

コンクリート接合面の力学的性状に関する実験的検討

Experimental Study on Mechanical Characteristics of Concrete Joints

R&Dセンター 古澤 護 MAMORU FURUSAWA
 R&Dセンター 田野 健治 KENJI TANO
 R&Dセンター 松永 健太郎 KENTARO MATSUNAGA

主として高層 RC 造建物に適用される PCa 工法のうち、ハーフ PCa 工法では、PCa 部材と現場打ち部の一体性の確保が重要である。両者の一体性の確保には、一般的に目荒らし処理やシヤーキーによる接合が用いられるが、施工性や施工品質の不均一性といった課題も残されている。そこで、これらの代替となりうる種々の処理を施した接合面を有する試験体を用いた 2 面せん断実験および 1 面せん断実験を実施した。接合面に処理を施さずに打継ぎを行った場合に比して、凹凸を有するシート類で処理を行った場合は約 2.9 倍、目荒らし処理を行った場合は約 6.1 倍のせん断強度を有することが分かった。

キーワード：接合面，ずれ，せん断応力度，剛性，摩擦係数

Among the PCa construction methods that are mainly applied to high-rise RC buildings, in the half-PCa construction method, it is important to ensure the integrity of the PCa members and the cast-in-place parts. Generally, to secure the integrity of both members, concrete roughening and shear key connections are used. Nevertheless, there are still problems such as complexity of constructing shear keys and work quality. Therefore, assuming half-PCa members, double shear push out tests and slant shear tests were carried out using concrete block specimens with joints surfaces treated with various alternatives to concrete roughening and shear keys. The results of double shear push out tests confirmed that the shear strength increased by about 2.9 times with the treatment using uneven sheets and about 6.1 times with the treatment using concrete roughening compared with no treatment on the concrete joints surface.

Key Words: Concrete joints, Slip, Shear stress, Stiffness, Static friction coefficient

1. はじめに

高層 RC 造建物で採用されているプレキャスト（以下、PCa）工法はフル PCa 工法とハーフ PCa 工法に大別される。ハーフ PCa 工法の場合には、PCa 部材と現場打ち部との接合面で一体性を確保することが重要である。接合面の一体性の確保にはシヤーキーを用いる場合¹⁾や目荒らし処理が一般的であるが、ハーフ PCa 部材を製作する際に鋼製型枠面にシート類を貼り付けて凹凸を形成することで施工性の向上や表面処理の不均一性の解消を図ることができる。

本報では、接合面に種々の処理を施した試験体のせん断強度の把握を主な目的とした 2 面せん断実験および、摩擦係数の検討を目的とした 1 面せん断実験（図-1 参照）を実施し、その実験結果を考察した。2 面せん断実験の結果については、せん断応力度—鉛直ずれ変位関係を 2 直線でモデル化する方法について検討を行った。

