

# 論文 不連続面を有するコンクリート要素の純せん断実験

山田 亮太郎<sup>\*1</sup>・海野 達夫<sup>\*2</sup>・松田 逸生<sup>\*3</sup>・吉武 勇<sup>\*4</sup>

**要旨：**打継ぎなどの不連続面を有するコンクリートでは、一体打ちコンクリートと比べて、その不連続面が強度低下をもたらす可能性が高く、適切な設計・施工を行うためにもせん断メカニズムの解明が望まれる。そこで本研究では、不連続面がコンクリートのせん断挙動に与える影響の定量化を目的に、主引張力方向に対する不連続面角度と鉄筋軸角度を実験パラメータとした鉄筋コンクリート(RC)要素を用いて、純せん断実験を実施した。本実験より、主引張力方向と不連続面角度が60°を超えると純せん断強度が低下すること、および不連続面に沿うひび割れ長さは鉄筋軸角度が90°に近いほど短くなること、を示した。

**キーワード：**純せん断力, 打継ぎ面, 鉄筋軸, RC要素, ひび割れ発生荷重

## 1. はじめに

プレキャストコンクリート桁と場所打ち床版が一体となる合成げた橋やコンクリート床版の上面増厚工法、コンクリートによる擁壁の嵩上げや落橋防止壁など、既設コンクリートに新しくコンクリートを追加する場合に不連続面が必然的に生じる。このような不連続面を有するコンクリートでは、一体打ちコンクリートと比べて、その不連続面が強度低下をもたらす可能性が高い。さらにこのような不連続面には、一般に鉄筋が配筋されるため、そのせん断メカニズムがいっそう複雑なものとなる。不連続面を含む鉄筋コンクリート(RC)構造の適切な設計・施工を行うためにもせん断メカニズムの解明が望まれる。このためには、鉄筋および不連続面双方の影響を考慮した要素実験が必要と考えられる。

既往の研究では、打継ぎ面の表面粗さ<sup>1),2)</sup>やそれに直交する鉄筋が与える影響<sup>3)</sup>、平滑な打継ぎ面を有するRC構造における鉄筋のせん断伝達機構<sup>4)</sup>といった検討が行われてきた。しかしながら、これらの研究はRC部材レベルを対象とした実験的検討であり、主引張力方向と不連続面(打継ぎ面)の角度、さらに鉄筋の配筋角度について、詳細な検討はほとんどなされていない。このような検討を行うにあたり、各影響因子を考慮した要素実験が望まれる。

そこで本研究では、著者らがこれまで考案してきた(中型)純せん断実験<sup>5)-7)</sup>を通じて、打継ぎ面を有するRC要素の純せん断挙動を調べた。特に、鉄筋軸と打継ぎ面角度が相互におよぼす影響を明らかにするため、一体打ちや打継ぎ面を有する無筋コンクリート要素供試体(以下、無筋供試体)あるいはRC要素供試体(以下、RC供試体)の純せん断実験を比較し考察を加えた。

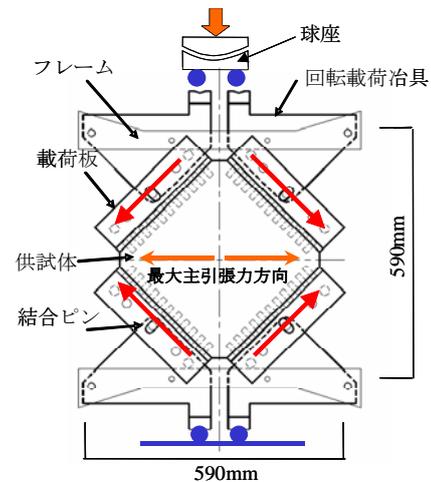


図-1 純せん断実験装置の模式図

## 2. 実験方法

### 2.1 純せん断実験装置

本研究で使用した(中型)純せん断実験装置の模式図を図-1に示す。この装置は、一般的に用いられる載荷試験機内に設置できるもので、複数の加力装置を必要としないため比較的簡易に純せん断力を与えることが可能である。純せん断力の導入方法は、図-2に示すように載荷試験機による一軸圧縮荷重を回転载荷治具および、それにピン結合した载荷板を介して45°方向に分配し、せん断力に変換するものである。この時生じる回転载荷治具の水平方向の反力は、上下に設置した鋼製フレームで受け持つ構造となっている。

