

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

Experimental Study on Effect of Localized Area in Shear Fracture of Concrete

石原誠一郎* 内井 栄二*²

森 浩二*²

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、一体打ちおよび打継ぎ試験体の直接せん断試験によって検証した。一体打ちの場合では損傷の局所化の領域幅を極度に小さくするとマクロのストラットが適切に形成されず、打継ぎの場合よりもせん断ひび割れ強度が小さくなることがある。また、一体打ち試験体では、せん断破壊が切欠きによる損傷領域の局所化の影響を受けるが、打継ぎ試験体では損傷領域の局所化の影響を受けないことを明らかにした。

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、Paulay¹⁾、Walraven²⁾、前川³⁾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直接せん断試験により検証した。損傷の局所化の領域幅を変化させることでせん断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試験体と打継ぎ面のない一体打ち試験体とを比較し、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32体とした。各シリーズの試験体一覧を表-1に、試験体の概要を図-1に示す。本実験において変化させたパラメータは、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および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-2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

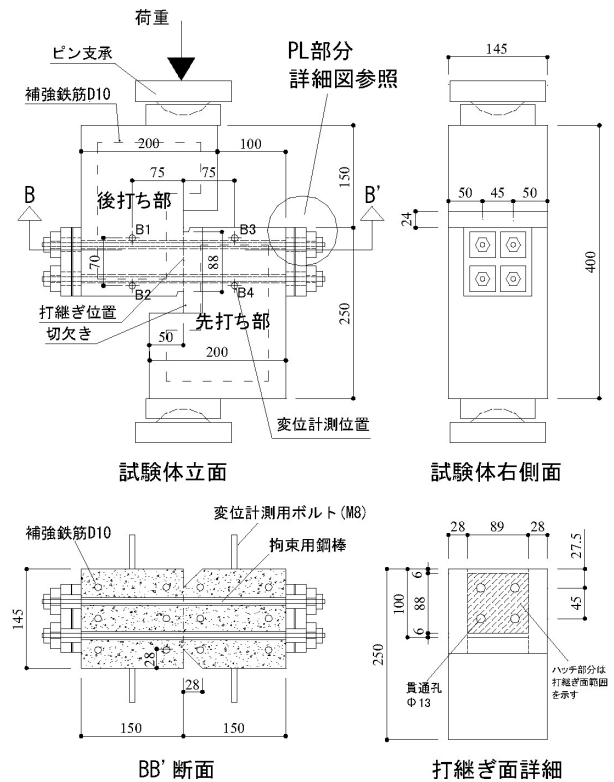
表-1 試験体一覧

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	一体打ち	—	1.97	φ8mm×4 (Aシリーズのみゲージ貼付部分の鋼棒を削る)	C2
	UJA-2					
	UJA-3					
	JRAU-S1	打継ぎ面上向き	目荒し粗さ(小)			C1 + C2
	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)			
	JRAU-L2	打継ぎ面下向き	目荒し粗さ(小)			C3 + C4
	JRAU-L3		目荒し粗さ(中)			
	JRAL-M1		目荒し粗さ(大)			
	JRAL-M2		目荒し粗さ(小)			
	JRAL-M3		目荒し粗さ(中)			
JRAL-L1	目荒し粗さ(大)					
JRAL-L2	目荒し粗さ(小)					
B	UJB-1	一体打ち	—	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)			C3 + C4
	JPB-2		目荒し粗さ(小)			
	JPB-3		目荒し粗さ(中)			
	JRB-S1		目荒し粗さ(大)			
	JRB-S2		目荒し粗さ(小)			
C	UJC0-1	一体打ち	—	0	—	C5
	UJC0-2					
	UJC0-3			1.33	φ5mm×4	C6
	UJC-1					
	UJC-2	打継ぎ面下向き	目荒し粗さ(小)	0	0	C5 + C6
	JRC0-S1					
	JRC-S1			1.33	φ5mm×4	
	JRC-S2					

