

論文

[1150] セメント硬化体を母材とする複合部材の界面における力学的挙動

正会員○梶尾 聡 (日本セメント中央研究所)  
 正会員 岡本享久 (日本セメント中央研究所)  
 正会員 富田六郎 (日本セメント中央研究所)  
 後藤英仁 (日本セメント九州支店)

1. はじめに

合理的な補修設計法を確立する上で耐久的な補修材料の開発ばかりでなく、補修後の旧コンクリートと補修材の界面の外力に対する共働作用について明確にする必要がある。旧コンクリートと補修材の接合強度は、補修材の種類のみならず、旧コンクリートと補修材とが接する界面の凹凸状態の影響を強く受けることが報告されている[1][2][3][4]。

本研究は、セメント硬化体を母材とする複合部材の界面における耐荷機構を明らかにし、せん断強度の評価法を求めることを目的とした。すなわち、硬化したコンクリートとポリマー系モルタルを中心とする接合材とからなる二層複合部材において、母材界面の凹凸状態、母材と接合材の容積変化および接合材の種類の違いが界面のせん断強度に与える影響に検討を加え、具体的なせん断強度評価法を提案した。

2. 母材及び接合材の物理試験結果

2.1 母材及び接合材の配合

母材のコンクリートに用いた材料として、セメントには普通ポルトランドセメント、細骨材に富士川産川砂と木更津産陸砂を7:3に混合したもの、粗骨材に青梅産碎石(碎石2005)、混和材としてAE減水剤、空気量調整剤および収縮低減剤を使用した。配合を表-1に示す。すなわち目標スランプおよび空気量は、それぞれ18±1cmおよび4.0±0.5%とし、水セメント比W/C=55%、細骨材率s/a=0.48および粗骨材の最大寸法は20mmとした。

接合材としては、ポリマーセメントモルタルを中心に現在補修材として需要が多く、代表的なセメント混和用ポリマーであるSBR(スチレンブタジエンゴム)系、EVA(エチレン酢酸ビニル)系およびPAE(ポリアクリル酸エステル)系の3種類を用いた。接合材の配合は、水セメント比W/C=55%の1:3モルタルを基準とした。ポリマー添加量は、ポリマーとセメントの重量比P/C=5, 10, 15%となるように外割りで調整した。容積変化の相違がこの種部材の界面に及ぼす影響を調べる目的で、収縮低減剤をCX4%およびCX2%混入した供試体も作製した。

2.2 物理試験結果

母材のコンクリートおよび接合材として用いた各種モルタルの載荷時の圧縮強度、曲げ強度、せん断強度(図-1参照)および乾燥収縮率の結果をそれぞれ表-2および表-3に示す。

表-1 母材コンクリートの配合

水	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				混和剤		
	セメント	細骨材	粗骨材		AE減水剤	空気量調整剤	収縮低減剤
190	345	831	大	小			
			453	453			

表-2 母材コンクリート単体の物理試験結果(28日材令)

曲げ強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	圧縮強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	せん断強度(kgf/cm <sup>2</sup> )	乾燥収縮率(X10 <sup>-6</sup> )
49.6	347	107.1	688

### 3. 試験概要

界面のせん断挙動を表-3 接合材として用いたモルタル単体の物理試験結果(28日材令)

知る目的でせん断試験および曲げ試験を実施した。載荷試験方法を図-1に示す。界面のせん断強度を評価するに当たり代表的な試験方法として一面せん断試験あるいは二面せん断試験の方法がある。

材料	P/C	収縮低減剤混入率	曲げ強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	せん断強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	乾燥収縮率 (X10 <sup>-6</sup> )
SBR系	5%	—	64.0	255	—	838
	10%	—	77.3	292	45.4	818
	15%	—	83.3	272	—	812
EVA系	10%	—	63.8	165	34.5	993
PAE系	10%	—	79.3	229	49.6	640
モルタル		—	52.7	265	81.2	851
SBR系	5%	CX4%	63.0	301	—	433
	10%	CX4%	70.9	270	45.2	405
	15%	CX4%	71.7	278	—	321
モルタル		CX4%	50.9	259	57.9	526

