

論文 プレキャスト接合部におけるシアキーのせん断挙動に関する研究

乗物丈巳*1 香取慶一*2 山本直孝*3 林静雄*4

要旨: プレキャスト工法においては水平・鉛直接合部を問わず、シアキーが有効なせん断抵抗機構として多用されている。そのせん断耐力は、シアキーの形状に関わらず底面積とコンクリート圧縮強度の積に比例する形で提案されているが、実際のシアキーは、形状・寸法・配置など様々であり、せん断耐力はもちろんのこと、シアキーのせん断挙動はその形状や配置によっても変化するものと考えられる。本研究の目的は、これらシアキーの形状、配置、拘束条件を因子として取り扱い、2次元弾塑性有限要素解析およびせん断実験を行うことによって、シアキーのせん断挙動を明らかにすることである。

キーワード: プレキャスト, 接合部, シアキー, 変形拘束, 形状, 配置

1. はじめに

プレキャスト工法において実際用いられているシアキーは、形状・寸法・配置など様々であり、またシアキーに対して垂直方向の変形拘束を受けている。シアキーのせん断挙動はこれらの因子によって変化するものと考えられるが、プレキャスト接合部におけるせん断伝達の研究は、現在までに数多く報告されているにもかかわらずこれらの因子の影響を考慮した研究は数少ない[1]。本研究は、これらの因子を変動要因としたシアキーに関する2次元弾塑性有限要素解析およびせん断実験を行ない、シアキーのせん断挙動の考察を行ったものである。

2. 解析

2.1 解析概要

解析対象は実際のプレキャスト構造接合部に準拠して、先打ち部と後打ち部からなっている。シアキーの形状は図1に示すように台形を基本としたが、シアキー底辺長さ(h)と高さ(t)の比 h/t の条件から幾何学的に三角形となるものもあった。 h/t と側面角度(θ)をパラメーターとして表1に示す10体を解析対象とした。

図2に解析対象の要素分割の一例を、表2に解析に用いた各定数を示す。 h/t の変化については全解析対象で t を一定とし、 h を変化させた。解析には、2次元弾塑性有限要素法を用いた。コンクリートを弾塑性とし、要素内のひずみは一定とした。2軸応力下の構成則には、Darwin, Pecknoldによる

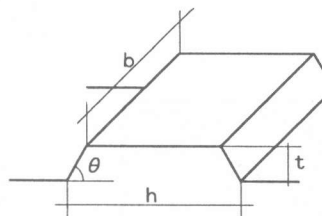


図1. シアキー形状図

表1. 解析対象一覧

試験体名	h/t	θ degree
560	5	60
545		45
530	4	30
460		60
445		45
430		30
360	3	60
345		45
260	2	60
245		45

*245は三角形

- *1 (株)竹中工務店 工修 (正会員)
- *2 東京工業大学助手 建築物理研究センター 工修 (正会員)
- *3 東京工業大学大学院 総合理工学研究科 環境物理工学専攻
- *4 東京工業大学教授 建築物理研究センター 工博 (正会員)

等価一軸ひずみに基づく直交異方性モデルを用いた [2]。接合面に相当する部分とシアキーの底面に相当する部分はクラックリンクで表現し、それぞれをクラックリンク 1、2 とし表 2 に示すように剛性と強度を定めた。ひび割れは仮定したひび割れと法線方向と接線方向のバネに作用する力の合力がコンクリートの引張強度に達したときに発生するものとした。また計算が不安定になるのを防ぐため、降伏強度の極めて低い鉄筋を接合筋として接合面に垂直に配置した。

2. 2 解析結果および考察

(1) シアキー形状の影響

解析結果一覧を表 3 に示す。尚、ここでせん断強度 (τ_{max}) は、最大耐力 Q_{max} をそれぞれのシアキー底面積 ($b \times h$) で除したものと定義する。図 3 に τ と滑り (δ) 関係について同一の h/t での θ の影響について示す。 θ が小さくなるにつれ、剛性は低くなり、最大耐力と変形性能(最大耐力時の変形) は大きくなる傾向がみられた。 $h/t \neq 5$ の場合でも同様の傾向がみられた。

