

正会員 東 洋一 (東京都立大学 教授・工博)

○ 同 磯 健一 ( 同 助手 )

同 大久保 全陸 (九州芸術工科大学助教授・工博)

## 1. 序

コンクリートのせん断強度に関して、古くからそれを調べるための試験法が各種提案され研究がなされてきたが、試験法の違いにより得られる強度、破壊性状は異なる。これは、コンクリートを純粋にせん断応力<sup>\*1)</sup>だけで破壊に導くことは困難であり、破壊面にはせん断応力の他に直応力も発生し、それらの組み合わせによってコンクリートの破壊が生じるためである。したがって、コンクリートのせん断強度の評価には組み合わせた応力状態における破壊基準の解明が必要であり、著者らは、<sup>\*2,10)</sup>コンクリートの純せん断強度は $\sigma_1$ - $\sigma_2$ 座標系の組み合わせ応力状態における主応力 $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ をもとにしたモールの応力円の包絡線と $\tau$ 軸との交点として評価すべきであると考えた。

著者らは、このような観点に立ち、これまで各種の組み合わせ応力によるコンクリートのせん断強度試験法について、実験を行い検討して来た。

本研究では、これら試験法のうち、<sup>\*7,10)</sup>藤松が考案した割裂・圧縮組み合わせ試験法を用いて、コンクリートの種別を変えた実験を行い、コンクリートの種別によるせん断強度の違いを調べ、又、各種試験法について比較検討し、標準的なせん断強度試験法開発の基礎資料を得ることを目的とする。

## 2. 実験計画

**2.1.) 供試体** 本実験で使用した供試体は、 $10 \times 10 \times 10$  cmの立方体及び $10 \times 10 \times 5$  cmの直方体供試体である。又、圧縮、割裂試験では、比較用として $10^{\phi} \times 20$  cmの円柱供試体も作成した。又、型枠には曲り供試体用型枠を利用した。打設に際し、棒状バイブレーターを用い、脱型後、4週間水中養生し、試験前日まで更に約4週間実験室にて空中養生した。

**2.2) 使用材料の性質** 試験体のコンクリートの種類は、普通コンクリート、珪石コンクリート、軽量コンクリートの3種類とし、それぞれ割合を2種類とした。セメントは普通ポルトランドセメント、骨材は、普通コンクリートでは、川砂(2.5mm以下)、川砂利(20mm

以下)、珪石コンクリートでは、珪石(20mm以下)、川砂(2.5mm以下)を用い、軽量コンクリートでは、某社製の人工軽量骨材(細骨材2.5mm以下、粗骨材20mm以下)を用いた。又、湿和剤としてポソリスAG.5Lを用いた。又、コンクリートの割合は表1にした。

表1. コンクリートの割合表

種別	記号	水セメント	細骨材率	水	セメント	粗骨材	粗骨材	湿和剤
		(%)	(%)	Kg/cm <sup>2</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Kg/m <sup>3</sup>	Jl/m <sup>3</sup>
普通 コンクリート	N-1	70.2	44.0	220	154	845	1082	2.20
	N-2	53.6	40.6	289	155	756	1160	2.90
軽量 コンクリート	L-1	57.0	47.0	159	279	546	468	2.79
	L-2	47.0	45.0	163	347	503	465	3.47
珪石 コンクリート	S-1	66.0	50.9	167	257	939	905	2.57
	S-2	52.0	48.4	171	330	862	920	3.30

**2.3.) 試験装置** 前回の実験<sup>\*2)</sup>では、分布荷重載荷板に力が偏心して加わり、その剛性も低かったので、圧縮応力の比が大きい場合(②, ③)で結果が高めとなった。本研究では、分布荷重載荷板の剛性を高め、一部を修正し、図1に示す試験装置を作成した。装置Aでは、分布荷重載荷板の高さを50mmとし、集中荷重載荷板の先端は平らである。装置Bでは、装置Aよりも分布荷重載荷板の高さを増し70mmとし、集中荷重載荷板の先端を凸状にし、集中荷重が伝達しやすくし、荷重分配板と各載荷板との間のローラーを載荷板と一体とした。

