

# 普通 콘크리트의 應力-變形度에 대한 實驗的 研究

## A Experimental Study of Stress-Strain Relation of Normal Concrete

김 화 중<sup>(1)</sup> 안 상 건<sup>(2)</sup> 박 정 민<sup>(3)</sup>  
Kim, Wha Jung An, Sang Gun Park, Jung Min

### ABSTRACT

It was achieved to formulate numerically the stress-strain relationship of concrete, which is a fundamental factor for the Elasto-Plastic analysis of concrete structures, for normal concrete by using random statistics.

As a result of experiment, in the shape of stress-strain curves of normal concrete it has approach linear from first loading to peak point, and after that point deformation increased radically and specimens were brokendown abruptly.

From the multiple linear regression, and obtained the exponential equation for stress-strain relationship of concrete as follows:

$$\sigma / \sigma_{\max} = e^{(1 - \epsilon / \epsilon_{\max}) \epsilon / \epsilon_{\max}}$$

### 1. 序論

産業의 發展과 함께 最近 콘크리트의 需要가 急增하고 있으며, 콘크리트 構造物의 舉動에 대한 解析과 關聯하여 콘크리트의 力學的 性質의 糾明은 매우 重要하다. 그 中에서도 특히 荷重을 받는 콘크리트의 變形은 콘크리트의 破壞機構 및 內部構造와 關聯하여 構造物에 대한 非間接的인 情報를 提供하여 주며, 實際的인 觀點에서 콘크리트 部材에 대한 極限 強度 設計는 콘크리트의 變形能力과 關聯이 깊다. 그리고 콘크리트의 變形能力에 대한 知識은 構造物의 처짐과 觀測된 變形으로부터 應力을 計算하기 위해 必要한 것이다. 한편, 콘크리트의 應力-變形度 關係에 대한 1940年代初에 古典的인 彈性理論을 基礎로 하여 彈性係數, modular ratio, 그리고 許容應力 등의 正義를 내리는 데에 寄與함을 始發로 하여,

同時에 Hognested 등에 의해 非彈性 理論들이 考察되어 發展을 이루었으며, 應力-變形度 關係에 대한 많은 一般式이 提案 되었다. 또한, 1960年代부터는 鐵筋 콘크리트 部材의 極限 荷重強度 解析 등과 關聯하여 많은 研究者들에 의해 實驗과 數學的 解析이 이루어졌으며, 最近에는 確率統計學을 利用하여 콘크리트의 應力-變形度 關係를 定式化하는 研究가 多數 이루어지고 있다. 이러한 趨勢와 關聯하여 本研究는 콘크리트의 力學的 性質에 影響을 미치는 要因으로서 물시멘트比, 單位시멘트量, 筋骨材率 등을 因子로 한 基準 配合表에 따라 圓形 콘크리트 試驗體를 製作試驗하여 一軸壓縮載荷時의 콘크리트의 最大壓縮強度와 그때의 變形率을 考察하였으며, 아울러 콘크리트의 機械的 性質에 基本的으로 影響을 주는 要因을 變數로 普通 콘크리트의 應力-變形度 關係를 定式化하고자 하였다.

(1) 慶北大學校 工科大學 建築工學科, 助教授

(2) 慶北大學校 建築工學科, 碩士過程

(3) 慶北大學校 建築工學科, 碩士過程

## 2. 實驗

### 2-1. 實驗 概要

본 實驗에서는 配合 設計時 單位시멘트量 500, 550, 600 kg/m<sup>2</sup>에 대해서 물시멘트比를 30, 35, 40%, 그리고 잔골材率은 35, 40, 45%로 設定하였으며 콘크리트의 高強度化, 流動性 등을 考慮하여 單位시멘트量을 上向하였으며 아울러 混和劑는 AE減水劑 CX-3와 高性能 流動化劑 SIKAMENT를 1:2의 比率로 單位시멘트量에 대해서 0.4%를 混入하였다. 實驗因子와 水準은 表 1 에 나타낸다.

