Plain Concrete の内部摩擦角と引張強度についての一考察

STUDY ON INTERNAL FRICTION ANGLE
AND TENSILE STRENGTH
OF PLAIN CONCRETE

藤田 吉夫*, 石丸 麟太郎**, 花井 重孝***, 末永 保美****

Yoshio FUJITA, Rintaro ISHIMARU, Shigetaka HANAI
and Yasuyoshi SUENAGA

In general, 37 degrees is applied for internal friction angle value (ϕ) of concrete and 8~10% value of compressive strength is for tensile strength value of it as well. However the theoretical solution of internal friction angle is calculated as 57.5 degrees by the equivalence that linear elastic theoretical solution of concrete split test is equivalent to wedge theoretical solution of it.

We experimented on partial compression test of plain concrete for making sure of this fact. As a result, it was proved that the test result well equal to wedge theoretical solutions at $\phi = 55^\circ$ and $F_t = 0.05F_c$.

KEYWORDS: Internal friction angle, Tensile strength, Wedge theory, Compressive failure, Split test,

Plain concrete

内部摩擦角、引張強度、くさび理論、圧縮すべり破壊、割裂試験

1. はじめに

筆者等は文献1において Plain concrete の支圧強度に関する「くさび理論」を発表し、その後文献2および文献3において「くさび理論」の応用として鉄筋コンクリートはり・柱のせん断強度に関する理論的解析法について述べ、一部は実験値との比較を試みた。これらの文献中ではコンクリートの内部摩擦角をコンクリートによく合うとされる $\phi = 37^\circ$ 、 $F_{tt} = F_t/F_c = 0.1$ の値を用いて結果を導いてきた。文献2において実験値と理論値の比の分布は、一律に 1.0~0.7 の範囲にあり、理論値の方がやや高めにでていることを指摘し、この原因は $F_{tt} = 0.1$ としたためと論じた。しかし、その後の考察によりこの原因として、くさび理論が上界の解であること、 ϕ の値、 F_{tt} の値の3つが考えられるが、くさび理論に立脚すると、後述するようにくさび理論と円柱の割裂テストの理論式との間の関係から、内部摩擦角は $\phi = \tan^{-1}(\pi/2) = 57.5^\circ$ となることが理論的に導かれる。

この両者の差に着目し、コンクリート（モルタル）の ϕ の値および真の引張強度と圧縮強度との関係を求めるための実験を行い実験値の統計解析をすると、くさび理論を用いた場合、 $\phi = 55^\circ$ 、 $F_{tt} = F_t/F_c = 0.05$ の時に実験値と理論値がよく一致するという結果を得たのでその結果について報告する。

また、実験の結果を用い算定した圧縮すべり角度および円柱の割裂テストに於ける引張強度の圧縮強度に対する見かけの割合等についてくさび理論を適用した結果について述べることにする。

2. Plain concrete の圧裂試験

2.1 実験の概要

(1) 試験体の形状および加力方法

Fig1 Shape and loading method of a specimen

試験体の形状はFig1に示すように150W×80L×200Hとし、熱処理材に機械加工をした上下の加力板を介して万能試験機（5 t f レンジを使用）により加力する。加力板のコンクリート側にはグリースを塗布した。

* (株) 香建築事務所

** (株) 香建築事務所 代表取締役・工博

*** 日本大学生産工学部建築工学科 専任講師・工博

**** 横浜国立大学 名誉教授・工博

Kaoru Architect Office

Kaoru Architect Office, Dr. Eng.

Lecturer, Dept. of Architecture Engineering, College of Industrial Technology, Nihon Univ., Dr. Eng.

Emeritus Prof., Yokohama National Univ., Dr. Eng.

