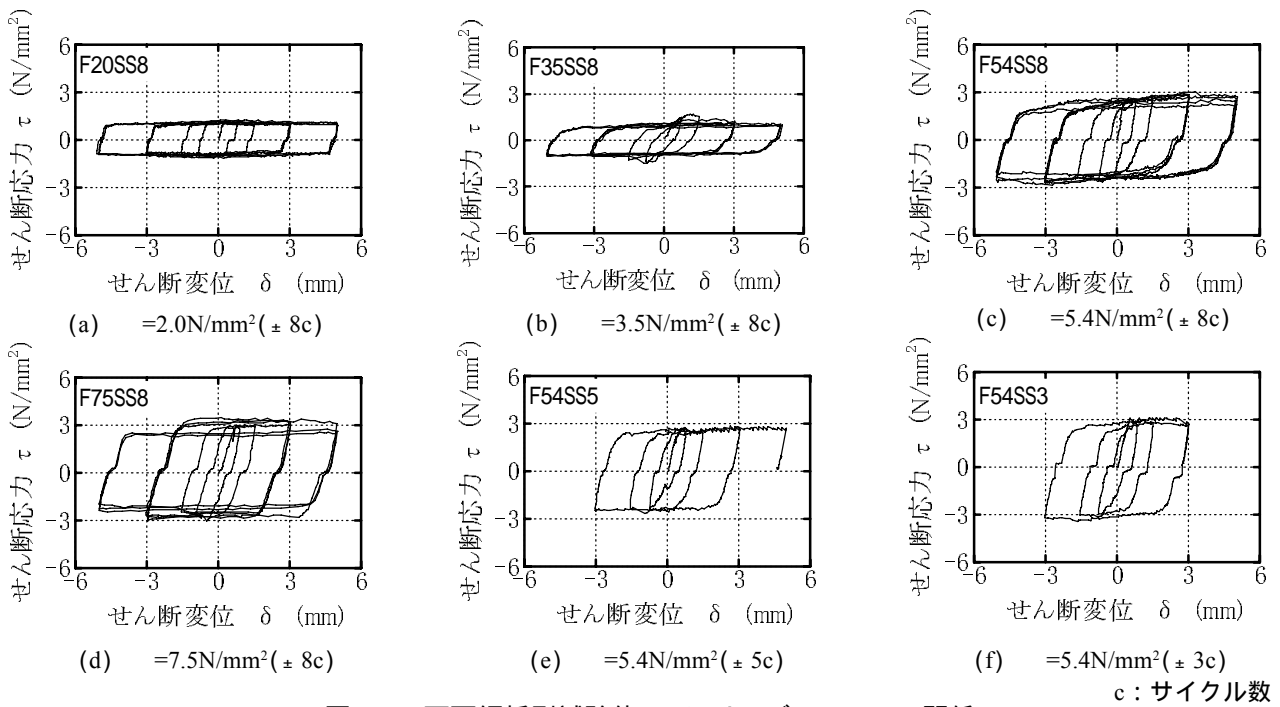


図 - 6 両面鋼板型試験体 (Fシリーズ) の τ - δ 関係

Fシリーズのせん断応力 - せん断変位 関係を、表 - 4 に実験結果一覧を示す。この図 - 6(a) ~ (d) には、圧着応力 を 2.0N/mm^2 , 3.5N/mm^2 , 5.4N/mm^2 , 7.5N/mm^2 と4段階に変動させ、せん断加力を正負交番 ± 8 サイクルとした F20SS8, F35SS8, F54SS8, F75SS8 試験体の結果を示している。また、図 - 6(e) と(f)には、圧着応力 $=5.4\text{N/mm}^2$ 下で ± 3 サイクルの F54SS3 と、 ± 5 サイクルの F54SS5 試験体の結果を掲げている。

全試験体とも、 τ - δ 曲線の外形は矩形型の包絡線を描き、正載荷第1サイクル時に初期すべりが生じて僅かな非線形性を呈しながら殆どの試験体で最大応力 τ_{max} に達し、その直後に 0.1N/mm^2 オーダの応力低下が観察され、続いて「明瞭な降伏応力棚」形状を呈している。

図 - 6(a) ~ (d) と表 - 4 より、圧着応力の上昇に追従して最大せん断応力 τ_{max} は大きくなるが、正負加力漸増時の剛性は、除荷時も含めてほぼ初期剛性に近く、降伏棚の応力値は、せん断変位が逆転する領域において僅かに小さくなる。