図 4 に同一の θ での h/t の影響について示す。 h/t が小さくなるにつれて剛性・最大耐力共に大きくなるが逆に最大耐力時の変形は小さくなった。 $\theta \neq 60^\circ$ の場合にも同様の傾向がみられた。

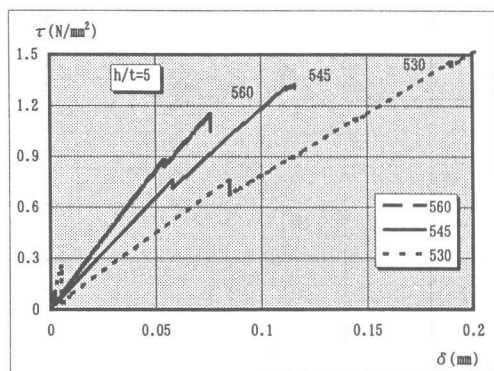


図 3. $\tau - \delta$ 関係 ($h/t=5$)

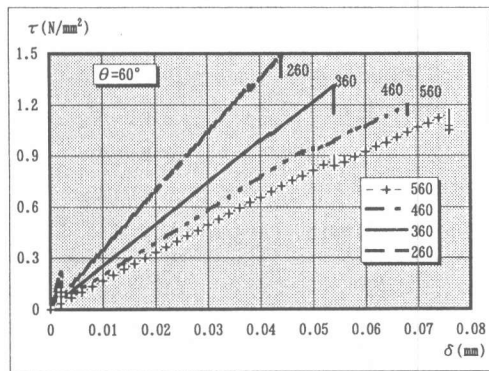


図 4. $\tau - \delta$ 関係 ($\theta=60^\circ$)

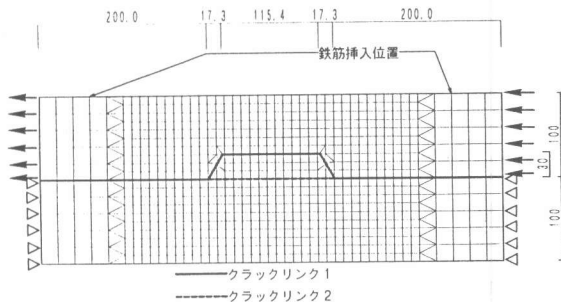


図 2. 要素分割一例 (560)

表 2. 解析に用いた各定数

コンクリート	圧縮強度 (N/mm^2)	ヤング率 (N/mm^2)	割裂強度 (N/mm^2)	ポアソン比
先打ち部	21	2.1×10^4	2.06	0.17
後打ち部	26	2.1×10^4	2.65	0.17
鉄筋	降伏強度 (N/mm^2)	ヤング率 (N/mm^2)		
	0.098	2.1×10^5	-	-
リンク 種類	リンク 設定位置	水平方向剛性 (kN/mm^3)	鉛直方向剛性 (kN/mm^3)	鉛直方向引張強度 (N/mm^2)
クラックリンク 1	図 2 実線部	0.0088	88.2	0
クラックリンク 2	図 2 破線部	88.2	88.2	2.940

表 3. 解析結果一覧

試験体名	δ_{max} mm	Q_{max} kN	τ_{max} N/mm^2
560	0.076	31.66	1.15
545	0.116	36.49	1.33
530	0.265	53.75	1.95
460	0.068	26.42	1.20
445	0.102	31.21	1.42
430	0.170	36.68	1.67
360	0.054	21.63	1.31
345	0.066	20.22	1.23
260	0.044	16.37	1.49
245	0.062	20.08	1.83

