

Double-Punch Test에 의한 콘크리트의 引張強度 試驗에 관한 研究

A Study on Double - Punch Test for Tensile Strength of Concrete

李 愚 鍾*·高 在 君*
Lee, Woo Jong · Koh, Chae Koon

Summary

The purpose of this study is to introduce the Double Punch test method which is an indirect testing method of tensile strength of concrete, and to compare with the tensile strength of concrete as determined by the split-cylinder test, a practical method for performing the Double Punch test to obtain the tensile strength of concrete is proposed and recommended for general use.

In this study, the dimensions of cylindrical specimens used in the Double-Punch test were 15×30 cm, 15×15 cm, 10×20 cm, and 5×10 cm, and in the split-cylinder test were 15×30 cm, 15×15 cm, and 10×20 cm. And the diameters of loading punches used in the Double-Punch test were 1.5 cm, 2.5 cm, and 3.5 cm.

The results obtained from tests are summarized as follows :

1. In the split-cylinder test, the tensile strength of concrete by the linear elasticity theory is similar to that of plasticity theory.
2. Both split-cylinder test and Double-Punch test, tensile strength of concrete is increased with decreasing specimen size. This tendency is identical when the ratio of specimen diameter to height is 1 : 2, but that tendency is quite different when the ratio is 1 : 1.
3. In the Double-Punch test, if specimen size is constant, by increasing the punch size, tensile strength of concrete is increased, too.
4. Using a 15×15 cm cylinder specimen and 3.5 cm diameter punch in the Double Punch test would give the most uniform and consistent result in tensile strength, and the result showed a good correlation with splitting tensile strength from 15×30 cm specimen.
5. In order to obtain satisfactory results and to minimize variability, it is proposed that specimens of 15 cm in diameter and 15 cm in height with two 3.5 cm diameter punches should be used.

It seems, therefore, reasonable to take $f_t = 0.0024 P (\text{kg} / \text{cm}^2)$ as a working formula for computing the tensile strength in the Double Punch test for concrete.

* 서울대학교 農科大學

I. 緒 論

콘크리트에서는 일반적으로 壓縮強度를 가장 널리 利用하지만 引張強度도 여러가지 關係성으로 미루어 보아 매우 重要하다. 그런데 이러한 콘크리트의 引張強度를 決定하는 것은 그리 쉬운 일이 아니다.

引張強度를 決定하는 試驗은 直接試驗法과 間接試驗法으로 大別할 수 있는데 直接試驗法은 측정장치에 의한 應力集中現象이나 사소한 잘못으로 인하여 試驗結果에 큰 誤差를 초래할 수 있다.

그래서 콘크리트의 引張強度 試驗은 間接試驗法을 많이 利用하는데 여기에는 여러가지가 있으나 그중에서 割裂試驗(split Cylinder Test)이 代表的이라 할 수 있다.

이 方法은 1950年代에 브라질의 Fernando Carneiro¹⁵⁾ 와 日本의 Tsunes Akazawa⁶⁾ 등에 의해 誘導된 方法으로서 이 方法을 現在 世界各國에서 使用하고 있는 實情이다.

그런데 直接試驗法이나 間接試驗法인 割裂試驗에 의한 結果는 壓縮試驗에 의한 結果보다 훨씬 큰 變動을 보이고 있어서 割裂試驗을 채택하고 있는 우리나라에서는 普通骨材를 利用한 콘크리트의 경우에는 割裂強度(f_{sp}')를 $1.6 \sim 1.9\sqrt{f_c'}$ 으로, 輕量骨材를 利用한 콘크리트의 경우에는 f_{sp}' 을 $1.1 \sim 1.3\sqrt{f_c'}$ 으로 하고 있다. 이때에 순수한 引張強度(f_t')는 앞에서 기술한 f_{sp}' 의 0.5~0.7 배이며 휨인장強度(f_r')는 f_{sp}' 의 1.25~1.75배로 計算하고 있으며 앞에서 記述한 係數中에서 작은 값은 高强度 콘크리트에 使用하고 큰 값은 低強度 콘크리트에 使用하도록 規定하고 있다³⁾.

그런데 1970年代에 와서는 좀 더 간단한 試驗으로, 試驗結果의 均一성이 良好한 콘크리트의 引張強度를 推定하기 위하여 새로운 試驗方法이 모색되어 오다가 W. F. Chen 등에 의해서 Double Punch Test 라는 方法이 제안되었다^{12, 19)}.

이 研究의 目的은 Double Punch Test에 대한 細部の인 試驗과 理論的인 分析을 통하여 在來의 方法인 割裂試驗에 의한 引張強度와 比較하여 實用性 與否를 確認하는 同時에 이 試驗에 必要한 Punch의 크기 및 供試體의 크기를 決定하는데 있다.

II. 콘크리트 引張強度의 基礎理論

1. 割裂試驗에 의한 引張強度

가. 彈性理論에 의한 콘크리트의 引張強度

만약 作用荷重이 Fig. 1과 같이 2a(13mm)의 幅에 걸쳐 均等하게 分布한다면 그에 대한 彈性應力은 式(1), (2)와 같이 表現된다¹²⁾.

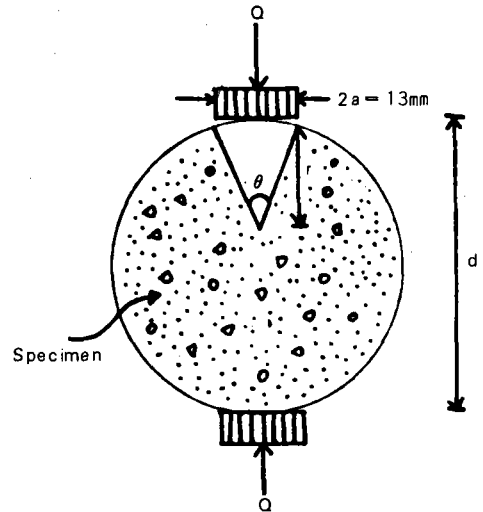


Fig. 1. Test Arrangement.

$$\text{Vertical Stress : } \delta_r = \frac{2Q}{\pi \ell d} \left[\frac{d}{4a} (\theta + \sin\theta) + \frac{d}{d-r} - 1 \right] \dots\dots\dots(1)$$

$$\text{Horizontal Stress : } \delta_\theta = \frac{-2Q}{\pi \ell d} \left[\frac{d}{4a} (\theta + \sin\theta) + \frac{d}{d-r} (\theta - \sin\theta) \right] \dots\dots\dots(2)$$

式(1), (2)에서 Q 및 r은 그림1에서와 같으며, 供試體 頂點에서의 最大水平引張應力은 近似的으로 式(3)과 같다.

$$f_t' = \delta_{\theta=0} = \frac{2Q}{\pi \ell d} \dots\dots\dots(3)$$

여기서, d : 直徑, ℓ : 供試體의 길이, Q : 作用荷重

式(3)은 線型彈性論에 依하여 구한 것인데 割

裂試驗에 의한 引張強度를 구하고자 하는 경우에 使用되는 關係式이다.

