

# RC・PC 円筒体のせん断挙動に関する理論的考察

武田 寿一 大内 一  
山口 恒雄 中山 達雄

## Theoretical Study on Shear Behaviors of RC and PC Cylinders

Toshikazu Takeda Hajime Ohuchi  
Tsuneo Yamaguchi Tatsuo Nakayama

### Abstract

The paper describes the results of an investigation to examine the applicability of a theory proposed by Collins to several types of cylindrical reinforced concrete structures in shear, such as PCCV and RC silo under torsional or horizontal load. There are two remarkable features in the Collins theory: (1) the stress transfer mechanism to transmit shear stresses across existing cracks, and (2) the failure criterion of concrete as a function of maximum shear strain. As the result of application of the theory to these test models, it was found that the theory is not appropriate for the RC silo of comparatively low strength because of the relatively great influences of the existence of longitudinal cracks caused by internal pressure and the effects of crack planes on the stress transfer mechanism governing shear behavior. However, it was confirmed that Collins' theory is effective in predicting not only nonlinear responses, but also the ultimate loads of PC structures with relatively high shear strength.

### 概 要

本研究は近年発表された Collins 理論を既に行なわれた PCCV 振り加力試験体, 同水平加力試験体, 及び大型サイロ振り加力試験体に Truss 理論とあわせて適用し, その有効性を検討したものである。当理論は主歪と主応力方向が一致するという仮定条件のもとに, 応力と歪に関するモール円を用いた簡潔な理論展開がなされている。特に興味ある点は, (1)ひび割れ面での応力負担を考慮していることからひび割れ後一般に主応力方向は変動する。(2)コンクリート圧縮斜材の破壊をせん断歪の関数として与えていることであって, 従って部材の耐力は縦横両鋼材の降伏かコンクリート斜材の破壊で決まる事になる。

適用の結果, 比較的低強度 RC の試験体については内圧による縦ひび割れの存在やひび割れ面の寄与等が相対的に大きな影響を与え, 充分な対応が得られないし, 過大補強の試験体についてもその最終破壊を予測出来なかったが, 比較的せん断強度の高い試験体については最終破壊まで含めて当理論の予測は満足いくものであり, その有効性が示された。

### 1. 序

近年 RC 部材のせん断研究は多数行なわれているが合理的な理論を見つける事は困難な様である。従ってせん断設計という段になると, おおむねトラス理論に基礎を置いているのが現状であろう。しかしながらトラス理論は強度上 Conservative な結果を与え, 特にせん断補強量の少ない部材や, 縦横補強量に差異のある部材に関して過少評価する傾向がある。この様な背景の中にあって, 近年発表された Collins 理論<sup>1)</sup>は, (1)ひび割れ面での応力伝達を考慮, (2)コンクリートの破壊で決まるせん断破壊をも予測する, という特長を有しており注目に値す

ると考える。

そこで既に実施された関西電力(株)委託 PCCV せん断試験<sup>2)3)</sup>, 日本原子力発電(株)委託 PCCV~1/30 模型試験<sup>4)</sup>, 及び大型サイロ模型ねじり加力試験<sup>5)</sup>に対して当理論を適用し, トラス理論によるものとあわせて結果の対応を試みる事にした。

### 2. Collins 理論

Collins のせん断理論 (The Diagonal compression Field Theory) はせん断と軸力のみを受ける RC, PC 梁について展開されたものであり, 鋼材降伏後の挙動についてはスターラップの降伏が先行し, その後主鉄筋の降

伏、或いはコンクリート斜め圧縮材の破壊によってせん断耐力が決定するとしたものである。(1) 主歪と主応力方向が一致、(2) コンクリートは外力の如何にかかわらず、常に最大主応力0、という仮定条件に立脚して、力の釣合はモールの応力円、適合条件はモールの歪円より簡潔な理論展開がなされている。特に興味ある点は一方向の鋼材が降伏してもひび割れ面上に応力が作用し、その結果主応力方向が変動してせん断耐力は上昇するところにある。コンクリート斜め圧縮材の破壊については、斜めひび割れを介して圧縮力の伝達されるゾーンの存在を認め、部材の破壊を論じる時これがクリティカルになるものとして、その破壊強度が変形(せん断歪)の関数となる破壊条件、式(8)を与えている。