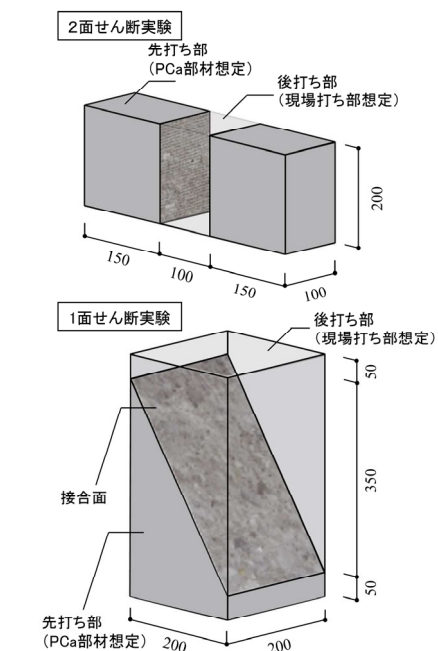


図-1 本研究で対象とする試験体の基本構成

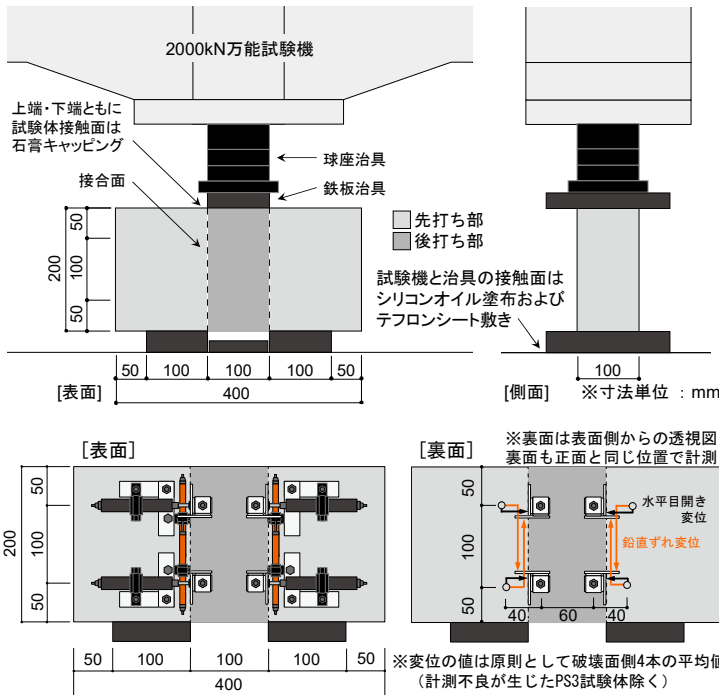


図-2 2面せん断実験の試験体形状と荷重方法

表-1 コンクリートの材料特性

全試験体	コンクリートの材料特性*1	
	先打ち部	後打ち部
f_c [N/mm ²]	49.5	54.6
σ_{sp} [N/mm ²]	3.81	4.03
E_c *2 [N/mm ²]	3.10×10^4	3.05×10^4

f_c : 圧縮強度, σ_{sp} : 割裂引張強度, E_c : 静弾性係数
 *1...実験期間の開始・中間・終了時点の平均値
 *2...1/3 割線線性

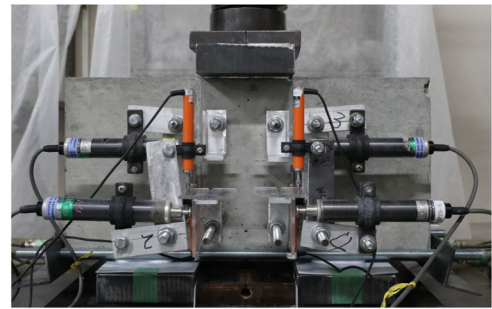


写真-1 2面せん断実験の実施状況

2. 2面せん断実験

(1) 実験概要

a) 試験体

2面せん断実験の試験体形状と荷重方法を図-2に、コンクリートの材料特性を表-1に示す。試験体は接合面を2面有するコンクリートブロックであり、後打ち部の幅と鉄板治具の幅を同一とした。実験変数は接合面の処理方法である。PCa部材製造時の鋼製型枠面を想定し、接合面を無処理としたシリーズ（以下、ST）、約30mm間隔で10mm程度の突起を有するコンクリート打ち継ぎ目処理用樹脂シートにより凹凸を設けたKKシリーズ（以下、KK）、約4mm間隔で2mm程度の突起を有する透水型コンクリート型枠シートにより凹凸を設けたPSシリーズ（以下、PS）、接合面に遅延材を塗布して骨材を洗い出し処理し目荒らしたAGシリーズ（以下、AG）の4種類と、接合面の無い一体打ちシリーズ（以下、NJ）を加えた5シリーズ構成とした。試験体数は各シリーズ5体の合計25体である。