(2) 破壊性状

要素の変形状態の一例を図5に示す。この状態をシアキーの破壊状況と見なすと、ほとんどの解析モデルでシアキー底面のせん断破壊（解析上はクラックリンク2の分離によるひび割れの発生と滑り）となったが、 $\theta = 30^\circ$ で h/t が4と5のモデルは、図5の網掛け部分の様にコンクリートの圧壊と考えられるシアキー側面のコンクリートの重なり部分がみられた。一般に矩形シアキーでは、 $h/t < 5$ でシアキーのせん断破壊となると考えられている[3]が、この境界値はシアキーの形状によっては変化する可能性がある。

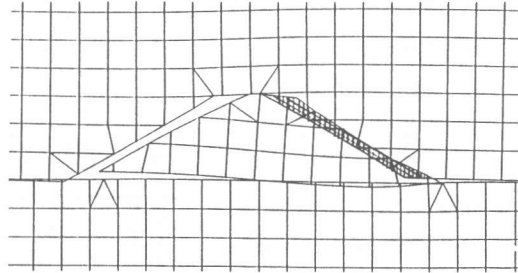


図5. 破壊状況 (430)

3. 実験

3.1 実験概要

シアキーの形状・配置・拘束条件を因子とし取り扱い、せん断実験を行なった。実験のパラメータは、解析同様 θ 、 h/t と新たに配置（個数）や拘束条件を因子とし追加した。加力装置（図6）は、逆対称一方向単調載荷（S型加力）とし、加力フレーム両側部分に平行クランクを取り付けることで、打継面に純せん断力がかかるようにした。接合面に対して垂直にベアリングとスクリージャッキを用いて接合面目開きを拘束をした。シアキーに対して垂直方向の変形拘束は、実験開始時には試験体とベアリングが軽く接触する程度（すなわち拘束力ゼロ）とし、接合面での滑り変位の発生に伴い、目開きが生じようとするのを拘束しようとする反力が自然に増加するようにした。試験体一覧を表4に、試験体の断面図の一例を図7に示す。尚、試験体はスタブから接合面に向かってコンクリートを打設した先打ち部

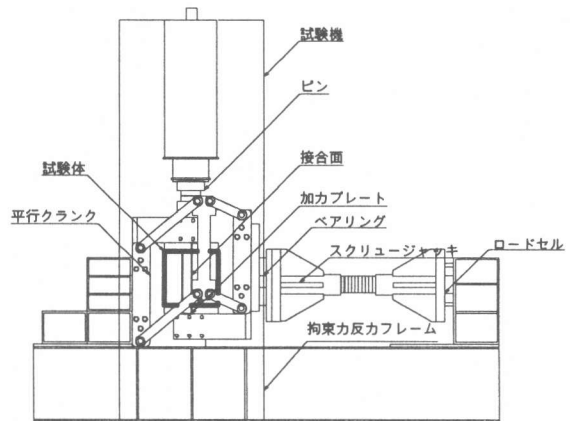


図6. 加力装置図

表4. 試験体一覧

試験体名	h/t	θ	ｼｱｷ数	拘束	試験体数
560	5	60	1	有	4
560N				無	2
545		45		有	6
545N				無	2
530		30		有	4
530N				無	2
445	4	45	2	有	4
245	2				4
2452					2
2453					3
2454					4
0	*				*
合計					36

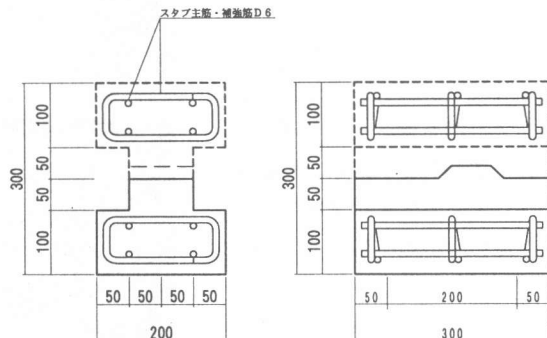


図7. 試験体断面図 (560)