ここでは梁を対称にした当理論を若干拡張し、2軸連続体に適用出来るものとした。

2.1. 力の釣合

釣合式よりコンクリート応力を求める。図-1より、 $\Sigma P_{sx}\sigma_{sx} = \sigma_{cx} + \sigma_x^0 \dots(1)$   
 $\Sigma P_{sy}\sigma_{sy} = \sigma_{cy} + \sigma_y^0 \dots(2)$

ここに、

$P_{sx}, P_{sy}$ : 鉄筋比

$\sigma_{sx}, \sigma_{sy}$ : 鉄筋応力度

$\sigma_{cx}, \sigma_{cy}$ : コンクリート

応力度

$\sigma_x^0, \sigma_y^0$ : 軸応力度

又軸応力、鉄筋応力については引張を正、コンクリート応力については圧縮を正とする。

2.2. モールの応力円

コンクリートは No-tension と仮定する事から図-2を参照して、

$$\sigma_{cy} = \tau_{xy} \tan \alpha \dots(3)$$

$$\sigma_{cx} = \tau_{xy} / \tan \alpha \dots(4)$$

$$\sigma_{cD} = \sigma_{cx} + \sigma_{cy} = \tau_{xy} (\tan \alpha + 1 / \tan \alpha) \dots(5)$$

2.3. モールの歪円

主応力と主歪の方向が一致するという仮定より、図-3の幾何学的関係を考慮して、

$$(\gamma_{xy}/2) \tan \alpha = \epsilon_x + \epsilon_D \quad (6)$$

$$(\epsilon_y + \epsilon_D) \tan \alpha = \gamma_{xy}/2 \quad (7)$$

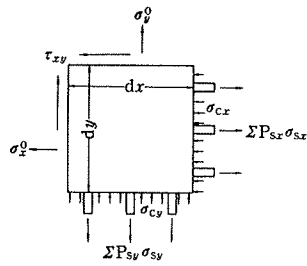


図-1 作用応力

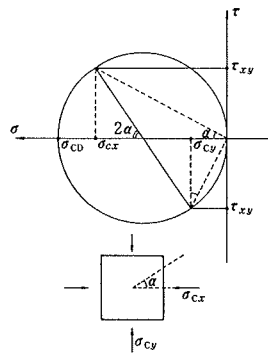


図-2 モールの応力円

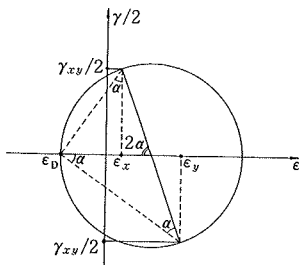


図-3 モールの歪円

(7)式を(6)式に代入して

$$\tan^2 \alpha = (\epsilon_x + \epsilon_D) / (\epsilon_y + \epsilon_D) \dots(8)$$

が得られる。

2.4. 弾性応力-歪関係

鋼材とコンクリートの弾性応力-歪関係(1軸)を、

$$\sigma_{sx} = E_{sx} \epsilon_x \leq \sigma_{sx}^Y \dots(9) \quad \sigma_{sy} = E_{sy} \epsilon_y \leq \sigma_{sy}^Y \dots(10)$$

$$\sigma_{cD} = E_c \epsilon_D \leq f_c \dots(11)$$

と規定する。ここに  $E_s, E_c$  はそれぞれ鋼材、コンクリートのヤング係数、 $\sigma_{sx}^Y, \sigma_{sy}^Y$  は鋼材降伏点応力度とする。尚降伏後はすべて完全塑性とする。

2.5.  $\tau$ - $\gamma$  関係-弾性(ひび割れ発生前)

弾性時は当理論によらず、次式で与える。

$$\tau_{xy} = G_c \gamma_{xy} \dots(12) \quad (\text{ここに } G_c: \text{コンクリートせん断弾性係数})$$