나. 塑性理論에 의한 콘크리트의 引張強度

一般的으로 塑性理論에서는 平面變位(Plane strain)의 條件에 따라서 分析方法을 ①極限解(Limit Analysis) ②流動線解析(Slip-Line Analysis) ③有限要素法(F. E. M)의 3가지로 區分할 수 있는데 3가지에 의한 分析結果가 別로 큰 差異를 보이지 않기 때문에 여기에서는 極限解析(Limit Analysis)에 대하여 重點을 두었다^{13 16)}.

極限解析에는 上限理論(Upper bound theorem)과 下限理論(Lower bound theorem)이 있으며, 이 두가지 方法 모두에는 局部的인 引張變形은 極限解析을 적용하기에 충분히 發生하고, 또한 콘크리트는 完全塑性으로서 壓縮側에서는 修正된 Mohr-Coulomb의 파괴선을 따르며 引張側에서는 작지만 0이 아닌 tension cut-off가 存在한다는 假定을 하고 있다. (Fig.2 參照)

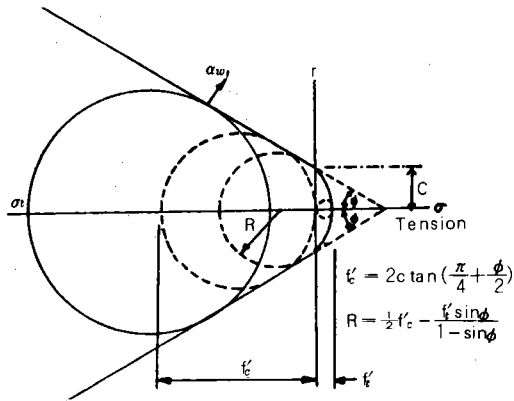


Fig. 2. Modified Mohr-Coulomb Criterion.

極限解析의 上限理論은 作用荷重이 내부에너지의 日률(rate of work)보다 크면 파괴된다는 것으로서, 내적日률과 외적日률(external rate of work)을 같다고 놓고 식을 유도할 수 있다.

Fig.3(b)는 2個의 쪼기域(wedge region)인 ABC로 이루어진 供試體의 파괴기구(mechanism)를 보여주고 있으며 引張균열C-C는 2個의 쪼기를 連結시키고 있다.

荷重이 증가함에 따라 2個의 쪼기는 서로 가까워지며 剛體(Rigid body)를 水平方向으로 Δ_n의

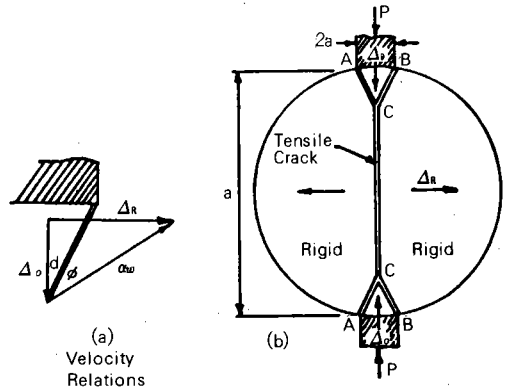


Fig. 3. Bearing Capacity of an Indirect Tensile Test.

速度로 밀어내게 된다. 이때 不連續線 AC와 BC는 φ의 角度로 경사져 있으며 이 線을 따라 나타나는 相對的인 速度벡터를 δw라 하면 이에 대한 關係는 그림 3(a)와 같다.

그러면 總內的 日률에 대한 外的日률을 方程式化하면 式(4)와 같다.

$$Q^u = \left(\frac{a}{\sin \alpha} \right) \left[\frac{f'_c \ell (1 - \sin \phi)}{\cos(\alpha + \phi)} - 2f'_c \ell \cos \alpha \tan(\alpha + \phi) + f'_c \ell \tan(\alpha + \phi) \right] \dots \dots \dots (4)$$

여기서, φ: 콘크리트의 내부마찰각, f'_c: 콘크리트의 壓縮強度

그런데 上限에서 最少值를 갖는다는 條件을 利用하면 式(5)와 같다.

$$\cos \alpha = \tan \phi + \sec \phi \left[1 + \frac{d}{2a} \frac{\cos \phi}{\frac{f'_c}{f'_c} \left(\frac{1 - \sin \phi}{2} \right) - \sin \phi} \right]^{\frac{1}{2}} \dots \dots \dots (5)$$

式(5)에 割裂試驗 標準供試體의 諸元인 2a=13 mm, d=15cm, f'_c/f'_t=10, φ=30°를 代入하면 α=16.1°가 된다.

그리고 이를 式(4)에 代入하면 式(6), (7)과 같이 된다.

$$Q \leq Q^u = 1.854 \ell d f'_t \dots \dots \dots (6)$$

$$\therefore f'_t \geq 0.541 \frac{Q}{\ell d} \dots \dots \dots (7)$$

또한 下限理論에 의하여 임계하중(critical Load)을 계산하면 式(8), (9)와 같이 되며 式(9)에 의

하여 塑性下限理論에 의한 인장강도를 구한다.

$$Q \geq Q^u = 1.370 \ell df_c \dots\dots\dots (8)$$

$$\therefore f_t \leq 0.730 \frac{Q}{\ell d} \dots\dots\dots (9)$$

그러나 割裂試驗時의 諸元을 $2a=13\text{mm}$, $d=10\text{cm}$, $f_c'/f_t'=10$, $\phi=30^\circ$ 인 경우에는 式(5)에 의해서 $\alpha=14.7^\circ$ 가 된다.