표 1. 實驗因子와 水準

항 목	수 준			
	500	550	600	
單位 시멘트량(kg/m <sup>3</sup> )	500	550	600	
물시멘트比 (%)	35	40	45	30
잔골材率 (%)	35	40	45	

### 2-2. 材料

#### 2-2-1. 시멘트

本 實驗에 使用한 시멘트는 KS L 5201에 規定된 國產 普通 포틀랜드 시멘트이며, 實驗에 의한 그 物理的 性質은 表 2 와 같다.

표 2. 시멘트의 物理的 性質

比重	安定性	粉末度	凝結時間 (h:m)		壓縮強度(kg/cm <sup>2</sup> )		
		cm <sup>3</sup> /s	초 길	종 길	3日	7日	28日
3.15	양 초	3,250	1-20	6-30	204	295	385

#### 2-2-2. 骨材

實驗에 使用한 靑은骨材는 慶北 신립산 碎石骨材이며, 잔骨材는 慶北 예천산 天然모래이다. 配合時 表面乾燥飽和狀態로서 使用하였다. KS F 2502-2506의 規定에 의해 實驗한 骨材의 性質은 各各 表 3, 表 4와 같다.

표 3. 靑은骨材의 物理的 性質

產地	骨材의 크기 (mm)	比重	吸收率 (%)	單位容積重量 (kg/m <sup>3</sup> )	밋기시험 (%)	組粒率
慶北産	25	2.76	3.146	1,681	0.513	6.87

표 4. 잔骨材의 物理的 性質

產地	比重	吸收率 (%)	單位容積重量 (kg/m <sup>3</sup> )	組粒率
慶北産	2.49	1.07	1625	3.29

### 2-3. 試驗體 製作

콘크리트의 混合은 Drum Mixer를 使用하여 靑은骨材, 잔骨材, 시멘트의 順으로 材料를 投入하고 약 1분간 乾비빔을 行한 後, 물을 投入하여 약 1분~1분 50초 程度 混合을 하였다. 굳지않은 콘크리트에 대한 實驗을 行한 후 각 batch 全體의 콘크리트를 平均한 철판에 부어 材料가 均一하게 分布하도록 손비빔을 行한 後  $\Phi 10 \times h20cm$ 의 鋼材 圓形 mould로서 成形하고 나서 12時間 지난 後 유리판으로 capping을 하였으며, 다시 그 後 12時間後에 試驗體를 탈형하였다. 脫형한 試驗體는 KS F 2404의 規定에 따라 流水와 振動이 없는 23±2°C의 常溫水槽에 넣어 濕潤狀態로 貯藏하여 養生시켰다.

### 2-4. 實驗方法

普通 콘크리트의 應力-變形度 關係 實驗에 있어서, 試驗體의 載荷는 容量 100t의 油壓式 萬能試驗器를 使用하였으며, 試驗體를 加壓판의 中央에 오도록 位置시킨 後 매초 1.5~3.0 kg/cm<sup>2</sup>의 一定한 速度로 荷重을 加하였으며, 加해진 荷重은 50t容量의 Load cell을 通하여 測定하였다. 應力計算에 利用된 試驗體의 斷面積은 지름을 2회 測定한 후 그 平均값을 使用하였다. 콘크리트의 應力은 試驗體가 받은 最大荷重을 斷面積으로 나누어 구하였다. 最大壓縮應力 以下에서의 反復壓縮載荷는 最大壓縮應力의 2-3等分の 應力位置에서 荷重이 0이 될 때까지 除荷

를 행하였으며, 最大壓縮應力以後의 復元力 特性을 把握하기 위하여 다시 反復壓縮載荷를 하는 등 總 3-4回 程度의 反復壓縮載荷를 하였다. 應力-變形度의 測定은 Load Cell과 LVDT Transducer로부터의 信號를 컴퓨터를 利用하여 入力받아 X-Y Plotter를 通하여 記錄하였다. 實驗의 系統圖는 다음과 같다.