さらに図 - 6(e), (f) に繰返し効果を見ると、サイクル数が大きいほど降伏応力棚は安定を見せ、そこにシンプルな摩擦塑性性論に従っている様子が読み取れる。以上のせん断応力 - せん断変位 関係は、

図 - 7 として要約できるようである。

図 - 8 に、F20SS8 試験体の上下コンクリートブロックの目開き をパイゲージによって測定した一例を示す。同じく図 - 8 より、せん断変位が進むにつれ、目開きが大きくなる椀状の変位曲線が見取れ、表 - 4 のとおり、せん断変位 $=5\text{mm}$ で最大目開き ω_{max} は、およそ $0.4 \sim 1.0\text{mm}$ に収まっており、この傾向は他の F シリーズ試験体でも同様であった。

写真 - 1(a) ~ (d) に、載荷終了後の接合部試験体

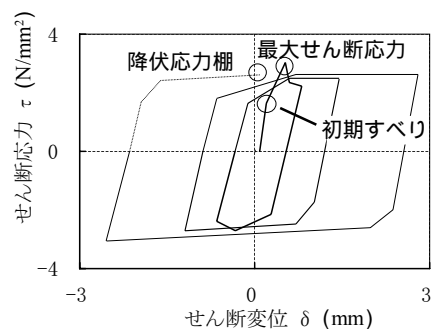


図 - 7 圧着接合部試験体の τ - δ 関係の要約

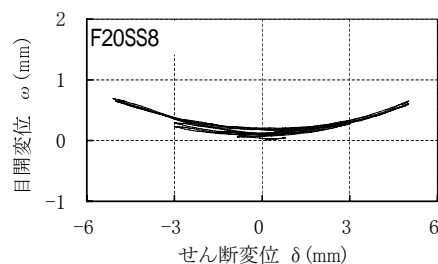


図 - 8 目開き変位 - せん断変位 の関係

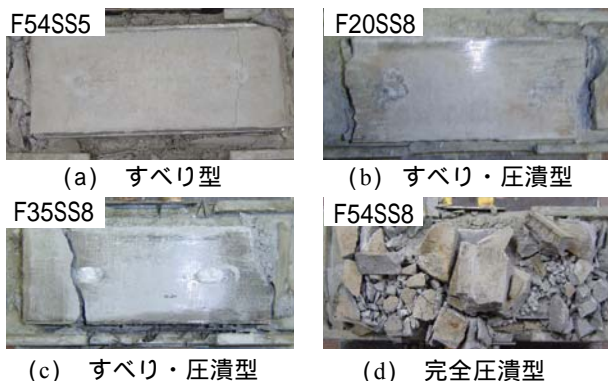


写真 - 1 接合部試験体目地モルタルの破壊状況

モルタル部の最終破壊状況を示す。写真 - 1 より、破壊のパターンは3つに大別される。即ちそれらは、同(a)のモルタルの損傷が無い「すべり型」、(b)と(c)のモルタルの一部が圧潰した「すべり・圧潰型」、そして(d)のモルタルが全壊した「完全圧潰型」である。表 - 4 に各試験体の破壊パターンを記載したが、圧着応力 σ_c が大きいほど、サイクル数の増加によって圧潰に到る傾向が顕著に現れている。

3.2.2 スティールバンドを想定したLシリーズのせん断性状

図 - 9(a) ~ (f) に片面鋼板他面コンクリート型のLシリーズのせん断応力 - せん断変位 関係を示す。なお紙幅の制約から、目開きや破壊状況については、表 - 4 の実験結果一覧の掲載に止める。

このLシリーズ(鋼板1枚)では、先の表 - 1 の試験体一覧に示したとおり、前のFシリーズ(鋼板2枚)

と圧着応力 σ_c や繰返し回数は同一であり、接合形態のみが変更されているだけである。

図 - 9より、Lシリーズのせん断応力 - せん断変位 曲線は、前記のFシリーズのそれと比較して、最大せん断応力から降伏応力棚への落差が僅かに大きく、 $0.5 \sim 1.0 \text{ N/mm}^2$ 程度となった。

更には、図 - 9(a) ~ (d)より、圧着応力 σ_c が大きくなるにつれ降伏応力棚の値も増大し、一方で、図 - 9(e), (f)から繰返し回数の影響は小さいことなど、目開き と破壊状況も含めて、全般にFシリーズの特徴とほぼ一致している。