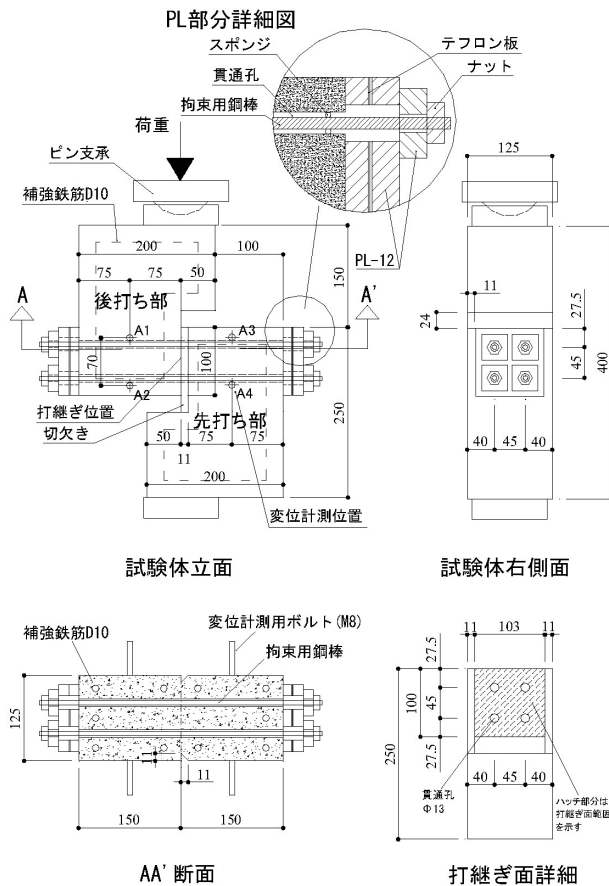
*建築研究グループ *²構造研究グループ

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。

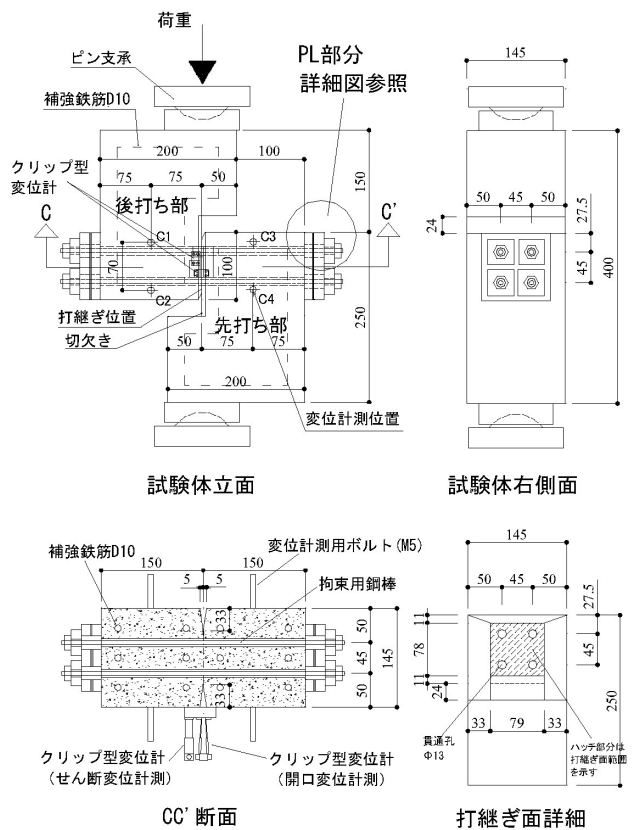
A、BおよびCシリーズの一部分の試験体には、4本の拘束用鋼棒を貫通孔に通して接合面に直交するように配置した。貫通孔の直径を鋼棒直径より大きくし、鋼棒によるダウエル作用と不必要なせん断抵抗を排除できるようにした。さらに、この鋼棒にひずみゲージを貼付け、鋼棒に作用する応力を計測した。載荷前の鋼棒の拘束は、鋼棒を所定位置に配するためナットを軽く手締めする程度にし、ほとんど拘束力をかけないようにした。使用した拘束鋼棒とその鋼材比（鋼材の断面積／打継ぎ面積）を表－1に示す。A、Bシリーズでは、滑り破壊後も鋼材が降伏しない程度の鋼材比を確保した。Cシリーズでは鋼材比をA、Bシリーズの半分程度および零とすることでどのように破壊性状が変わるかを調べた。



[B シリーズ]



[A シリーズ]



[C シリーズ]

図－1 試験体形状と計測位置

試験体には図－１および図－３に示すように、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を入れ、接合面積を同じくした。

試験体の製作は、図－２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

打継ぎ面の表面粗さの程度を数値化する目的で、打継ぎ面を上から下へレーザー変位計で0.1mm間隔に計測し、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ヵ所を計測し、平均値を算出した。

2.4 試験方法

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排除する目的からB、Cシリーズでは上部、下部とも球座とした。