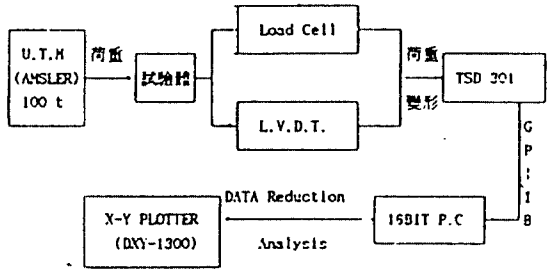


그림 1. 應力-變形度 關係 實驗의 系統圖

### 3. 實驗 結果 및 考察

#### 3-1. 最大壓縮強度

實驗結果에 의한 最大壓縮強度의 平均値와 콘크리트의 配合表를 表 5.에 나타낸다. 各 因子가 最大壓縮強度에 미치는 影響을 把握하기 위하여 分散分析을 行한 結果, 1%의 水準에서 有意性을 나타내었다. 單位시멘트量과 最大壓縮強度의 關係에서는 單位시멘트量이 增加함에 따라 壓縮強度도 대체로 增加하는 傾向이 있다. 實驗結果에서는 單位시멘트量이 500kg/m<sup>3</sup>으로 增加할 때 壓縮強度는 減少하고 있으며, 550kg/m<sup>3</sup>에서 600kg/m<sup>3</sup>으로 增加할 때 增加하는 것으로 나타나고 있다.

물시멘트比와 壓縮強度와의 關係에 있어서는 물시멘트比가 增加할 때 壓縮強度는 대체로 減少하고 있다. 實驗結果에서는 물시멘트比가 30%에서 35%로 增加할 때 壓縮強度는 增加하고 있으며, 물시멘트比가 35%에서 40%로 增加할 때 壓縮強度는 減少하는 것으로 나타났다. 이로 미루어 보아 물시멘트比가 큰 境遇에 壓縮強度의 減少傾向이 큰 것을 짐작할 수 있겠다. 잔骨材率과 壓縮強度의 關係에 있어서는 殘骨材率이 增加함에 따라 壓縮強度도 대체로 增加하는 傾向이 있다.

#### 3-2. 最大壓縮強度-變形度 曲線

實驗에 의한 普通 콘크리트의 單調增加壓縮載荷 및 反復壓縮載荷時의 最大壓縮強度-變形度 曲線은 그림 11에 나타낸다. 曲線에서 實線은 實驗時에 測定한 값이고, 點線은 定式化 結果로 구한 計算値이다. 曲線의 上昇域에서 初期載荷부터 最大壓縮強度까지의 曲線의 形狀은 거의 直線에 가까우며, peak point를 지나면서부터는 曲線으로 緩和되는 것으로 나타났다. 그리고, 試驗體의 大部分은 載荷初期에서 peak point까지 曲線의 傾斜는 比較的 급한 편으로 變形率도 작게 나타나지만, peak point에 이르러서는 試驗體가 급격히 破壞하면서 曲線의 下降域에서는 變形率이 급격히 增加하는 취성거동을 보이고 있다. 試驗體의 最大壓縮強度가 클수록 이러한 傾向이 있다. 載荷時의 曲線의 形狀은 強度가 큰 境遇에는 原點에 가깝게 수축하여 殘留變形이 적으며, 曲線도 直線에 가깝다.