이를 式(4)에 代入하면 式(10), (11)과 같다.

$$Q \leq Q^u = 2.281 \ell df_t \dots\dots\dots (10)$$

$$\therefore f_t \geq 0.438 \frac{Q}{\ell d} \dots\dots\dots (11)$$

또한 下限理論에 의하여 임계하중을 구해보면 式(12), (13)과 같다.

$$Q \geq Q^u \pm 1.690 \frac{Q}{\ell d} \dots\dots\dots (12)$$

$$\therefore f_t \leq 0.592 \frac{Q}{\ell d} \dots\dots\dots (13)$$

2. Double-Punch Test에 의한 인장강도

Chen, Drucker 등은 Double-Punch Test에 의한 인장강도의 算定方法으로서 極限解析을 제안하였는데,

여기에서 콘크리트는 線型彈性-完全塑性 物質로, 그리고 壓縮側에서는 修正된 Mohr-Coulomb의 파괴선을 따르며, 인장側에서는 작지만 0이

아닌 tension cut-off가 存在한다는 假定을 두고 있다.

理想的인 圓柱形 供試體의 Double-Punch 試驗에 의한 파괴기구(failure mechanism)는 Fig.4와 같다.

Fig.4에서와 같이 인장균열(Tension crack)이 放射型(radial)方向으로 發生하고 2個의 cone 형상을 하는 파괴表面이 펀치 밑에 생긴다.

cone 형상을 하고 있는 파괴표면은 주위에 있는 物質들을 荷重이 증가함에 따라 옆으로 밀어내게 되고 그에 따라 Δ_0 도 증가하게 된다.

이때 相對的인 速度벡터를 δw 라 하면 δw 는 各點에서 cone의 表面을 따라서 콘크리트의 내부 마찰각 ϕ 만큼 傾斜져 있다. 또한 各速度間의 相互關係는 Fig.4에서 보는 바와 같다. 여기서 內的 일률에 대한 總外的 일률을 方程式化하면 作用 荷重 Q의 上限値는 式(9)와 같다^{12,8)}.

$$\frac{Q^u}{\pi a^2} = \frac{1 - \sin\phi}{\sin\alpha \cos(\alpha + \phi)} \frac{f_c'}{2} + \tan(\alpha + \phi) \left[\frac{bh}{a^2} - \cot\alpha \right] f_t' \dots\dots\dots (9)$$

여기서,

f_c' : 콘크리트의 壓縮強度

f_t' : Double-Punch 試驗에 의한 콘크리트의 인장강도

ϕ : 콘크리트의 내부마찰각

α : cone의 角으로서 未知數

a : 펀치의 반지름

b : 供試體의 반지름

h : 供試體의 높이

式(9)에서 $\partial Q^u / \partial \alpha = 0$ 을 滿足시킬 때 上限에서 最少値를 갖는다는 條件을 利用하면 式(10)과 같다.

$$\cot\alpha = \tan\phi + \sec\phi \left[1 + \frac{\frac{bh}{a^2} \cos\phi}{\frac{f_c'}{f_t'} \left(\frac{1 - \sin\phi}{2} \right) - \sin\phi} \right]^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (10)$$

式(10)을 式(9)에 代入하면 式(11)과 같다.

$$\frac{Q^u}{\pi a^2} = f_t' \left[\frac{bh}{a^2} \tan(2\alpha + \phi) - 1 \right] \dots\dots\dots (11)$$

式(11)을 다시 쓰면 式(12)로 表現할 수 있다.

$$Q \leq Q^u = \pi(kbh - a^2) f_t', \quad \text{단 } k = \tan(2\alpha + \phi) \dots\dots (12)$$

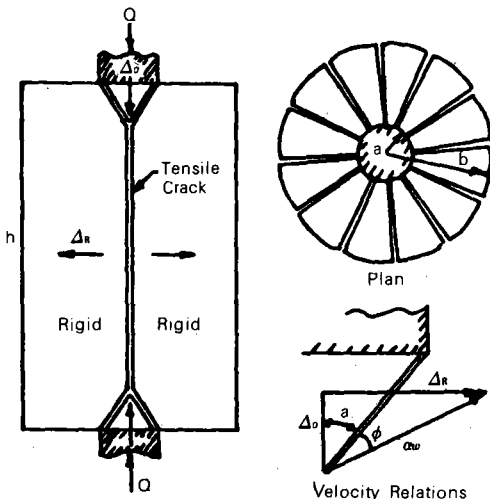


Fig. 4. Bearing Capacity of Double Punch Test.

Table-1. Quality of Normal Portland Cement.

Physical Properties				Chemical Properties			
Property	Item	Result	K. S	Compound	Item	Result	K. S
	Specific gravity	3.16		Heat of hydration	7days	-	
Fineness	Blariness (cm ³ /g)	3011	>2600	Drying shrinkage (%)		-	
	standard sieve 44μ residue (%)	-					
	standard sieve 149μ residue (%)	-		Ignition loss (%)	1.2	<3.0	
Time of Setting	Normal (%) consistency	25		Insoluble residue (%)	2.27	<0.75	
	Initial (min)	155	>60	SO ₃ (%)	1.8	<2.5	
	Final (hr)	5.42	<10	MgO (%)	2.7	<5.0	
	Soundness	0.12	<0.80	SiO ₂ (%)	21.5		
Strength (kg/cm ²)	Compression age	3days	121	>110	Al ₂ O ₃ (%)	-	
		7days	190	>175	CaO (%)	64.3	
	Tension age	3days	19	>10	S (%)	-	
		7days	28	>20	Fe ₂ O ₃ (%)	-	

Table-2. Physical Properties of Fime Aggregates.

Item	Fineness modulus	Unit weight (kg/m ³)	Specific gravity	Absorption (%)	Surface water (%)	Organic impurity	Soundness
Results	2.75	1599.9	2.68	2.94	4.40	None	Good

그런데 Chen, Drucker 등은 식 (12)에서 k의 感 應 度 與 否 를 알 아 보 기 위 해 a, b, h, ϕ의 條 件 을 여 러 가 지 로 變 化 시 켜 본 結 果 k는 1.07~1.44의 범 위 내 에서 별 로 예 민 하 지 않 게 변 한 다 는 結 論 을 내 리 고 實 用 의 인 側 面 을 고 려 하 여 k=1.20으로 하 여 도 별 로 큰 誤 差 가 發 生 하 지 않 는 다 고 하 였 다^{9,12}.
 그래서 k=1.20으로 정 하면 식 (12)는 식 (13) 과 같 이 된 다.

$$f'_c = \frac{Q}{\pi(1.2bh - a^2)} \dots\dots\dots(13)$$

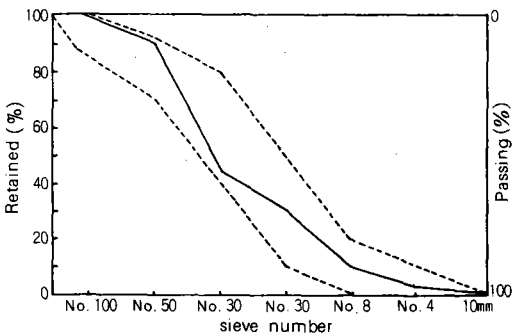


Fig. 5. Gradation Curve of Fine Aggregates.