b) 荷重方法および計測方法

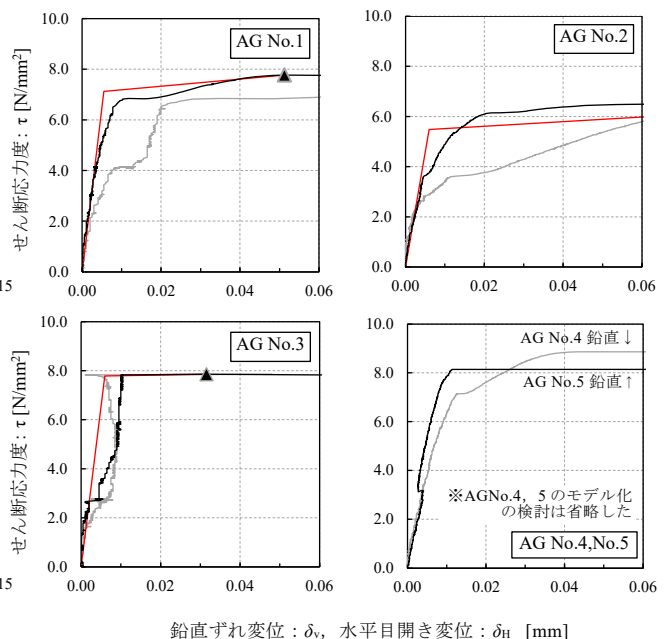
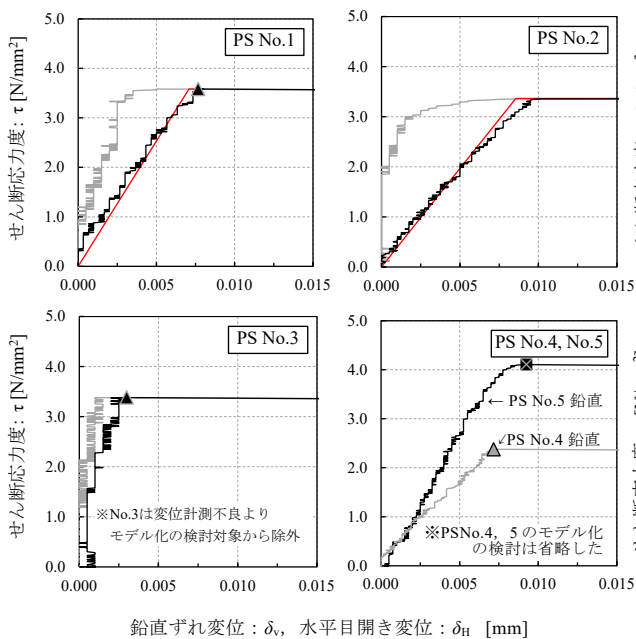
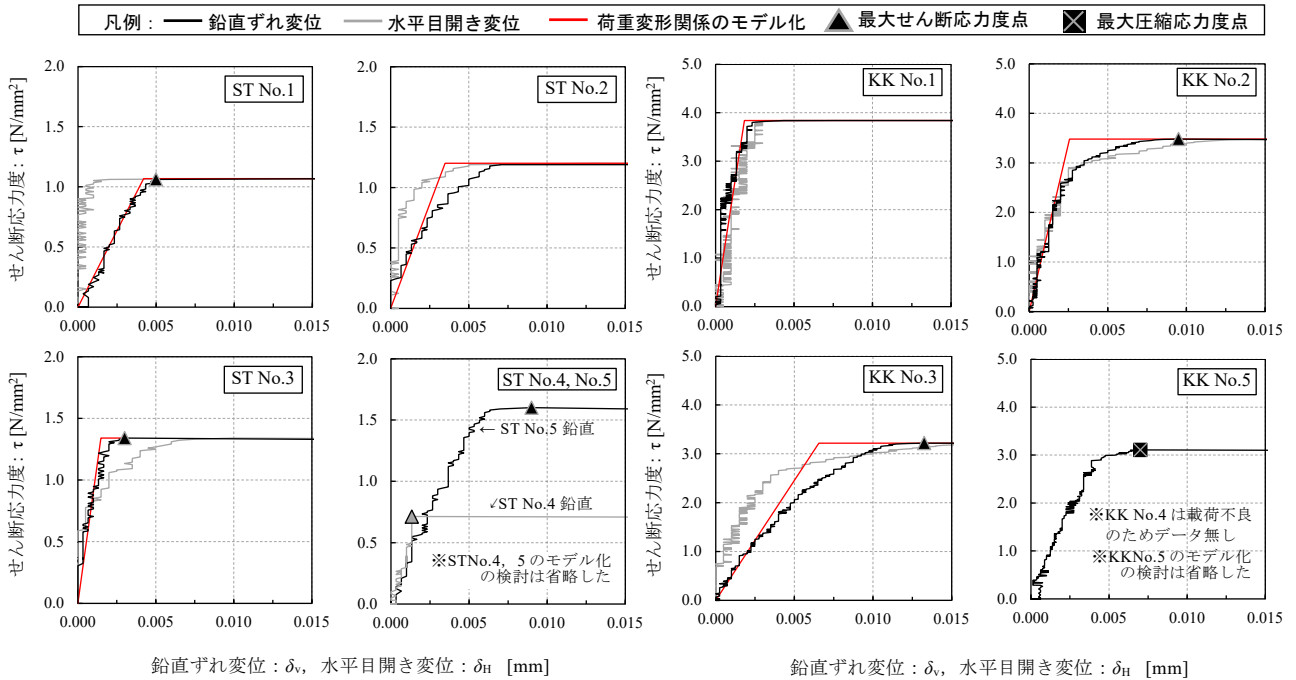
2000kN 万能試験機の台座に試験体の先打ち部のみを支えるように設置し、後打ち部のみを鉛直方向に荷重することで一方押し抜き荷重を行った。万能試験機に取り付けた鉄板治具と後打ち部の幅を一致させた。変位計測については、試験体の左右接合面の上下および表裏に取り付けた変位計により鉛直方向（以下、鉛直ずれ変位）および水平方向（以下、水平目開き変位）の変位を計測