(2) 試験体の材質、製作および養生

試験体はロット毎の材料の品質が安定するようプレミックス型のモルタルを選定し、1ロット15個が製作できる金型を用いて4週強度が270kgf/cm²となるよう水セメント比を定めて製作した後、表面に湿潤した布をかぶせ養生し、試験日まで実験室に放置した。モルタルの混合主成分は以下の通りであり、混合比は公表されていない。

- ・普通ポルトランドセメント
- ・粒度調整済乾燥砂 (S/C = 2.0)
- ・セメント系収縮補正材
- ・化学糊材 (メチルセルローズ系)
- ・高性能減水剤
- ・膨張剤

(3) 実験パラメーターおよび試験体数

実験のパラメーターはくさび理論に於ける β の値とし、Fig1の2aの値を変動させて行う。試験のシリーズ名、 β 、2a、加力面積Sの値および試験体数をTable1に示す。試験体数はt分布の変動が少なくなる $n = 38 \sim 40$ とした。また、圧縮試験用のテストピースは1ロット当たり100 $\phi \times 200H$ で6個製作した。

Table1 Experimental parameter

Series	β H/2a	2a mm	S cm ²	Numbers
A	20.0	10	8.0	40
B	14.3	14	11.2	40
C	10.0	20	16.0	40
D	8.0	25	20.0	40
E	5.0	40	32.0	40
F	4.0	50	40.0	38
G	3.45	58	46.4	38
H	2.94	68	54.4	38
I	2.5	80	64.0	38
J	2.0	100	80.0	38

(4) 加力実験

実験は1993年4月から1994年12月にかけて行った。加力は1ロット毎にA~Jシリーズについて行い、A~Eシリーズについて各40体、F~Jシリーズについて38体について加力した。材令は28日を標準とし、試験体の加力に先立ちテストピースの圧縮試験を行い試験体の圧縮強度を求めた。

2.2 実験結果

(1) くさび破壊と圧縮すべり破壊

実験結果の解析をするに当たり、加力条件により破壊形式が異なるため、くさび破壊と圧縮すべり破壊形式について述べる。くさび理論を文献1から再掲すると、圧裂試験における部分圧縮強度 p の解は $t = \cot \alpha$ をパラメーターとして(1)式により与えられる。

(記号はFig3参照)

$$p = \frac{A t^2 + B t + C}{t - \mu} \quad (1)$$

$$\text{ここに、} A = \tau_0 - \mu F t \quad (2)$$

$$B = (\mu \beta - 1) F t \quad (3)$$

$$C = \tau_0 + \beta F t \quad (4)$$

$$\tau_0 = \frac{(1 + \mu^2)^{1/2} - \mu}{2} F_c$$

$$\mu = \tan \phi$$

$$\beta = h/a$$

(1)式の極小値を与える t_0 は $t > \mu$ の範囲で

$$\frac{dp}{dt} = 0$$

より、

$$t_0 = \mu + \{ \mu^2 + (B\mu + C)/A \}^{1/2} \quad (5)$$

となる。くさびが成立するための幾何学的条件は

$$\beta \geq t_0 \quad (6)$$

であるから(6)式の範囲ではくさび破壊形式となって部分圧縮強度は(5)式を(1)式に代入して、

$$p_{min} = B + 2A\mu + 2\{(A\mu)^2 + AB\mu + AC\}^{1/2} \quad (7)$$

なる。このとき β の値は(5)式を(6)式に代入して、

$$\beta \geq \frac{K + \{K^2 + 4A^2\}^{1/2}}{2A} \quad (8)$$

$$\text{ここに、} K = 2A\mu + \mu^2 F t + F t \quad (9)$$

となり、くさび破壊を生ずる β の下限値 β_0 は ϕ と $F t t$ をパラメーターとしてTable2のように算定される。

Table2 Limit value of β ($=h/a$)

ϕ deg		Ftt (Ft/Fc)					
		0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
37	2.24	2.31	2.39	2.47	2.56	2.66	
39	2.36	2.45	2.54	2.64	2.75	2.87	
41	2.50	2.60	2.71	2.83	2.96	3.12	
43	2.66	2.77	2.90	3.05	3.22	3.42	
45	2.83	2.97	3.14	3.32	3.54	3.80	
47	3.03	3.21	3.41	3.65	3.95	4.30	
49	3.27	3.49	3.75	4.07	4.48	5.01	
51	3.54	3.83	4.18	4.64	5.24	6.08	
53	3.88	4.26	4.75	5.44	6.42	7.91	
55	4.30	4.83	5.57	6.70	8.58	12.3	
57	4.85	5.63	6.86	9.04	14.0	35.0

Fig2 β_0 -Ftt relation curve

Fig 3 Mode of fracture in partial compression according to "Wedge Theory" and stress relations along fracture lines