2.6.  $\tau$ - $\gamma$  関係-鋼材が弾性又は一部降伏の時

(1)式に(9)、(4)式を代入して、

$$\epsilon_x = (\tau_{xy} / t + \sigma_x^0 - \mu_x) / E_c \lambda_x \dots(13)$$

ここに、 $\lambda_x = \Sigma P_{sx} (E_{sx} / E_c)$ 、 $\mu_x = \Sigma P_{sx} \sigma_{sx}^Y$ 、 $t = \tan \alpha$  で  $\Sigma P_{sx} E_{sx}$ 、 $\Sigma P_{sx} \sigma_{sx}^Y$  はそれぞれ弾性状態、及び降伏した鋼材に対する総和を表わす。

y方向についても(2)式に(3)、(10)式を代入して、

$$\epsilon_y = (\tau_{xy} t + \sigma_y^0 - \mu_y) / E_c \lambda_y \dots(14)$$

又、(5)、(10)式より、

$$\epsilon_D = \tau_{xy} (t + 1/t) / E_c \dots(15)$$

ここで、(13)、(14)、(15)式を(8)式に代入して次の  $t = \tan \alpha$  に関する4次方程式を得る。

$$\frac{(1 + 1/\lambda_y)}{(1 + 1/\lambda_x)} t^4 + \frac{(\sigma_y^0 - \mu_y) / \tau_{xy}}{(1 + 1/\lambda_x) \lambda_y} t^3 - \frac{(\sigma_x^0 - \mu_x) / \tau_{xy}}{(1 + 1/\lambda_x)} t - 1 = 0 \dots(16)$$

今  $\sigma_x^0 = \sigma_y^0 = 0$  で鋼材が弾性状態 ( $\mu_x = \mu_y = 0$ ) にある場合を考えると(16)式は、

$$t^4 = (1 + 1/\lambda_x) / (1 + 1/\lambda_y) \dots(17)$$

として与えられ、換言すれば主応力方向  $\alpha$  はせん断応力度にかかわらず鋼材量のみで決まる事になる。

次にせん断歪については(7)式に(14)、(15)を代入して、

$$\gamma_{xy} = 2\tau_{xy} [1 + (1 + 1/\lambda_y) t^2] / E_c + 2(\sigma_y^0 - \mu_y) t / E_c \lambda_y \dots(18)$$

として導かれる。

2.7.  $\tau$ - $\gamma$  関係-鋼材降伏後の挙動

x方向鋼材がすべて降伏した場合を考える。(1)式より

$$\sigma_{cx} = \Sigma P_{sx} \sigma_{sx}^Y - \sigma_x^0 = \mu_x - \sigma_x^0 \dots(19)$$

(19)式を(4)式に代入して  $\tan \alpha$  を求め、これを(3)、(5)式に代入すると、

$$\sigma_{cy} = \tau_{xy}^2 / (\mu_x - \sigma_x^0) \dots(20)$$

$$\sigma_{cD} = \tau_{xy}^2 / (\mu_x - \sigma_x^0) + \mu_x - \sigma_x^0 \dots(21)$$

又、(2)式に(10)、(20)式を、(11)式に(21)を代入して、

$$\epsilon_y = [\tau_{xy}^2 / (\mu_x - \sigma_x^0) + \sigma_y^0 - \mu_y] / E_c \lambda_y \dots\dots\dots(22)$$

$$\epsilon_D = [\tau_{xy}^2 / (\mu_x - \sigma_x^0) + \mu_x - \sigma_x^0] / E_c \dots\dots\dots(23)$$

(19), (4)式より求めた  $\tan \alpha$  と(22), (23)式を(7)式に代入,

$$\gamma_{xy} = 2\tau_{xy}^3 (1 + 1/\lambda_y) / E_c (\mu_x - \sigma_x^0)^2 + 2\tau_{xy} [1 + (\sigma_y^0 - \mu_y) / \lambda_y (\mu_x - \sigma_x^0)] / E_c \dots\dots\dots(24)$$

2.8. 耐力

x, y 両方向鋼材がすべて降伏する時耐力は決まる。一方, コンクリート圧縮斜材の破壊をも考慮し圧縮破壊応力を変形の関数として与える式(20)の様な破壊条件を実験式として提案している。

$$\sigma_{cD} \geq 3.6f_c / (1 + 2\gamma_m / \epsilon_0) \dots\dots\dots(25)$$

ここに,  $\gamma_m: \epsilon_x + \epsilon_y + 2\epsilon_D$  (最大せん断歪),  $f_c$ : コンクリート1軸圧縮強度,  $\epsilon_0$ : 同1軸最大応力度に対応する歪度,  $\sigma_{cD}$ : コンクリート圧縮主応力度

