

# 論文 コンクリートのせん断破壊におよぼす局所化領域の影響に関する実験的研究

石原 誠一郎<sup>\*1</sup>・三橋 博三<sup>\*2</sup>・金子 佳生<sup>\*3</sup>

**要旨**：本研究では、コンクリートのせん断破壊において損傷の局所化領域が、ひび割れ発生からひび割れが伝播する破壊進行域における破壊現象にどのような影響を与えるかを直接せん断試験によって検証した。損傷の局所化の領域幅を変化させることで破壊メカニズムにどのような変化が現れるのか、さらに損傷の局所化領域が打継ぎ面に限定される打継ぎと一体打ちと比較し、そのせん断破壊メカニズムの相違点を明らかにした。

**キーワード**：コンクリート, せん断, 破壊, 局所化, 破壊進行域

## 1. はじめに

コンクリートのせん断破壊メカニズムのうち、ひび割れの入ったコンクリートのせん断伝達挙動については、Paulay<sup>1)</sup>、Walraven<sup>2)</sup>、前川<sup>3)</sup>などの多くの研究があり、そのせん断伝達機構についてもかなり明らかにされている。一方、せん断力を受けたコンクリートにおいて微細ひび割れが発生後、ひび割れ面が完全に形成されるまでの破壊進行域での破壊メカニズムについてはほとんど研究がなされていない。本研究では、コンクリートのせん断破壊において損傷の局所化領域の大きさが、破壊進行域におけるせん断破壊現象にどのような影響を与えるかを検証した。損傷の局所化の領域幅を変化させることで破壊メカニズムにどのような変化が現れるか、さらに損傷の局所化が打継ぎ面に限定される打継ぎと一体打ちとを比較しその破壊メカニズムの相違点を明らかにした。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体

試験はA～Cの3シリーズを行い、試験体は合計37体とした。各シリーズの試験体の概要を図-1に、試験体一覧を表-1に示す。本実験にお

いて変化させたパラメーターは、表-1および図-1に示すように切欠き形状、打継ぎ面処理方法、打継ぎ面の目荒し程度、打継ぎ面の拘束鋼材比である。試験体の打継ぎ面の処理方法は図-3に示すように、打継ぎ面を上向きにした打継ぎ-UPタイプ、打継ぎ面を下向きにした打継ぎ-LWタイプ、そして一体打ちタイプの3種類である。

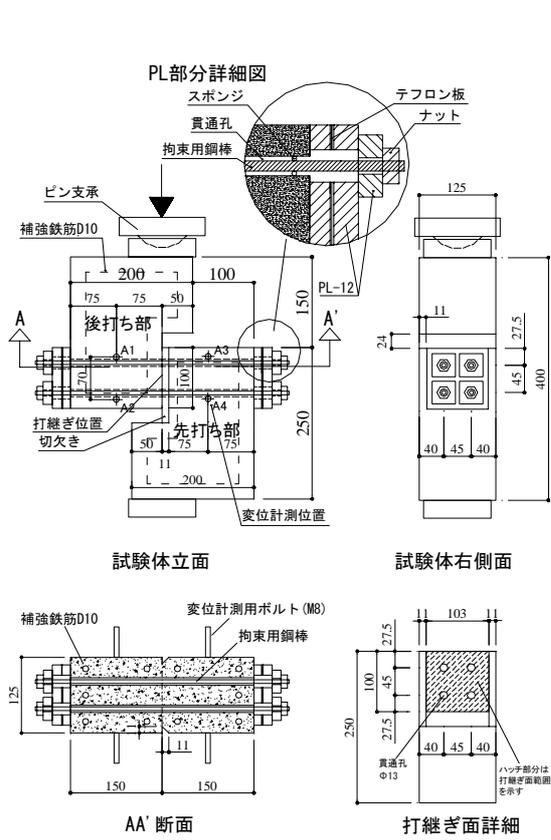
打継ぎ面の目荒しは、Aシリーズではウォータージェットで大、中、小の3段階の粗さで行った。B、Cシリーズでは打継ぎ面に市販の凝結遅延シートをはりつけ、型枠脱型時にその面を洗い出し、深さ2mm程度(Aシリーズの小程度)の目荒しを行った。平滑面タイプは打継ぎ面を塗装合板による仕上げとした。