여기서,
 b: 供 試 體 의 半 徑 (cm)
 h: 供 試 體 의 高 이 (cm)
 a: 펀치의 半 徑 (cm)
 Q: 作 用 荷 重 (kg)
 이 식 (13)을 利 用 하 여 Double-Punch Test 에 의 한 引 張 強 度 를 구 할 수 있 다.

III. 材 料 및 方 法

1. 材 料

가. 시멘트

本 試 驗 에 서 使 用 한 시멘트는 國 內 某 會 社 에 서 生 產 된 보 통 포틀랜드 시멘트(Normal Portland Cement)로 서, 그 에 대 한 品 質 은 Table-1과 같 으 며 韓 國 工 業 規 格 (KSL5210)에 適 合 하 였 다.

나. 骨 材 (Fine Aggregates)

잔 骨 材 는 本 大 學 의 콘크리트 材 料 實 驗 室 에 있 는 것 을 使 用 하 였 으 며, 그 에 대 한 品 質 은 Table-2와 같 고 粒 度 는 Fig.5와 같 이 標 準 粒 度 範 圍 내

Table-3. Physical Properties of Coarse Aggregates.

Item	Fineness modulus	Unit weight (kg/m ³)	Specific gravity	Absorption (%)	Organic impurity	Soundness
Results	7.63	1963.5	2.79	91.75	None	Good

Table-4. Mix Design of Concrete.

Max size of coarse aggregates	Slump	unit weight of water	unit weight of cement	w/c	G/s	Sand	Gravel
25mm	4~8cm	159kg	325kg	49%	1.75	724kg	1267kg

*Note : $\sigma_{ck}=200\text{kg/cm}^2$
coeff. of strength incresement : 1.15

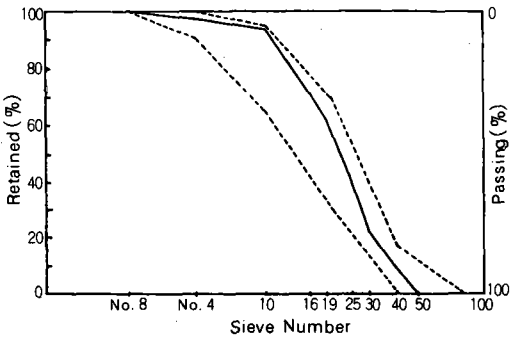


Fig. 6. Gradation Curve of Coarse Aggregates.

에 있어서 比較的 良好한 것으로 判明되었다.

2) 굵은 骨材 (Coarse Aggregates)

굵은 骨材는 本 大學의 콘크리트 材料 實驗室에 있는 것을 使用하였으며, 그에 대한 品質은 Table-3과 같고 粒度는 Fig.6 과 같이 標準粒度 範圍內에 들어있어서 比較的 良好한 것으로 判明되었다.

다. 콘크리트의 配合設計

本 試驗에서는 割裂試驗 및 Double-Punch試驗에 의한 콘크리트의 引張強度 試驗을 實施하였는데, 그 供試體 製作에 使用되는 콘크리트의 配合設計는 Table-4 와 같다.

2. 方 法

가. 割裂試驗에 의한 引張強度 試驗

割裂試驗에 使用한 供試體의 치수는 15×30cm, 15×15cm, 10×20cm의 3 가지로 하였으며 各各의

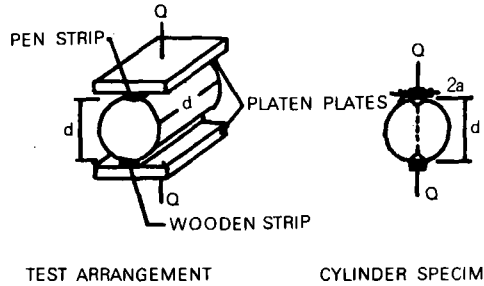


Fig. 7. Splitting Test Arrangements.

供試體에 대하여 平均試驗値를 구하기 위해 4 個씩 製作하였다.

割裂試驗方法은 現在 가장 널리 利用되고 있는 콘크리트의 引張強度 試驗方法으로서 KSF 2423에 準하여 實施하였으며 試驗配置 (Test arrangement)는 Fig.7 과 같다.

割裂試驗에 의한 引張強度의 算定은 彈性論과 塑性論에 의거한다. 즉 직경 $d=15\text{cm}$ 인 공시체를 使用할 때 彈性論의 경우에는 式(3)과 塑性論의 경우에는 式(7), (9)를 使用하고, 직경 $d=10\text{cm}$ 인 공시체를 使用할 때는 彈性論의 경우 式(3)과 塑性論의 경우 式(11), (13)을 使用한다.

나. Double Punch試驗에 의한 引張強度 試驗

Double Punch試驗에 使用한 供試體의 치수는 15×30cm, 15×15cm, 10×12cm, 5×10cm의 4 가지로 하였으며 各各의 경우에 대하여 平均値를 구하기 위해 4 個씩 製作하였다.

또한 Double Punch試驗에 必要한 P_{ukh} 는 材

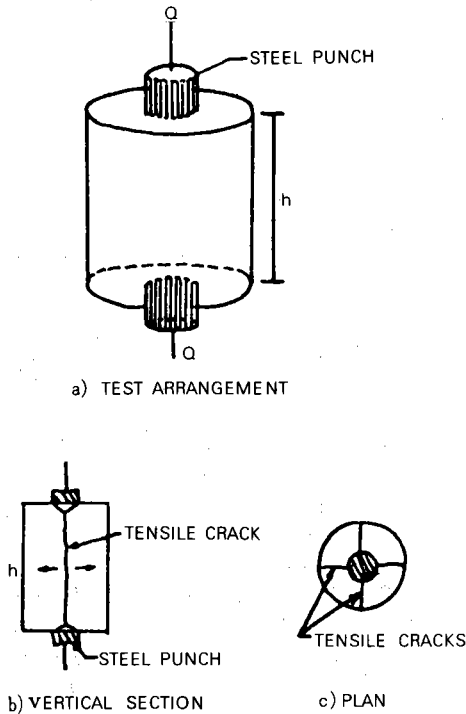


Fig. 8. Apparatus for Double-Punch Tests.