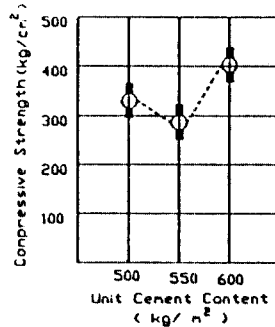


그림 2. 單位시멘트量과 最大壓縮強度와의 關係

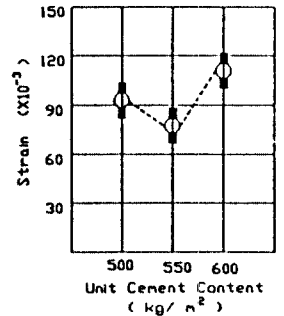


그림 3. 單位시멘트量과 最大變形率과의 關係

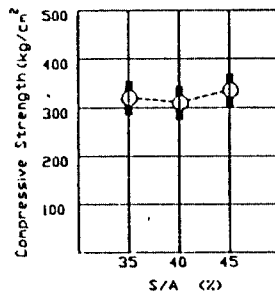


그림 4. 물시멘트比와 最大壓縮強度와의 關係

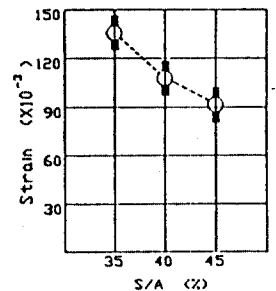


그림 5. 물시멘트比와 最大變形率과의 關係

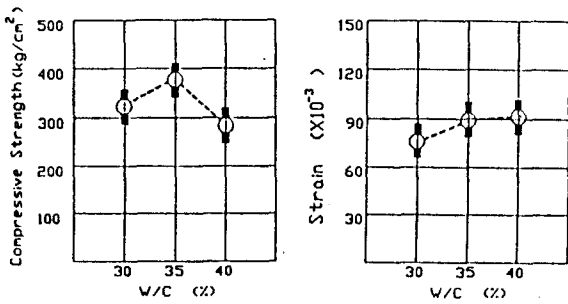


그림 6. 잔골材率과  
最大壓縮強度와의 關係

그림 7. 잔골材率과  
最大變形率과의 關係

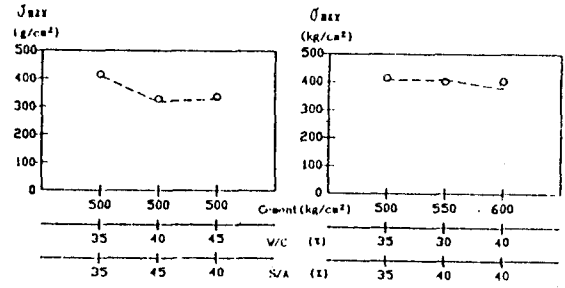


그림 8. 最大壓縮強度의 實驗結果와 回歸式에 의  
한 計算結果

### 3-3. 回歸分析 結果

콘크리트의 應力-變形度 曲線은 大部分 最大壓縮強度, 最大壓縮強度時의 變形, 初期 彈性係數, 割線係數 등에 의해서 表現되고 있다. 따라서 콘크리트 應力-變形度 關係를 定式化하기 위해서는 앞에서 論한 因子들에 대해서 綜合的인 影響을 檢討할 必要가 있다. 그래서, 普通 콘크리트의 單位시멘트量, 물시멘트比, 잔골材率 등의 因子가 最大壓縮強度, 最大壓縮強度時의 變形率, 彈性係數에 미치는 影響을 分析하기 위해서 重線形 回歸分析을 行하였다. 各 因子를 各各 目的(從屬)變數로 하고, 單位시멘트量, 물시멘트比, 잔골材率 등을 說明(獨立)變數로 하여 重線形 回歸分析을 行한 結果는 0.1의 有意水準에서 回歸가 有意한 것으로 나타났다. 그리고 分析結果에 의하여 구한 回歸方程式은 다음과 같다.

$$\sigma_{max} = 679.93 + 0.249x_1 - 4.565x_2 - 6.768x_3$$

$$\epsilon_{max} = 0.40074 - 0.00014x_1 - 0.00159x_2 - 0.00392x_3$$

$$E = -47.83 + 0.083x_1 - 0.321x_2 - 0.98x_3$$

$\sigma_{max}$  = 最大壓縮強度 (kg/cm<sup>2</sup>)

$\epsilon_{max}$  = 最大壓縮強度時의 變形率 (%)

E = 彈性係數 (× 10<sup>4</sup> kg/cm<sup>2</sup>)