表-2 2面せん断実験の実験結果一覧

試験体 No.	最大せん断応力度			破壊形式*2 (破壊面)
	最大値 τ_{max} [N/mm ²]	平均値 avg. τ_{max} [N/mm ²]	鉛直ずれ変位 δv_{max} [mm]	
ST	1	1.1	No.1-3平均値 1.2	1.7×10^{-2} せん断(右側)
	2	1.2		7.0×10^{-3} せん断(右側)
	3	1.3		2.3×10^{-3} せん断(左側)
*除外	4	0.71	No.1-3平均値 3.5	1.3×10^{-3} せん断(右側)
*除外	5	1.6		9.0×10^{-3} せん断(右側)
KK	1	3.8	No.1-3平均値 3.5	4.3×10^{-3} せん断(右側)
	2	3.5		9.5×10^{-3} せん断(右側)
	3	3.2		1.3×10^{-2} せん断(左側)
*除外	4	荷重不良		
*除外	5	3.1	No.1-3平均値 3.4	7.0×10^{-3} 曲げ(後打部)
PS	1	3.6		7.7×10^{-3} せん断(左側)
	2	3.4	4.9×10^{-2} せん断(左側)	
	3	3.4	3.0×10^{-3} せん断(左側)	
*除外	4	2.4	No.1-3平均値 7.4	7.2×10^{-3} 曲げ(後打部)
*除外	5	4.1		9.3×10^{-3} せん断(左側)
AG	1	7.8	No.1-3平均値 7.4	5.1×10^{-2} せん断(左側)
	2	6.5		1.2×10^{-1} せん断(両側)
	3	7.9		3.2×10^{-2} せん断(左側)
*除外	4	8.9	No.1-3平均値 4.9	4.3×10^{-2} 曲げ(後打部)
*除外	5	8.1		1.1×10^{-2} 曲げ(後打部)
NJ	1	4.7	No.1-3平均値 4.9	*1 7.1×10^{-3} 曲げ(中央)
	2	5.1		1.1×10^{-3} 曲げ(中央)
	3	5.0		3.8×10^{-3} 曲げ(中央)
*除外	4	2.9	No.1-3平均値 4.9	6.9×10^{-3} 曲げ(中央)
*除外	5	5.4		6.5×10^{-3} 曲げ(中央)

*1...NJ試験体は曲げ破壊が先行したため、せん断強度は表中の値以上となる。
 *2...破壊形式に付記した破壊面は表面から見た方向である。NJシリーズについては全試験体曲げ破壊に至ったが、後打ち部を有さないため表記を区分した。

した(図-2および写真-1参照)。



(2) 実験結果

表-2 に実験結果一覧、図-3～図-7 に各シリーズのせん断応力度—鉛直ずれ変位および水平目開き関係、写真-2 に試験体を正面より見た最終破壊状況、写真-3 に破壊面の様子をそれぞれ示す。せん断応力度の算定は荷重を接合面（2 面分）の断面積で除して算出した。なお、図中の赤線は、後述する荷重—鉛直ずれ変位関係を 2 直線で近似したものである。各シリーズ 5 体実験を行い、载荷不良のデータとばらつきを考慮して最大または最小のせん断強度を示した試験体を除外して各種の検討を行

った。以降では各シリーズで検討対象とした試験体について述べる。

破壊形式は 2 種類に分類でき、接合面でせん断破壊した ST, KK, PS, AG シリーズと、試験体下端中央に微細なひび割れが生じて曲げ破壊した NJ シリーズである。ST シリーズを基準とした各試験体の接合面のせん断強度 (No.1～No.3 の平均値) は、KK, PS シリーズは約 2.9 倍、AG 試験体は約 6.1 倍となった。なお、曲げ破壊と判断した NJ 試験体については、せん断破壊よりも曲げ破壊が先行したことから、約 4.1 倍以上のせん断強度

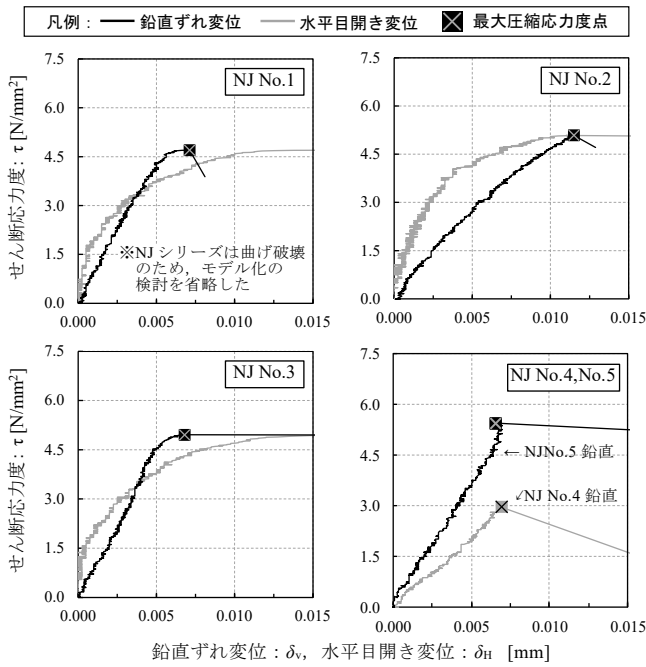


図-7 NJ試験体 セン断応力度-変位関係

を有すると考えられる。

ST シリーズでは、水平目開き変位より鉛直ずれ変位の値が先行して増加していたことから、曲げ変形はほとんど生じていないと判断し、接合面は純せん断に近い状態であったと推測される。さらに、破壊面は平滑な状態を維持したまま接合面に沿って破壊したことから、接合面のコンクリートの付着が失われたことで接合面のせん断破壊に至ったと考えられる。