料가 강재 (Steel) 로서 그 치수는 두께를 모두 일정하게 1cm로 하고, 그 직경만을 1.5cm, 2.5cm, 3.5cm의 3가지로 변화시켜 사용하였다.

이 시험은 割裂試驗과는 달리 콘크리트 供試體를 壓縮試驗時와 同一하게 設置하고, 대신 壓縮力이 供試體의 아래·위 表面에 있는 Steel Punch를 통해서 作用하도록 한다. 이에 대한 試驗配置 (Test arrangement)는 Fig. 8 (a)와 같으며 이러한 경우에 파괴형상은 Fig. 8의 (b), (c)와 같다.

Double Punch試驗에 의한 引張強度의 算定方法은 塑性論의 極限解析에 의해서 구한 式 (13)에 의거한다.

IV. 結果 및 考察

1. 割裂試驗에 의한 引張強度 試驗

割裂試驗에 의한 引張強度 試驗 割裂試驗에 의한 各 供試體別 材令28日의 引張強度 試驗結果는 Table-5와 같다.

Table-5에서 보는 바와 같이 한열시험을 利用하여 引張試驗을 實施하고, 強度의 算定過程에서 彈性論과 塑性論을 利用하였고, 塑性論에서는 上限理論과 下限理論을 적용하였는데 上限과 下限의 값의 차이는 各 供試體別로 共히 5~6kg/cm²程度의 차이를 보이고 있으나 이 上·下限에 의한 값의 平均値를 취하면 彈性論에 의한 값과 거의 一致하는 것을 알 수 있다.

이러한 사실은 割裂試驗의 標準供試體인 15×30cm를 재령 7日, 28日, 60日, 90日에 대하여 試驗한 結果인 Table-6에서도 알 수 있으며 이것을 圖示하면 Fig. 9와 같다.

그런데 chen과 chang은 割裂試驗을 實施하여 콘크리트의 引張強度를 算定한 바 있는데, 引張強度의 算定過程에서 彈性論과 塑性論을 적용하여 塑性論에 의한 結果과 彈性論에 의한 結果는 거의 一致한다는 結論을 얻은 바 있다¹³⁾.

Table-5. Tensile Strength by Splitting Test.

unit : kg/cm²

Specimen size Analysis (cm) Test		15×30	15×15	10×20	cf
		Elastic	21.58	18.76	
S.	Plastic	18.52	16.10	20.02	
P.	(upper-bound)	21.63	18.81	22.89	
T	(Lower-bound)	2474	21.51	25.75	

Table-6. Strength Effect of Curing Days.

unit : kg/cm²

Curing days Analysis Test		7	28	60	90	cf
		Elastic	18.71	21.82	21.95	
Plastic	16.05	18.34	18.83	19.34		
(upper-bound)	18.75	21.42	22.00	22.59		
(Lower-bound)	21.45	24.50	25.17	25.84		

Double-Punch Test에 의한 콘크리트의 인장강도 시험에 관한 연구

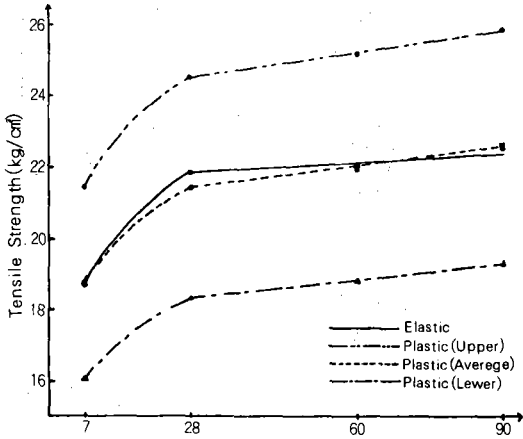


Fig. 9. Relationship between Elastic and Plastic in S. P. T.

한편 Fig. 9 에서와 같이 본 시험의 경우에도 탄성론에 의한 인장강도와 소성론의 극한해석에서 상한과 하한에 의한 인장강도의 평균치는 全養生期間을 통하여 거의一致하고 있음을 알 수 있다.

2. Double-Punch Test에 의한 인장강도 시험

Double-Punch Test에 의한 供試體別, punch 치수別 재령28日의 인장강도 시험結果는 Table-

7과 같다.

Table-7에서 보듯이 Double-Punch Test에 의한 인장강도는 Punch 치수에 관계없이 공시체의 치수가 작아질수록 증가하는 傾向을 보이며, 동시에 각 供試體에 대해서는 共히 Punch 치수가 커지면 그에 따른 強度도 커지는 傾向을 보이고 있다.

그런데 이러한 傾向이 15×30cm, 10×20cm, 5×10cm의 공시체인 경우에는 비슷하게 나타나고 있으나, 15×15cm 공시체는 이와는 달리 독특한 양상을 보이고 있는데, 이는 15×15cm 공시체는 직경과 높이의 비가 1:1인데 反해 나머지 供試體는 직경對높이가 1:2인 비율을 가지고 있기 때문인 것으로 思料된다.

콘크리트의 인장강도 시험에서는 現在까지 15×30cm 공시체에 割裂試驗을 實施하는 것이 標準으로 되어 있기 때문에 15×30cm에 대한 割裂試驗에 의한 인장강도를 100으로 보고, Double-Punch Test에 의한 시험結果를 이에 대한 백분율(%)로 表示해 보면 Table-8과 같다.

Table-8로부터 割裂인장강도와 Double Punch Test에 의한 인장강도와와의 관계는 Double Punch Test에서 供試體의 치수가 15×15cm인 경우에는 Punch의 크기에 따라 할열인장강도의 79~98%에 이르고 있으며, Punch의 크기가 3.5cm인 경우에는 供試體의 크기에 따라 82~111%에

Table-7. Tength by Double Punch Test.

unit : kg/cm²

Specimen size (cm)		15×30	15×15	10×20	5×10	cf
Punch size (cm)		15×30	15×15	10×20	5×10	
D. P. T.	1.5	10.47	17.14	13.86	16.76	28days standard curing
	2.5	13.40	19.28	16.63	22.27	
	3.5	17.76	21.16	19.34	23.85	

Table-8. Strength Ratio of Each Specimen Size.

Specimen size (cm)		15×30	15×15	10×20	5×10	cf
ratio						
Punch size (cm)		%				() : Plastic
Tests						
D. P. T.	1.5	49(48)	79(79)	64(64)	78(77)	
	2.5	66(66)	89(89)	77(77)	103(103)	
	3.5	82(82)	98(98)	98(89)	111(110)	
S. P. T.		100				

이르고 있다. 특히 供試體의 크기가 15×15cm, Punch의 크기가 3.5cm인 경우의 Double Punch Test에 의한 引張強度는 割裂試驗에 의한 引張強度의 98%에 이르고 있어 상당히 좋은 것으로 판단된다.