A、BおよびCシリーズの一部の各試験体には、4本の拘束用鋼棒を貫通孔に通して接合面に直交するように配置した。貫通孔の直径を鋼棒直径より大きくし、鋼棒によるダウエル作用と不必要なせん断抵抗を排除できるようにした。さらに、この鋼棒にひずみゲージを貼付け、鋼棒にかかる応力を計測した。載荷前の鋼棒の拘束は、鋼棒を所定位置に配するためナットを軽く手締めする程度にし、ほとんど拘束力をかけないようにした。使用した拘束鋼棒とその鋼材比

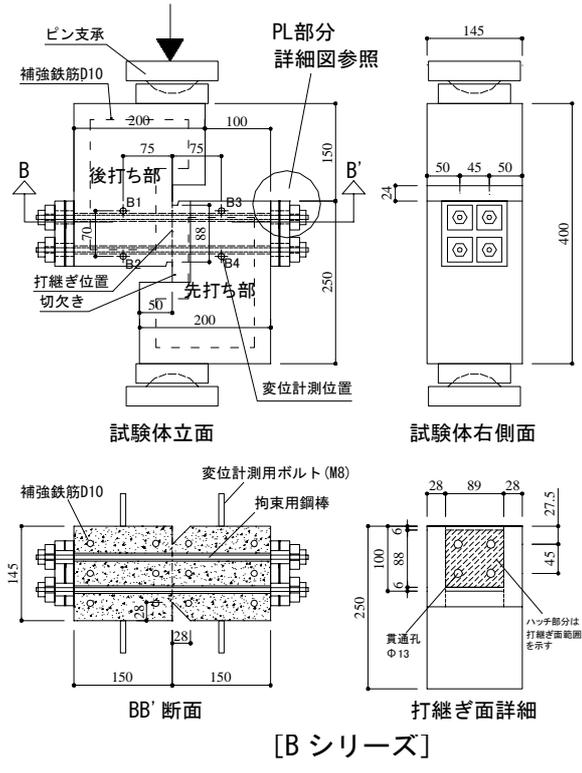
\*1 (株)浅沼組 技術研究所 建築研究グループ 課長 博士(工学) (正会員)

\*2 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻教授 工博 (正会員)

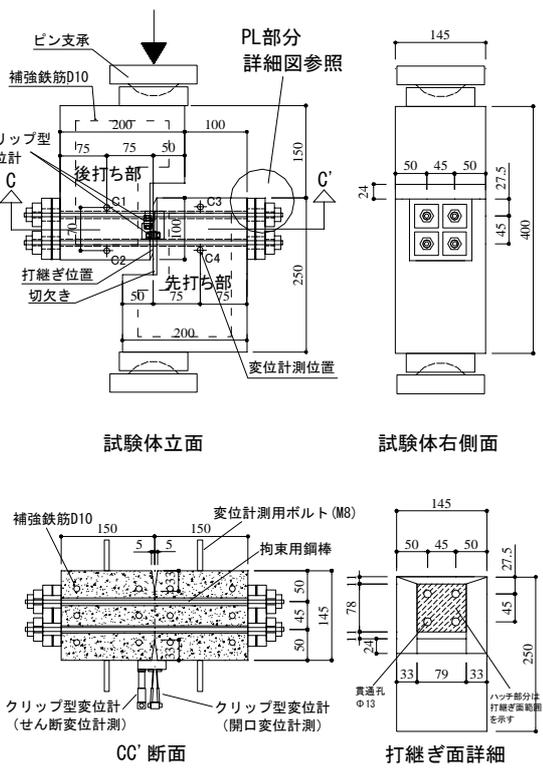
\*3 東北大学大学院 工学研究科都市・建築学専攻助教授 Ph.D. (正会員)



[A シリーズ]  
図-1 試験体形状と計測位置



[B シリーズ]