KK シリーズでは、試験体ごとにばらつきはあるが、概ね水平目開き変位よりも鉛直ずれ変位が先行して増加した。しかし、ST シリーズと比較すると相対的に鉛直ずれ変位が小さい段階から水平目開き変位の増加が記録されていた。これは、ST シリーズのように接合面が平滑もしくは凹凸が浅い場合には接合面は純せん断に近い状態となり水平目開き変位がほとんど生じずに破壊に至る一方、KK シリーズのように凹凸の高さが ST シリーズと比べて相対的に大きい場合には、微小な曲げ変形が生じることで後打ち部がハの字形に変形し水平目開き変位が生じると推測される。破壊形式については、今回の実験においては水平目開き変位が極めて小さかったことおよび接合面に沿って破壊したことに鑑みてせん断破壊と判断した。載荷後の接合面については、打継目シートによる 10mm 程度の突起が破壊面に残存した試験体と残存しない試験体が混在していた。

PS シリーズでは、試験体ごとにばらつきはあるが、ST シリーズと同様に水平目開き変位よりも鉛直ずれ変位が先行して増加した。破壊形式については、KK シリーズと同様に接合面に沿って破壊が進んだことからせん

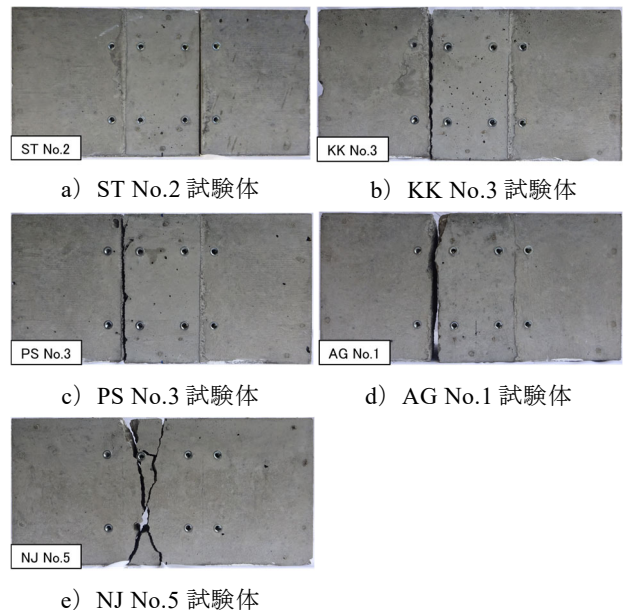


写真-2 2面せん断実験の最終破壊状況

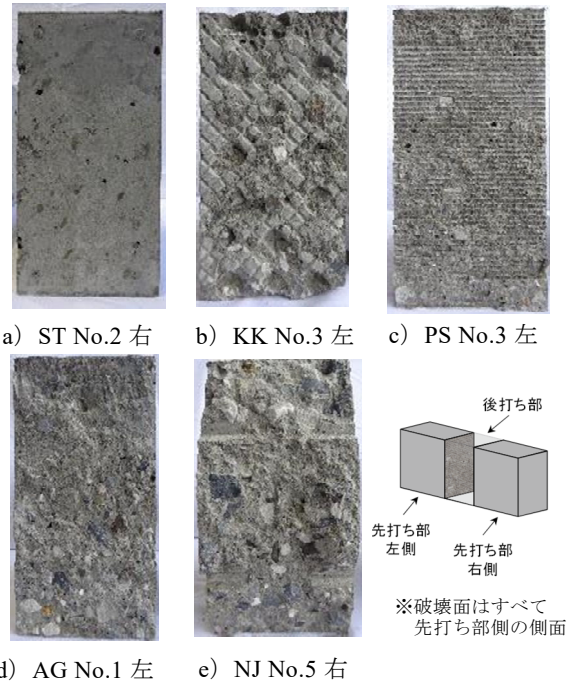


写真-3 2面せん断実験の破壊面の様子

断破壊と判断した。載荷後には、接合面に貼付した型枠面シートに由来する 2mm 程度の凹凸が破壊されて剥落した様子を全試験体で確認した。

AG シリーズについては、せん断応力度-鉛直ずれ変位関係から、 $\tau=2.6\sim 3.9 \text{ N/mm}^2$ 近傍において鉛直ずれ変位が急激に進行した後に再び応力度が増大していることが確認され、他のせん断破壊型の試験体とやや異なる推移を示した。これは接合面で鉛直ずれ変位が生じたものの、目荒らしによって露出した骨材のかみ合いが作用したものと考えられる。しかしながら、骨材のかみ合いによる耐力の上昇は、目荒らし処理による凹凸の高さや

間隔、目荒らし処理がなされる面積によっても変化すると考えられ、これらの要因が及ぼす影響に関する検討については今後の課題である。

NJ シリーズについては、他のシリーズと異なり、接合面を持たないために大きく異なる破壊性状を示した。他のシリーズでは載荷不良となった試験体を除いて接合面に沿ってせん断破壊に至ったが、NJ シリーズでは試験体下端中央に微細なひび割れが生じた。この微細なひび割れは、発生後すぐに拡幅し、試験体の中央部分を貫くようにして上端まで伸長し破壊に至った。