### 2.2 供試体および打継ぎ面

本研究で使用した供試体の模式図を図-3に示す。この図に示すように、供試体の4辺の载荷板にはスパイクの役目としてボルトを取り付けた。そして、このスパイ

\*1 山口大学大学院 理工学研究科 社会建設工学専攻 (正会員)

\*2 (株) エイトコンサルタント技術本部 (正会員)

\*3 山口大学大学院 理工学研究科 社会建設工学専攻

\*4 山口大学大学院 理工学研究科 准教授 博(工) (正会員)

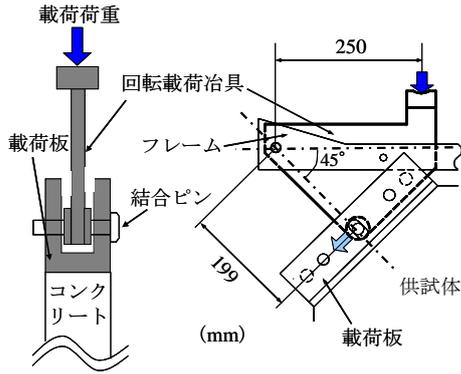


図-2 純せん断力導入方法

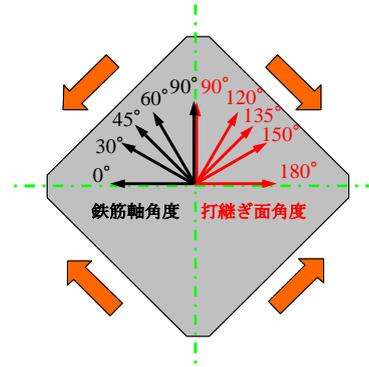


図-5 鉄筋軸・打継ぎ面角度

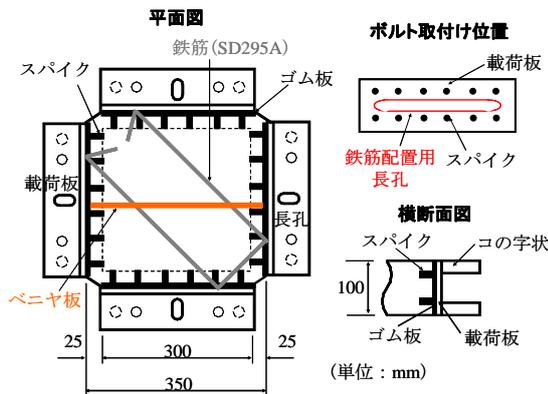


図-3 供試体の模式図

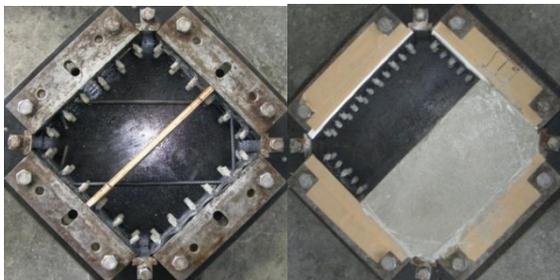


写真-1 打継ぎ面を有する供試体作製状況  
(左：RC 供試体先行打設前，右：無筋供試体後行打設前)