[C シリーズ]

シリーズ	試験体記号	打継ぎ面処理方法	打継ぎ面目荒し程度	拘束鋼材比 (%)	拘束鋼棒 (本)	使用 CON
A	UJA-1	一体打	—	1.97	φ8mm×4 (ゲージ貼付け部分の鋼棒を削る)	C1 + C2
	UJA-2					
	UJA-3					
	JRAU-S1	打継ぎ面上向き	目荒し粗さ(小)			
	JRAU-S2		目荒し粗さ(中)			
	JRAU-M1		目荒し粗さ(大)			
	JRAU-M2		目荒し粗さ(小)			
	JRAU-M3		目荒し粗さ(中)			
	JRAU-L1		目荒し粗さ(大)			
	JRAL-M1	打継ぎ面下向き	目荒し粗さ(小)			
	JRAL-M2		目荒し粗さ(中)			
	JRAL-M3		目荒し粗さ(大)			
JRAL-L1	目荒し粗さ(小)					
JRAL-L2	目荒し粗さ(中)					
JRAL-L2	目荒し粗さ(大)					
B	UJB-1	一体打	—	2.39	φ8mm×4	C4
	UJB-2					
	UJB-3					
	JPB-1	打継ぎ面下向き	平滑面(塗装合板)			
	JPB-2		目荒し粗さ(小)			
	JPB-3		目荒し粗さ(小)			
	JRB-S1		目荒し粗さ(小)			
	JRB-S2		目荒し粗さ(小)			
C	UJC0-1	一体打	—	0	—	C5
	UJC0-2					
	UJC0-3					
	UJC-1	打継ぎ面下向き	目荒し粗さ(小)	1.33	φ5mm×4	C6
	UJC-2					
	JRC0-S1					
	JRC-S1					
	JRC-S2					

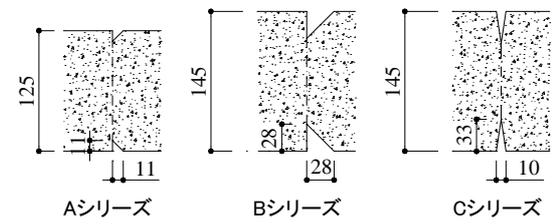


図-2 各シリーズの切欠き形状の比較

(鋼材の断面積/打継ぎ面積)を表-1に示す。A, B シリーズでは、滑り破壊後も鋼材が降伏しない程度の鋼材比を確保した。C シリーズでは鋼材比を A, B の半分程度および零とすることでどのように破壊性状が変わるかを調べた。

試験体には図-1のように、打継ぎ面に切欠きを入れた。A, B シリーズでは市販の目地材を使用し、切欠きを深くする事による破壊性状の変化を調べた。C シリーズではより鋭く深い切欠きとすることで、破壊性状が A, B とどのように異なるかを調べた。一体打ちの試験体も同じ位置で切欠き、接合面積が同じになるようにした。

荷重速度は A シリーズでは最大荷重を過ぎるまで 0.02mm/min, それ以降 0.06mm/min の低速度で荷重した。B シリーズでは、せん断ひび割れを起こすまで 0.005mm/min, ひび割れ発生後 0.06mm/min の速度で荷重した。C シリーズでは 0.005 mm/min で破壊まで荷重した。

試験体の支持条件は、A シリーズでは試験の容易さから上部：球座、下部：固定で行ったが、曲げ等の不必要な影響を出来る限り防ぐ目的から B, C シリーズでは上部, 下部とも球座とした。

試験体の作製は、図-3に示すように、先打ち部、後打ち部および一体打ちのコンクリート打設時に、剥離用テープを巻いた丸鋼を打ち込み、硬化前に丸鋼を引抜き、鋼棒用の貫通孔を作製した。

## 2.2 コンクリートの調合と使用材料

各シリーズの先打ち部、後打ち部および一体打ちに用いた各普通コンクリートの調合を表-2に示す。使用したコンクリートの材料試験結果を表-3に示す。なお、拘束鋼棒には、ネジ切りの機械加工を施すため S45C を使用した。