(3) せん断応力度-鉛直ずれ変位関係のモデル化に関する検討

2面せん断実験や後述する1面せん断実験について、接合面の応力状態の検討を含めて解析的に検討を進めるために必要なモデル化を、図-3～図-7に示す各シリーズのせん断応力度-鉛直ずれ変位関係を用いて検討した(図-8、表-3参照)。接合面処理の粗度の程度により骨材のかみ合いの程度が異なると考え、接合面の凹凸が浅く、骨材の露出は見られなかったST, KK, PSシリーズの場合と、相対的に凹凸が深く接合面全面に処理が施されているAG試験体の場合とでモデル化の手法を分けて検討を試みた。前者を鉛直ずれ型(接合面で鉛直方向にずれが生じる場合)、後者を骨材かみ合い型(骨材のかみ合いが生じる場合)と称してモデル化を行った。いずれの場合にも、原点と最大せん断応力度の1/3の点を結ぶ直線(直線①)の傾きをモデル上の初期剛性とした。鉛直ずれ型の場合には直線①と直線②(最大せん断応力度の値)との交点を、骨材かみ合い型の場合には直線①と鉛直ずれ変位 $\delta v = 0.006\text{mm}$ の交点を折れ点として定義し、バイリニアでモデル化を行った。鉛直ずれ変位 $\delta v = 0.006\text{mm}$ の値については、実験値を考慮して定めた値である。直線③は、直線①上に定めた折れ点と最大せん断応力度点を結ぶ直線である。表-3から、剛性は試験体によってばらつきが大きいものの、KKシリーズが最も大きく、STシリーズの約2.9倍であった。構築したモデルを図-3～図-7に併記した。モデルと実験結果はST, KK, PSシリーズでは比較的整合したが、AGシリーズでは整合性に課題が残った。

3. 1面せん断実験

(1) 実験概要

a) 試験体

1面せん断実験に用いた試験体と載荷を図-9、接合面の処理状況を写真-4にそれぞれ示す。材料特性は先述した2面せん断実験の試験体と共通である。試験体は、 $200 \times 200 \times 450$ の直方体とし、天端面および下端面に対

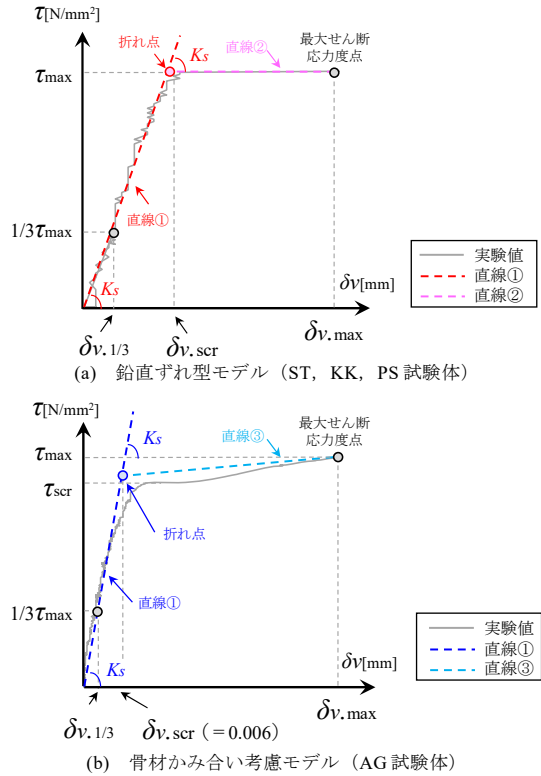


図-8 せん断応力度-鉛直ずれ変位のモデル化

表-3 せん断応力度-鉛直ずれ変位のモデル化の検討

試験体	剛性の算出点			折れ点			
	応力度 1/3 τ_{max} [N/mm ²]	ずれ変位 $\delta v_{1/3}$ [mm]	初期剛性 K_s [N/mm ²]	応力度 τ_{scr} [N/mm ²]	ずれ変位 δv_{scr} [mm]		
S T	1	0.35	1.7×10^{-3}	210	3体平均	1.1	5.0×10^{-3}
	2	0.40	1.0×10^{-3}	410	673	1.2	3.0×10^{-3}
	3	0.47	0.33×10^{-3}	1400	673	1.3	0.94×10^{-3}
K K	1	1.3	0.33×10^{-3}	3900	3体平均	3.8	1.0×10^{-3}
	2	1.2	0.75×10^{-3}	1500	1960	3.5	2.3×10^{-3}
	3	1.1	2.3×10^{-3}	480	1960	3.2	6.8×10^{-3}
P S	1	1.2	2.0×10^{-3}	600	2体平均	3.6	6.0×10^{-3}
	2	1.1	2.8×10^{-3}	410	505	3.4	8.3×10^{-3}
	3	1.1	0.50×10^{-3}	2260	505	3.4	1.5×10^{-3}
A G	1	2.6	2.0×10^{-3}	1300	3体平均	7.8	6.0×10^{-3}
	2	2.4	2.6×10^{-3}	920	1173	5.5	6.0×10^{-3}
	3	2.6	2.0×10^{-3}	1300	1173	7.8	6.0×10^{-3}