3. 引張強度와 Punch의 크기 및 供試體의 크기와의 關係

Table-7의 結果로부터 Double-Punch 試驗時 Punch의 크기 및 供試體의 크기와 그에 따른 引張強度와의 關係를 圖示하면 Fig.10과 같다.

Fig.10에서와 같이 Punch의 직경이 커지면 그에 따른 引張強度도 증가하는 경향을 보이며, 같은 크기의 Punch인 경우에는 供試體의 크기가 커

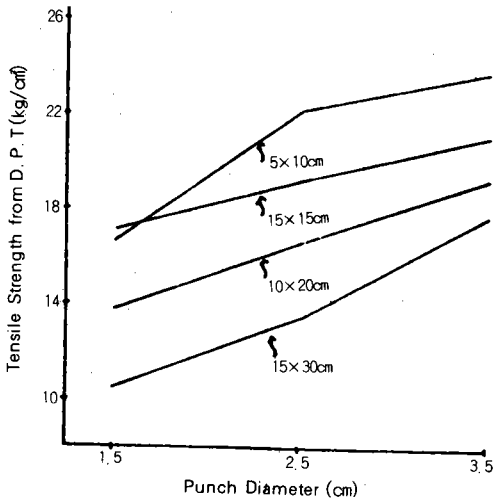


Fig. 10. Relationship between Punch Size and Tensile Strength from D. P. T.

질수록 引張強度는 작아지는 양상을 보이고 있다.

또한 Fig. 10에서 보이고 있는 강도의 증가양상으로 미루어 보아 Punch의 치수를 4.0cm로 하였을 경우에 15×30cm 供試體는 21.0kg/cm², 15×15cm 供試體의 경우에는 23.0kg/cm², 10×20cm 供試體의 경우에는 22.0kg/cm²의 引張強度를 보일 것으로 推定되므로 割裂試驗에 의한 引張強度(21.58kg/cm²)에 근접하는 Double-Punch 試驗時의 공시체 및 Punch의 치수는 15×30cm 供試體에 4.0cm의 Punch인 경우와 15×15cm 공시체에 3.5cm의 Punch인 경우, 그리고 10×20cm 공시체에 4.0cm의 Punch인 경우와 5×10cm 供試體에 Punch 치수 2.5cm인 4 가지 경우를 추출해 낼 수 있다.

그러나 Punch의 치수를 달리함으로써 생기는 強度의 차이는 15×30cm인 경우 7kg/cm², 10×20cm의 경우 6kg/cm², 5×10cm의 경우 7kg/cm²를 보이는 반면 15×15cm의 경우에는 약 4kg/cm²의 차이를 보이고 있어 가장 적게 나타나 Punch 크기의 영향을 가장 적게 받으므로 가장 有利한 것으로 생각된다.

4. 割裂試驗과 Double-Punch Test 와의 關係

本 試驗에서 各 Data의 平均値를 얻는 過程에서 各 Data間의 變動係數(Coefficient of Variation)를 구해 보면 表 9와 같다.

Table-9에서 보듯이 各 data 間의 變動係數는 Double Punch Test에서 Punch의 크기가 3.5cm인 경우에는 割裂試驗의 경우에 비하여 상당히 낮게 나타나고 있어 試驗結果가 均一함을 알 수 있다.

따라서 試驗結果인 Table-8, Fig. 10, Table-9로 미루어 보아 Double Punch Test로 인정시험

Table-9. Coefficient of Variation as a Percentage.

Test	Specimen size (cm)					cf
	Punch size (cm)	15×30	15×15	10×20	5×10	
D. P. T.	1.5	7.90	5.70	4.72	4.56	
	2.5	6.29	8.59	4.30	2.00	
S. P. T.		7.64	6.86	7.64		

*coeff. of variation: $V = \frac{\sigma}{x} \times 100 (\%)$

where, X: average
σ: standard deviation

Table-10. Strength Effect of Curing days.

Variables Curing days	Average tensile strength in D. P. T f_t^d , kg/cm ²	Average tensile strength in S. P. T f_t^s , kg/cm ²	Coeff of variation (%)		Average compress-strength strength f_c , kg/cm ²	f_c/f_t		$\frac{f_t^d}{f_t^s}$
			D. P. T	S. P. T		D. P. T	S. P. T	
7	18.08	18.71	6.08	6.08	169.52	9.38	9.07	0.96
28	21.14	21.82	5.07	7.78	200.67	9.49	9.20	0.97
60	21.49	21.95	4.97	5.37	206.39	9.60	9.40	0.98
90	22.03	22.54	1.84	3.55	212.02	9.62	9.41	0.98

을實施할 경우에는 공시체의 크기를 15×15cm, Punch의 직경을 3.5cm로 하는 것이 적당할 것으로 판단되었다.

Double-Punch Test를 15×15cm의 공시체에, Punch의 크기 3.5cm인 경우로 실시하고, 할열시험은 15×30cm 공시체에 대하여 실시한 경우의 각 시험에 의한 강도 및 그에 따른 변동계수를 재령의 변화에 따라 구해보면 Table-10과 같다.

Table-10으로부터 전 양생기간을 통하여 볼 때 Double Punch Test에 의한 변동계수는 割裂試驗의 그것보다 작아서 試驗結果의 均一性이라는 側面에서 Double-Punch Test가 割裂試驗보다 有利한 것으로 나타났다. 즉, Double-Punch Test에 의한 변동계수는 약 1.84~6.08%, 割裂試驗에 의한 그것은 3.55~7.78%의 범위내에 들고 있는데 어느 경우나 養生日數가 증가할수록 변동계수는 오히려 작아지고 있어, 試驗結果의 均一性은 더욱 좋아지는 側向을 보이고 있다.

이 結果를 Chen¹²⁾이 試驗한 경우와 比較하여 보면, Chen의 경우에는 割裂試驗에서는 15.2×30.4cm 供試體를 使用하였으며 Double Punch Test의 경우에는 Punch의 크기가 직경 3.82cm이고, 供試體의 크기는 15.2×15.2cm를 使用하여, 普通骨材를 使用한 경우에 변동계수는 割裂試驗에서는 1.8~4.7%를, Double Punch Test에서는 0.5~5.6%를 나타내어 본 試驗보다는 낮은 변동계수를 나타내고 있다. 그러나 全般的인 傾向으로 Double-Punch Test에 의한 변동계수가 割裂試驗에 의한 변동계수보다는 낮아서 試驗結果의 均一性은 Double-Punch Test가 割裂試驗보다 우수하다는 사실은 Chen의 경우나 본 試驗의 경우나 同一하다고 볼 수 있다.