## 2.3 コンクリート表面粗さの測定方法

打継ぎ部の目荒し程度を数値化する目的で、打継ぎ面をレーザー変位計で 0.1mm 間隔で計測し、JIS B 0601 に準じて中心線平均粗さ Ra で示した。一面につき 5 本線を計測し、平均値を採用した。

## 2.4 試験方法

試験は、コンピュータ計測制御式の荷重装置

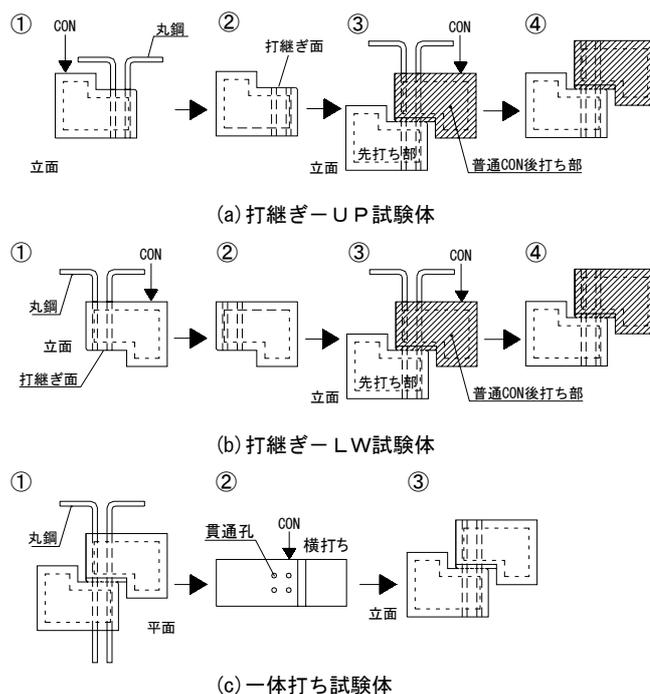


図-3 試験体製作要領

表-2 調合表

CON 種類	骨材 寸法 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
				W	C	G	S
C1, 2	15	60	46.8	189	315	949	808
C3, 4	15	60	50.5	189	315	888	867
C5, 6	15	60	51.1	186	310	876	878

表-3 材料試験結果

CON 種類	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 ( $\times 10^4$ N/mm <sup>2</sup> )
C1	24.2	2.07	2.3
C2	24.2	2.04	2.32
C3	30.1	2.43	2.38
C4	26.5	2.20	2.31
C5	29.7	2.43	2.9
C6	35.5	2.63	2.7

を用いた。データサンプリングは 0.5~1 回/秒とした。各試験体の両側に設けた 4 ヶ所の変位計測位置 (図-1 の A1~4, B1~4, C1~4) のせん断変位, ひび割れ幅の変化を測定した。C シリーズでは図-1 に示す位置にクリップ型変位計を取付けノッチ部のせん断変位, ひび割れ幅を計測し、その計測値を採用した。

## 3. 実験結果

### 3.1 せん断応力とせん断変位の関係

A, B, C シリーズの代表的試験体のせん断応力とせん断変位との関係を図-4に示す。いずれの試験体においても、せん断応力とせん断変位

の関係に図-5のような段階的变化が見られた。段階的变化は大きく4段階に分けられる。まず、ひび割れ発生前の弾性段階、次にひび割れ発生後のひび割れ伝播段階、三番目はすべり破壊を起す遷移段階、最後に安定した骨材かみ合い段階である。Aシリーズにおいて、ひび割れ伝播段階の存在が確認された。ひび割れ伝播段階を詳細に調べる目的で、BとCシリーズではAシリーズ以上に低速度载荷を行った。Bシリーズの目荒して打継いだ試験体 JRB-S2 と一体打ちの UJB-2 ではひび割れ伝播が観察されたが、打継ぎ面が平滑な JPB-2 ではひび割れ伝播が急速で計測できなかった。すべり破壊を起した遷移段階後は、各試験体とも骨材かみ合い段階へと移行した。