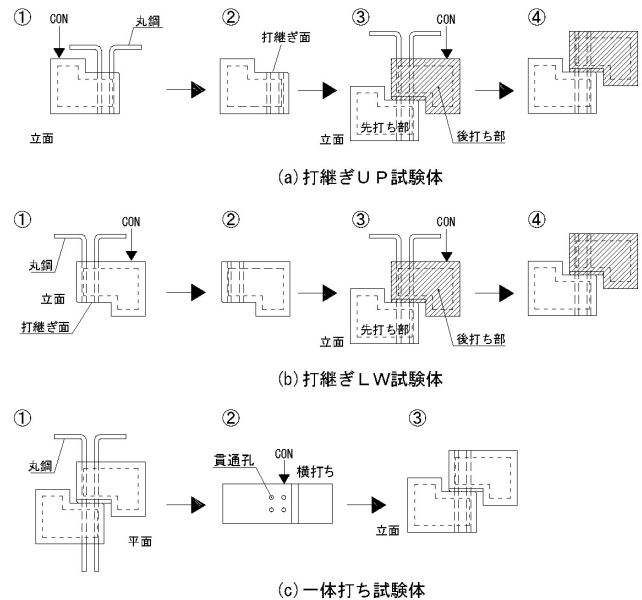
試験は、コンピュータ制御式の載荷装置を用いた。載荷速度は、Aシリーズでは最大荷重を過ぎるまで0.02 mm/minとし、それ以降を0.06mm/minの低速度で載荷した。BとCシリーズでは、ひび割れ伝播段階を詳細に調べる目的で、Aシリーズ以上に低速度載荷を行った。Bシリーズでは、せん断ひび割れを起こすまで0.005mm/min、ひび割れ発生後を0.06mm/minの速度で載荷した。Cシリーズでは0.012mm/minで破壊まで載荷した。データサンプリングは0.5～1回/秒とした。

各試験体の両側の4ヵ所で変位を計測し、(図－１のA1～4、B1～4、C1～4)せん断変位、開口変位の変化を測定した。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、開口変位を計測した。

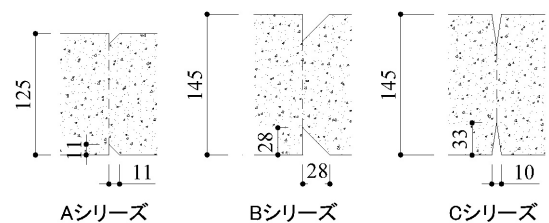
3. 実験結果

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に示すような段階的变化が見られた。



図－２ 試験体製作要領



図－３ 各シリーズの切欠き形状の比較

表－２ 調合表

CON 種類	骨材 寸法 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)			
				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/mm²)	割裂引張強度 (N/mm²)	静弾性係数 ($\times 10^4$ N/mm²)
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

この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こす遷移段階、最後に安定した骨材かみ合い段階である。

Aシリーズの実験において、ひび割れ伝播段階の存在が確認された。

Aシリーズ以上に低速度載荷したBシリーズでは、目荒しを行って打継いだ試験体JRB-S2と一体打ちのUJB-2で、明確な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。