又、試験体と装置の間には、減摩材としてテフロンシートとシリコングリースを挿入した。

**2.4) 応力算定方法** 試験断面の破壊時の引張主応力 $\sigma_t$ 、と圧縮主応力 $\sigma_c$ 、とは、最大荷重P(ton)に表2に示す係数をかけることにより得られる。

**2.5) 試験断面の応力解析** 図2に、荷重番号③, ⑤, ⑦での試験断面の応力を有限要素法弾性解析法により求めた結果を示す。

**3. 実験結果**

**3.1) 破壊限界線** 図3.1, 図3.2は減摩材の影響と試験体の中の違いについて行った予備実験の結果であるが、グリース層を増し減摩効果と高めるほうが、

強度は小さくなり、供試体の中の違いについては差はほとんどない。

図3.3～図3.6はコンクリートの種類及び強度別の実験結果を示す。N-1-A, N-1-Aでは装置Aを用い、他は装置Bを用いた。軽量コンクリートは引張強度が弱く実験結果もNシリーズより低い。又、各種コンクリートとも強度が増すと、実験結果は低くなる。

図3.6は、試験装置の違いについてまとめたものであるが、載荷板の剛性を高めることにより、とくに圧縮応力の比が大きい②③で実験結果は低くなる。ただし、装置の剛性を増した分だけ装置は重くなる。同図には2軸応力状態で最も信頼されているKupfer<sup>\*)</sup>の実験結果を示してあるが、本実験の結果はこれより高い。

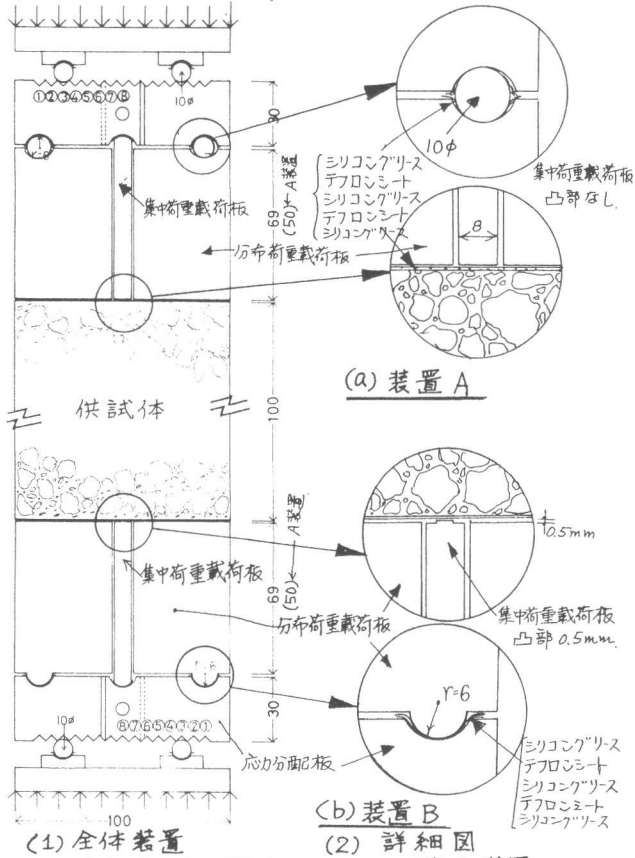


図1. 割裂・圧縮組み合わせ試験法装置

表2. 2軸応力計算用係数 ( $\times 10^3 \text{ kg/cm}^2$ )

位置	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
$\sigma_x$ (MP)	0.566	0.425	1.415	2.405	3.395	4.386	5.376	6.366
$\sigma_c$ (MP)	9.422	10.797	12.180	13.565	14.948	16.332	17.717	19.100

