

論文 多数回繰り返し曲げせん断を受けるプレキャスト PC 柱圧着継目の摩擦係数に関する実験的研究

櫻井 琢巳*1・福井 剛*2・浜原 正行*3

要旨：繰り返し曲げモーメントにより正負の曲げひび割れが繋がった後に滑り破壊を生じるように計画した PC 柱圧着接合継目を有する試験体 2 体に対して、各荷重ステップの交番回数をパラメーターとした実験を行った。これらの試験体は計画通りの破壊プロセスを経て滑り破壊を生じた。滑り破壊時の最大耐力およびその時の滑り変位はほぼ等しく、実験結果に交番回数による有意差は見られなかった。また滑り破壊時の摩擦係数はそれぞれ 0.92 と 0.93 であり、既存の曲げせん断載荷による滑り破壊実験の結果のばらつきの中に収まっていた。

キーワード：PCaPC 柱, 圧着工法, 曲げせん断実験, 繰り返し載荷, 滑り耐力, 摩擦係数

1. はじめに

PCaPC 造圧着工法を用いる場合には、通常の曲げ破壊を先行させる部材設計手法に加え、圧着継目の滑り破壊を生じさせないようにする必要がある。PC 規準¹⁾では、PC 圧着継目の滑り破壊に対する設計式として式(1)が掲載されている。なお、図-1は PCaPC 圧着工法概要を示したものであり、本報告では図中赤破線部のモルタルとプレキャスト部材の界面を圧着継目と呼ぶ。

$$Q_{slu} = \mu \cdot (N + P_e) \quad (1)$$

ここに、 Q_{slu} ：圧着継目滑り耐力 μ ：摩擦係数(=0.5)
 N ：軸力 P_e ：有効プレストレス力

式(1)の摩擦係数は、岡本²⁾、小山内³⁾、L.L.Jones⁴⁾等の直接せん断実験の結果に基づき定められている。これらの実験より得られた摩擦係数 μ は大きくばらついており、その下限値は 0.6 程度である。PC 規準では、繰り返し荷重下において摩擦係数が低下する可能性を懸念し、設計に用いる摩擦係数を $\mu=0.5$ と定めている。

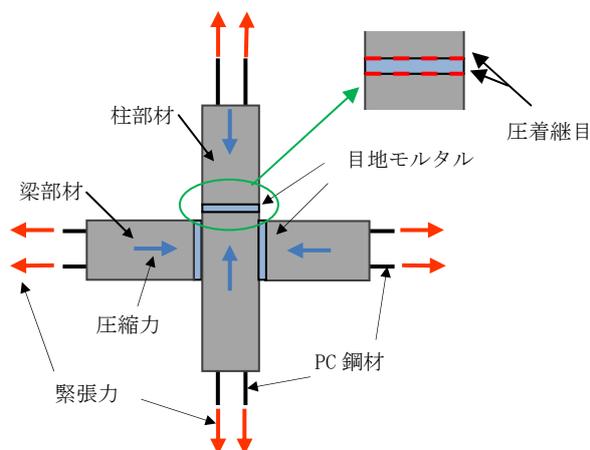


図-1 PCaPC 圧着工法概要

実際の PCaPC 造建物の圧着継目は、図-1のように部材端部に設けられることが一般的であるため、せん断力だけでなく、地震により正負繰り返し曲げモーメントを受ける。したがって、このような圧着継目に滑り破壊が生じるとすれば、圧着継目には曲げひび割れが発生し、正負繰り返しによって、この曲げひび割れが繋がり、モルタルとコンクリート間の付着力が喪失する。この状態を本報告では離間と呼ぶ。実際の PCaPC 造柱は滑り破壊が生じるとすれば、離間を経験した後に滑り破壊が生じる。これより、実際の破壊プロセスと PC 規準の摩擦係数の基となっている実験はこのような破壊プロセスを経ておらず異なっている。

坂田らは PC 圧着型外付フレームによる耐震補強における、外付けフレームのスラブと既存フレームの梁の圧着継目における滑り破壊に関する実験⁵⁾を行っている。実験は片持ち梁形式の曲げせん断正負交番載荷によって行われているが、前述の離間状態を経験していない。

飯田は PCaPC 建物の柱を想定した圧着継目の滑り破壊に関する実験⁶⁾を行っている。実験は逆対称の単調載荷によって行われているため、こちらも離間状態を経験していない。