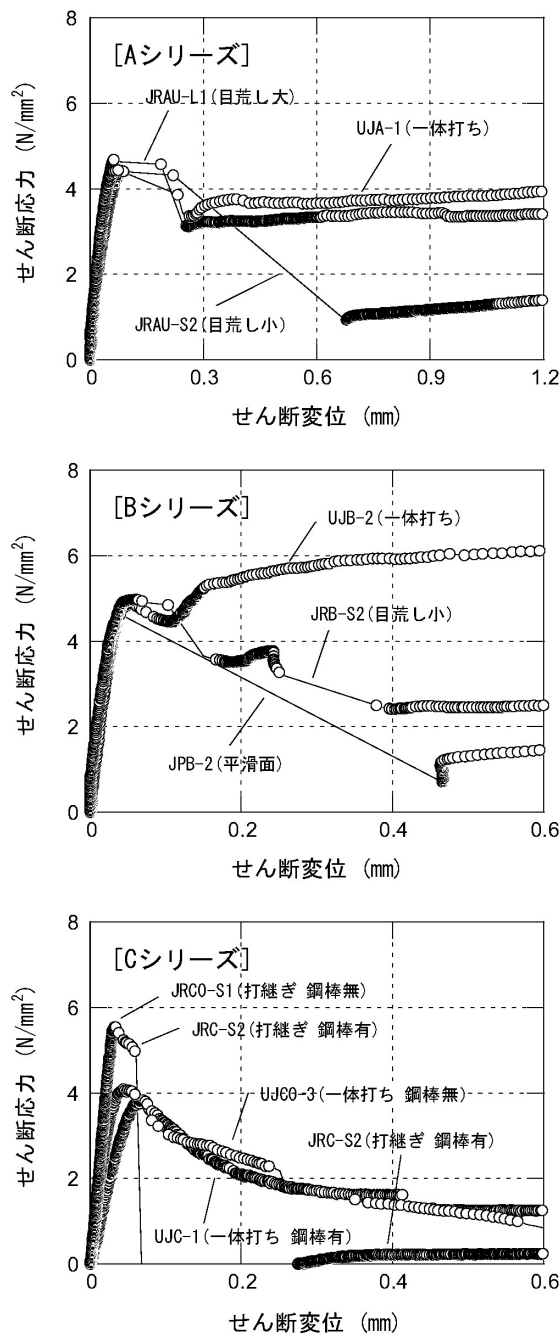


図-4 各シリーズのせん断応力とせん断変位

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シリーズにおいて、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、ひび割れが発生し、ひび割れ伝播段階を経て、すべり破壊を起した。その後、拘束鋼棒を有する試験体は骨材かみ合い段階に移移し、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いため、せん断応力が零になった。拘束鋼棒を有する試験体では、その後、せん断応力が零の状態では0.2mm程度せん断変位が進んだ後、徐々にせん断応力を上昇させ、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 $\tau_{ci}/\sqrt{f_c}$ と表面粗さRa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、目荒しによりぜい弱層が取除かれたため、打継ぎ面の上下による差は、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シリーズ間では見られなかった。この事から

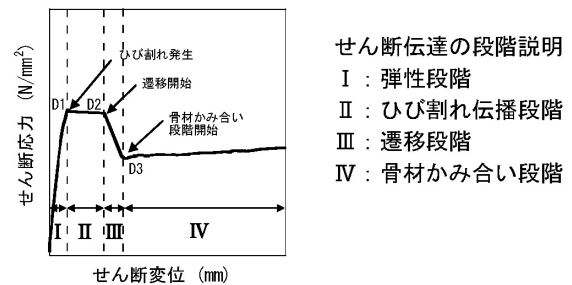


図-5 せん断伝達の段階説明概念図

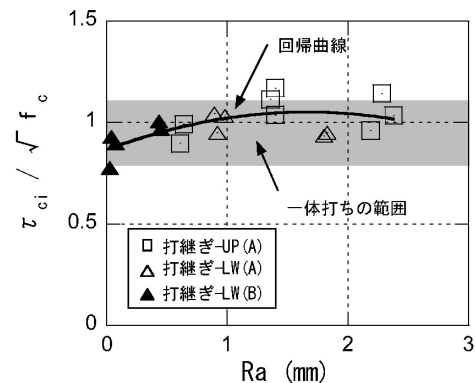


図-6 A、Bシリーズの $\tau_{ci}/\sqrt{f_c}$ とRaの関係

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なったために、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 $\tau_{ci}/\sqrt{f_c}$ と表面粗さ Ra の関係を、図-7 に示す。Cシリーズの打継ぎ試験体の $\tau_{ci}/\sqrt{f_c}$ 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、Cシリーズの一体打ちの $\tau_{ci}/\sqrt{f_c}$ 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。

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、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。Cシリーズの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を図-10 に示す。