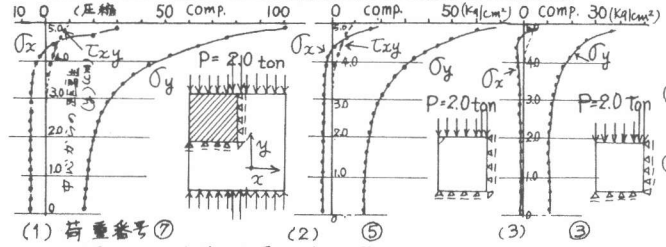


図2. 試験断面の応力解析

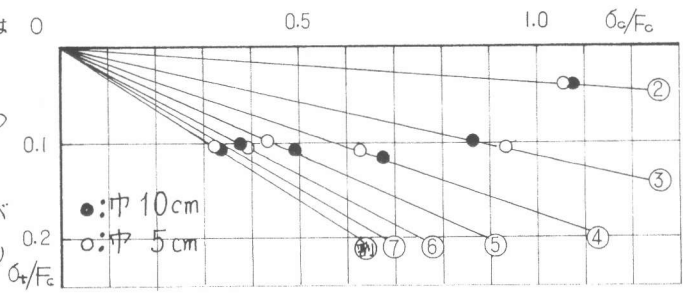


図3.1 試験体の中のちがい

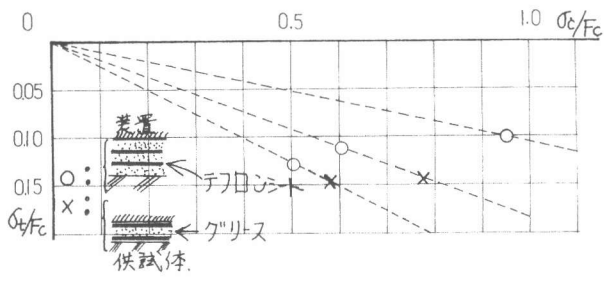


図3.2. 減摩材の影響

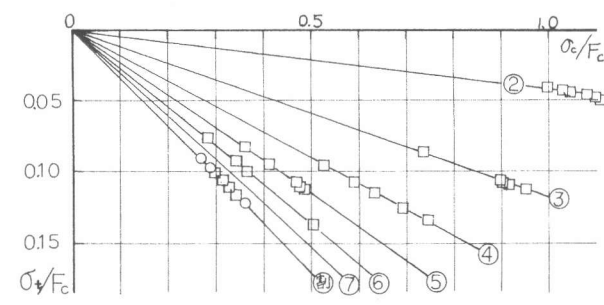


図3.3 破壊限界線 (N-1-A)  $F_c = 188 \text{ kg/cm}^2$

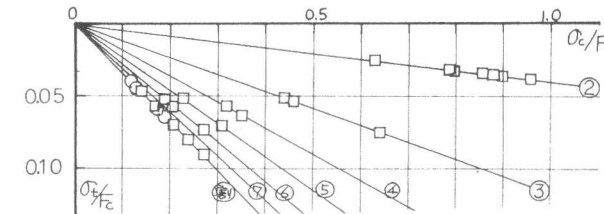


図3.4. 破壊限界線 (L-1)  $F_c = 342 \text{ kg/cm}^2$

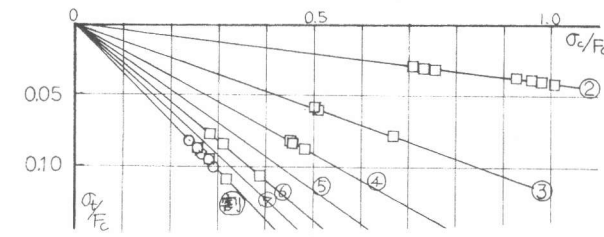


図3.5 破壊限界線 (S-1)  $F_c = 304 \text{ kg/cm}^2$

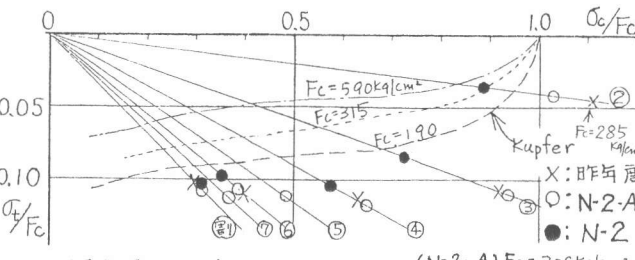


図3.6 試験装置のちがい. (N-2-A)  $F_c = 306 \text{ kg/cm}^2$ , (N-2-)  $F_c = 265 \text{ kg/cm}^2$

3.2) 破壊性状 圧縮応力の比が小さい場合(③~⑥)

では、試験断面で割裂による破壊をした。圧縮応力の比の大きい②の場合、試験装置Aを用いると、試験断面で破壊せず、前回の実験同様、端部で圧縮破壊したが、装置Bを用いると、試験断面でひびわれが生じ、さらに荷重を増すと、圧縮破壊した。これは、試験断面にひびわれが生じた後、応力の再分配がおり、試験断面で引張応力が伝達されず、結局圧縮応力のみが加わったためと思われる。このため、②の場合の実験結果ではひびわれ発生時の荷重を用いている。

又、破壊面を観察すると、普通コンクリート、砕石コンクリートでは、骨材とペースト間の分離破壊を示しているが、軽量コンクリートでは、破壊面は骨材を貫通している。これは、骨材の強度がペーストの強度より小さいためと思われる。