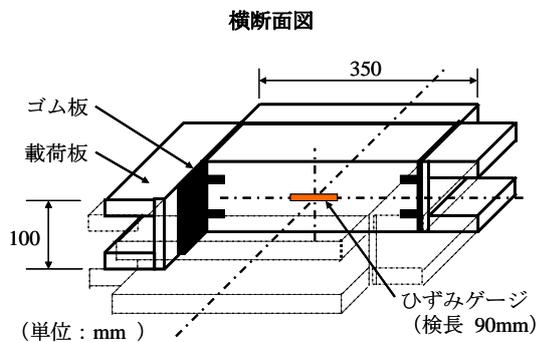


図-4 ひずみ測定箇所(打継ぎ面角度 135°)

ク領域は、コンクリートと载荷板の結合部分と考え、純

表-1 供試体一覧

Case	供試体記号 RS(X)-Y	鉄筋軸 角度 X(°)	打継ぎ面 角度 Y(°)
1~3	NS	—	—
4	RS(0°)	0	—
5	RS(30°)	30	—
6	RS(45°)	45	—
7	RS(90°)	90	—
8	NS-180°	—	180
9	NS-150°	—	150
10	NS-135°	—	135
11	NS-120°	—	120
12	NS-90°	—	90
13	RS(0°)-135°	0	135
14	RS(30°)-135°	30	135
15	RS(45°)-135°	45	135
16	RS(90°)-135°	90	135

せん断応力の評価には、この結合部分を除いた 300×300×100mm の内部領域を用いた。载荷板には、コンクリートに対して過度の変形拘束の影響を与えないように厚さ 1mm のゴム板を取り付けた。また、図-3 右に示すように载荷板をコの字状とし、その内部に一枚の回転载荷治具をピン結合する構造とした。また、鉄筋を配筋するために各载荷板の中央には、長さ 265mm×幅 15mm の長孔を設け、さらに鉄筋をコンクリートに定着させるため、形状をコの字型にし、両端に鋭角フックを設けた。

本研究では、打継ぎ面を有する供試体の作製にあたり、所定の角度に配置したベニヤ板で区切られた一方にコンクリートを先行打設した。その翌日にベニヤ板を除いて、他方に同様のコンクリートを打設した。先行・後行コンクリート打設前の状態例を写真-1 に示す。なお、先行打設コンクリートの打継ぎ面には、粗さ #120 のサ

表-2 使用材料

	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Ad	鉄筋
使用材料	早強ポルトランドセメント	海砂	安山岩碎石	AE 減水剤	SD295A (D10)
密度(g/cm <sup>3</sup> )	3.13	2.60	2.70	1.08~1.12	
吸水率(%)	—	1.19	0.64	—	

表-3 配合条件

水セメント比 W/C (%)	平均圧縮 強度 $f'_c$	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Ad
60	29.5N/mm <sup>2</sup>	160	267	790	1092	2.67

ンドペーパーを用いて、表面粗さが均一になるように研磨した。

打継ぎ面を有する供試体の純せん断実験は、一体打ちコンクリートの純せん断実験<sup>5)</sup>と同様に（後行打設コンクリートの）材齢7日において行った。ここで、打継ぎ面に生じる先行打設コンクリートのひずみを調べるため、図-4に示すように研磨後の先行打設コンクリート表面に検長90mmのひずみゲージを貼付した。

### 2.3 実験パラメータ

本研究で作製した供試体を表-1にまとめて示すとともに、鉄筋軸角度・打継ぎ面角度の詳細を図-5に示す。表-1に示す記号では、RS および NS がそれぞれ RC 供試体、無筋供試体を表し、( ) 内の数値は、主引張力作用方向に対して鉄筋軸がなす角度 X を示している。さらに、ハイフン(-)に続く数値は、打継ぎ面角度 Y を示している。RS シリーズでは、鉄筋軸を 0°, 30°, 45°, 90°の4水準とし、打継ぎ面を有する RS・NS では同角度を 180°(0°に相当), 150°(30°に相当), 135°(45°に相当), 120°(60°に相当), 90°として実験を行った。