Cシリーズでは一体打ち試験体は拘束鋼棒の有無に拘らずA,Bシリーズ同様に段階的变化を示し、弾性挙動後、ひび割れ発生段階とひび割れ伝播段階を経て、すべり破壊を起した。拘束鋼棒を有する試験体は骨材かみ合い段階に遷移し、拘束鋼棒の無い試験体はそのまま応力を低下させ崩壊した。打継ぎ試験体は、拘束鋼棒の有無に拘らず、弾性挙動を示した後、ひび割れ発生段階を経て、ひび割れ伝播段階をせん断変位で0.02mm程度経た後、すべり破壊を起した。拘束鋼棒を配した試験体の拘束鋼材比がA,Bシリーズと比べ小さく、応力が零になった。拘束鋼棒を有する試験体ではその後、試験体の自重により応力が零の状態でも0.2mm程度せん断変位が進んだ後、徐々に応力を上昇させ、骨材かみ合い段階に達した。

### 3.2 せん断応力と表面粗さとの関係

A, Bシリーズのせん断ひび割れ強度  $\tau_{ci} / \sqrt{f_c}$  と  $R_a$  との関係を図-6に示す。 $\tau_{ci} / \sqrt{f_c}$  は打継ぎ面の表面粗さにかかわらずほぼ一定の値を示し、一体打ちと同等の値を示した。また、目荒しにより弱層が取除かれたため、打継ぎ方向の上下による差はほとんど見られなかった。さらに、切欠き形状の異なることによる差異もA, B間では見られなかった。このことから、A, Bシリーズではいずれも切欠きの角度が比較的緩く、ひび割れ損傷