河野ら⁷⁾はアンボンド PC 梁・柱圧着接合部を対象とした実験で、最初に曲げが卓越する正負交番載荷方式の曲げせん断実験を行い、その後に直接せん断載荷により圧着継目の残存滑り耐力を確認する実験を行っている。前述したように滑り破壊発生時は曲げせん断状態ではない。

上述の 3 つの実験では一般的な圧着継目に起こりうる滑り破壊プロセスを再現したものではない。

*1(株)クロスファクトリー 構造設計部 (正会員)

*2 日本大学 理工学部海洋建築工学科准教授 (正会員)

*3 日本大学 理工学部海洋建築工学科教授 (正会員)

軸方向歪とした。試験体表面ゲージの貼付位置、圧着継目滑り変位測定位置は図-4に示す。回転角は図-5に示すように変位計を設置し、これより得られた変位から、式(5)によって算出した。層間変位については後述する載荷ルールの参考として計測を行った。

$$\theta = \frac{\delta_r - \delta_l}{j} \quad (5)$$

ここに、 δ_r : 観測面右側変位計より得た変位
 δ_l : 観測面左側変位計より得た変位
 j : 両変位計間距離

3.4 加力方法

加力は、写-1の平行加力載荷装置を用いて、上下逆対称の曲げモーメントを与えた。軸力は2000kNジャッキを用いて一定に保持した状態で、水平力を与えた。載荷ルールについては、BS-3は曲げひび割れ強度 Q_{cr} と離間荷重を確認した後に滑り破壊をさせる正負交番漸増載荷を行う。BS-4については、第1ステップのピーク荷重を摩擦係数 $\mu=0.70$ 相当とし、それ以降のステップのピーク荷重は μ を0.05ずつ増加させた荷重とした。各ステップにおいては、第1サイクルのピーク時の層間変位で10回正負交番載荷を行った。

4. 実験結果

4.1 材料試験結果

コンクリート、目地モルタルの材料試験結果を表-2、PC鋼材の材料試験結果を表-3に示す。

表-2 コンクリート・モルタル材料試験結果

	使用部位	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (kN/mm ²)
コンクリート	柱・スタブ	51.17	31.81
モルタル	目地	72.05	29.90

表-3 PC鋼材の材料試験結果

d (mm)	A_p (mm ²)	σ_y (N/mm ²)	σ_b (N/mm ²)	E_p (kN/mm ²)	伸び (%)
φ15	177	1182	1295	200	14

材種:SBPR1080/1230

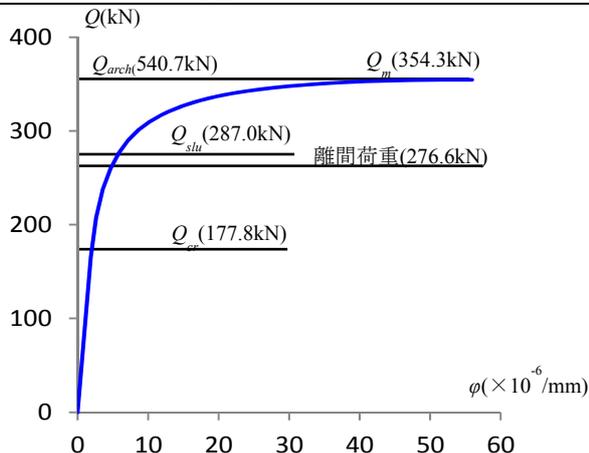


図-3 せん断力と圧着継目の曲率の関係

4.2 破壊経過

図-6はBS-3試験体に行った載荷ルールを示したものである。

BS-3 第1ステップでは、柱頭圧着継目に150kNで曲げひび割れが発生した。ピーク時の引張縁からの曲げひび割れ長さは133mmであった。柱脚圧着継目は195kNで曲げひび割れが発生した。ピーク時の曲げひび割れ長さは16mmであった。第2ステップでは、柱頭圧着継目に-70kNで曲げひび割れが発生し、ピーク時の曲げひび