3. トラス理論

ひび割れ発生までは弾性挙動するものとし, その剛性はコンクリートのせん断弾性係数がこれを決定するものとする。又最大主応力が1軸引張強度  $f_t$  に達する時ひび割れが生じるものとする。

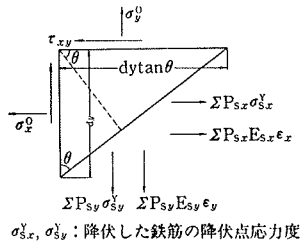


図-4に示される系で力の釣合を考える ( $\theta$ : y軸とひび割れ面のなす角) 事により各歪は次式で与えられる。

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x^0 + \tan \theta \cdot \tau_{xy} - \Sigma P_{sx} \sigma_{sx}^Y}{\Sigma P_{sx} E_{sx}} \dots\dots\dots(26)$$

$$\epsilon_y = \frac{\sigma_y^0 + \tau_{xy} / \tan \theta - \Sigma P_{sy} \sigma_{sy}^Y}{\Sigma P_{sy} E_{sy}} \dots\dots\dots(27)$$

又コンクリート圧縮材についてモールの応力円 ( $\sigma_{max} = 0, \sigma_{min} = \sigma_c$ ) を考える事により次式が導かれる。

$$\epsilon_c = 2\tau_{xy} / E_c \sin 2\theta \dots\dots\dots(28)$$

ここに,  $\sigma_c = E_c \epsilon_c$  ( $\epsilon_c > 0$ )

次に歪に関するモールの円を考え, 圧縮斜材方向が最小主歪方向と一致するものとする。図-5の幾何関係より,

$$\gamma_{xy} = 2[\epsilon_x \epsilon_y + \epsilon_c (\epsilon_x + \epsilon_y) + \epsilon_c^2]^{1/2} \dots\dots\dots(29)$$

なる式が導かれる。

(26), (27), (28)式を(29)式に代入する事により, せん断応力—せん断歪の関係式は導かれる。

$$\gamma_{xy} = 2$$

$$\left[ \frac{(\sigma_x^0 + \tan \theta \cdot \tau_{xy} - \Sigma P_{sx} \sigma_{sx}^Y) (\sigma_y^0 + \tau_{xy} / \tan \theta - \Sigma P_{sy} \sigma_{sy}^Y)}{\Sigma P_{sx} E_{sx} \cdot \Sigma P_{sy} E_{sy}} + \frac{2\tau_{xy}}{E_c \sin 2\theta} \left( \frac{\sigma_x^0 + \tan \theta \cdot \tau_{xy} - \Sigma P_{sx} \sigma_{sx}^Y}{\Sigma P_{sx} E_{sx}} + \frac{\sigma_y^0 + \tau_{xy} / \tan \theta - \Sigma P_{sy} \sigma_{sy}^Y}{\Sigma P_{sy} E_{sy}} \right) + \frac{4\tau_{xy}^2}{E_c^2 \sin^2 2\theta} \right]^{1/2} \dots\dots(30)$$

尚4章の図に示すトラス理論値はすべて  $\theta = 45^\circ$  とした。

4. 計算結果

4.1. PCCV 振り加力試験

図-6~図-8に PC 中空円筒体の振り加力試験に対

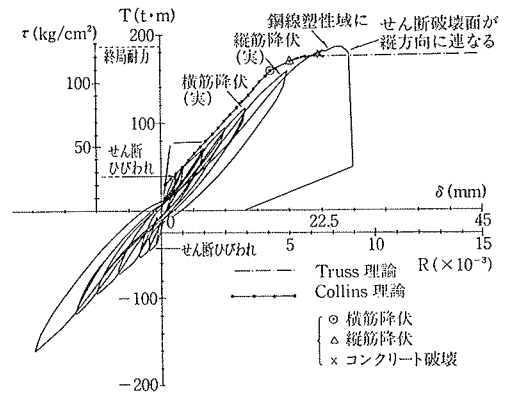


図-6 荷重—変形関係 (MT3)