本研究では、一面せん断試験と二面せん断試験の結果がほとんど一致していること、二面せん断試験方法がより平易な実験手法であることなどから二面せん断試験を行うことにした[5]。複合部材のせん断試験用供試体は10X10X10(cm)の母材となるコンクリート供試体を成形し、翌日蒸気養生を施した。蒸気養生を行った理由は早期に強度発現させ、接合材を施工した後の母材の強度発現を最小にするためである。供試体脱型後、80℃に設定した乾燥器内に2週間静置し、乾燥収縮を促進させ、接合材を打ち継いだ後の母材の乾燥収縮の影響を極力取り除いた。接合材の打ち継ぎ作業では、母材コンクリートの打ち継ぎ面に所定の表面処理を施した後、10X10X40 (cm)の型枠の中間に置き、その両側に接合材を打設した。接合材打設後、気中養生(温度20℃、湿度60%)を2週間行い、試験に供した。曲げ試験は、JIS A 1106に準ずる三等分点載荷方法を行った。複合部材の曲げ強度試験体は、10X5X40 (cm)の母材となるコンクリート供試体を成形した後、せん断試験用供試体と同様の養生を施した。接合材の打ち継ぎは、母材コンクリートの打ち継ぎ面にせん断試験用供試体同様の処理を施した後、10X10X40(cm)の型枠に置き、その上に打設した。

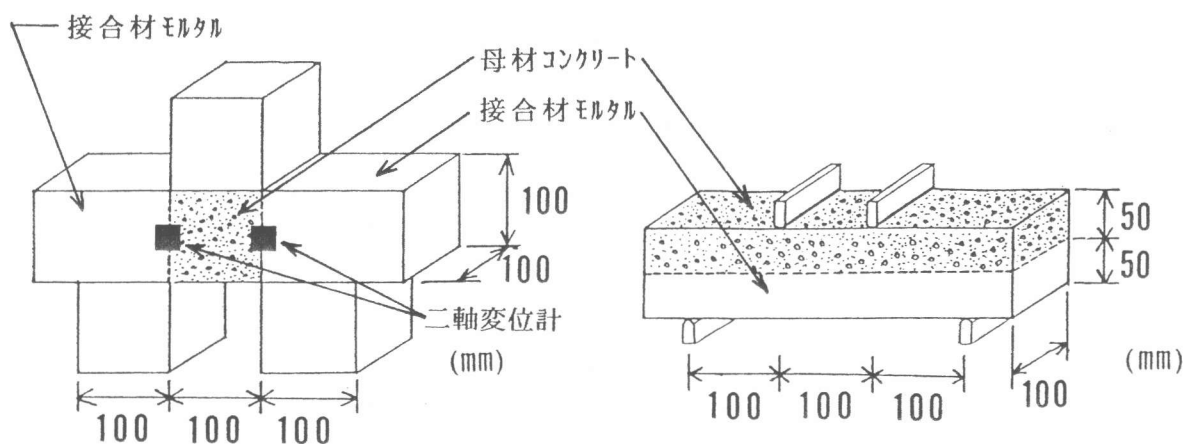


図-1 載荷試験方法(二面せん断試験および三等分点曲げ試験)

### 4. 母材界面の表面粗度および処理方法の相違が接合面の力学的性状に及ぼす影響

母材と接合材の打ち継ぎ面(すなわち、界面)の処理方法としてワイヤーブラシ処理(WB処理)、ピシャンハンマー処理(BH処理)およびサンドブラスト処理(SB処理)の3種類を採用した。BHに関しては表面に傷がつく程度に処理したもの(BH-L処理)および凹凸がはっきりつくまで処理したもの(BH-H処理)の2種類の凹凸処理を行った。図-2は界面の処理

方法の相違がせん断強度に及ぼす影響を示す。せん断強度が小さい順に処理方法を述べると、BH-L処理、WB処理、BH-H処理、SB処理となった。すなわち、界面にある母材の凹凸の程度が大きい程せん断強度は改善されることが認められた。図-3から図-6は、二面せん断試験から求めた破壊した界面における作用せん断応力と、界面に貼付した二軸亀裂変位計から求めた界面に平行方向の変位（縦方向変位、すなわちずれ変位）および界面に垂直方向の変位（横方向の変位、すなわちひびわれ変位）の関係を示す。これらの図から以下の様なことが認められた。作用せん断応力と変位の関係から、界面の接合剛性（界面に平行な変位および垂直な変位の増加に伴う作用せん断応力の増加割合）は、界面処理方法の相違によって異なることが認められた。すなわち、作用せん断応力（ $\tau_s$ ）と変位（ $\delta_s$ ）の関係より、SB処理では $\tau_s$ と $\delta_s$ の関係は界面が滑り始めるまで線形的な関係が存在するが、WB処理では最大せん断強度の20%~50%まで剛性（この領域の剛性はSB処理とほぼ等しく、「第1剛性」と呼称）と、それ以降界面が滑るまでの剛性（「第2剛性」と呼称）が混在する結果となった。界面処理方法が接合部の剛性に及ぼす影響は第2剛性の領域で生じ、WB処理による界面の第2剛性はSB処理のそれより1/10~1/20となった。SB処理による界面の接合剛性は接合材単体の剛性とほぼ等しいこと、またWB処理での界面における第2剛性は母材および接合材の単体の剛性より小さいことは、界面の破壊状況と密接な関係がある。すなわち、SB処理による界面の破壊は接合