つぎに、 $\tan^{-1} \beta < \theta$ の場合は文献 3 で述べたように破壊形式は Fig 4 に示す圧縮すべり破壊となり、 p の値は (10) 式のように求められる。

$$p = \frac{\tau_0 \cdot \cos \phi}{\cos \theta \cdot \sin (\theta - \phi)} \quad (10)$$

(10) 式の分母は、 $2\theta - \phi = 90^\circ$ のとき最大値 $(1 - \sin \phi) / 2$ となり、 p の下限値は、モール・クーロンの破壊条件を適用して、

$$p_{\min} = \frac{2 \tau_0 \cdot \cos \phi}{1 - \sin \phi} = F_c \quad (11)$$

となり、このときのすべり角は、

$$\theta = 45^\circ + \phi / 2 \quad (12)$$

で与えられる。

$\beta \geq \beta_0$ のときは (5) 式、 $\beta < \beta_0$ のときは (10) 式 ($\theta = \tan^{-1} \beta$ として) を用いて、 $\phi = 5.5^\circ$ 、 $F_{tt} = 0.05$ のときの p/F_c と β ($\beta = 1.5 \sim 20$) の関係を図示すると Fig 4 (b) 図が得られる。

(10) 式では β が 2.5 以下になると、 p/F_c の値は急激に上昇するようになる。しかし、実験の結果ではこのような現象はみられず、文献 4 においても $\beta = 2 \sim 1.5$ 程度まではなだらかな上昇傾向をたどっていることが確認されている。

$\tan^{-1} \beta$ が (12) 式によって得られるすべり角度 θ 以下になるとすべり角は一定値 θ となるとして Fig 4 (a-1) に示すようなすべり線を想定すると (11) 式で示されるように $p/F_c = 1$ となる。この関係は Fig 4 (a-2) に示す β まで続き、この β 以下では両側のすべり線が同一の縦方向切断面内に存在しない範囲ができるため破壊に要する荷重が増大し、 p/F_c の値が上昇していくと考えられる。 $\phi = 5.5^\circ$ 、 $F_{tt} = 0.05$ のときに Fig 4 (a-2) において $\beta = 1.59$ となる。

以上の考察により実験値の解析に当たっては、 $\beta \geq \beta_0$ のときは (5) 式、 $\beta < \beta_0$ のときは (10) 式、 $\tan^{-1} \beta < \theta$ のときは $p/F_c = 1$ として理論値を算定することとする。

Fig 4 Failure mechanism in pure compression of a rectangular disk

(a-1,2) Slip failure line at $\tan^{-1}(h/a) < \theta$

(b) $p/F_c - \beta$ relation curve

(2) 実験結果

圧裂試験は 26 ロット、10 シリーズ、合計 390 個の試験体について行った。各ロットのテストピースの圧縮試験結果の分布状況を Fig 2 1、Fig 2 2 に示す。

Case 1 は 1 ~ 12 ロットまでの 72 体のテストピースの試験結果で、水セメント比を 6.0 % とした。Case 2 は 13 ~ 26 ロットまでの 84 体のテストピースの試験結果で水セメント比を 6.5 % とした。水セメント比を変えたのは気温の変動による施工性と強度の補正を考慮したためである。圧裂試験結果の解析にはテストピース 6 体の上下値をカットした 4 体の圧縮強度の平均値を用いた。

Fig 5 ~ Fig 9 に圧裂テストの実験結果を縦軸に p/F_c 、横軸に β をとって表示する。図中の黒点は実験結果の分布を示し、太線の上下は実験結果の平均値から母平均の信頼区間を t -検定により信頼率 95 % で推定した上下限値を結んだ曲線、中央が実験結果の平均値を結んだ曲線をそれぞれ示している。細実線は前述の理論式を用いて算定した結果である。

実験結果との比較に用いた理論値のパラメータの組合せは、内部摩擦角は、 $\phi = 3.7^\circ \sim 5.7^\circ$ の間で 2° ピッチ毎に 11 種類、引張強度比は、各 ϕ に対して $F_{tt} = 0.01 \sim 0.9$ 間で 0.01 ピッチで 9 種類の合計 99 種類である。この内、実験値の t -検定における信頼率 95 % の間に β の全部について合格する組合せは、唯一 $\phi = 5.5^\circ$ 、 $F_{tt} = 0.05$ の場合であり、このときの理論値に対する実験結果の値を F -検定した結果は、5 % の有意差で β の値によって実験値がばらつくことはなかった。