### 2.4 使用材料および配合条件

本研究で用いたコンクリートの使用材料と配合条件を表-2、表-3に示す。本研究ではコンクリートの材齢を7, 8日で行うため、早強ポルトランドセメントを用いた。先行打設コンクリートの材齢1日から湿布養生を行い、後行打設コンクリートの材齢1日以降、湿布養生を全面に施した。本研究では、設計基準強度24N/mm<sup>2</sup>相当の一般的なコンクリートを対象とするため、水セメント比(W/C)を60%とした。

## 3. 実験結果

### 3.1 ひび割れ発生形態

#### (1) 一体打ちコンクリート

純せん断実験で得られた一体打ちコンクリートの各供試体のひび割れ発生形態を表-4に示す。また、各供試体のひび割れ発生荷重  $F_{ps}$  とそれを載荷板面積(300×100mm)に対して応力換算した純せん断強度  $f_{ps}$  も表-4

に併記する。

Case1~3(NS)の一体打ち無筋供試体では、小型コンクリート要素を対象とした既往の研究<sup>8)</sup>でも指摘しているように、主引張応力成分が卓越し、供試体中心で縦方向のひび割れが発生・進展し、脆性的な劈開破壊となった。また、最も鉄筋による補強効果が高いと考えられる鉄筋軸角度0°のCase4(RS(0°))においても、鉄筋軸を直交するひび割れが発生した。さらに、Case5~7(RS(X))では、鉄筋軸の角度によらず、すべての供試体で縦方向のひび割れが発生・進展し、劈開破壊となった。

#### (2) 打継ぎ面を有するコンクリート

一体打ちコンクリートと同様に、純せん断実験で得られた打継ぎ面を有する各供試体のひび割れ発生形態およびひび割れ発生荷重を表-5に示す。

様々な打継ぎ面角度を有する無筋供試体のCase8~12(NS-Y)では、すべての供試体において打継ぎ面に沿うひび割れが発生した。なお、打継ぎ面角度が主引張応力方向と直交するCase8(NS-180°)では、脆性的に表-5に示すようなひび割れが発生・進展した。これは、後行打設コンクリート側に縦方向のひび割れが入った瞬間、打継ぎ界面において横方向にずれが生じ、先行打設コンクリート側に複数のひび割れが生じたことから、1本のひび割れが縦方向に貫通しなかったものである。

ここでCase9~12を比較すると、打継ぎ面角度が90°に近いほど、打継ぎ面に沿うひび割れ長さが長いことがわかる。このことは、純せん断応力状態において、打継ぎ面の角度が主引張応力方向に対して90°に近づくほど、ひび割れは打継ぎ面角度に支配されることを示唆している。

次に打継ぎ面を有するRC供試体の破壊形態について着目する。表-5に示すように、Case13~16(RS(X)-Y)のすべての供試体において、打継ぎ面に沿うひび割れが進展したが、それぞれの実験条件により、打継ぎ面に沿うひび割れ長さが異なった。Case13(RS(0°)-135°)ではCase14~16に比べて、打継ぎ面に沿うひび割れは最も長く、打継ぎ長(300mm)の90%程度におよんだ。これに対

表-4 一体打ちコンクリートの実験結果

Case	1 NS	2 NS	3 NS		
ひび割れ形態					
$F_{ps}$ (kN)	109.8	109.8	98.1		
$f_{ps}$ (N/mm <sup>2</sup> )	2.30	2.30	2.05		
Case	4 RS (0°)	5 RS (30°)	6 RS (45°)	7 RS (90°)	
ひび割れ形態					
$F_{ps}$ (kN)	103.9	99.7	90.3	99.1	
$f_{ps}$ (N/mm <sup>2</sup> )	2.17	2.08	1.89	2.07	