또한 Table-12로부터 양생일수에 따른 강도의 변화(증가)양상을 圖示하면 Fig. 11과 같다.

Fig. 11에서 나타난 割裂試驗은 15×30cm 供試

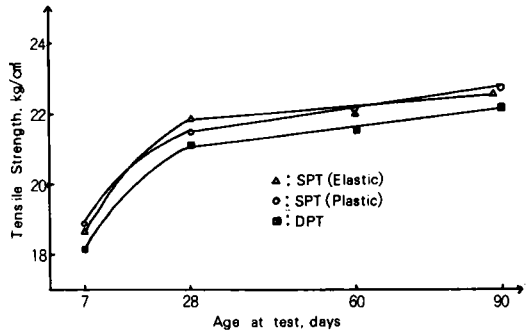


Fig. 11. Tensile Strength in D. P. T and S. P. T in Relation to Test Ages.

體를, Double Punch Test는 15×15cm 供試體에 Punch는 3.5cm로 實施한 結果로서 양생일수가 7日에서 28日 사이에는 약 3kg/cm²의 증가를 보인 반면 그 이후의 기간에 대해서는 變化(강도의 증가)가 적었다.

또한 全 養生期間을 통하여 할열시험에 의한 강도는 Double-Punch Test에 의한 강도보다 약간 크게 나타나고 있는데 이는 할열시험은 파괴면이 하나인데 비해 Double-Punch Test는 파괴면이 적어도 2個내지는 3個로서, 이때의 강도는 이 파괴면들에 의한 힘의 平均値로 表示되기 때문이다.

이 結果를 Chen¹²⁾이 試驗한 경우와 比較해보면, Chen의 경우에는 재령 7日에서 28日 사이에는 약 4kg/cm²의 인장강도 증가를 보이고 그以後의 期間에 대해서는 약 2kg/cm²의 증가를 보였다. 그러나 재령에 따른 인장강도의 증가 양상은 본 試驗의 경우나, Chen의 경우나 비슷한 경향을 나타내고 있었다.

또한 본 試驗의 경우에는 Double-Punch Test에 의한 인장강도가 割裂試驗에 의한 인장강도의

96~98% 정도에 이르는 반면, Chen의 경우에는 Double-Punch Test에 의한 引張強度가 割裂試驗에 의한 引張強度의 94~111%까지 나타내고 있어, 本試驗보다도 큰 차이를 보이고 있다.

이러한 차이를 보이고 있는 理由는 Double-Punch Test에 의한 引張強度 試驗時供試體의 크기, Punch의 크기 등에서 연유하는 치수효과(scale effect)와 供試體를 製作하는데 基本이 되는 콘크리트의 配合設計가 틀림으로 인해서 發生했을 것으로 추측된다.

즉, 本試驗의 경우에는 Double-Punch Test를 實施할 경우, Punch의 크기는 직경 3.5cm, 공시체의 크기는 15×15cm로 하였으며 물-시멘트比(w/c)는 49%로 하였는데, Chen의 경우에는 Double Punch Test의 경우 Punch의 크기는 직경 3.82cm, 공시체의 크기는 15.2×15.2cm로 하였으며 물-시멘트比는 65%로 實施하는 등의 차이가 있다.

그리고 15×30cm 供試體에 대한 割裂試驗의 結果와 15×15cm의 공시체에 Punch의 크기가 3.5cm인 경우의 Double Punch Test에 의한 結果와의 관계를 圖示하면 Fig.12와 같다.

Fig. 12와 같이 전 양생기간을 통하여 Double-Punch Test에 의한 引張強度와 割裂試驗에 의한 引張強度 사이에는 별로 큰 차이가 없기 때문에 割裂試驗을 대신하여 Double-Punch Test를 利用하여도 좋을 것으로 思料된다.

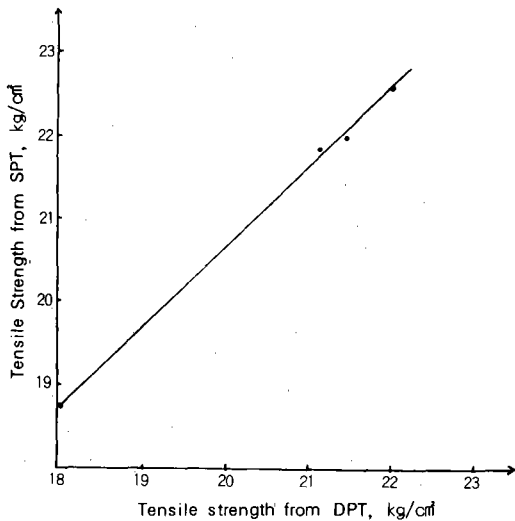


Fig. 12. Relationship of Tensile Strength between D. P. T and S. P. T

V. 要約 및 結論

本 研究는 콘크리트의 引張強度 試驗 方法으로서 現在 가장 널리 利用되고 있는 割裂試驗이 가지고 있는 短點인 높은 變動係數와 試驗의 不便함을 보완하기 위한 方法으로서, Double-Punch 試驗을 實施하여 在來의 方法인 할열시험과 비교해 봄으로써 實用性 여부를 확인하는 同時에 이 試驗에 必要한 Punch의 크기 및 공시체의 크기를 決定하는데 있다.

이에 대한 試驗結果를 要約하면 다음과 같은 結論을 導出할 수 있다.

1. 割裂試驗에 의한 引張強度 試驗時, 彈性理論과 塑性理論(上限·下限의 平均值)에 의한 引張強度는 잘 一致되는 경향을 보이고 있다.

2. 割裂試驗과 Double-Punch 試驗에서 供試體의 치수가 달라짐에 따라 引張強度는 서로 다른 값을 나타내었다.

그러나 공시체의 직경과 높이의 비가 1:2 인 경우에는 供試體의 치수가 작을수록 강도는 높아지는 경향을 보였는데 그 비가 1:1인 경우에는 이와는 다른 증가 양상을 보였다.

3. Double-Punch Test에서 供試體의 크기가 일정할 때에는 Punch의 크기가 커질수록 그에 따라 引張強度도 증가하는데 4 가지의 공시체 크기 중에서 15×15cm 供試體가 가장 작은 증가폭을 보이고 있다.