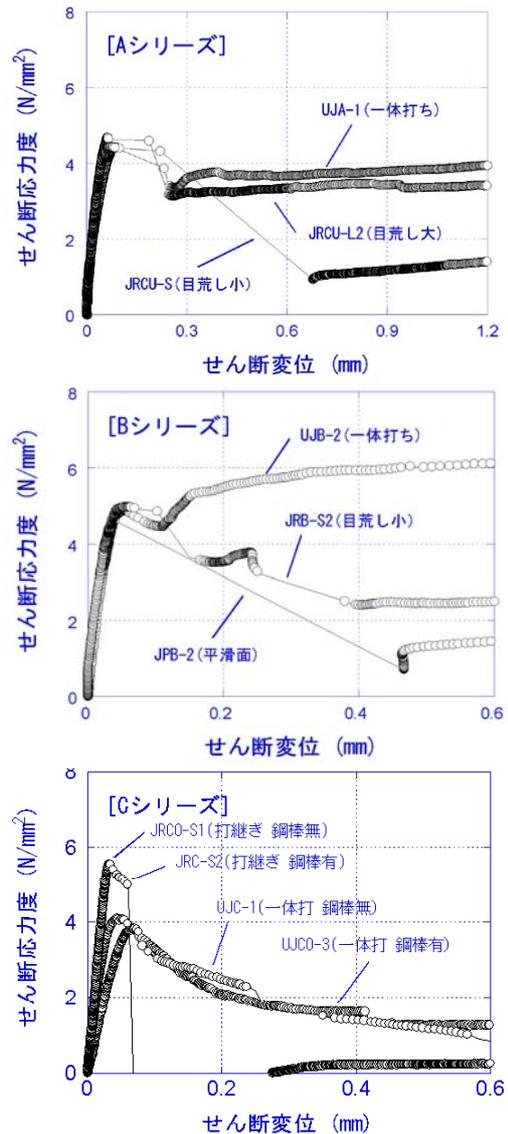


図-4 各シリーズのせん断応力とせん断変位



図-5 せん断伝達の段階説明概念図

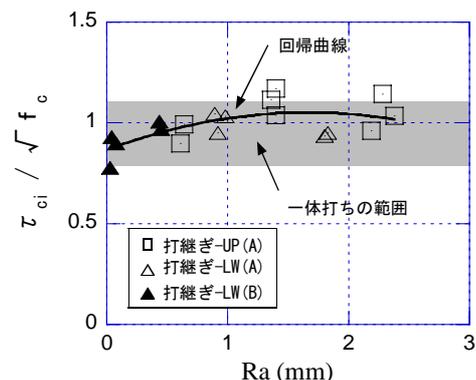


図-6 A, Bシリーズの  $\tau_{ci} / \sqrt{f_c}$  と  $R_a$  の関係

の範囲が切欠き先端のみでなく、切欠きの傾斜部にも広がり、損傷領域がいずれも広く、両シリーズ間に違いが見られなかったものと考えられる。

Cシリーズの試験結果を加えた  $\tau_{ci} / \sqrt{f_c}$  と Ra の関係を図-7に示す。打継ぎ試験体の  $\tau_{ci} / \sqrt{f_c}$  は拘束鋼棒の有無に拘らず1程度で、A、Bシリーズの打継ぎ試験体と同じであった。一方、一体打ちの  $\tau_{ci} / \sqrt{f_c}$  は拘束鋼棒の有無に拘らず0.6程度で、Cシリーズの打継ぎ、A、Bシリーズの一体打ちと打継ぎのいずれの試験体よりも小さかった。