して Case14~16 では、打継ぎ面に沿うひび割れ長さはそれぞれ打継ぎ長の 40%、35%、30%となり、鉄筋軸角度が 90° に近いほどその割合は低くなった。主引張応力方向に最も補強効果の高い Case13 では、打継ぎ面に沿うひび割れが進展し、ここを起点として相対的に強度が低下する載荷板付近にひび割れが発生・進展したものと考えられる。さらに鉄筋軸角度が 90°に近くなるほど主引張応力方向に対する鉄筋の補強効果が相対的に小さくなるため、打継ぎ面に沿うひび割れ長さは短くなったものと思われる。

(3) 打継ぎ面の有無に伴う破壊形態の差異

一体打ち RC 供試体と打継ぎ面を有する RC 供試体の破壊形態を比較する。鉄筋軸を主引張力方向に配置した Case4(RS(0°))と Case13(RS(0°)-135°)では、破壊形態に打継ぎ面の有無による違いが顕著に表れた。Case13 では打継ぎ面が脆弱部となり、一体打ちの Case4 のような鉄筋と直交するひび割れはみられなかった。また、それぞれ同じ鉄筋軸角度を有する Case5~7 と Case14~16 の比較においても、供試体を縦方向に貫通するようなひび割れは入らず、打継ぎ界面から剥離破壊するとともに、その近傍にある鉄筋軸方向に沿うひび割れが発生した。

以上のことより、打継ぎ面を設けることで破壊形態は大きく異なり、一体打ち供試体ではみられなかった鉄筋軸角度の違いによる破壊形態の差異も表れた。

3.2 ひび割れ発生荷重

(1) 一体打ちコンクリート

純せん断力作用下において、鉄筋がコンクリートのひ

び割れ発生荷重に及ぼす影響を調べるため、Case4~7(RS(X))の作製にあたり、同一バッチからそれぞれ無筋供試体 Case1~3(NS)も併せて作製し、純せん断実験を行った。なお Case5, 7 は Case2 と同一バッチで作製したものであり、Case1,4 および Case3,6 がそれぞれ同一バッチで作製したものである。そして本研究では、各バッチのコンクリート強度差異の影響を低減するため、無筋供試体のひび割れ発生荷重に対する RC 供試体の同荷重の比を強度比(RS/NS)として評価を行った。

Case1~7(NS, RS(X))の純せん断強度および強度比と鉄筋軸角度の関係を図-6に示す。図-6に示すように、Case4~7の一体打ち RC 供試体の強度比は、すべて 0.90~0.95 にあり、鉄筋を配することで、無筋コンクリートに比して 5~10%程度の強度低下がみられた。さらにその影響は、鉄筋軸角度によらず、概ね一定の割合で強度低下を示すものであった。これは、既報の研究<sup>9)</sup>に示しているように、内在する鉄筋がコンクリートの体積変化(収縮)を一部拘束することによって、予めコンクリートに引張力が作用したためと考えられる。

(2) 打継ぎ面を有するコンクリート

次に打継ぎ面を有する無筋供試体 Case8~12(NS-Y)のひび割れ発生荷重について考察する。打継ぎ界面が完全圧縮応力場となる Case8(NS-180°)のひび割れ発生荷重は 90kN 程度と最も高いものの、Case9~11のひび割れ発生荷重(83~86kN 程度)と大きな隔たりはみられなかった。一方、最も脆弱と考えられる打継ぎ面角度 90°の Case12(NS-90°)は、Case8のひび割れ発生荷重の 75%相

表-5 打継ぎ面を有するコンクリートの実験結果

Case	8 NS-180°	9 NS-150°	10 NS-135°	11 NS-120°
ひび割れ 形態				
$F_{ps}$ (kN)	90.2	83.4	85.9	86.3
$f_{ps}$ (N/mm <sup>2</sup> )	1.88	1.74	1.80	1.80
Case	12 NS-90°			
ひび割れ 形態				
$F_{ps}$ (kN)	66.8			
$f_{ps}$ (N/mm <sup>2</sup> )	1.40			
Case	13 RS (0°)-135°	14 RS (30°)-135°	15 RS (45°)-135°	16 RS (90°)-135°
ひび割れ 形態				
$F_{ps}$ (kN)	88.2	88.7	80.9	95.2
$f_{ps}$ (N/mm <sup>2</sup> )	1.84	1.85	1.69	1.99