3.3) モールの応力円 各コンクリート種別の実験結果をもとに、モールの応力円を描くと、図3.7~図3.10となる。図中には8つのモールの応力円を描いてあるが、破壊包絡線を決定する場合、圧縮応力円、割裂応力円の他に2つないし3つの応力円で十分であると思われる。この点については、さらにデータを蓄積し検討する必要があると思われる。

3.4) せん断強度の推定 前節で得たモールの応力円の包絡線とT軸との交点より評価したコンクリートのせん断強度を表3に示す。ただし、せん断強度は、 $k_1 = T_0/F_c$ ,  $k_2 = T_0/\sqrt{F_c \cdot F_t}$  で表す。この表よりコンクリートの種別ごとに、圧縮強度が増すにつれ、 $k_1$  の値は、減少するが、 $k_2$  の値はあまり差がない。

又、割裂強度の低い軽量コンクリートは、普通コンクリートよりせん断強度は約3割ほど低い。

表中には、既径の提案式による $k_1$ の値を示してあるが、軽量コンクリート、砕石コンクリートでは $k_1$ の値は(3)及び(4)式による値に近く、普通コンクリートでは $k_1$ の値は(3),(4)式による値と(2)式による値の間にある。

4. 検討及び考察

4.1.) 既径の実験結果との比較 2軸組み合わせ応力による既径の試験法の略図を図4.1に示す。これらの試験法から得られた結果を $k_1 = T_0/F_c$ ,  $k_2 = T_0/\sqrt{F_c \cdot F_t}$  を用いて図4.2~図4.3に示す。試験法及び研究者によりかなりのちがひがある。

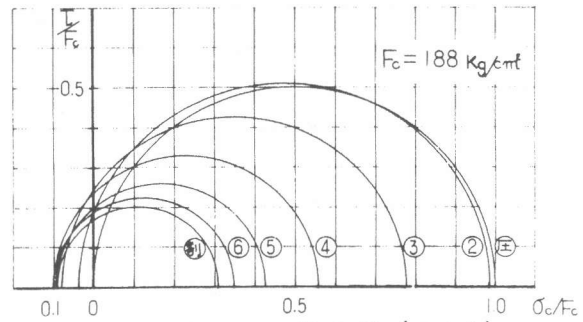


図3.7 モールの応力円 (N-1-A)

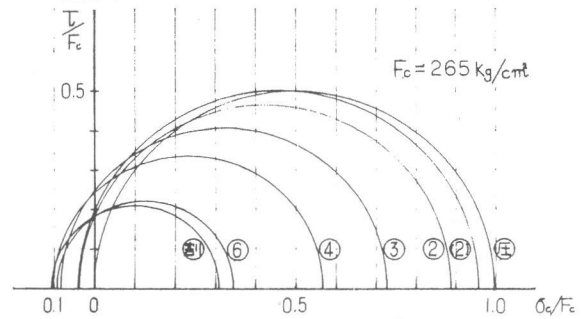


図3.8 モールの応力円 (N-2)

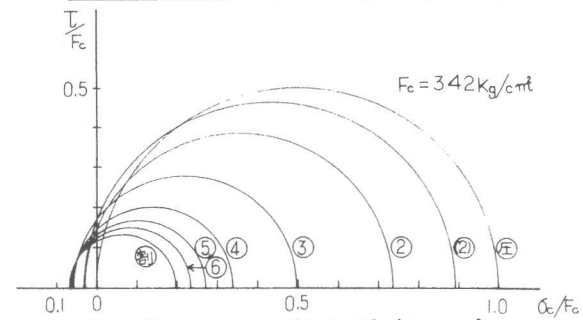


図3.9 モールの応力円 (L-1)

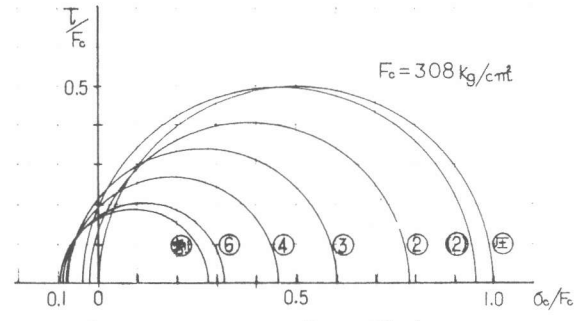


図3.10 モールの応力円 (S-1)