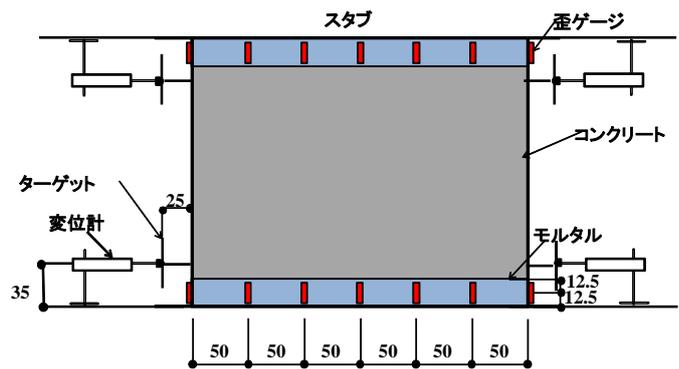


図-4 変位計位置・歪ゲージ貼付位置

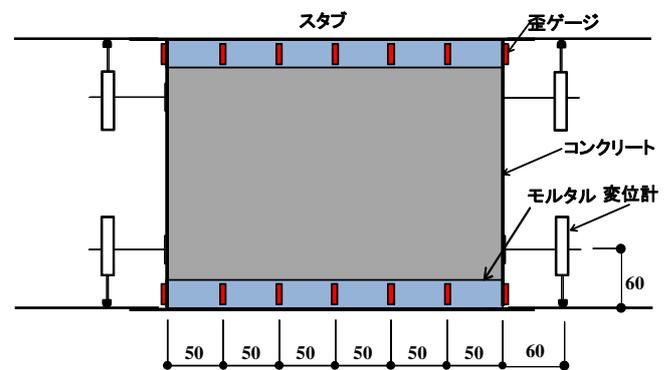
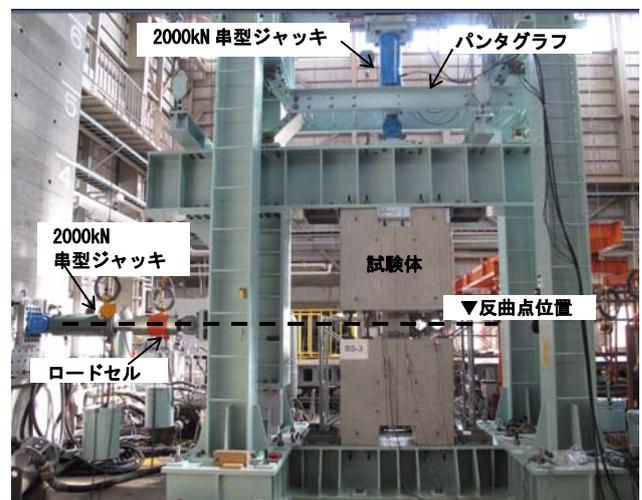


図-5 回転角変位計位置



写-1 試験装置

割れ長さは 140mm であった。柱脚圧着継目は-215kN で曲げひび割れが発生し、ピーク時の曲げひび割れ長さは 5mm であった。第 3 ステップでは、柱脚 265kN、柱頭 269kN で離間を確認した。離間荷重の判定については後述する。同ステップで最大耐力である-322kN を経験した。第 8 ステップの-290kN で柱頭圧着継目で急激な耐力低下が生じた。

BS-4 第 1 ステップ 1 サイクル目の正側で柱頭圧着継目に 230kN で曲げひび割れが発生し、このサイクルピークで曲げひび割れ長さは $D/2$ である 150mm に到達した。後述する離間荷重の判定によっても同時点において離間を確認している。柱脚圧着継目に 236kN で曲げひび割れが発生し、同ステップ 10 サイクル目ピーク時に曲げひび割れ長さは 99mm であった。第 1 ステップ 1 サイクル目の負側では、荷重-200kN で柱頭圧着継目に曲げひび割れが発生し、同ステップ 10 サイクル目で曲げひび割れが 99mm まで伸びた。柱脚圧着継目は、第 1 ステップ 10 サイクル目のピークである-235kN で曲げひび割れが発生した。第 7 ステップ($\mu=1.00$)1 サイクル目の-328kN で最大耐力を経験し、柱頭圧着継目で急激な耐力低下が生じた。