(x<sub>1</sub>: 單位시멘트量 x<sub>2</sub>=물시멘트比 x<sub>3</sub>=잔골材率)

### 4. 普通 콘크리트의 應力-變形度 關係의 定式化

콘크리트의 應力-變形度 關係는 構造物의 彈塑性 解析에 直接的인 情報를 提供하기 때문에 重要한 性質중의 하나이다. 따라서 콘크리트의 應力-變形度

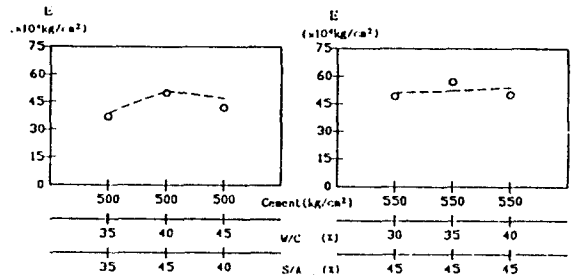


그림 9. 最大壓縮強度時의 變形率의 實驗結果와 回歸式에 의한 計算結果

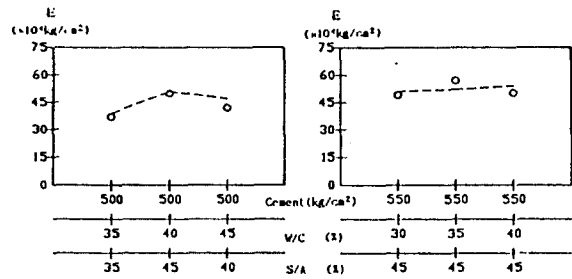


그림 10. 彈性係數의 實驗結果와 回歸式에 의한 計算結果

關係를 構造解析에 適用하기 위해서는 定式化할 必要가 있다. 콘크리트의 應力-變形度 曲線式은 參考 文獻 11을 참고로 다음과 같은 式으로 表現하였다.

$$\sigma / \sigma_{max} = e^{(1 - \epsilon / \epsilon_{max})} \epsilon / \epsilon_{max}$$

이때,  $\sigma_{max}$  : 最大應力時 變形

$\epsilon_{max}$  : 最大應力(強度)

$\epsilon_{max}$ ,  $\sigma_{max}$ 는 普通 콘크리트에서는 單位시멘트 量, 물시멘트比, 잔骨材率 등의 影響을 받는다. 따라서, 위에서 行한 回歸方程式을 利用하여 計算한  $\epsilon_{max}$ ,  $\sigma_{max}$ 의 값을 定式化에 使用하였다.

$$\text{壓縮強度} : \sigma_{max} = 679.93 + 0.249x_1 - 4.565x_2 - 6.768x_3$$

$$\text{變形率} : \epsilon_{max} = 0.400740 - 0.00014x_1 - 0.00159x_2 + 0.00392x_3$$

이때,  $x_1$  : 單位시멘트量 (kg/m<sup>2</sup>)  
 $x_2$  : 물시멘트比 (%)  
 $x_3$  : 잔骨材率 (%)

## 5. 結論

普通 콘크리트의 應力-變形度 關係를 實驗에 의하여 考察한 結果, 다음과 같은 結論을 얻을 수 있었다.

### (1) 普通 콘크리트의 應力-變形度 曲線

가. 曲線의 上昇域에 있어서 載荷初期부터 最大壓縮強度까지의 曲線의 形狀은 거의 直線에 가까우며, peak point 以後에는 曲線으로 緩和되고 있다.

나. 載荷初期에는 曲線의 기울기가 급하여 變形이 작게 나타나지만, peak point에 이르러서는 瞬間적으로 破壞가 이루어지면서 變形이 급격히 增加하고 있다.

다. 載荷時의 曲線은 最大壓縮強度가 클수록 曲線의 形狀은 直線에 가까우며, 殘留變形도 작게 일어난다.