分と後打ち部分からなっており、破線で示したシアキー凹面部分が先打ち部分である。試験体スタブ部分の主筋及び補強筋(各3本)に D6 を用いた。コンクリートの調合は、W/C=65%、 $F_c=20.6(N/mm^2)$ とした。

表5. 実験結果一覧

試験体名	実験値		コンクリート圧縮強度 σ_c		τ_{max}/σ_c	Qmax時の拘束力 (N/mm^2)	破壊形式
	Qmax (kN)	τ_{max} (N/mm^2)	先打ち (N/mm^2)	後打ち (N/mm^2)			
560-1	60.76	6.08	25.1	22.6	0.269	0.56	③
560-2	39.30	3.93	25.8	24.8	0.158	0.36	③
560-3	53.02	5.30	22.2	19.3	0.274	0.46	③
560-3N	64.58	6.46	22.2	19.3	0.334	-	③
560-4	59.88	5.99	25.0	22.1	0.272	0.46	③
560-4N	66.15	6.62	25.0	22.1	0.300	-	③
545-1	92.41	9.24	25.1	22.6	0.409	0.85	②
545-2	73.21	7.32	25.8	24.8	0.295	0.95	②
545-3	61.64	6.16	22.2	19.3	0.319	0.29	③
545-3N	29.30	2.93	22.2	19.3	0.151	-	④
545-4	63.11	6.31	25.0	22.1	0.286	0.72	②
545-4N	48.22	4.82	25.0	22.1	0.219	-	③
545-5	68.21	6.82	22.9	20.8	0.328	0.91	②
545-6	-	-	-	-	-	-	-
530-1	74.58	7.46	25.1	22.6	0.330	0.72	①
530-2	84.18	8.42	25.8	24.8	0.339	1.54	②
530-3	-	-	-	-	-	-	-
530-3N	-	-	-	-	-	-	-
530-4	68.01	6.80	25.0	22.1	0.308	1.47	②
530-4N	55.27	5.53	25.0	22.1	0.251	-	④
445-1	88.79	11.10	25.1	22.6	0.491	0.29	①
445-2	85.46	10.68	25.8	24.8	0.430	0.52	①
445-3	62.23	7.78	22.9	20.8	0.374	0.75	②
445-4	35.08	4.39	23.0	21.9	0.200	0.39	①
245-1	82.42	20.60	25.1	22.6	0.911	0.36	①
245-2	64.58	16.15	25.8	24.8	0.650	0.26	①
245-3	45.86	11.47	22.9	20.8	0.551	0.23	①
245-4	21.66	5.41	23.0	21.9	0.247	0.36	①
2452-1	45.37	5.67	22.9	20.8	0.273	0.52	①
2452-2	21.76	2.72	23.0	21.9	0.124	1.52	①
2453-1	80.65	6.72	22.9	20.8	0.323	0.62	①
2453-2	38.61	3.22	23.0	21.9	0.147	0.82	①
2454-1	63.11	3.94	22.9	20.8	0.190	0.59	①
2454-2	50.47	3.15	23.0	21.9	0.144	0.78	①
0-1	69.58	2.32	25.1	22.6	0.103	-	④
0-2	83.89	2.80	25.8	24.8	0.113	-	④