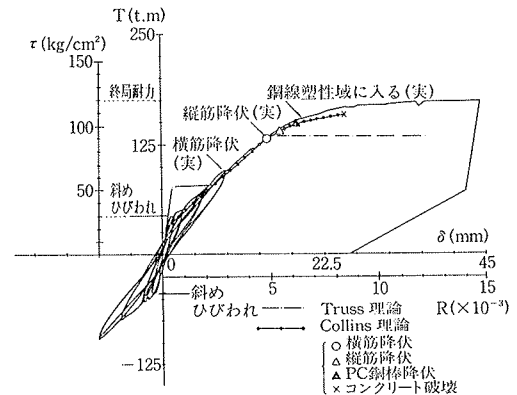


図-7 荷重—変形関係 (MT4)

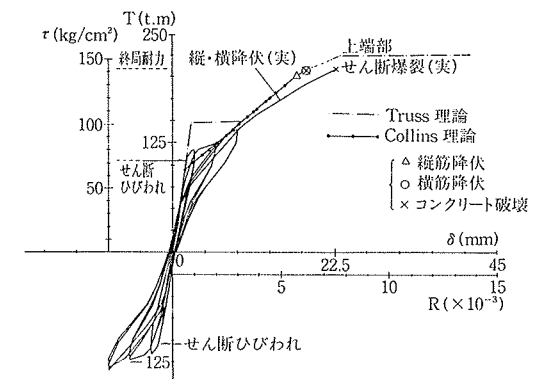


図-8 荷重—変形関係 (MT7)

する代表的な荷重-変形関係を、表一 1 には全試験体についての諸荷重計算結果を示す。図より分かる様に全体降伏までの挙動は Collins, Truss 理論共実験値と非常に良い一致を示しており、特に Collins 理論においてはコンクリートの破壊で決まる最終破壊まで対応づけられている (MT 3, MT 7)。一方 MT 4 については最終破壊変形に実験との差異を生じているが、縦方向鋼材がすべて降伏しているにもかかわらず、コンクリート破壊時までフープ方向 PC 鋼線の余力分耐力が上昇している事は Collins 理論の特長を示しているものと言えよう。表一 1 より低強度の RC 試験体 (MT 5) 及びワイヤーが破断した MT 8 を除いて、最終耐力 (MT 1, MT 2 は鋼材降伏で耐力決定)、破壊及び破壊時変形まで比較的良好な予測を示している。

4.2. サイロ振り加力試験体<sup>5)</sup>

図一 9 に示す様にせん断に対する縦横筋補強量の等しい試験体については縦横両筋の降伏がほぼ同時に起り、従ってその意味で Collins 理論は Truss 理論値と同様な結果を示す。しかしながら鉄筋の降伏歪を超えても耐力は上昇する事が実験事実として観察され、この事は鉄筋

試験体	縦筋降伏荷重 $\tau_{sv}$		横筋降伏荷重 $\tau_{sh}$		PC鋼棒降伏荷重 $\tau_{pv}$		PC鋼線降伏荷重 $\tau_{ph}$		コンクリート破壊荷重 $\tau_c$	最大荷重 $\tau^{max}$			最大荷重比 (計/実)	
	C	T	C	T	C	T	C	T		C	T	(実)	C	T
MT1	66	69	73	73	76	—	80	75	—	80	75	93.3	0.857	0.804
MT2	73	78	81	79	90	89	91	—	—	91	89	103.6	0.878	0.859
MT3	109	109	117	—	—	120	—	—	123	123	120	126.7	0.971	0.947
MT4	90	88	96	—	—	92	102	—	109	109	92	118	0.924	0.780
MT5	36.5	36.6	36.5	36.6	—	—	—	—	—	36.5	36.6	43.7	0.835	0.838
MT6	123	125.6	125	122.6	—	129.6	129	—	130	130	129.6	140	0.929	0.904
MT7	142	144.3	138	134.3	—	153.3	—	—	142	142	153.3	142	1.0	1.080
MT8	—	184.3	—	168.3	—	—	—	192.3	156	156	192.3	—	—	ワイヤー破断