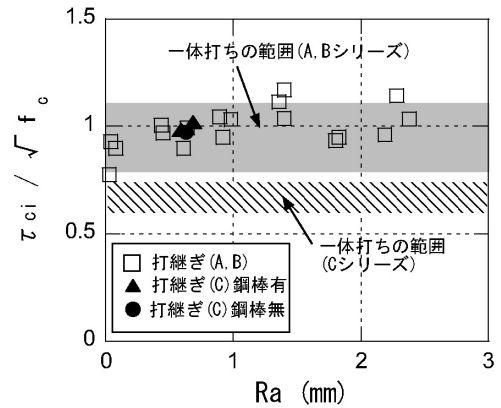


図-7 Cシリーズの $\tau_{ci}/\sqrt{f_c}$ と Ra の関係

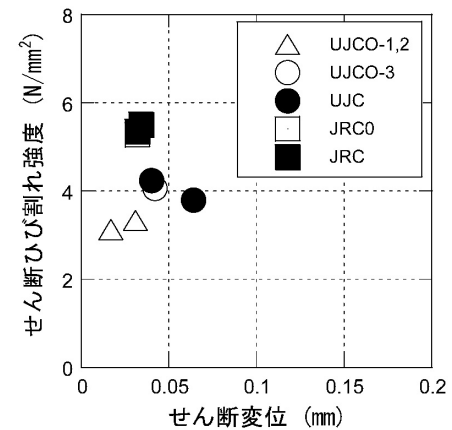


図-8 Cシリーズの τ_{ci} とせん断変位関係

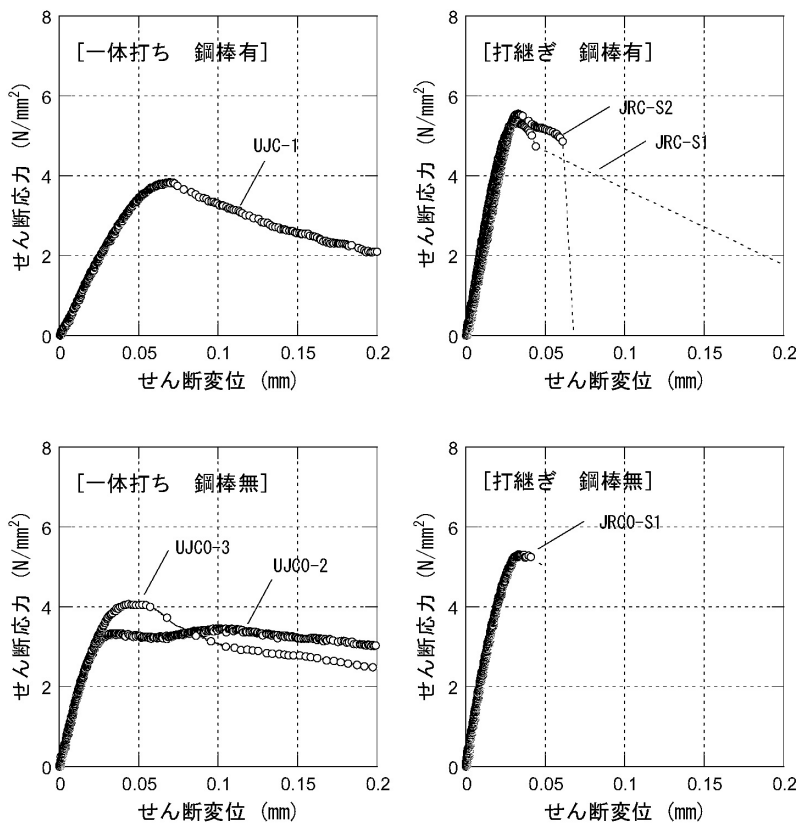


図-9 せん断応力とせん断変位関係

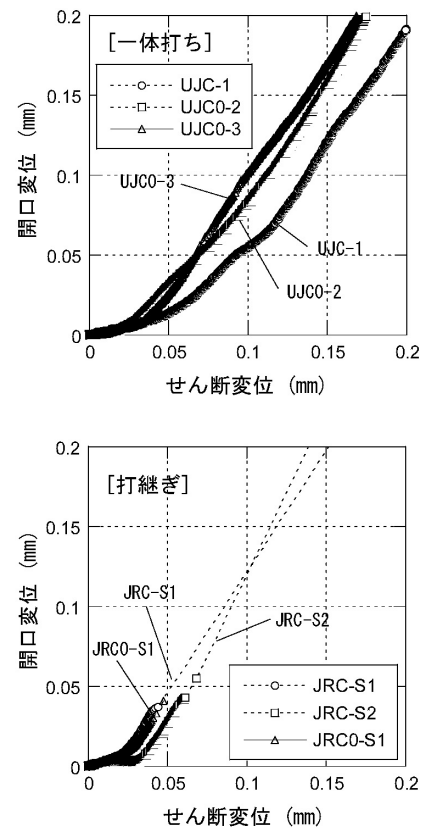


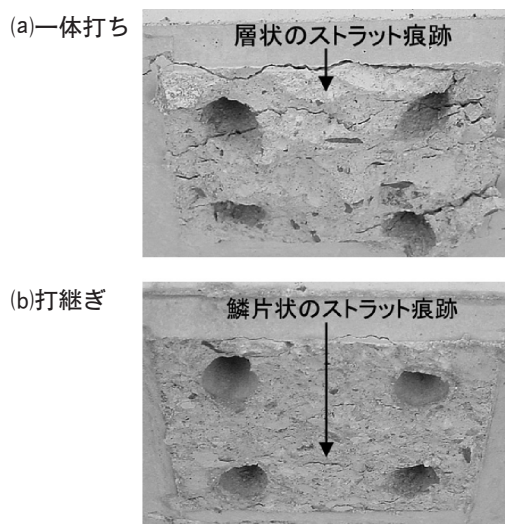
図-10 開口変位とせん断変位関係

せん断変位0.05mm程度までは、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には明確な差が見られなかった。しかしながら、Cシリーズ破壊後のひび割れ面を見ると、写真－1(a)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(b)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。