当となった。これは、打継ぎ面に補強鉄筋を有さないこのような不連続面を有するコンクリートにおいても、純せん断応力状態ではある程度の荷重負担が可能であることを示している。

また、表-5に示すように、Case13~16の打継ぎ面を有するRC供試体では、ひび割れ発生荷重が80~95kN程度と分布しているが、鉄筋軸角度に応じた一定の傾向はみられなかった。

ここで、これらの打継ぎ面を有するRC供試体(Case13~16)と、同じ鉄筋軸角度を有する一体打ちRC供試体(Case4~7)のひび割れ発生荷重を比較する。同じ鉄筋軸を有する供試体について、Case4とCase13では約85%(=88.2/103.9)、Case5とCase14では約89%(=88.7/99.7)、Case6とCase15では約90%(=80.9/90.3)、Case7とCase16では約96%(=95.2/99.1)の強度比を示し、鉄筋軸が90°に近づくにつれ、打継ぎ面の有無に伴う強度の差異は小さくなる傾向が窺えた。

### (3) 打継ぎ面に生じるひずみ

本研究では、打継ぎ界面における先行打設コンクリートのひずみ挙動を調べることで、ひび割れ発生までの先

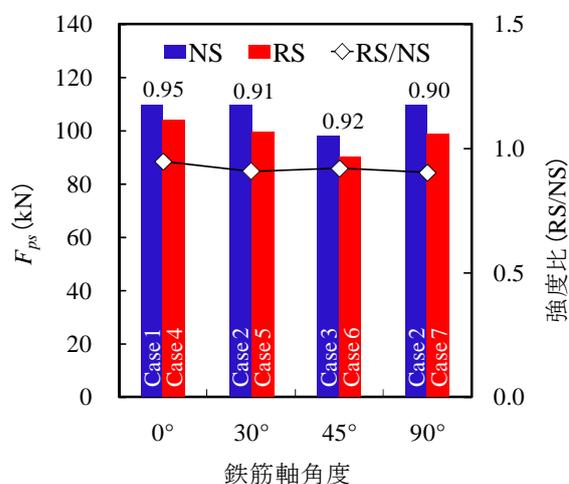


図-6 強度比-鉄筋軸角度

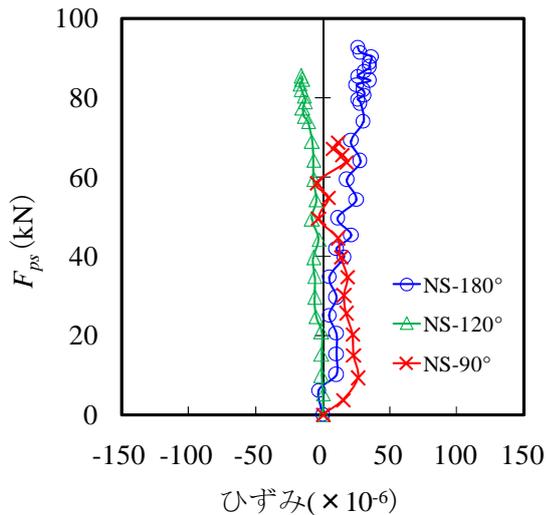


図-7 打継ぎ面に生じるひずみ

行・後行打設コンクリートの一体性を調べることにした。無筋供試体(NS-180, NS-120, NS-90)の先行打設コンクリートの打継ぎ界面に生じたひずみを図-7に示す。ここに示す結果は、無筋供試体にひび割れが発生するまでのひずみ挙動である。