(2) 實驗結果를 分散分析을 통하여 普通 콘크리트의 強度性狀에 대한 各因子들의 影響을 考察한 結果는 다음과 같다.

가. 最大壓縮強度: 잔骨材率, 물시멘트比, 單位시멘트量의 順으로 影響을 미치고 있는 것으로 나타났다.

나. 最大壓縮強度時의 變形率: 最大壓縮強度의 境遇에서와 같이 잔骨材率, 물시멘트比, 單位시멘트量의 順으로 影響을 미치는 것으로 나타났다.

다. 彈性係數에 있어서는 별로 有意할 만한 影響을 알 수 없었다.

### (3) 應力-變形度 關係式

重線形回歸分析을 통하여 單位시멘트量, 물시멘트比, 잔骨材率을 變數로 하는 最大壓縮強度와 그 點에서의 變形率을 구할 수 있는 回歸式을 구하였다.

$$\text{壓縮強度} : \sigma_{max} = 679.93 + 0.249x_1 - 4.565x_2 - 6.768x_3$$

$$\text{變形率} : \epsilon_{max} = 0.400740 - 0.00014x_1 - 0.00159x_2 + 0.00392x_3$$

이때,  $x_1$  : 單位시멘트量(kg/m<sup>2</sup>)  
 $x_2$  : 물시멘트比(%)  
 $x_3$  : 잔骨材率(%)

위의 回歸式을 使用하여 다음과 같은 應力-變形度 關係式을 구하였다.

$$\sigma / \sigma_{max} = e^{(-\epsilon / \epsilon_{max})} \epsilon / \epsilon_{max}$$

本 研究는 90年度 韓國科學財團의 신진基礎 研究費 지원으로 이루어진 研究로 財團에 感謝를 드립니다.

## 參考 文獻

1. Ramaley, D., and Mchenry, D., "Stress-Strain Curves for Concrete Stained Beyond the Ultimate Load", Laboratory Report No. SP-12, U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, March 1947, 22 pp.

2. Prentis, J.M.H., "The distribution of Concrete Stress in Reinforced and Prestressed Concrete Beam When Tested to Destruction by a Pure Bending Moment", Magazine to Concrete Research, Vol. 2, No. 5, London, January 1951, pp. 77-73

3. Hognested, E., Hanson, N.W., and Mchenry, D., "Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design", ACI Journal, Proceedings Vol. 52 No. 4, December 1955, pp. 73-77

4. Lee, L.H.N., "Inelastic Behaviour of Reinforced Concrete Member", Transactions,

ASCE, Vol.120, 1955, pp.181-202

5. Sahlin, S., "Effect of Far-Advanced Compressive Strains of Concrete in Reinforced Concrete Beams Submitted to Bending Moments", *Betong*, Vol.40, No. 3., Stockholm, 1955, Library Translation No.65, Cement and Concrete Association, London.

6. Smith, G.M., and Young, L.E., "Ultimate Theory in Flexure by Exponential Function", *ACI Journal*, Proceedings Vol.52, No.3, November 1955, pp.349-360

7. Young L.E., "Simplifying Ultimate Flexural Theory by Maximizing the Moment of the Stress Block", *ACI Journal*, Proceeding Vol.57, No.5, November 1960, pp.549-556.

8. Desayi, p., and Krishnan, S., "Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete", *ACI Journal*, Proceeding Vol.61, No.3, March 1964, pp .345-350.