3.3 圧着接合面の摩擦性状の同定

図 - 10にサイクル数 ± 8 の8体のせん断応力 - 圧着応力 から求めた集約図を掲げる。同図(a)に初期すべりせん断応力 τ_{is} を、同図(b)には最大せん断応力 τ_{max} 、そして同図(c)に降伏応力の値 τ_s と圧着応力との関係をそれぞれ示してある。これら各図には、下式(1)を仮定した最小2乗法から回帰させた直線を併記してある。

$$\tau = \mu \cdot \sigma_c + a \quad (1)$$

μ : 摩擦係数

a : 付着結合力(初期せん断強度 τ_0)

図 - 10より、本実験範囲においては、線形の $\tau - \sigma_c$ 関係が特定され、そこに単純な摩擦論の成立が認められる。図 - 10(a)の初期すべりせん断応力 τ_{is}

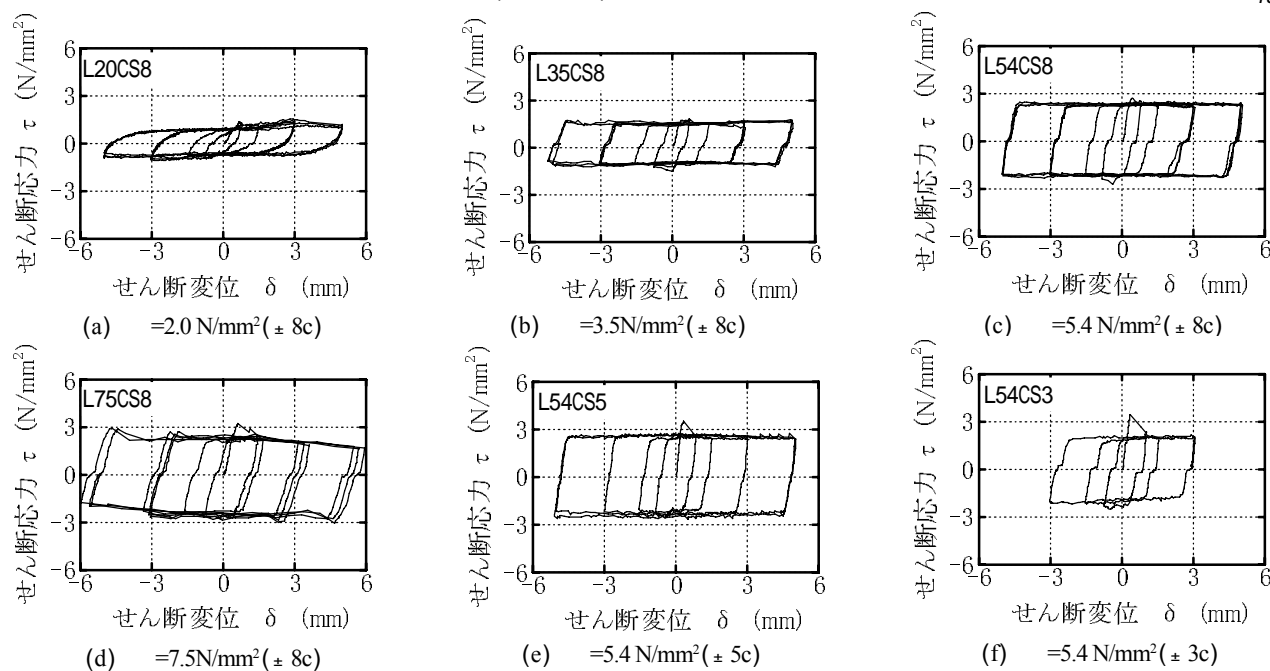


図 - 9 片面鋼板他面コンクリート型試験体(Lシリーズ)の $\tau - \delta$ 関係

c : サイクル数

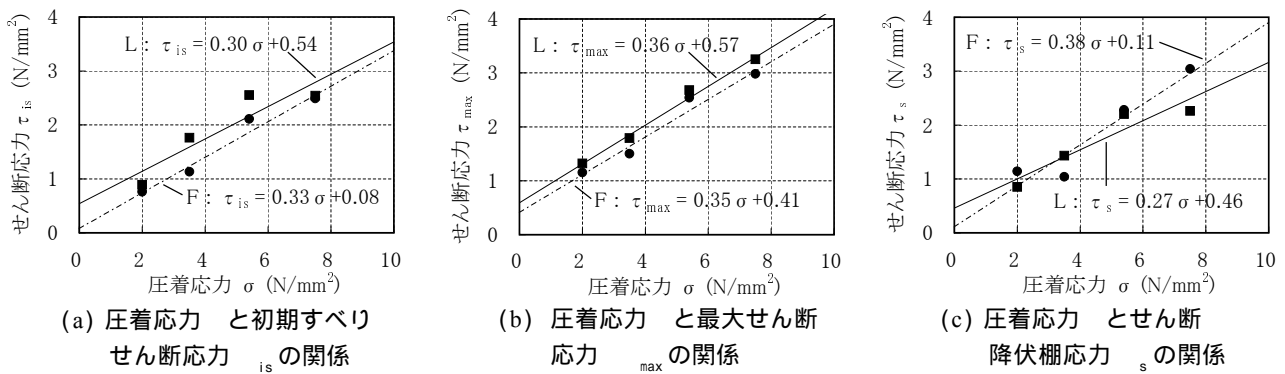


図 - 10 一定圧着応力 下での摩擦性状

と図 - 10(b)の最大せん断応力 τ_{max} によれば、接合形式に拘らず、摩擦係数 μ_{is} と μ_{max} は 0.30 ~ 0.36 の極めて近い範囲の値に収まっている。

図 - 10(c)のせん断時の降伏棚応力 τ_s については、Fシリーズ試験体では摩擦係数 $\mu_s = 0.38$ 、Lシリーズでは $\mu_s = 0.27$ と鋼板の枚数が少ないほど降伏応力棚の摩擦係数が小さくなる傾向にある。これは、最大せん断応力 τ_{max} が大きくなった分、その接合面の損傷の程度も大きくなり、結果として摩擦係数が小さくなったためと思われる。しかしながら、限られた試験体数からの結果であり、今後、更なる実験的検証が必要と思われる。

4. まとめ

本論文では、スチールバンドを有するPCaPC圧着接合構造を想定した「圧着接合部のせん断すべり実験」を行った。本接合部試験体のシリーズは、目地モルタルを挟み込む形態の違いにより1)両面鋼板型接合、2)片面鋼板他面コンクリート型接合の2種の総計12体であり、各試験体に対して、圧着応力の異なる正負繰返しせん断すべり載荷実験を行い、試験体シリーズの違いによる応力 - 変位性状の相違についてそれぞれ検討・考察を加えた。得られた成果を要約すると以下のようである。