この結果から

1 : 母平均の推定値が最もよく適合するのは、

$\phi = 5.5^\circ$ 、 $F_{tt} = 0.05$ のものである。

2 : 内部摩擦角 ϕ はくさび理論による解

$\phi = 5.7.5^\circ$ に近づくほど母平均の推定分布が理論解に近づいていることが分かった。

(* 実験結果の図表を挟み、後に続く)

Fig 5 $\phi = 37\text{deg}$

Fig 6 $\phi = 45\text{deg}$

Fig 7 $\phi = 51\text{deg}$

Fig 8 $\phi = 55\text{deg}$

Fig 9 $\phi = 57\text{deg}$

Fig 10 $\phi = 55\text{deg}$, $Ft = 0.05Fc$

Fig 1 1 A series

Fig 1 2 B series

Fig 1 3 C series

Fig 1 4 D series

Fig 1 5 E series

Fig 1 6 F series

Fig 1 7 G series

Fig 1 8 H series

Fig 1 9 I series

Fig 2 0 J series

Fig 2 1 Fc histogram
of test pieces
Case 1 ($x=60\%$)

Fig 2 2 Fc histogram
of test pieces
Case 2 ($x=65\%$)

Fig 2 3 Photograph of test results

Table 3 Experimental data

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
	β 20.00	β 14.30	β 10.00	β 8.00	β 5.00	β 4.00	β 3.45	β 2.94	β 2.50	β 2.00	
	As 8.0	As 11.2	As 16.0	As 20.0	As 32.0	As 40.0	As 46.4	As 54.4	As 64.0	As 80.0	
ロット	σ/Fc	σ/Fc	σ/Fc	σ/Fc	σ/Fc	σ/Fc	σ/Fc	σ/Fc	σ/Fc	σ/Fc	Fc
1	2.67	2.25	1.61	1.10	0.94	0.97	0.96	1.01	1.03	1.07	332.8
1	2.07	1.90	1.55	0.97	0.89						332.8
2	2.39	1.91	1.58	1.45	0.86	0.96	0.86	0.92	1.02	0.98	313.8
2						0.89	1.00	0.89	1.00	0.95	313.8
3	1.61	1.62	1.38	1.49	0.98	0.86	0.84	0.82	0.76	0.90	322.1
3	1.87	1.62	1.46	1.33	0.93						322.1
4	2.55	2.18	1.76	1.51	1.17	1.00	0.93	0.96	0.98	0.98	320.2
4						1.02	0.97	0.92	0.96	0.99	320.2
5	2.68	2.26	1.75	1.54	1.09	0.94	0.86	0.93	0.87	0.98	305.6
5	2.48	2.18	1.87	1.38	1.00						305.6
6	2.71	2.12	1.88	1.65	1.24	1.13	1.09	1.04	1.01	1.06	253.8
6						1.10	1.02	1.00	1.03	1.01	253.8
7	2.67	2.15	1.80	1.60	1.21	1.02	1.05	1.04	1.04	0.99	298.6
7	2.35	1.91	1.86	1.62	1.19						298.6
8	2.59	2.14	1.73	1.62	1.16	1.03	1.02	1.00	1.01	0.98	287.3
8						1.02	1.06	1.04	0.95	0.91	287.3
9	3.23	2.89	2.21	1.91	1.41	1.23	1.16	1.05	1.11	0.96	297.8
9	3.37	2.60	2.16	1.96	1.39						297.8
10	2.63	2.21	2.02	1.71	1.23	1.06	1.01	1.01	0.97	0.90	299.4
10						1.07	1.00	0.95	0.93	0.95	299.4
11	2.48	2.16	1.73	1.38	1.07	1.02	0.92	1.01	0.92	0.97	290.0
11	2.56	2.16	1.71	1.55	1.15						290.0
12	2.68	2.30	1.85	1.61	1.15	1.02	1.00	0.99	1.00	0.99	291.0
12						0.99	0.97	0.99	1.00	0.98	291.0
13	2.94	2.26	1.65	1.56	1.26	1.12	1.06	1.00	1.03	0.97	259.0