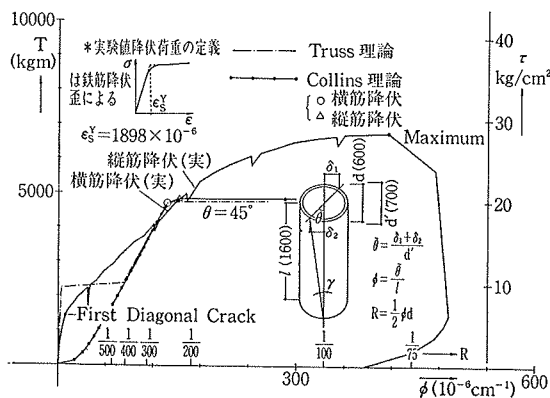
単位: KG/cm<sup>2</sup> C: Collins 理論 T: Truss 理論

表一 1 PCCV 振り加力試験体諸荷重計算値

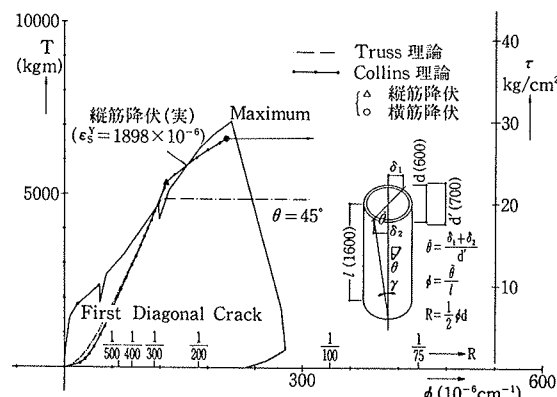
試験体	縦筋降伏荷重 $\tau_{sv}$		横筋降伏荷重 $\tau_{sh}$		コンクリート破壊荷重 $\tau_c$ (C)	最大荷重			最大荷重比 (計/実)	
	C	T	C	T		C	T	(実)	C	T
SHV-14-70	10.40	10.24	10.20	10.24	—	10.40	10.24	18.8	0.553	0.545
SHV-14-100	20.50	—	20.0	19.95	—	20.50	19.95	28.4	0.722	0.702
SHV-14-129	30.50	—	30.0	29.98	—	30.50	29.98	39.0	0.782	0.769
SHV-25-130	19.80	—	19.40	19.50	—	19.80	19.50	28.3	0.700	0.689
SHV-25-160	31.0	—	30.50	30.50	—	31.0	30.50	37.0	0.838	0.824
SHV-44-213	30.50	—	30.0	30.0	—	30.50	30.0	28.4*	1.074	1.056
SHV-25-184	23.0	20.50	28.0	—	—	28.0	20.50	29.9	0.936	0.686
SHV-25-309	26.50	20.50	—	—	39.50	39.50	20.50	31.2	1.266	0.657
SHV-25-213	33.50	31.0	38.50	—	—	38.50	31.0	29.8*	1.292	1.040
SHV-0-264	—	—	95.8	—	90.0	90.0	95.8	58.79	1.531	1.630
SHV-14-200	59.0	—	58.50	58.44	—	59.0	58.44	56.06	1.052	1.042
SHV-44-213A	32.0	31.0	34.0	—	—	34.0	31.0	37.23	0.913	0.833

\*パンチング破壊 注: Truss 理論値は全て  $\theta=45^\circ$  として計算  
単位: kg/cm<sup>2</sup> C: Collins 理論値 T: Truss 理論値