9. Saens, L.P., Discussion of a paper by P.Desayi and S.Krishnan, "Equation for the Stress-Strain Curve of Concrete", *ACI*

10. Sturman, G.M., Shah, S.P., and Winter, G., "Effect of Flexural Strain Gradients on Microcracking and Stress-Strain Behaviour of Concrete", *ACI Journal*, Proceedings Vol.62, No.7, July

11. 金和中, 高温度におけるコンクリートの力學的舉動に関する實驗的研究, *日本建築學會論文報告集* (198 8.2)

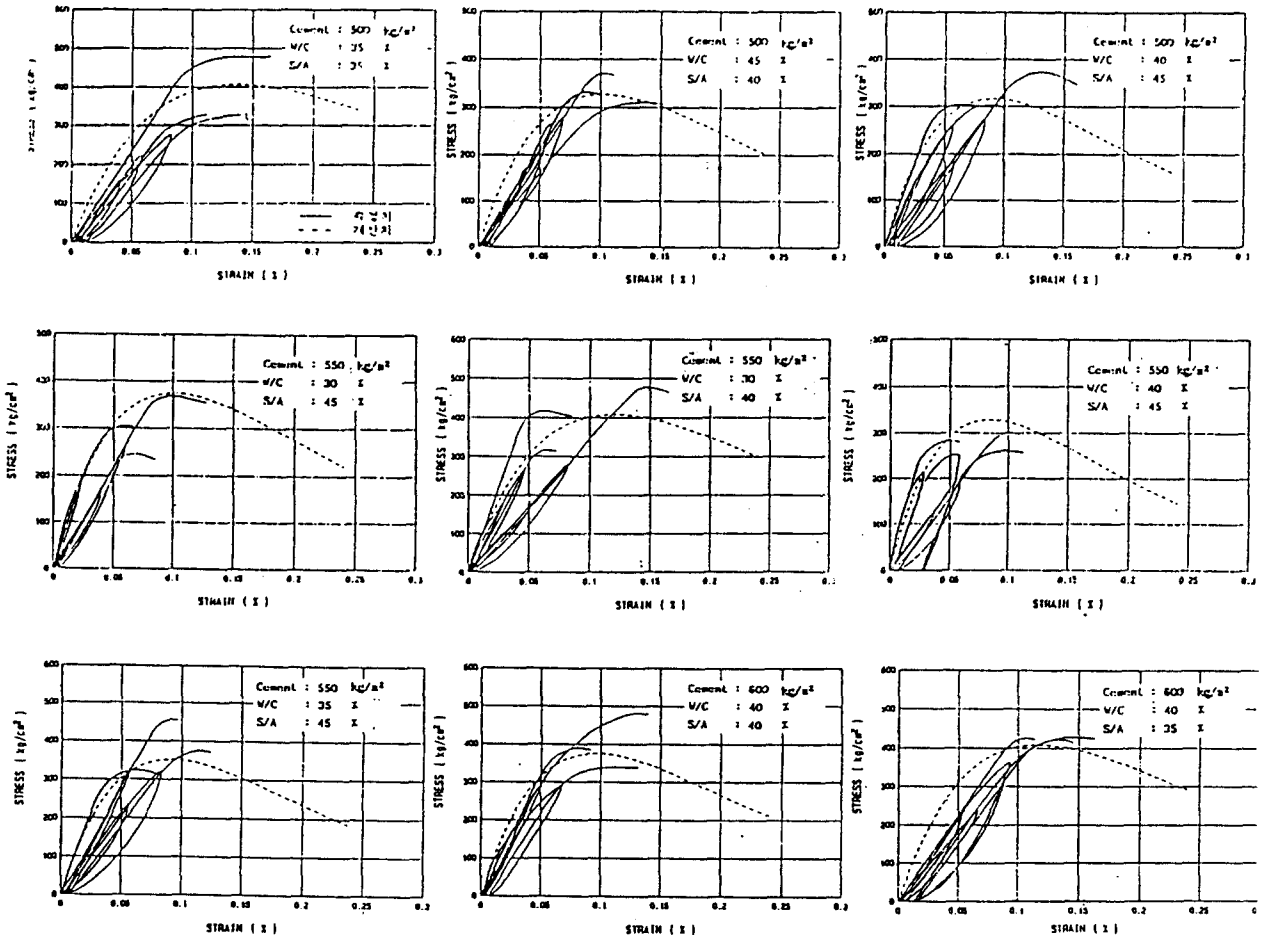


그림 11. 普通 콘크리트의 應力-變形度 曲線