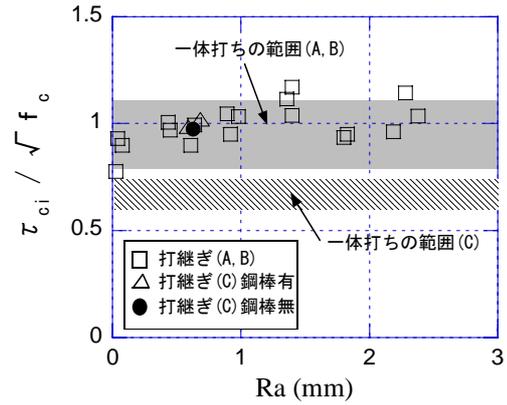


図-7 Cシリーズの  $\tau_{ci} / \sqrt{f_c}$  と Ra の関係

#### 4. 考察

本節ではCシリーズの実験結果をより詳細に検証し、一体打ちよりも打継ぎ試験体のせん断ひび割れ強度が大きくなった原因を考察する。

Cシリーズのせん断ひび割れ強度とせん断変位の関係をプロットしたものを図-8に示す。

Cシリーズの各試験体のせん断変位 0.2mmまでのせん断応力とせん断変位の関係を図-9に示す。一体打ちと打継ぎ試験体の、開口変位と

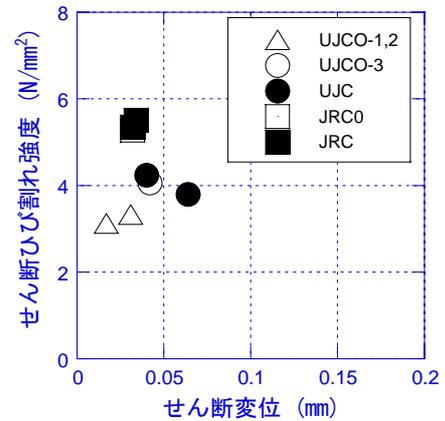


図-8 Cシリーズの  $\tau_{ci}$  とせん断変位関係

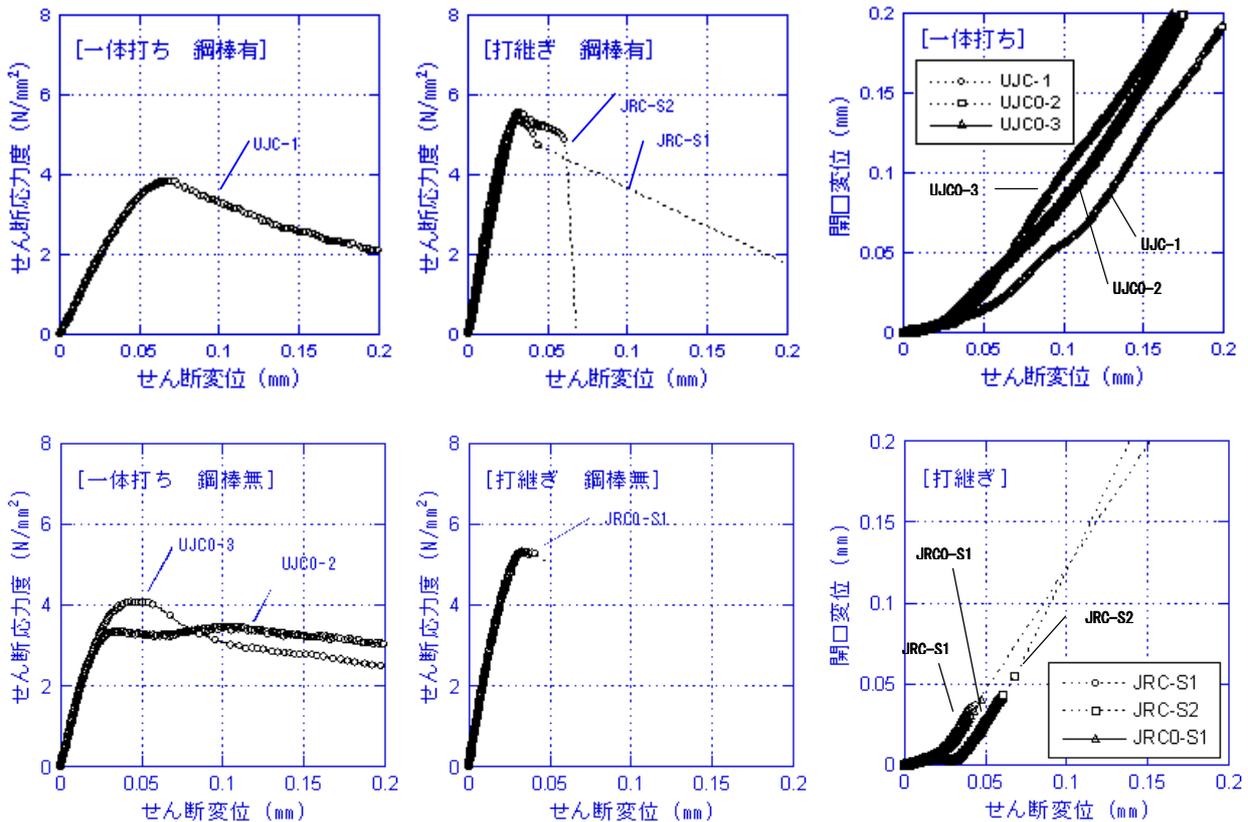


図-9 せん断応力とせん断変位関係

図-10 開口変位とせん断変位関係

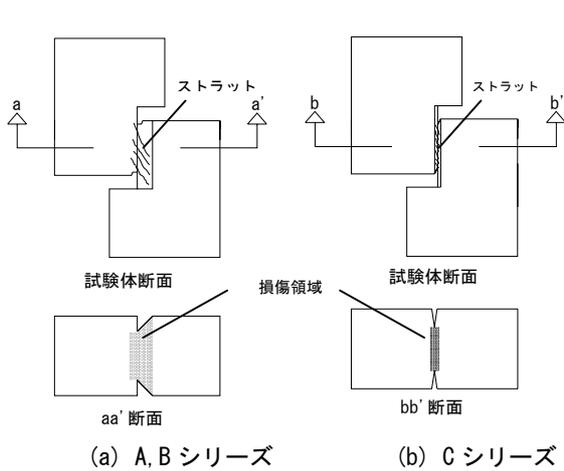


図-11 一体打ちのせん断破壊挙動模式図

せん断変位の関係を図-10 に示す。一体打ちと打継ぎ試験体の開口変位とせん断変位の関係は明確な差が見られなかった。破壊後のひび割れ面を見ると、写真-1 に示すように一体打ち試験体ではストラットの痕跡と考えられる薄い層状のひび割れが幾つも観察された。一方、打継ぎ試験体では、写真-1 に示すように微細なストラットの痕跡と思われる鱗片状のひび割れが見られた。