13	3.05	2.41	1.78	1.42	1.31						259.0
14	2.74	1.98	1.59	1.37	1.22	1.09	1.01	1.02	1.01	1.03	274.8
14						1.06	1.02	1.02	1.01	1.03	274.8
15	2.31	1.99	1.67	1.56	1.07	0.97	0.86	0.86	0.92	0.94	318.2
15	2.40	2.05	1.56	1.54	1.09						318.2
16	2.76	2.03	1.65	1.37	1.19	1.00	1.00	0.98	0.98	1.00	315.1
16						0.99	1.03	0.97	1.00	0.99	315.1
17	2.44	2.12	1.61	1.40	1.33	1.10	1.01	1.02	0.97	0.96	262.3
17	2.58	2.10	1.60	1.51	1.30						262.3
18	2.93	2.31	1.70	1.47	1.23	1.03	1.13	1.01	1.00	0.99	274.2
18						1.06	1.05	0.99	1.00	1.00	274.2
19	2.72	2.14	1.60	1.59	1.20	1.07	1.02	0.99	0.98	0.96	260.3
19	2.84	2.21	1.64	1.64	1.21						260.3
20	3.13	2.37	1.90	1.67	1.38	1.19	1.18	1.16	1.17	1.14	265.9
20						1.18	1.20	1.14	1.18	1.13	265.9
21	2.49	1.92	1.52	1.33	0.98	0.87	0.91	0.86	0.89	0.89	301.7
21	2.37	1.97	1.45	1.20	1.02						301.7
22	2.68	2.12	1.68	1.48	1.13	0.99	0.97	1.02	0.98	0.99	266.3
22						0.99	1.00	0.97	1.00	1.00	266.3
23	2.85	2.24	1.72	1.51	1.18	1.05	1.05	1.00	1.01	1.03	263.1
23	2.72	2.14	1.80	1.60	1.24						263.1
24	2.88	2.32	1.85	1.70	1.24	1.07	1.02	0.98	1.00	0.98	267.0
24						1.06	1.05	1.00	0.99	0.99	267.0
25	2.81	2.36	1.80	1.67	1.26	1.06	0.99	0.97	0.93	0.95	273.2
25	2.66	2.24	1.70	1.60	1.23						273.2
26	2.68	2.13	1.53	1.43	1.15	0.99	0.97	0.97	0.97	0.97	267.3
26	2.81	2.02	1.50	1.40	1.12						267.3
平均 μ	2.634	2.150	1.710	1.510	1.160	1.033	1.007	0.986	0.989	0.986	1.427
分散 σ^2	0.105	0.049	0.031	0.034	0.018	0.006	0.007	0.004	0.005	0.003	
n	40	40	40	40	40	38	38	38	38	38	390
偏差平方和	4.204	1.965	1.223	1.346	0.711	0.230	0.254	0.158	0.189	0.102	10.382
不偏分散 V	0.108	0.050	0.031	0.035	0.018	0.006	0.007	0.004	0.005	0.003	0.027
$\sqrt{V}$	0.328	0.224	0.177	0.186	0.135	0.079	0.083	0.065	0.071	0.052	
tn-1(0.05)	2.023	2.023	2.023	2.023	2.023	2.026	2.026	2.026	2.026	2.026	
95%信頼区間上限	2.739	2.222	1.767	1.569	1.203	1.059	1.034	1.008	1.012	1.004	
95%信頼区間下限	2.529	2.078	1.654	1.450	1.117	1.007	0.979	0.965	0.965	0.969	

Fig1 0は $\phi = 55^\circ$ 、 $F_{tt} = 0.05$ の値を用いた計算値と実験の平均値を比較したものであり非常によく一致していることが分かる。

Fig1 1～Fig2 0は各シリーズの実験結果のヒストグラムに実験値の平均値と分散を用いて正規分布を算定した結果を合わせて図示したもので、相対度数を縦軸に用いている。

Fig2 3の写真は各シリーズの試験体の代表的破壊例を示す。理論的には $\phi = 55^\circ$ 、 $F_{tt} = 0.05$ の場合は、A～Eまでがくさび破壊（割裂形の破壊）、F～Jは圧縮すべり破壊（圧壊形の破壊）となっているが実験結果は概ねこの事実合っている。