表3. せん断強度の推定

	F <sub>c</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	F <sub>t</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	k <sub>1</sub> <sup>*</sup>	k <sub>2</sub> <sup>**</sup>	*) 提案式			k <sub>1</sub> × (F <sub>c</sub> )	
					(1)	(2)	(3)		
普通コンクリート	N-1-A	188	20	0.25	0.76	0.16	0.33	0.22	0.21
	N-2-A	306	32	0.26	0.80	0.16	0.32	0.22	0.21
	N-2	265	28	0.25	0.79	0.16	0.32	0.22	0.21
軽量	L-1	342	23	0.17	0.67	0.13	0.26	0.19	0.18
	L-2	425	24	0.16	0.67	0.12	0.24	0.18	0.17
砕石	S-1	304	31	0.21	0.64	0.16	0.32	0.22	0.21
	S-2	401	39	0.18	0.58	0.16	0.32	0.21	0.21

\*)  $k_1 = T_0/F_c$ ,      \*\*)  $k_2 = T_0/\sqrt{F_c \cdot F_t}$ ,  
 \*\*\*) (1)  $T_0 = 0.5\sqrt{F_c \cdot F_t}$  (Mohr),      (4)  $T_0 = F_t/\sqrt{1.25m}$  (小阪)  
 (2)  $T_0 = 1.0\sqrt{F_c \cdot F_t}$  (Mörsh),       $\left[ m = (n+2+2\sqrt{n+1})/n^2 \right]$   
 (3)  $T_0 = (\sqrt{F_c/F_t} - 1) \cdot F_t$  (Leon),

図4.2で、 $k_1$ の値は、普通コンクリートで、砕石コンクリートで0.18~0.27に多く分布し、軽量コンクリートで0.16~0.22に分布している。又、強度の増加につれ、 $k_1$ の値は減少している。図4.3で、 $k_2$ の値は普通コンクリートで0.57~0.83、軽量コンクリートでは0.60~0.72に分布している。 $k_2$ の値は強度による差は小である。

4.2) 試験方法の比較 表4に図4.1の各種試験法の比較を一覧して示す。本研究で用いた割裂・圧縮組み合わせ試験法は、他の試験法に比べ、供試体の作成、セットが容易であるが、試験断面に作用する応力分布が不均等である。又、一面せん断試験法でも、補強法の簡略化により、供試体の作成が容易となり、側圧載荷の場合もバネ装置を用いて簡略化することによりセットが容易となる。今後、補強法、側圧載荷装置に関して検討する必要がある。

### 5. まとめ

割裂・圧縮組み合わせ試験法によりコンクリートのせん断強度をもとめると、普通コンクリートで、 $T_0 = 0.24F_c \sim 0.25F_c$ 、軽量コンクリートで  $T_0 = 0.16 \sim 0.17F_c$ 、砕石コンクリートで  $T_0 = 0.18 \sim 0.21F_c$  となり、コンクリートの種別によりせん断強度にかなり差が見られた。

既往の組み合わせ応力による試験法と比較すると、本実験でのせん断強度  $T_0$  はやや高いが、供試体の作成、セットが容易で試験は簡単である。

### (謝辞)

本研究は、JMCせん断ワーキンググループの研究の一貫として、せん断強度試験法のJIS原案作成のために行われたものであり、適切な御助言及び資料をいただいたJMCせん断W.G.の委員の方々に深く感謝致します。

### (参考文献)

- \*1) 東, 磯, 大久保; 昭和52年10月建築学会大会 梗概集 P135
- \*2) 東, 磯, 大久保; 昭和53年9月建築学会大会 梗概集 P183
- \*3) 小阪・谷川; 昭和44年11月建築学会東海支部報告
- \*4) 小阪・谷川; 昭和44年12月建築学会論文集 No.166
- \*5) Kupfer etc; ACI Journal Vol.66 No.8, 1967
- \*6) 藤井; 昭和52年10月建築学会大会 梗概集 P179
- \*7) 藤松阿部; 昭和52年, 昭和53年建築学会 秋会 梗概集
- \*8) 小林, 丹羽; セメント技術年報 1966, No.120
- \*9) 神山他; 材料試験連合 昭37年9月
- \*10) JMC委員会, 資料