*1…PS試験体の剛性に関する検討は、変位計測不良のPS No.3を除外したPS No.1, No.2の実験データにより実施した。

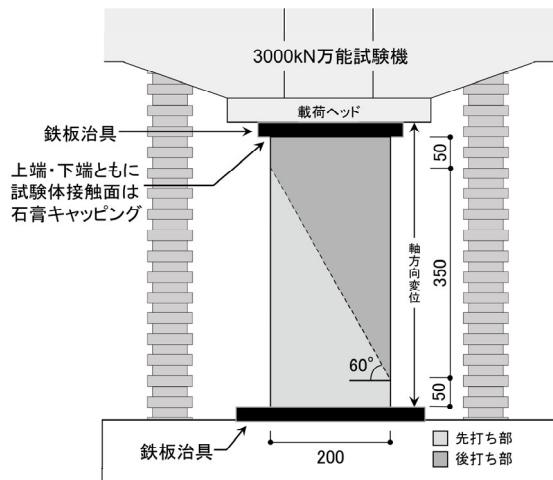


図-9 1面せん断実験の試験体と載荷方法

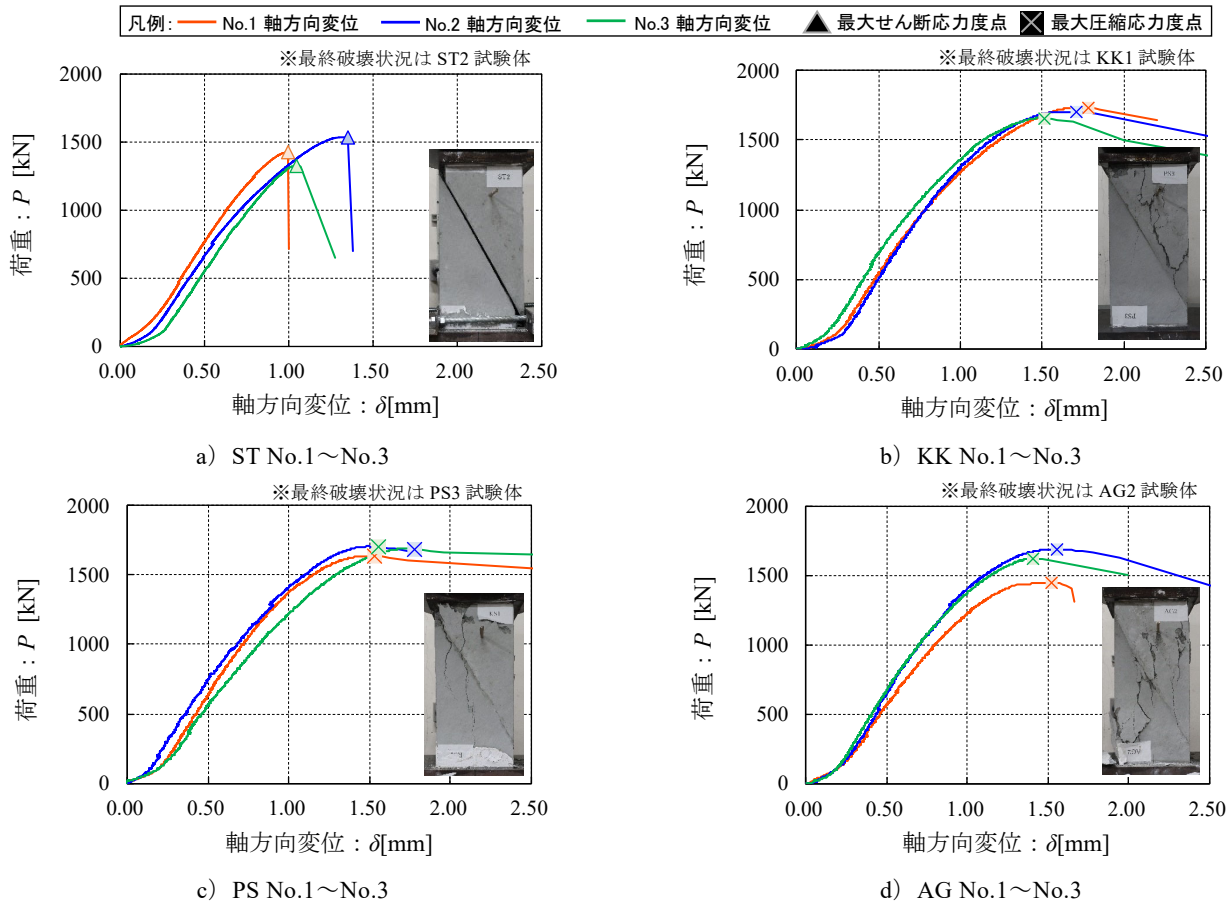


図-10 1面せん断実験 荷重-軸方向変位関係および最終破壊状況

して約 60° 傾斜させた接合面を有するコンクリートブロックである。なお、試験体のサイズは接合面処理の際の施工性、試験体セット時の作業性を考慮して決定した。接合面の傾斜角度については、45° とした松藤・大村らの研究²⁾ および大津らの研究³⁾ において圧縮破壊に至った場合と接合面のせん断破壊に至った場合が混在していたため、これよりも傾斜角度を大きい 60° とした。実験変数は 2 面せん断実験と同様に、PCa 部材製造時の鋼製型枠面を想定した ST シリーズ、コンクリート打ち継ぎ目処理用樹脂シートによる処理を施した KK シリーズ、透水型コンクリート型枠シートによる処理を施した PS シリーズ、遅延材を塗布した後にブラスト処理を施した AG シリーズの 4 シリーズ構成とした。試験体数は各シリーズ 3 体の合計 12 体である。

b) 荷重方法および計測方法

3000kN 万能試験機を用いて一方向単調荷重を行った。試験機の台座および荷重ヘッドに接して設置した鉄板治具と試験体間には、石膏キャッピングを施すことにより荷重の偏りを防止した。軸方向変位は、試験体の下端側の鉄板治具にマグネットスタンドで変位計を固定し、荷重ヘッドに変位計先端を当てることで計測を行った (図-9 参照)。

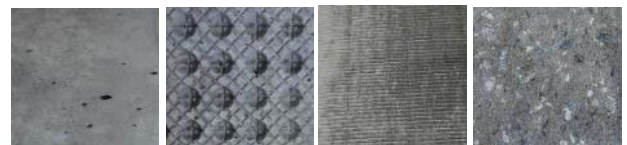


写真-4 接合面の処理状況

表-4 1面せん断実験の実験結果一覧

試験体	最大荷重 P_{max} [kN]	圧縮応力度		破壊形式
		最大値 σ_{Bmax}	平均値 $\sigma_{B,avg}$	
				[N/mm ²]
ST	No.1	1432	35.8	せん断破壊
	No.2	1536	38.4	
	No.3	1326	33.2	
KK	No.1	1732	43.3	圧縮破壊
	No.2	1706	42.7	
	No.3	1660	41.5	
PS	No.1	1637	40.9	圧縮破壊
	No.2	1739	43.5	
	No.3	1690	42.3	
AG	No.1	1446	36.2	圧縮破壊
	No.2	1686	42.2	
	No.3	1620	40.5	

*KK, PS, AG 試験体については、せん断破壊せずに圧縮破壊に至ったため、実際には表中の数値以上のせん断強度を有すると考えられる。