破壊形式：①せん断破壊②支圧部圧壊③斜めひび割れ破壊④その他の破壊

3. 2 実験結果および考察

実験結果一覧を表5に示す。

(1) 破壊性状

代表的な破壊形式の例を図8に示す。図8①はシアキー底断面でひび割れを生じ、そのままシアキー底断面が切れた《せん断破壊》、同図②はシアキー側面のコンクリートが徐々に圧壊をした《支圧部圧壊》、同図③は、スタブ方向に斜めにひび割れが生じその後シアキー底断面部分が切れた《斜めひび割れ破壊》、同図④は、シアキーから両方のスタブに斜めにひび割れが生じる等シアキー底断面部分以外で破壊を生じた《その他の破壊》と大きく分けて4タイプ確認された。①～③の破壊形式となった拘束を有する試験体の内、 $h/t \leq 4$ の試験体のほとんどがせん断破壊をした。また、拘束を有し、 $h/t=5$ の試験体の内、 $\theta \leq 45^\circ$ のときには支圧部圧壊をし、 $\theta = 60^\circ$ になると斜めひび割れ破壊を生じた。拘束無しの試験体はその他の破壊形式となり、その内、 $\theta = 60^\circ$ のものでは、同図④のようにシアキー底断面部分以外で破壊し、 $\theta \leq 45^\circ$ のものでは打ち継ぎ部の付着が切れて破壊した。実際の建築物では、拘束を有する試験体のような接合部の破壊性状をするものと思われる。

(2) コンクリート強度の影響

本実験では、何回かのバッチ

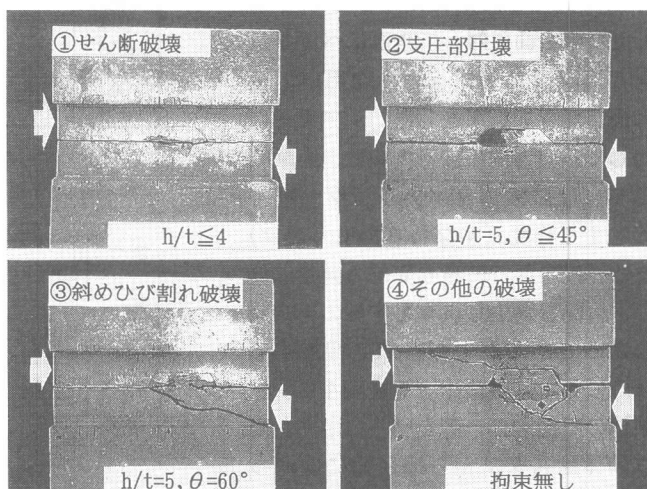


図8. 破壊形式

にわけてコンクリートを打設したのでコンクリート圧縮強度(σ_B)にばらつきが生じた。シアキーがひとつの試験体の τ_{max} と σ_B の関係を図9に示す。試験体の結果をそれぞれ種類毎にべき乗で回帰してみると支圧部圧壊(545,530)の τ_{max} は σ_B にほぼ比例し、せん断破壊(445,245)の場合、 σ_B の3乗に近い値に比例した。しかし、三角形の形状となる245の試験体は、今回使用した骨材に対してシアキーが小さく(今回使用した砂利の最大径20mmに対して、245の試験体は底辺が40mmで高さが20mmのシアキー)、 τ_{max} に大きなばらつきが生じた。全体的に σ_B に比例して τ_{max} が上昇した。

(3) シアキー形状の影響

図10に τ_{max}/σ_B と側面角度 θ の関係を示す。同図から側面角度 θ が30、45、60度と大きくなるにつれ、せん断強度が小さくなった。ここでは τ_{max}/σ_B 、つまり σ_B に対する最大耐力 Q_{max} をそれぞれのシアキー底面積($b \times h$)で除した値(τ_{max})の比で評価しているが、支圧部圧壊する試験体の場合は、 Q_{max} を斜面投影面積 A_p ($b \times t$)か支圧部の面積 A_s ($b \times t / \sin \theta$)で除した値で評価したほうが良いと思われる。そこで支圧部圧壊した試験体の支圧部の面積による評価を試みた。 $\theta=30^\circ$ と 45° の $Q_{max}/A_p \cdot \sigma_B$ と $Q_{max}/A_s \cdot \sigma_B$ の平均値を表6に示す。表から、 A_p で除した値の方が θ による影響が小さいことから、支圧部圧壊のせん断強度は、支圧部の面積 A_s よりも投影面積 A_p で除した値のほうがよりよい評価できると考えられる。