4. Double-Punch Test의 試驗結果의 變動係數는 공시체의 크기 및 Punch의 크기에 따라 다르며, 가장 낮은 Punch의 크기가 3.5cm인 경우로서, 이때의 변동계수는 할열시험에 의한 변동계수보다 낮아서 試驗結果의 均一性이라는 측면에서 상당히 有利한 것으로 판단된다.

5. 할열시험과 Double-Punch 試驗 모두에서 재령이 증가함에 따라 引張強度는 증가하는데 증가폭은 7日~28日 사이가 가장 크고, 그 이후에는 서서히 증가하는 양상을 보였다. 또한 두가지 試驗方法 모두 재령이 증가함에 따라 변동계수는 낮아져 試驗結果의 均一性은 좋아지고 있다.

6. 콘크리트의 引張強度 試驗方法으로서 現行 割裂試驗을 Double-Punch 시험으로 대체할 경우, Double-Punch 試驗에 必要한 供試體의 치수는 15×15cm, Punch의 크기는 두께 1cm, 직경 3.5cm의 강재를 使用하면 할열시험에 의한 引張強度의

96~98% 정도를 기대할 수 있으며, 변동계수는 할열시험보다 낮아서 시험결과의 균일성은 할열 시험에 의한 것보다 우수하다.

參 考 文 獻

1. 權鎮東·金生彬(1982), 新制 土木材料學, 慶文出版社.
2. 徐英甲·申鉉默(1982), 最新 鐵筋콘크리트 工學, 治庭文化社.
3. 李歐衡外 六人(1983), 鐵筋콘크리트設計法, 文運堂
4. (1978), 콘크리트標準示方書 解説, 大韓土木學會.
5. 韓國工業規格(KS)
6. Akazawa, T. (1953), Tension test method for concrete, Bulletin No. 16, International Association of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures, pp.11-73.
7. ACI standard 214-65.
8. Andrie C. T. Chen., and Chen, W. F. (1975), Constitutive Relations for concrete, ASCE, Vol. 101, No. EM4, pp.465-480.
9. Andrie C. T. Chen., and Chen, W. F.(1975), Constitutive equations and punch-indentation of concrete, ASCE, Vol.101, No. EM6, pp.889-906.
10. Bresler, B., and Prister, K. S. (1958), Strength of Concrete under combined stresses, Journal of ACT, pp.321-345.
11. Chen, W. F., and Trumbaer, B. E. (1972), Double Punch Test and Tensile Strength of Concrete, ASTM, 7, (2), pp.148-154.
12. Chen, W. F., and Robert L. Yuan (1980), Tensile strength of concrete, ASCE, Vol. 106. No. ST8, pp.1673-1683.
13. Chen, W. F., and Chang, T. Y. P. (1978), Plasticity solutions for concrete splitting tests, ASCE, vol.104, No.EM3, pp.691-704.
14. Chen, A. C. T., and Chen, W. F. (1976), Nonlinear Analysis of concrete Splitting Tests, Computers and Structures, Pergamon Press, New York, pp.451-457.
15. Carneiro, F. L. L., and Barcellos, A. (1953), Tensile strength of concrete, Bulletin No. 13, International Association of Testing and Research Laboratories for Materials and Structures, pp.97-123.
16. Chen, W. F. (1970), Extensibility of concrete and theorems of Limit Analysis, ASCE, Vol.96, No.EM3, pp.341-352.
17. Chen, W. F., and Drucker, D. C. (1969), Bearing capacity of concrete blocks or rocks, ASCE, Vol.95, No.EM4, pp.955-978.
18. Chen, W. F., and Suzuki, H. (1980), Constitutive models for concrete, Computers and Structures, pergamon Press, New York, pp.23-32.
19. Chen, W. F. (1970), Double Punch Test for Tensile strength of Concrete, ACI, Vol. 67, pp.993-995.
20. Chen, W. F., (1982), Constitutive Equations for Engineering Materials, Vol. 1, John Wiley & Sons, New York.
21. Hsieh, S. S., Ting, E. C., and Chen, W. F. (1979) An Elastic-Fracture Model for Concrete, ASCE, pp.437-440.
22. Hughes, B. P., and Chapman, G. P. (1966), The complete stress-strain curve for concrete in direct tension, Bulletin RILEM, No. 30, pp.95-97.
23. Harris, H. G., Sabnis, G. M., and White, R. N. (1966), Small scale direct models of reinforced and prestressed concrete structures, Cornell Univeristy, Ithaca, New York.
24. Hondros, G.(1959), The evaluation of Poisson's ratio and the Modulus of materials of Low tensile resistance by the Brazilian (Indirect tensile) Test with particular reference to concrete, Australian Journal of Applied Science, Vol.10, pp.243-268.
25. Joseph, J. W.(1978), Concrete Construction Handbook, McGraw-Hill, N. Y.
26. Kooharian, A. (1952), Limit Analysis of Voussor (Segmental) and concrete arches, ACI, Vol.24, pp.317-328.
27. Komendant, A. E. (1977), Contemporary Concrete Structures, Huntington, New

- York.
28. McNeely, D. J., and Lash, L. D. (1963), Tensile strength of concrete, ACI, pp.751-761.
 29. Mirza, S. A., Hctzinikolas, M., and McGregor, J. G. (1979), Statistical descriptions of strength of concrete, ASCE, Vol.105, No. ST6, pp.1021-1037.
 30. Mills, L. L., and Zimmerman, R. M. (1970), Compressive Strengthe of Plain concrete under multiaxial loading condition, ACI, Vol.67, No.10, pp.802-807.
 31. Mirza, M. S., White, R. N., and Roll, F. (1972), Materials for structural Models, ACI, Committee 444, Dallas, Tex.
 32. Offsen, N. S. (1977), A failure criterion for concrete, ASCE , Vol.103, No.EM4, pp.527-535.
 33. Oladapo, I. O. (1964), Extensibility and Modulus of Rupture of concrete, Bulletin No.18, Structural Research Laboratory, Tech, University of Denmark.
 34. Robert D. D., and Ahmad, A. H. (1979), Tensile strength of concrete masonry, ASCE, Vol.105, No.ST7, pp.1261-1276.
 35. Robinson, G. S. (1967), Behavior of concrete in Biaxial Compression, ASCE, Vol. 93, No. ST1, pp.71-86.
 36. Timoshenko, S., and Goodier, J. N. (1970), Theory of Elasticity, McGraw-Hill, New York.