(2) 実験結果

図-10に各シリーズの荷重-軸方向変位関係、表-4に実験結果一覧をそれぞれ示す。STシリーズでは、すべての試験体において最大荷重時に接合面でずれが生じ、急激な耐力低下が生じた。KK、PSおよびAGシリーズでは、PSシリーズの試験体の一部で接合面に沿った微小なひび割れを確認したが、接合面でずれが生じることはなく最終的にすべての試験体で圧縮破壊に至ったことから、接合面のせん断強度は圧縮強度以上であったと考えられる。

なお、圧縮破壊に至ったKK、PSおよびAGシリーズについて、実験で得られた圧縮強度は表-1に示す材料試験結果に比して小さい値を示した。これは、文献4)にも示されるように、供試体寸法や形状の違いによるものであると考えられる。

4. まとめ

ハーフPCa工法の先打ち部と後打ち部の接合面を想定した2面せん断実験および1面せん断実験を実施した。実験変数は両実験ともに接合面の処理方法とした。2面せん断実験より、接合面を無処理とした場合と比較して接合面をシート類による処理とした場合は約2.9倍、目荒らし処理とした場合には約6.1倍の接合面のせん断強度を有することを確認した。1面せん断実験による結果

からも、シート類による処理や目荒らし処理によりせん断強度が増加することが分かった。摩擦係数に関する検討は、試験方法を含めて検討が不十分であり、今後の検討課題である。

謝辞：本実験の遂行にあたり、東京都市大学 大村哲矢准教授に貴重な御助言および御指導をいただきました。特に、1面せん断実験に関する実験計画および実験実施については、大村准教授ならびに大村研究室の皆様のご協力を得ました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 村田義之ほか：流し込み形成による外殻 PCa 柱部材の研究：(その4)押し抜きせん断試験，日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），C-2，構造IV，pp.881-882，1999.7
- 2) 松藤洋明，岩崎恭平，大村哲矢：打ち重ね部を有するコンクリート壁の構造性能に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文集，vol.42，No.2，pp.649-654，2020.7
- 3) 大津美加ほか：コンクリート打継面における摩擦力とせん断力に関する考察 その2 45°打継円柱試験によるせん断力と摩擦力に関する考察，日本建築学会大会学術講演梗概集（九州），材料施工，pp.315-316，2016.8
- 4) 谷川恭雄ほか：構造材料実験法〈第3版〉，森北出版，pp.182-184，2008.3