図11に τ_{max}/σ_B と h/t の関係を示す。 $h/t=2$ の試験体にかなりばらつきが生じたが平均してみると、 h/t が小さくなるにつれせん断強度が大きくなった。

(4) 配置による影響

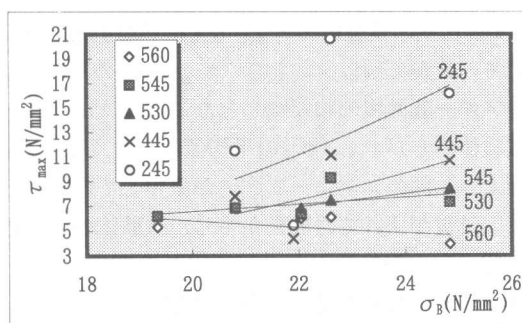


図9. $\tau_{max} - \sigma_B$ 関係

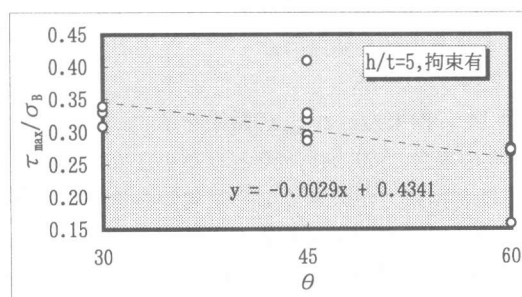


図10. $\tau_{max}/\sigma_B - \theta$ 関係

表6. $Q_{max}/(A_p \cdot \sigma_B)$ と $Q_{max}/(A_s \cdot \sigma_B)$ の値

	① $\theta=30^\circ$	② $\theta=45^\circ$	①/②
Av($Q_{max}/A_p \cdot \sigma_B$)	1.63	1.54	1.06
Av($Q_{max}/A_s \cdot \sigma_B$)	3.26	2.31	1.41

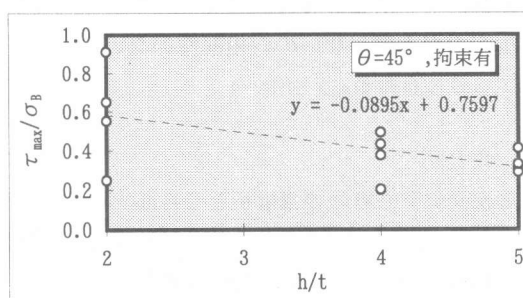


図11. $\tau_{max}/\sigma_B - h/t$ 関係

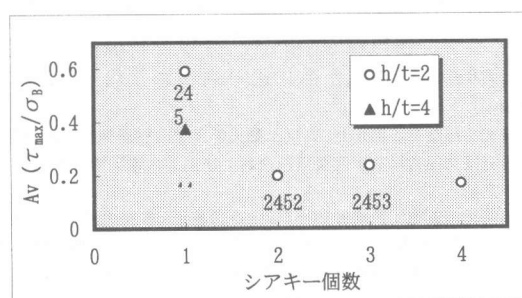


図12. Av(τ_{max}/σ) - シアキー数関係

$h/t=2$ と 4 の試験体の τ_{\max}/σ_B を平均する。その平均値とシアキー個数の関係を図 12 に示す。シアキー数が 2 個以上のとき、 τ_{\max}/σ_B の平均値はシアキー数 1 個のときより小さくなった。またシアキー底面積の和が同じとなる 445 とシアキー数 2 個の 2452 の試験体を比較すると、2452 の試験体の方が τ_{\max}/σ_B の平均値は小さくなった。図 13 にコンクリート歪み分布の一例を示す。同図より端部のシアキーに応力が集中していることがわかる。これは接合打ち継ぎ面のコンクリートの付着が切れて目開きが生じ、試験体の上側と下側とで目開き量の差が生じ、端部のシアキー 1 個に応力が集中したのが原因と考えられる。シアキーが複数の試験体から得られたシアキー 1 個あたりのせん断強度は、シアキー 1 個の試験体から得られたものよりも小さくなった。