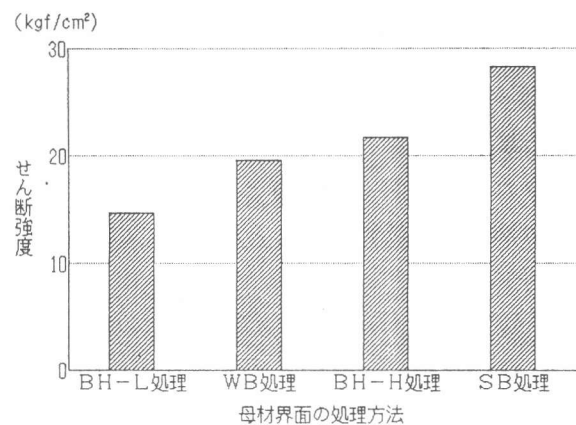


図-2 界面処理方法の相違が界面のせん断強度に及ぼす影響

材のせん断破壊（凝集破壊）であり、またWB処理による界面の破壊は界面の接着破壊であったことが原因である。BH処理を行った複合部材の接合剛性はせん断強度と同様に界面の凹凸状

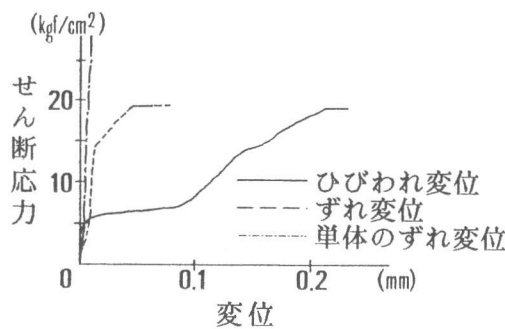


図-3  $\tau_s$ と $\delta_s$ の関係 (WB処理)

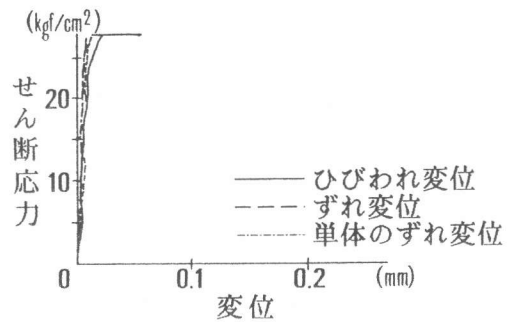


図-4  $\tau_s$ と $\delta_s$ の関係 (SB処理)

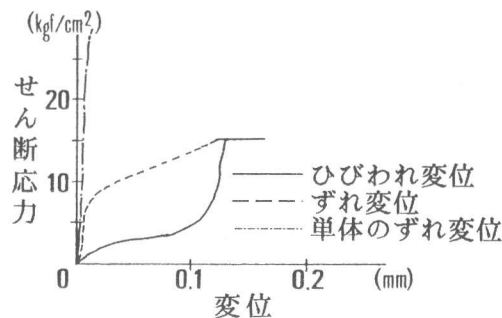


図-5  $\tau_s$ と $\delta_s$ の関係 (BH-L処理)

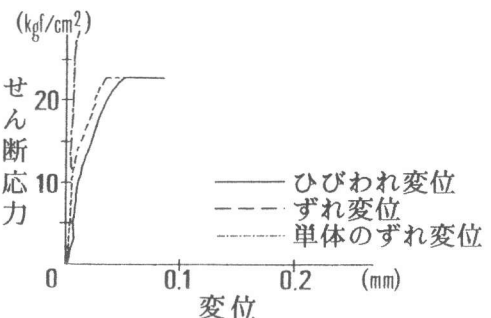


図-6  $\tau_s$ と $\delta_s$ の関係 (BH-H処理)