両試験体の最大耐力 Q_u はほぼ同じ値であるが、若干 BS-4 の方が大きく、繰り返し载荷による影響は見られなかった。

上述の、曲げひび割れと滑り破壊はモルタルとスタブ間で生じたものである。

4.3 離間荷重の判定

両試験体共に、目視によって離間は確認したが、荷重については、目地モルタルの歪ゲージより得られた歪分布により確認した。**図-7** は横軸に歪ゲージの貼付位置、縦軸に圧縮歪を正とした軸方向歪のグラフであり、正側載荷時の柱頭・柱脚の圧着継目の歪分布を示すものである。この歪分布において $D/2$ を超えた位置で引張歪が出ている場合または、若干の圧縮歪を示していても、平面保持が著しく乱れた時点を離間と判定した。本実験では**図-7** の分布を示した荷重を離間荷重とした。

図-8 は、縦軸がせん断力、横軸が回転角のグラフである。負側の圧着継目歪については残留歪の影響により、歪分布が大きく乱れ離間荷重の確認が困難であったが、**図-8** から分かるようにいずれの試験体についても荷重一回転角関係はほぼ原点を中心とした点対称であることから圧着継目部の曲率についても、正負の対称性が高いものと判断して、負側の離間荷重は正側の離間荷重と同様とした。離間荷重は、BS-3 の柱頭が 269kN、柱脚が 265kN、BS-4 は柱頭・柱脚共に 230kN であった。