(5) 拘束力の考察

図 14 に拘束力と τ_{\max} の関係を示す。 $h/t=5$ の場合、560, 545, 530 と θ が小さくなるほど拘束力が大きくなる傾向がある。また、 $h/t=5$ の場合では拘束力が増すと、 τ_{\max} も増える傾向にある。 $h/t \leq 4$ の場合には τ_{\max} と拘束力は相関性がなかった。 θ が小さいほど目開きが大きくなるうとし、それに対する拘束力が大きくなるとともに、シアキー側面のコンクリートの支圧強度が高くなる。445 や 245 のようにせん断破壊する試験体は、目開きが生じず拘束力が上昇しないのが相関性のない原因と考えられる。

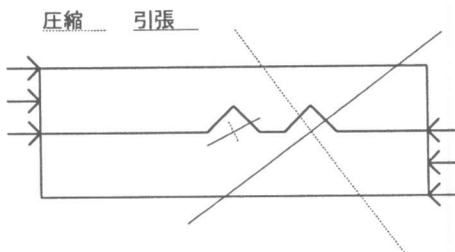


図 13. コンクリート歪み分布一例 (2452)

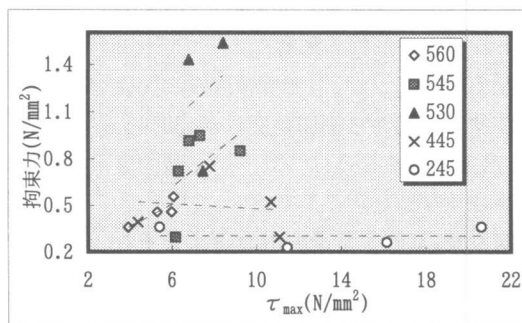


図 14. τ_{\max}/σ_B -拘束力関係

4. まとめ

2次元弾塑性有限要素解析とせん断実験より以下の知見をえた。

- 1) $\theta=45^\circ$ かつ $h/t \leq 4$ のときせん断破壊し、 $h/t=5$ かつ $\theta \leq 45^\circ$ のとき支圧部圧壊し、 $h/t=5$ かつ $\theta=60^\circ$ のとき斜めひび割れ破壊となる。
- 2) シアキー側面角度 θ が小さくなるにつれせん断強度・拘束力共に大きくなる。
- 3) h/t が小さくなるにつれせん断強度は大きくなる。
- 4) シアキーが複数の試験体から得られたシアキー 1 個あたりのせん断強度は、シアキー 1 個の試験体から得られたものよりも小さくなった。

謝辞

本研究を行なうにあたり、東京工業大学大学院林研究室の皆様にも多大な協力を頂きましたことをここに深く感謝いたします。本研究は文部省科学研究費補助金および東工大建築物理研究センター全国共同研究の援助を受けております。

参考文献

- [1] 河村・新宅：鉄筋コンクリートプレキャスト構造せん断接合部の応力と耐力について（その1、2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造系、pp.1639-1643、1976.[2] Darwin, Pecknold: Nonlinear Biaxial Stress-Strain Law for Concrete, JOURNAL OF ENGINEERING MECHANICS DIVISION, April, 1977.[3] 品川・広沢・黒正ほか：建築学構造体系 21 特殊コンクリート構造、彰国社、pp.17-21、1972.[4] 日本建築学会：プレキャスト鉄筋コンクリート構造の設計と施工、1986.[5] 乗物丈巳・香取慶一・林静雄：プレキャスト接合部におけるシアキーの形状とせん断挙動の関係に関する解析的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、C-2 構造IV、pp.835-836、1996.9