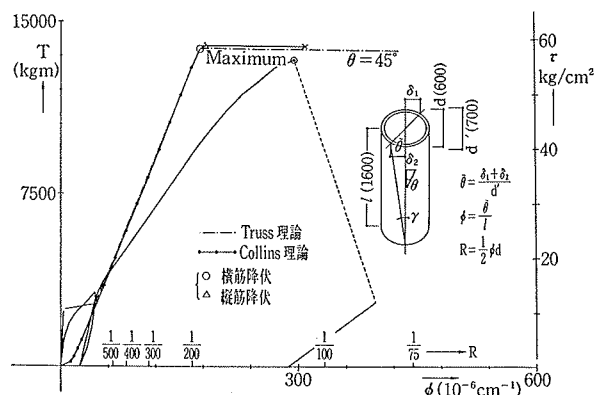
表一 2 大型サイロ振り加力試験体諸荷重計算値



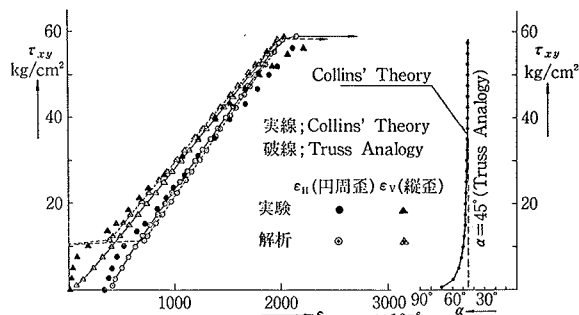
図一 9 荷重-変形関係 (SHV-14-100)



図一 10 荷重-変形関係 (SHV-25-184)



図一 11 荷重-変形関係 (SHV-14-200)



図一 12 荷重-鉄筋歪関係 (SHV-14-200)

の  $\sigma$ - $\varepsilon$  関係での上昇分を考慮しても測定歪レベルから言って説明出来ないところである。図-10に示す様にせん断補強として縦筋量に比べ横筋量の過大な試験体については、Collins 理論値は横筋の降伏するまで耐力上昇を示し、主応力方向も変動して最終  $\alpha=36^\circ$  となり、耐力に関しては実験とほぼ対応している様である。図-11, 12に示す試験体 SHV-14-200 については、Collins 理論値は縦横両筋のほぼ同時降伏を示し Truss 理論値との差はないが、この際の最大せん断応力度を用いて  $\alpha=45^\circ$  として(2)式より求めた破壊時せん断歪は実験と対応している。表-2には諸荷重計算値を全試験体について示すが、横筋量の多い SHV-25-184, 25-309, 44-213A などについては耐力が実験値に近づいているようである。しかしながら過大補強でコンクリートの破壊で耐力の決まる試験体 SHV-0-264 については理論値は実験値を大幅に上回っており、RC のせん断強度の限界を説明出来ない。尚、表-3には計算に用いた諸定数等を示しておく。

4.3. PCCV 水平加力試験体<sup>3)4)</sup>

図-13, 14は 1/8 及び 1/30 PCCV 水平加力試験体に対して、配筋及び層せん断力の異なる高さ方向各部材を円周方向に有限個分割し、せん断力の放物線弾性分布を仮定して各分割要素に Collins 理論より定まる  $\tau$ - $r$  関係を適応して求めた頂部水平変位と平均せん断応力度の関係である。ただし、ここでせん断力はすべて面内せん断力として流れるものとした。図から分かる様に荷重-変形関係だけでなく、最終破壊(脚上腹部コンクリート破壊)、最終変形まで対応は比較的良好であって、せん断応力の再分配を考慮すれば強度的にも十分な評価が出来るものと思われる。

5. Collins 理論の問題点

今回の対応を通して考えられる Collins 理論の問題点を箇条書で示す。

- (1) 対称ボックスビームのせん断破壊実験をもとにせん断強度を予測しているが、(2)式の破壊実験式を定めるにあたり試験体形状やデータ数が限定されている。
- (2) せん断に対して縦横等配筋なら当理論は Truss 理論と一致してしまい、その意味でコンクリート寄与分とされるせん断強度の増加分を説明出来ない。これについてはひび割れ面でのかみ合いによる摩擦力がみかけ上同面に合力として直交方向引張力を与えるものと著者は考える。
- (3) コンクリートの破壊した RC 過補強試験体(SHV-0-264)の強度を予測出来ない。