態の程度の影響を受け、WB処理とSB処理の中間の値となった。BH処理を行う場合、母材界面の凹凸部においてビシャンハンマーの振動による凸部のゆるみの影響が生ずる場合があり、せん断強度がWB処理程度になる場合もある。

### 5. 母材と接合材の容積変化の相違が界面の力学性状に及ぼす影響

母材コンクリートに接合材を打ち継ぐ場合、界面を介して母材の拘束効果により界面近傍の固元応力が生ずることが知られている[2]。すなわち、主に接合材の乾燥収縮による容積変化が原因となり、母材コンクリートには圧縮応力が、接合材には引張応力が蓄積され、界面の接合強度が低下することが知られている。本章では接合材の容積変化の低減を収縮低減剤によって試み、界面の力学性状に及ぼす影響を検討した。SBR系の接合材について、収縮低減剤を混入することにより接合材単体としての乾燥収縮率は図-7に示すようにほぼ40~60%まで低下することがわかる。続いて、図-1に示す三等分点曲げ供試体を用いた複合部材における接合材の乾燥収縮率を図-8に示す。この図における材令とは接合材を打ち継いだ時点からの材令である。打ち継ぐことにより乾燥収縮率は更に低下しているが、これは、打ち継ぐことによって接合材は収縮を抑制されて、界面に引張力として働いているものと考えられる。すなわち、収縮低減剤の混入が、収縮の抑制をも低減することによって、この引張力も低減できる。

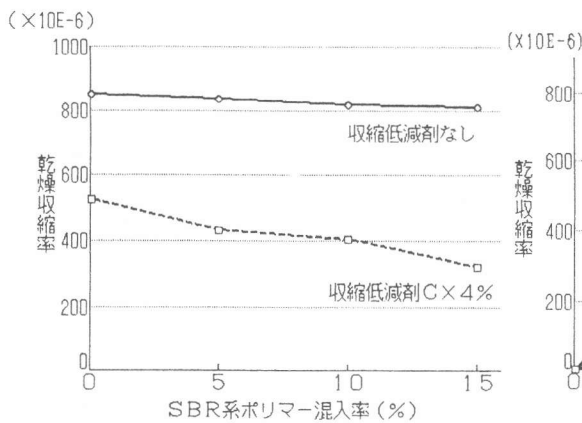


図-7 収縮低減剤が容積変化に及ぼす影響

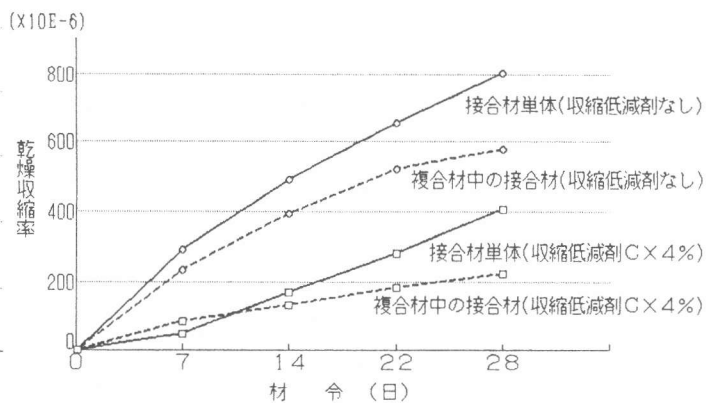


図-8 打ち継ぐことによる容積変化の影響 (ホイットモアひずみ計を用いたコンタクトゲージ法)

図-9および図-10に複合部材のせん断試験結果および曲げ試験結果を示す。なお、界面の処理方法はWB処理である。この結果から、収縮低減剤の混入は、複合材のせん断強度および曲げ強度の向上に効果が少なかった。続いて図-11にSB処理した複合部材のせん断試験結果を示す。SB処理の場合では、収縮低減剤を混入により、せん断強度が12~28%ほど改善できることが確認できた。この原因としては、WB処理は破壊形式が接着破壊であり、しかも界面の凹凸が少なく物理的なかみ合わせが少ないため容積変化の差の影響が顕われにくいことが考えられる。

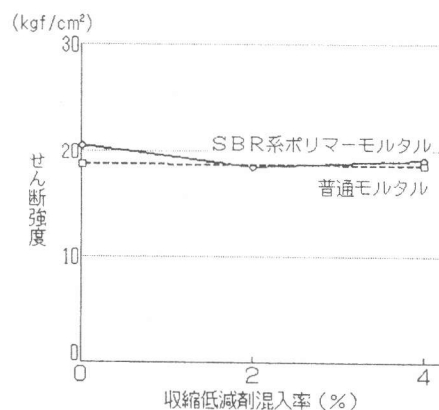


図-9 接合材の容積変化が界面のせん断強度に及ぼす影響 (WB処理)