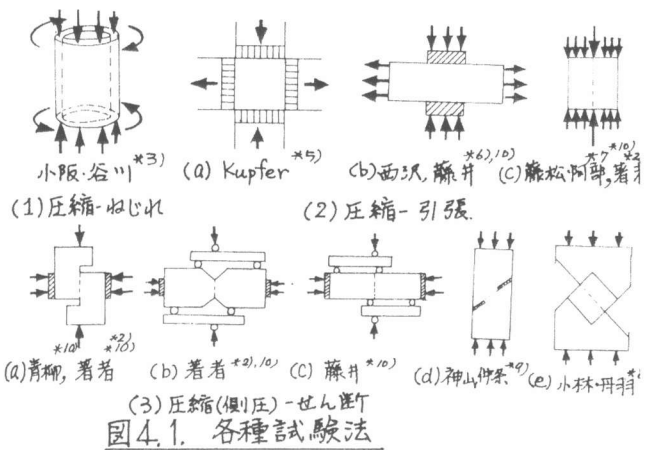


図4.1. 各種試験法

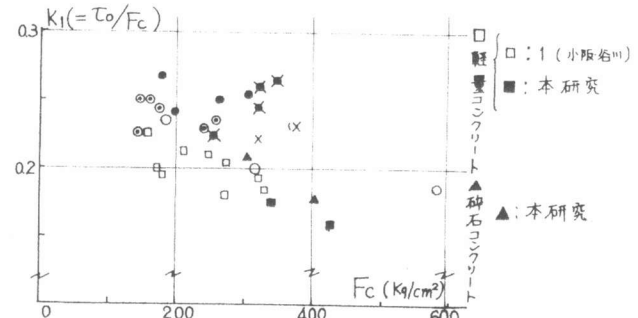


図4.2  $F_c$  と  $T_0/F_c$  との関係

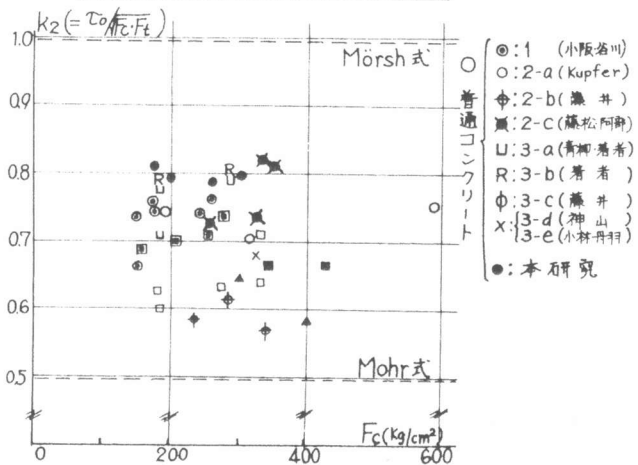


図4.3  $F_c$  と  $T_0/F_c/F_t$  との関係

表4 各種組み合わせ試験法の比較一覧

分類	組み合わせ応力の種類	供試体		セットの難易度	加力装置の種類	載荷経路	解析に用いる応力	その分布性状	研究名	
		寸法(cm)	重量(kg)							
1	圧縮-ねじり	外径21.5高さ内径12.5 67	37.0	無	アムスラーねじり試験機	圧縮一定	$\sigma_x, \tau_{xy}$	均等	小阪谷川	
2	a	20x20x5	4.6	無	比較的容易	シヤッキ2台	比例	$\sigma_x, \sigma_y$	均等	Kupfer
	b	10x10x40	9.2	埋込めねじ	比較的容易	シヤッキ2台	引張一定	$\sigma_x, \sigma_y$	均等	西沢藤井
	c	10x10x10	2.3	無	容易	アムスラー	比例	$\sigma_x, \sigma_y$	不均等	藤松阿部 著者
3	a	30x96x10	18.2	要	やや難	アムスラーとシヤッキ	側圧一定	$\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$	不均等	青柳著者
	b	20x50x10	23.0	要	難	アムスラーとシヤッキ	側圧一定	$\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$	不均等	著者
	c	10x10x40	9.2	無(重)	やや難	アムスラーとシヤッキ	側圧一定	$\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$	不均等(不均等)	藤井
	d	15x60x10	20.7	要	容易	アムスラー	比例	$\sigma_x, \tau_{xy}$	不均等	神山 神山 神山
	e	圧縮-ねじり (EL79L)	5.5x5.5x5.5	0.4	無	比較的容易	アムスラー	比例	$\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$	不明確