試験体	諸定数		コンクリート1軸圧縮強度 $F_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$F_c$ に対するビーク応力歪度 $\varepsilon_o$	コンクリート弾性係数 $E_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	*コンクリート1軸引張強度 $F_t$ (kg/cm <sup>2</sup> )	鉄筋量 (%)		PS鋼材量 (%)		鉄筋降伏点応力度 $\sigma_s$ (kg/cm <sup>2</sup> )	PS鋼材降伏点応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )	
	$\sigma_x$	$\sigma_y$					$F_{sx}$	$F_{sy}$	$F_{px}$	$F_{py}$		$\sigma'_{px}$	$\sigma'_{py}$
MT3	-16	-32	462	$2,500 \times 10^{-4}$	$2.6 \times 10^5$	29.6	2.0	2.0	0.387	0.572	3,640	18,300	12,200
MT4	-16	-32	462	$2,500 \times 10^{-4}$	$2.6 \times 10^5$	29.6	1.0	1.0	0.866	0.862	3,640	18,300	12,200
MT7	-80	-64	462	$2,500 \times 10^{-4}$	$2.6 \times 10^5$	29.6	2.0	2.0	0.752	0.862	3,640	18,300	12,200
SHV-14-100	14.3	0	285	$2,683 \times 10^{-4}$	$2.06 \times 10^5$	19.0	0.975	0.587			3,473		
SHV-25-184	25.0	0	261	$2,448 \times 10^{-4}$	$1.96 \times 10^5$	18.8	1.811	0.587			3,473		
SHV-14-200	14.3	0	249	$2,870 \times 10^{-4}$	$1.85 \times 10^5$	19.8	2.0	1.65			3,600		

\* Truss 理論適用の時

表-3 諸材料定数

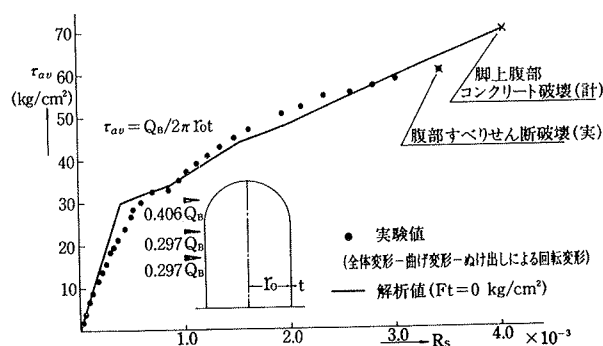


図-13 1/8 PCCV 水平加力試験体・荷重-せん断変形関係

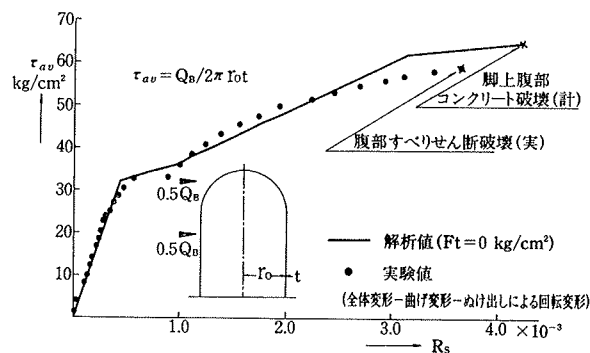


図-14 1/30 PCCV 水平加力試験体・荷重-せん断変形関係

6. あとがき

せん断挙動に対するひび割れ面の寄与や、内圧による縦ひび割れの存在の影響が相対的に大きな RC 試験体について Collins 理論は十分な予測が出来たとは言えない。補強量の少ない試験体程、剛性及び降伏荷重に隔たりのあるようである。

一方、せん断強度の高い今回の様な PC 試験体については最終破壊まで含めて良好な予測を示しており、PC 高強度試験体になる程、当理論は有効であると思われる。

### 参考文献

- 1) M. P. Collins: Towards a Rational Theory for RC Members in Shear, ASCE ST4, vol. 104, (Apr. 1978)
- 2) 武田, 他: PCCV のせん断耐力に関する試験, 大林組技術研究所報, No. 20, (1980), pp. 1~16
- 3) 武田, 他: プレストレストコンクリート格納容器 (PCCV) の力学的挙動に関する一連の研究(その2), 大林組技術研究所報, No. 22, (1981), pp. 7~24
- 4) 武田, 他: プレストレストコンクリート格納容器 (PCCV) の力学的挙動に関する一連の研究(その3), 大林組技術研究所報, No. 22, (1981), pp. 25~43
- 5) 中山, 他: 超大型サイロに関する研究(その1), 大林組技術研究所報, No. 19, (1979), pp. 1~6