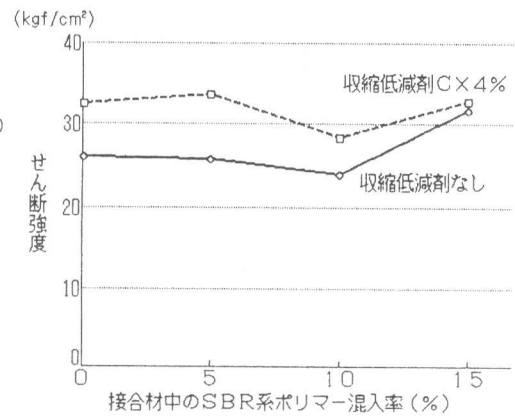
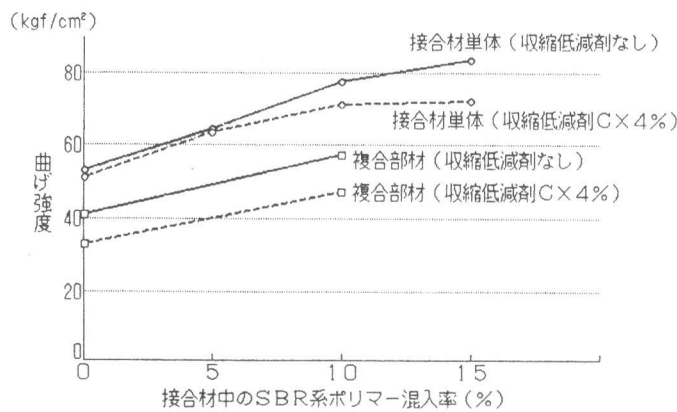


図-10 容積変化が曲げ強度に及ぼす影響 図-11 接合材の容積変化が界面のせん断強度に及ぼす影響 (SB処理)

### 6. 接合材の種類の違いが界面の力学的性状に及ぼす影響

図-12は接合材の種類の違いが界面のせん断強度に及ぼす影響を示すものである。界面の処理方法は凝集破壊を起こすSB処理である。接合材の種類について、PAE系およびEVA系より、SBR系の方がせん断強度が大きくなる。ポリマー添加量に関してはP/Cが15%までの範囲では、添加量が多いほどせん断強度が大きくなる傾向がある。

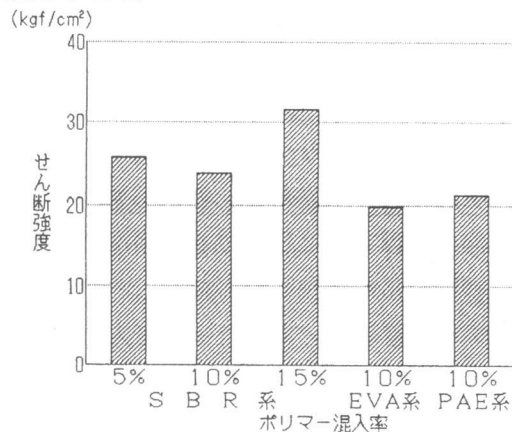


図-12 接合材の種類の違いが界面のせん断強度に及ぼす影響 (SB処理)

### 7. 母材の凹凸状況の定量的評価法

第6章までの結果から、母材コンクリートの表面粗度がせん断強度に大きな影響を及ぼしていることが確認できた。この章ではその表面粗度を定量化する試みを行い、その指標とせん断強度との比較検討を行う。図-13に示すように単純光を接合面の横から角度を5°、10°、15°と変えて照射し、その影の面積から任意の接合面のせん断面積比λ(%)<sup>[3]</sup>を求める。写真-1、2および3に、入射角5°で照射した時のWB処理、BH-H処理およびSB処理の母材界面の性状を示した。図-14に示す入射角と影の面積比の関係