表-4 には両試験体の離間荷重の計算値と歪分布から判定した荷重を記載する。これより、両荷重を比較する

と BS-3 試験体の柱頭で 97%柱脚で 96%となっている。BS-4 試験体は柱頭・柱脚で 83%となっている。

4.4 荷重一層間変位および荷重一滑り変位

図-9 に各試験体の滑り破壊時までの荷重一層間変位

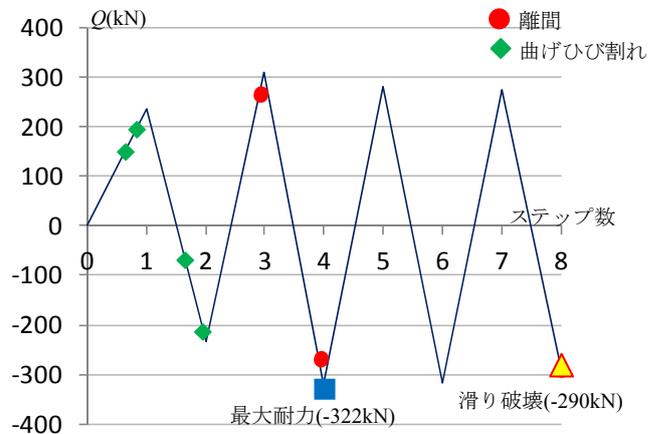


図-6 BS-3 各ステップピーク荷重

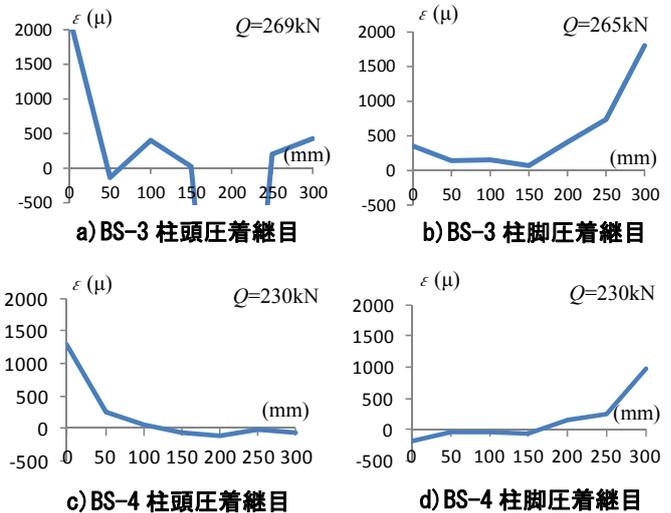


図-7 離間時の圧着継目歪分布

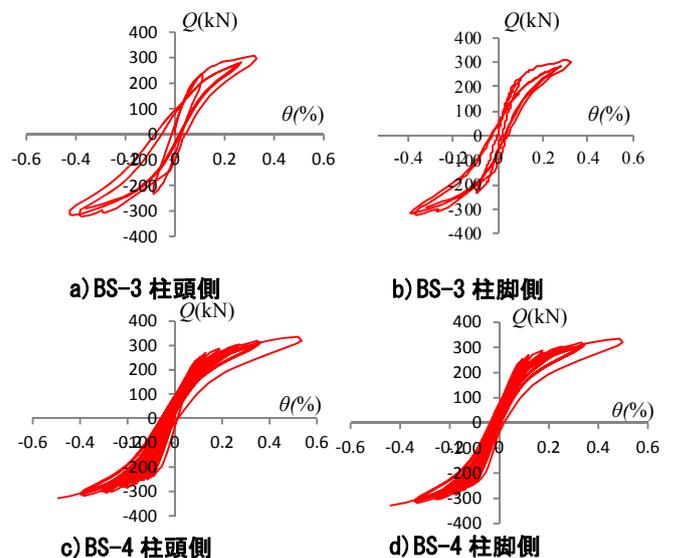


図-8 離間時のせん断力一回転角関係

関係、**図-10** に荷重—滑り変位関係を示す。滑り変位については、変位形を**図-4** に示した通り圧着継目から35mm 浮かせた位置に設置したため、回転成分の変位も含まれている。**表-5** には最大耐力時の荷重、滑り発生時の滑り変位と層間変位、破壊部位を示す。

BS-3 試験体については、**図-10** のBS-3 柱頭滑り変位の-290kN (図中▲) 時点で急激な耐力低下が生じているが、最大耐力はこれ以前のステップで経験しておりその値は-322kN であった。この最大耐力経験直後にわずかではあるが耐力の低下を伴い、滑り変位が増大していたため、これを滑り耐力とした。

BS-4 試験体については滑り破壊を起こすまで耐力の低下を伴った変位の進行は見られなかった。最大耐力-328kN で滑り破壊が生じた。

表-5 より両試験体の最大耐力とその時の滑り変位は、おおむね等しい。わずかだが交番回数が多い BS-4 の方が大きい。これより本実験においては最大耐力に及ぼす繰り返しの影響は見られない。

表-4 離間荷重の計算値と実験値の比較

試験体名	離間部位	計算値 (kN)	実験値 (kN)	実験値/計算値	離間時の回転角 (%)
BS-3	柱頭	276	269	0.97	0.16
	柱脚		265	0.96	0.15
BS-4	柱頭		230	0.83	0.13
	柱脚		230	0.83	0.13

両試験体共に最大耐力を経験後の耐力の急激な低下を生じた以降も変位制御により载荷を続けた。**図-12** は急激な耐力低下以降の荷重—層間変位関係も併せて示したものである。この図より両試験体共にほぼ等しく正負250kN で荷重の低下を繰り返し、この時の摩擦係数は0.70 程度であった。