- 1) 本実験におけるモルタル部のせん断すべりパターンは、「すべり型」、「すべり・圧潰型」、「完全圧潰型」の3種に分類される。
- 2) 両面鋼板型接合のFシリーズ接合部試験体は、せん断応力 - せん断変位 曲線は矩形の包絡線を描き、最大摩擦係数 μ_{max} は 0.35 と同定された。
- 3) 片面鋼板他面コンクリート型接合のLシリーズ接

合部試験体でも、せん断応力 - せん断変位 曲線は矩形型を描いており、最大摩擦係数 μ_{max} は 0.36 であり、両面鋼板型接合とほぼ同等の値が得られた。

謝辞

本実験の実施にあたり、木畑雅章君、尾関公敏君、菅野竜也君から多大な協力を得ました。また、本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究(B)・課題番号：18360257・代表者：上田正生）の援助を受けました。付記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 田中秀人，岡本晴彦，太田義弘：高鋼材係数の圧着プレストレストコンクリート梁降伏後の柱梁接合部挙動，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.25，No.2，pp.715 ~ 720，2003
- 2) 河野進，三牧祐輔，田中仁史：繰返し荷重を受けるプレストレストコンクリート梁・柱圧着接合部の残存せん断耐力，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.2，pp.1185 ~ 1189，1997
- 3) 山下仁，和田俊良，上田正生：スチールバンドを有するアンボンドPCaPC柱・梁圧着接合を意図した接合面のせん断応力伝達実験，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造，2005年8月
- 4) 中野清司，田邊恵三，松崎育弘，和田章，坂田弘安，久保山寛之，杉山智昭，池澤誠：PC圧着関節工法による損失制御架構の力学的性状に関する研究，日本建築学会構造系論文集，576号，2004年2月
- 5) プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説，日本建築学会，1998