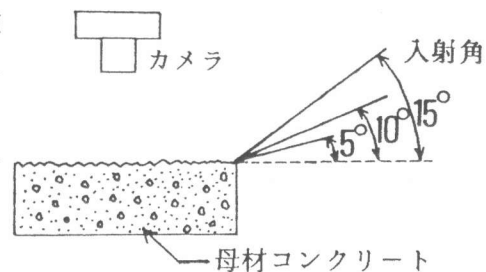


図-13 表面粗度の測定方法

から、界面性状が入念になるに従い、影の面積比が大きくなっていることが確

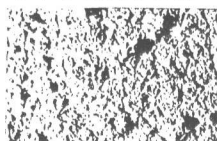


写真-1 WB処理 (入射角5°、λ=18.54%)



写真-2 BH-H処理 (入射角5°、λ=46.84%)

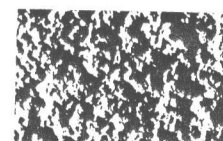


写真-3 SB処理 (入射角5°、λ=47.40%)

認できる。せん断強度に貢献するのは入射角 $0^\circ$  の場合の影の面積比（せん断面積比）である。入射角と影の面積比との間に線形関係が成り立つと仮定して、一次回帰を行い、せん断面積比を求めた。続いて接合材単体のせん断強度 $\tau=45.4\text{kgf/cm}^2$ と、せん断強度に貢献しているせん断面積比からコンクリートに接合材を打ち継いだ場合のせん断強度 $\tau_{c.a.}$ を(1)式によって算定でき、その結果を表-4に示す。

$$\tau_{c.a.} = \lambda \cdot \tau \quad \dots\dots\dots(1)$$

これにより、打ち継ぐ接合材単体のせん断強度が分っていれば、せん断面積比を算出することにより凝集破壊を起こしたSB処理およびBH-H処理の場合のせん断強度が精度よく推定できることが認められた。

### 8. まとめ

- (1) 母材コンクリートと接合材からなる複合部材の界面におけるせん断強度は、界面の破壊状況によって異なる。すなわち、凝集破壊を起こさせるSB処理およびBH-H処理は、他の処理方法に比べてせん断強度が改善される。また、収縮低減剤を用いると複合部材の容積変化が低減されるので、一層せん断強度が改善される。一方、WB処理では界面の破壊が接着破壊であるため、せん断強度が小さく、収縮低減剤の効果も発揮されにくい。
- (2) 接合材と接する母材コンクリートの表面の凹凸状況と界面のせん断強度の関係は、光を母材コンクリートの凹凸面に照射し、影の面積を画像解析により求めて、せん断面積比を計算し、この値に材料単体のせん断強度を乗じることにより求めることができ、実用性が高い方法と思われた。

### 参考文献

[1]長瀧重義・岡本享久・中井暁夫・鈴木智郎：補修した鉄筋コンクリート部材の力学的特性に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、9-2、pp.257-262、1987

[2]長瀧重義・岡本享久・曾我寿孝：断面修復した鉄筋コンクリートはりの力学挙動と合理的補修設計の提案、コンクリート工学年次論文報告集、12-1、pp.1281-1286、1990

[3]岡本享久・長瀧重義：断面修復したコンクリート部材の新旧接合面におけるせん断特性、第45回セメント技術大会講演集、pp.744-749、1991

[4]J.Silfwerbrand：Improving Concrete Bond in Repair Bridge Decks、American Concrete Institute、Concrete International、pp.61-66、Sep.1990

[5]後藤裕司・長瀧重義：コンクリート接合部のせん断耐力に関する基礎研究、土木学会論文報告集、第254号、pp95-106、Oct.1976

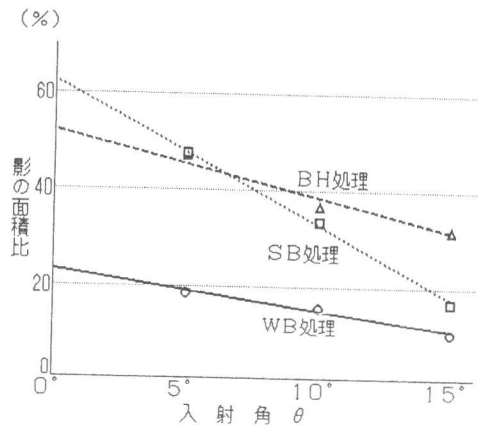


図-14 せん断面積比と入射角の関係

表-4 せん断強度の推定値と実験値の比較

界面処理	$\lambda$	$\tau_{test}$	$\tau_{c.a.}$	$\tau_t/\tau_c$
WB	0.23	13.6	10.4	1.30
BH-H	0.50	26.9	22.7	1.18
SB	0.62	30.3	28.2	1.08