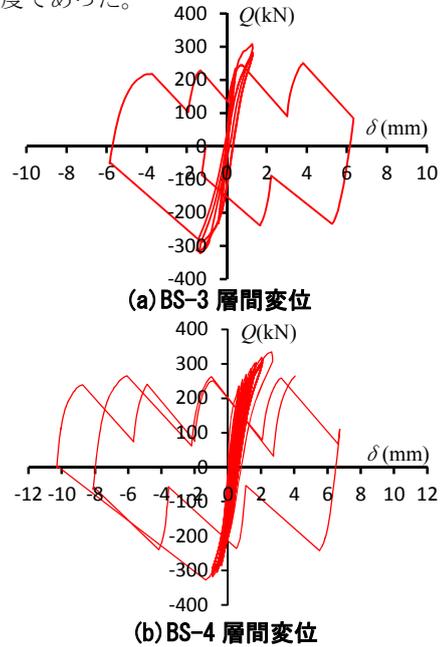


図-11 荷重—層間変位関係

表-5 最大耐力、滑り変位、破壊状況

試験体名	滑り発生時の荷重 (kN)	滑り変位 (mm)	破壊状況
BS-3	322	0.40	柱頭滑り破壊
BS-4	328	0.41	柱頭滑り破壊

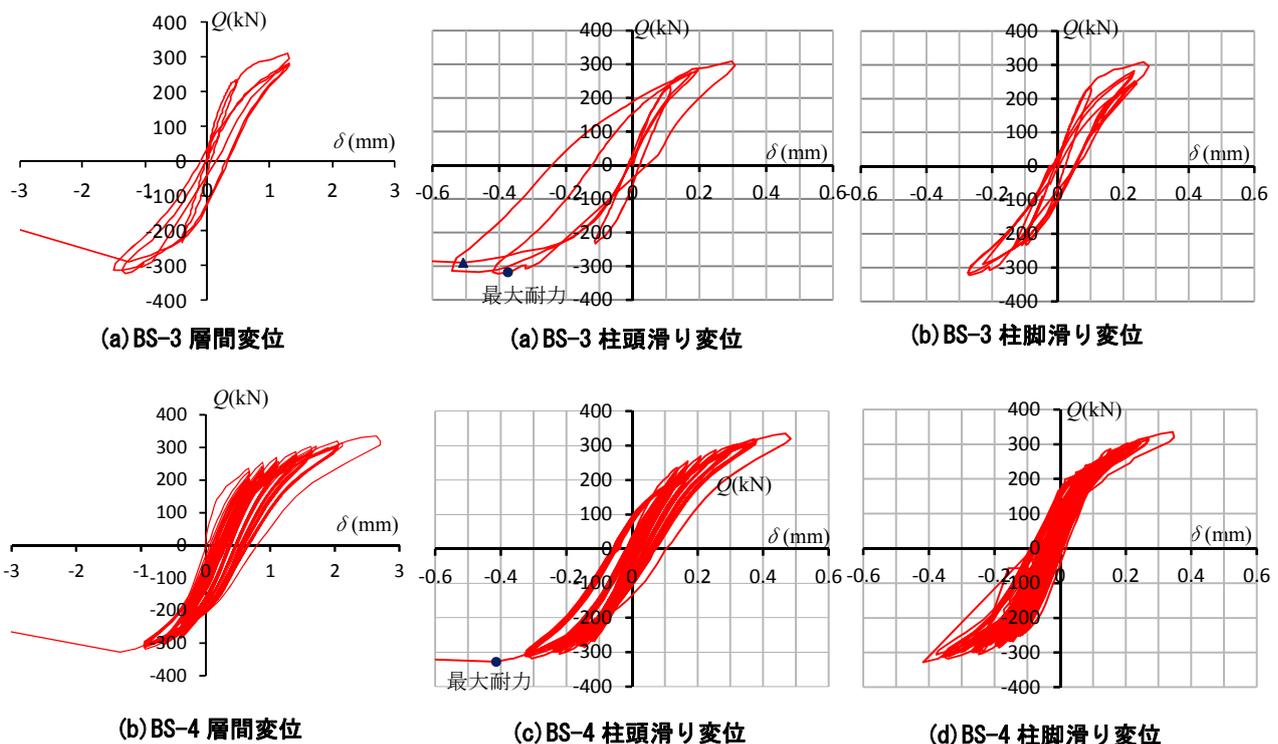


図-9 荷重—層間変位関係

図-10 柱頭・柱脚荷重—滑り変位

4.5 摩擦係数の検討

摩擦係数は、式(5)に示すように最大耐力時のせん断力 Q_u を圧着継目に作用する圧縮力で除した値で評価する。

$$\mu = Q_u / C \quad (5)$$

ここに、 μ ：摩擦係数 Q_u ：最大耐力
 C ：圧着継目に作用する圧縮力

PC 鋼材の張力 P は、PC 鋼材歪 ε にヤング係数 E_p と断面積 A_p を乗じて求めた。また、圧着継目に作用する圧縮力 C は、2 本の PC 鋼材張力の和 ΣP と軸力 N の和で求めた。表-5 は最大耐力時の、PC 鋼材の総引張力 ΣP 、軸力 N 、圧縮力 C を示したものである。

最大耐力時の摩擦係数は、BS-3 で 0.92、BS-4 で 0.93 となり、その平均は 0.93 となった。BS-3、BS-4 の摩擦係数間に有意差は無いことから、繰り返し载荷による影響は見られていない。また、飯田と坂田が行った曲げせん断試験体の実験結果と本実験結果と共に表-6 に示し、計 9 体の平均値をとると 0.88 となった。図-13 は、縦軸に最大耐力時のせん断力を圧縮力で除した値である摩擦係数 μ 、横軸に軸方向応力 $\sigma_g + \sigma_o$ をとり、計 9 体の実験結果をプロットしたものである。このグラフより、これらの曲げせん断実験の結果は、PC 規準の基となっている直接せん断実験の結果と比べるとばらつきの小さい摩擦係数となっている。本実験以外の曲げせん断実験の摩擦係数と多数回の繰り返し载荷を行った BS-4 摩擦係数は、この小さいばらつきの中に収まっている。