Table3に実験結果の一覧を示す。

3. 理論的背景

コンクリートの引張強度を推定する手段として円柱の割裂試験（JISA1113）が行われているがこの試験方法にくさび理論の適用を試みる。すなわち、くさび理論において支圧面の幅 $2a$ を小さくしていくと円柱の割裂試験と同様の結果が得られるはずである。（7）式を変形して

$$p/\beta = (\mu - 1/\beta) F_{tt} + 2A\mu/\beta + 2\{(A\mu/\beta)^2 + (A\mu^2/\beta - A\mu/\beta^2 + (A\tau_0/\beta^2 + A F_{tt}/\beta)\}^{1/2} \quad (13)$$

従って、

$$\lim(p/\beta) = \mu F_{tt} \quad (\beta \rightarrow \infty) \quad (14)$$

が得られる。すなわち β が大きい範囲では近似的に

$$p/\beta = \mu F_{tt} \quad (15)$$

が成立する。

（15）式をさらに変形すると

$$\beta = H/2a, H = d, P = 2ap$$

より

$$p/\beta = 2ap/H = P/d = \mu F_{tt} \quad (16)$$

となる。

一方割裂試験のコンクリートの引張強度は

$$F_{t'} = 2P/\pi d \quad (17)$$

であるから、（16）（17）式から P/d を消去して、

$$\mu = \pi F_{t'} / 2 F_{tt} \quad (18)$$

ここで、 $F_{t'} = F_{tt}$ とすれば、

$$\mu = \pi / 2 \quad (19)$$

が得られ、内部摩擦角 ϕ は

$$\phi = \tan^{-1}(\pi/2) = 57.5^\circ \quad (20)$$

となり、実験により得られた内部摩擦角 $\phi = 55^\circ$ は理論解にほぼ近い値となっていることが分かる。

4. 実験値の適用例

実験により求められた、 $\phi = 55^\circ$ 、 $F_{tt} = 0.05$ をいくつかの命題に適用する。

4. 1 真の一軸圧縮強度

真の一軸圧縮強度は、（12）式に ϕ の値を代入して

$$\theta = 72.5^\circ$$

底面の径と高さの比が

$$H/d = \tan(72.5^\circ) = 3.17$$

程度で与えられると考えられる。

さて、従来用いていた $\phi = 37^\circ$ のときは、 $\theta = 45^\circ + 37^\circ / 2 = 63.5^\circ$ 、 $H/d = \tan(63.5^\circ) = 2.01$ となり、現行のコンクリート強度試験用のテストピースの高さ・径比に一致している。しかし、破壊面が $\phi > 37^\circ$ の場合はテストピースの圧縮強度（の最小値）は端面の拘束効果によって上昇することになる。

既往の研究（文献5）によれば、一軸圧縮強度はテストピースの H/d によって変化する、一般的に H/d が増加すると圧縮強度は低下するが、 $H/d = 3 \sim 4$ 以降は概ね一定となると報告されている。上記の算定値を受入れるとすればこの現象が概念的にはあるが理解することが出来る。

4. 2 円柱による割裂試験

米国における円柱割裂試験規準（ASTM -C649-62T）で使われる試験片寸法、 $2a = 0.5 \text{ in}$ 、 $d = 6 \text{ in}$ において、 $F_{t'}/F_c$ の値は平均0.1とされている（1軸引張強度は0.085～0.10 F_c ）（文献6）。今回の実験で得られた $\phi = 55^\circ$ 、 $F_{tt} = 0.05$ を用いて（7）式で求めた p を F_c で無名数化し $2a$ を乗じて P とし、（17）式に代入すると割裂試験の見かけの引張強度比

$$F_{tt'} = F_{t'}/F_c$$

を求めることができる。

このようにして求めた β と $F_{tt'}$ の値を Fig2 4に示す。この図から計算結果は $\beta = 12$ の時 $F_{tt'} = 0.101$ となり、上記の実験結果と一致する。