以上から一体打ちのせん断ひび割れ強度が打継ぎよりも小さくなった原因は次のように考えられる。一体打ちでは文献 4) に示すように、せん断応力が卓越した損傷領域において、微細ひび割れが主応力軸上に発生後、主応力軸が回転し、ひび割れの成長により、損傷領域にマクロなストラットを形成し耐荷するのではないかと考えられる。A,B シリーズでは局所化された損傷領域が比較的広く図-11(a)のようにマクロなストラットが形成され十分な耐荷機構が働くと考えられるが、C シリーズでは鋭い切欠きのため損傷が図-11(b)のように非常に狭い範囲に局所化され薄く脆弱なストラットしか形成されず、十分な耐荷がなされず、打継ぎよりも小さなせん断ひび割れ強度になったと考えられる。

一方、打継ぎ試験体では、元来ひび割れの損傷が打継ぎ部に局所化され、図-12<sup>5)</sup>に示すように打継ぎ界面に微細なストラットが形成され、耐荷されると考えられる。そのため、切欠きに

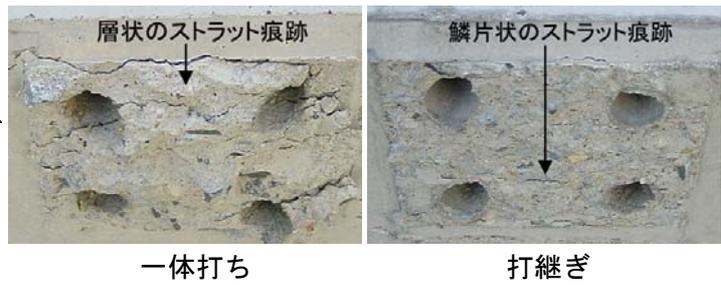


写真-1 試験体の破壊面状況 (C シリーズ)

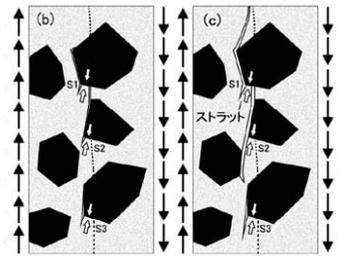


図-12 打継ぎ部でのストラット形成状況

よる損傷領域の局所化が破壊メカニズムに影響を与えないため、A, B, C シリーズとも同じ程度のせん断ひび割れ強度であったと推論される。

## 5. まとめ

本実験から以下の知見が得られた。

- (1) せん断力による損傷が極端に局所化された場合、一体打ちではマクロのストラットが適切に形成されず、打継ぎよりもせん断ひび割れ強度が小さくなる場合がある。
- (2) 打継ぎ試験体では、ひび割れの損傷が打継ぎ部に局所化され、打継ぎ界面に微細なストラットが形成され、切欠きによる損傷領域の局所化が破壊メカニズムに影響を与えないと考えられる。

## 参考文献

- 1) T.Paulay and P.J.Loebner : Shear Transfer By Aggregate Interlock, Special Publication SP42, ACI, 1974, pp.1~15
- 2) Walraven, J.C. and Reinhardt, H.W.: Theory and Experiments on the Mechanical Behaviour of Cracks in Plain and Reinforced Concrete Subjected to Shear Loading, HERON, Vol.26, No.1A, 1981
- 3) 李宝祿, 前川宏一: 接触密度関数に基づくコンクリートひび割れ面の応力伝達構成式, コンクリート工学, JCI, Vol.26, No.1, pp.123-137, 1988.1
- 4) 石原誠一郎, 三橋博三, 金子佳生, 森浩二, 内井栄二: 水平ノッチのあるプレーンコンクリートの一面せん断実験—マイクロメカニクスによる考察—, 日本建築学会構造系論文集, No.570, pp.145-150, 2003.8
- 5) 石原誠一郎, 三橋博三, 金子佳生, 森浩二, 内井栄二: コンクリート打継ぎ部のせん断破壊過程に関する実験的研究—マイクロメカニクスによる考察—, 日本建築学会構造系論文集, No.574, pp.181-187, 2003.12