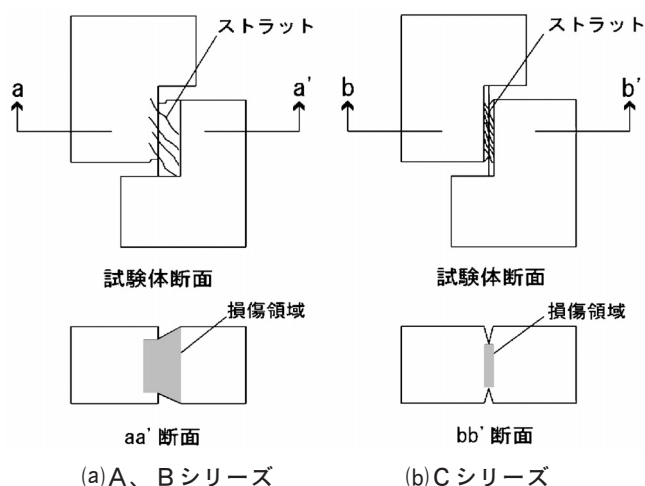
以上から、一体打ちでは文献⁴⁾に示すように、せん断応力が卓越した損傷領域において、微細ひび割れが主応力軸上に発生した後、主応力軸が回転し、ひび割れの成長により、損傷領域にマクロなストラットを形成し耐荷するのではないかと考えられる。A、Bシリーズでは局所化された損傷領域が比較的広く図－11(a)のようにマク

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ないで、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。

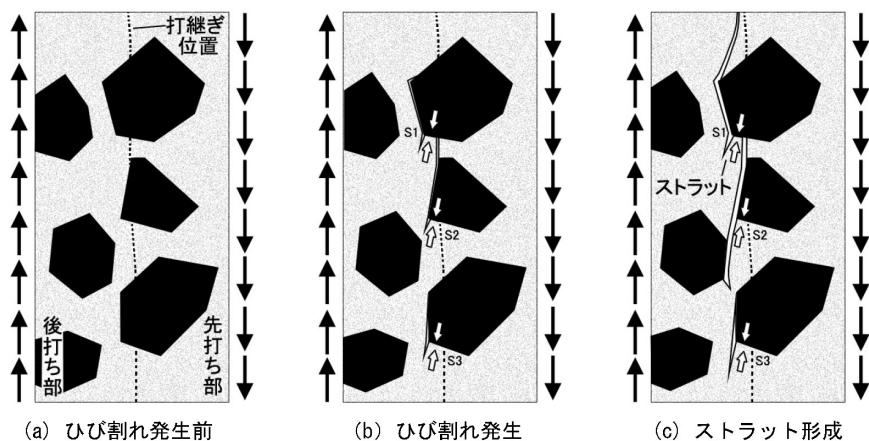
一方、打継ぎ試験体では、元来、ひび割れの損傷が打継ぎ部に局所化されるため、せん断力を受けると図－12(a)に示すような打継ぎ位置近傍の骨材とマトリックスの界面において、次第に(b)および(c)のように微細なストラットが形成され、耐荷されると考えられる。そのため、切欠きによる損傷領域の局所化が破壊メカニズムに影響を与えないため、A、B、Cシリーズとも同じ程度のせん断ひび割れ強度であったと推論される。



写真－1 試験体の破壊面状況 (Cシリーズ)



図－11 一体打ちのせん断破壊挙動模式図



図－12 打継ぎ部でのストラット形状状況

5. まとめ

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調べるために行った実験から、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、一体打ちの場合ではマクロのストラットが適切に形成されず、打継ぎの場合よりもせん断ひび割れ強度が小さくなることもある。
- (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ることから、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。

[謝辞]

本研究に際し、御指導いただいた東北大学大学院工学研究科教授 三橋博三博士および東北大学大学院工学研究科助教授 金子佳生博士に謝意を表します。

[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) Wlraven, 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) 李宝禄、前川宏一：接触面密度関数に基づくコンクリートひびわれ面の応力伝達構成式、コンクリート工学、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