Fig2 4 $\beta - F_{tt'}$ relation curve

4. 3 修正モール・クーロンの破壊基準

引張側を切断したモール・クーロンの破壊基準は、Fig2 5のようにならわされ、圧縮を正として $\sigma_3 > \sigma_1$ のとき、破壊基準式および定数は

$$\sigma_3 \frac{1 - \sin \phi}{2 C \cos \phi} - \sigma_1 \frac{1 + \sin \phi}{2 C \cos \phi} = 1 \quad (21)$$

$$F_c = \frac{2 C \cos \phi}{1 - \sin \phi} \quad (22)$$

$$C = \frac{F_c}{2} \frac{1 - \sin \phi}{\cos \phi} = \tau_o \quad (23)$$

$$\sigma_o = \frac{C \cos \phi - F_t}{1 - \sin \phi} \quad (24)$$

$$r = \sigma_o + F_t \quad (25)$$

となる。(23)式と(25)式に ϕ および F_{tt} を代入して、 $r \cos \phi$ と C との比をとると、

$$\frac{r \cos \phi}{C} = \frac{0.27352 F_c \cos \phi}{0.15765 F_c} = 0.995$$

引張側の円弧は圧縮側の破壊基準直線

$$|\tau| = \tan \phi \cdot \sigma + C \quad (26)$$

と、縦軸(τ 軸)上でほぼ接していることになり、これはモール・クーロンの基準が点(0, C)、(0, -C)で直線(26)に接する円弧で切断されていることを示す。

Fig 2 5 Mohr-Coulomb's modified failure envelope

4. 4 RC柱の実験結果

Fig 2 6、Fig 2 7は文献7の資料を基にRC柱の実験結果をくさび理論に適用した場合の実験値と理論値の比較を示したものである。Fig 2 6は、 $\phi = 37^\circ$ 、 $F_{tt} = 0.1$ とし、Fig 2 7は $\phi = 55^\circ$ 、 $F_{tt} = 0.05$ として求めたものである。この結果から、実験値と理論値の比の分布は、特に理論値による $Q/B \cdot D \cdot F_c \geq 0.1$ の範囲で、1.1~0.7の範囲から1.2~0.8の間に変化し、分布状況が改善されたことが分かる。

5. むすび

Plain concrete の圧裂試験の結果、 $F_c = 240 \sim 345 \text{ kgf/cm}^2$ (テストピースの圧縮試験結果の分布範囲)の範囲で、コンクリート(モルタル)の内部摩擦角 ϕ および引張強度の1軸圧縮強度に対する比 F_{tt} は、 $\phi = 55^\circ$ 、 $F_{tt} = 0.05$ のときにくさび理論による解によく一致することが分かった。この結果は円柱の割裂試験の引張強度の近似理論解とくさび理論解の等置により求められる内部摩擦角 $\phi = 57.5^\circ$ にほぼ一致する。

Fig 2 6 RC柱の実験結果と理論値
 $\phi = 37^\circ$ 、 $F_{tt} = 0.1$ の場合

Fig 2 7 RC柱の実験結果と理論値
 $\phi = 55^\circ$ 、 $F_{tt} = 0.05$ の場合

6. 謝辞

本実験は日本大学生産工学部建築工学科、花井研究室において行ったもので、卒論生諸兄の全面的なご協力を得ましたことを記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 末永保美、石丸麟太郎：組み合わせ応力を受けるコンクリート材の動力学的解析(その3)、日本建築学会論文報告集 第220号 pp1~7 1974.4
- 2) 末永保美、石丸麟太郎：組み合わせ応力を受けるコンクリート材の動力学的解析(その4)、日本建築学会論文報告集 第221号 pp9~16 1974.7
- 3) 浅川敏雄、石丸麟太郎、吉田宏、末永保美：高層壁式プレキャスト鉄筋コンクリート造のピロティに用いる鋼管巻きRC柱のせん断強度に関する研究、日本建築学会構造系論文集 第460号 pp143~152 1994.6
- 4) 野口貴文、友澤史紀：高強度コンクリートの圧縮力学特性に及ぼす供試体寸法・形状の影響、日本建築学会構造系論文集 第473号 pp19~28 1995.7
- 5) コンクリート工学ハンドブック 朝倉書店 pp277,278 1972年
- 6) W.F.Chen：コンクリート構造物の塑性解析 pp84,320 丸善株式会社 1985.7
- 7) 広沢雅也：建築研究資料 No2 既往のRC柱実験資料 建設省建築研究所 1973

(1996年6月3日原稿受理, 1996年12月12日採用決定)