5. まとめ

曲げとせん断を受ける PCaPC 柱圧着継目の摩擦係数に及ぼす繰り返し载荷の影響を明らかにするために、圧着継目が離間を経験するように計画した、2 体の交番回数のみ異なる試験体を用いて実験を行った。BS-3、BS-4 の最大耐力、滑り変位に有意差は見られず、摩擦係数についてもほぼ同様の値であった。このことから本実験においては、交番回数の違いが摩擦係数に及ぼす影響は無いと言える。本実験により得られた 2 体の摩擦係数の実験結果は、既存の曲げせん断载荷による圧着継目の滑り破壊実験の結果と同様にばらつきは小さく、その平均は 0.93 となった。また、これを含む全実験データの平均値は 0.88 となった。

表-5 最大耐力時の総プレストレス力と圧縮力

試験体名	総緊張力 ΣP (kN)	軸力 N (kN)	圧縮力 C (kN)
BS-3	260.4	89.2	349.6
BS-4	252.7	99.0	351.7

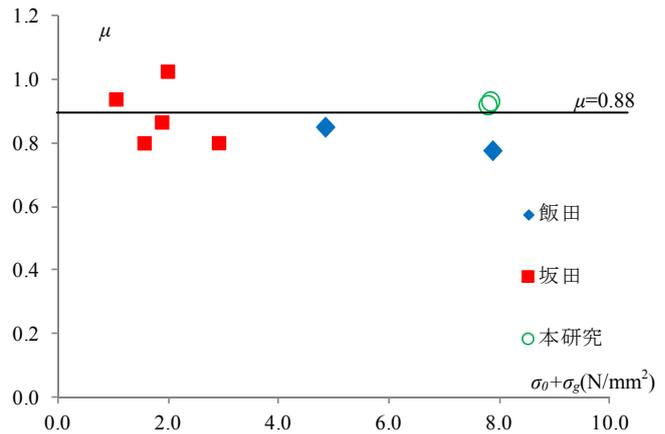


図-12 本研究を含む曲げせん断実験における摩擦係数
 表-6 滑り耐力、圧縮力、軸方向応力、摩擦係数

試験体名	最大耐力 Q_u (kN)	圧縮力 C (kN)	軸方向応力 $\sigma_o + \sigma_g$ (N/mm²)	摩擦係数 μ	文献番号
BS-3	322.0	349.6	7.8	0.92	3)
BS-4	328.0	351.7	7.8	0.93	
BS-1	275.0	353.6	7.9	0.78	
BS-2	184.9	217.1	4.8	0.85	
A9-0.9-05	261.0	278.0	1.0	0.94	2)
A9-1.35-05	334.0	417.0	1.5	0.80	
A13.5-2.0-05	436.0	503.0	1.9	0.87	
A13.5-2.0-03	545.0	531.0	2.0	1.03	
A13.5-2.7-05	626.0	781.0	2.9	0.80	

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説，pp.267-270，1998年11月
- 2) 岡本晴彦ほか：プレキャストコンクリート柱・梁接合部の圧着接合に関する研究—接合面のせん断伝達に関する実験結果，日本建築学会大会学術講演会概要集，C，構造II，pp.1063-1064，1996年9月
- 3) 小山内裕ほか：付帯柱と絶縁したプレキャスト壁の耐震性に関する実験的研究その5，その6，日本建築学会大会学術講演会概要集，構造，pp.903~906，1996年9月
- 4) L.L.Jones：Shear tests on Joint between Precast Post-tensioned Units, Magazine of Concrete Research, VOL.11, No.31, March 1959
- 5) 坂田博史ほか：既存コンクリート造建物に対するPC圧着型外側耐震補強の接合部設計に関する基礎研究，pp.41-89，2012年3月 大阪工業大学博士論文
- 6) 飯田達也ほか：PCaPC柱の圧着継目滑り耐力に関する実験的研究，日本建築学会大会学術概要集，その1，その2，構造IV，pp.845-848，2013年8月
- 7) 河野進ほか：繰り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，Vol1，No.2，pp.1185-1190，1997年6月
- 8) 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人建築研究所監修：2009年度版プレストレストコンクリート造技術基準解説及び設計・計算例 2009年2月