この結果に示すように、ひび割れが発生するまで、コンクリート界面には、最大でも $\pm 50 \times 10^{-6}$ 程度のひずみしか発生していないことが分かる。このことは、打継ぎ界面に沿うひび割れ(破壊)が生じるまで、先行打設・後行打設コンクリート間にほとんどずれが生じなかったことを示唆した結果と考えられる。すなわち、打継ぎ界面にひび割れが生じるまでは、両者は一体となって荷重負担する可能性が窺える。

#### 4. まとめ

本研究では、打継ぎ面を有する無筋供試体やRC供試体の純せん断実験を通じて、打継ぎ面角度や鉄筋軸角度がコンクリート要素のせん断挙動に与える影響について実験的検討を試みた。本研究で得られた知見を以下に列挙する。

- (1) 一体打ちコンクリートでは、鉄筋の有無に拘わらず縦方向のひび割れが発生・進展することで、脆的な破壊挙動を示した。さらにそのひび割れ形態は、鉄筋軸の角度によらないものであった。
- (2) 打継ぎ面を有する無筋供試体では、打継ぎ面角度が主引張応力方向に対して $90^\circ$ に近いほど、打継ぎ面に沿うひび割れ長さが長くなった。また打継ぎ面を有するRC供試体でも同様の傾向を示したが、鉄筋軸角度が $90^\circ$ に近いほど、打継ぎ界面に沿うひび割れ長が短くなった。
- (3) 一体打ちコンクリートの場合、RC供試体は、無筋供試体に比して5~10%程度の強度低下がみられたが、その影響は鉄筋軸角度によらず、概ね一定の割合を示した。
- (4) 打継ぎ面を有するRC供試体と、同じ鉄筋軸角度を有する一体打ちRC供試体のひび割れ発生荷重の比より、鉄筋軸が $90^\circ$ に近づくにつれ、打継ぎ面の有無に伴う強度の差異は小さくなる傾向がみられた。
- (5) 打継ぎ界面に沿うひび割れが生じるまで、コンクリート界面には、ほとんどひずみは生じなかったことから、先行打設・後行打設コンクリート間のずれは極めて小さいことが推察された。

#### 参考文献

- 1) 塩原 等, 佐藤幸史: コンクリート打ち継ぎ面の簡易型一面せん断試験, コンクリート工学年次論文集, Vol.13, No.2, pp.653-658, 1991.
- 2) 槇谷貴光, 香取慶一, 林 静雄: コンクリート打継ぎ面における表面粗さの評価とせん断力伝達能力に関する実験研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.17, No.2, pp.171-176, 1995.
- 3) 香取慶一, 林 静雄, 乗物丈巳, 羽田和幸: コンクリート打継ぎ面に直交する鉄筋の挙動と打継ぎ面粗さの関係に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.19, No.1, pp.1263-1268, 1997.
- 4) 篠田佳男, 大野豚海, 田中伯明, 鈴木顕彰: 平滑な面における鉄筋のせん断伝達機構に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.15, No.2, pp.479-484, 1993.
- 5) 久部修弘, 吉武 勇, 田中 浩, 浜田純夫: コンクリート要素実験のための中型純せん断試験装置の開発検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.2, No.27, pp.787-792, 2005.
- 6) 海野達夫, 吉武 勇, 久部修弘, 山田亮太郎: 内的小および外的に補強したコンクリート要素の純せん断実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.3, pp.661-666, 2007.
- 7) 久部修弘, 吉武 勇, 稲森あゆみ, 浜田純夫: 純せん断実験に基づく炭素繊維シートのせん断補強の定量化, 土木学会論文集, Vol. 62, No. 4, pp.855-865, 2006.
- 8) 田中 浩, 吉武 勇, 山口佳起, 浜田純夫: 純せん断力を受けるコンクリート要素の強度に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.746/V-61, pp.205-214, 2003.