

部分프리스트레스트된 矩形콘크리트

部材의 균열크기에 관한 研究

A Study on the Crack Width of the Partially Prestressed
Concrete Member with Rectangular Section

張 丞 弼*
Chang, Sung Pil

Abstract

The purpose of this research is to experimentally verify the effect of prestressing on the control of cracks and on the possible increase of load capacity of the members by testing five beams with same cross section and same reinforcement ratio but with different amounts of prestressing.

The test results indicate that the ultimate strength of prestressed concrete beams is only slightly higher than that of unprestressed concrete beams. It may be however need more experimental results to come to this conclusion. But it can be clearly seen that the effect of prestressing on the crack width is remarkable and that the reduction of about to 50% in crack width under service loads can be easily achieved by introducing small prestressing (about 25% of a fully prestressing).

要 旨

本論文은 同一한 斷面과 同一한 鐵筋比를 갖는 다섯 개의, 矩形斷面의 部分 P.C. 보에 各各 다른 程度의 프리스트레스를 도입하므로써 얻어지는, 균열발생의 抑制效果와 全體시스템의 耐荷力 增加效果를 實驗을 통하여 確認하는데 있다.

實驗結果, 프리스트레스를 加한 보의 極限耐荷力은 그렇지 않은 보의 그것보다 약간의 增加趨勢를 보이나, 이에 대한 結論을 내리기 위하여는 좀더 많은 實驗데이터가 要求된다. 프리스트레스의 도입에 의한 균열폭의 억제效果는 확실하게 나타나며 아주 작은 양인 完全프리스트레스의 25% 程度의 프리스트레스의 導入으로도 그렇지 않은 경우보다 使用荷重下에서 50% 程度로 抑制할 수 있는 것으로 나타난다.

*正會員 · 서울大學校 工科大學 副教授, 土木工學科

1. 序 論

外的環境에 그다지 큰 영향을 받지 않는 鐵筋 콘크리트部材가 死荷重에 比하여 큰 活荷重을 가감 받는다면, 이 部材는 프리스트레스를 加함으로써 그 斷面을 줄일 수 있다. 그러나 이 때 完全프리스트레스를 加하게 되면 活荷重이 作用하지 않을 때 力學上 問題가 야기되므로 이러한 境遇에는 部材를 部分스트레스드 콘크리트部材로 設計하는 것이 經濟的이다. 이 때는 균열이 死荷重下에서는 발생하지 않고 活荷重이 作用할 때에만 발생하도록 設計하는 것이 가장 理想的이다. 本 研究는 同一한 配筋狀態下에서 加해진 프리스트레스의 量이 균열폭의 크기에 어떠한 영향을 주는가를 實驗的으로 糾明하고 現在 使用하는 균열폭계산 公式들을 部分 P.C. 部材設計에 적용할 수 있는지, 如否의 檢討를 그 目的으로 한다.

2. 實驗部材의 選擇

2.1. 選擇理由

實驗部材의 斷面은 그 치수를 작게 取하므로써 乾燥收縮에 依하여 發生하는 殘留應力이 콘크리트의 引張強度에 미치는 影響을 最小限으로 줄였다. 斷面은 넓이 20 cm, 높이 24 cm의 矩形斷面을 取하였다.

部材가 균열이 없는 狀態(狀態 I)에서 균열이 發生한 狀態(狀態 II)로 바뀌는 것은 使用鐵筋量에 크게 좌우된다. 本實驗에서는 全鐵筋比(P.C. 鋼線+R.C. 鐵筋)를 比較的 작은 값인 $P=0.009$ 를 取하였다. 그렇게 함으로써 프리스트레스가 균열에 미치는 영향을 쉽게 관찰할 수가 있을 것을 기대했다.

2.2. 部材의 치수 및 鐵筋의 配筋

實驗은 $20 \times 24 \times 280$ cm의 치수를 갖는 5個의 矩形斷面을 갖는 보에 대하여 行하였다. 그림 1은 實驗部材의 치수와 鐵筋의 配筋을 나타낸 것이다. 콘크리트의 澆개는 1.5 cm로 取하였다.

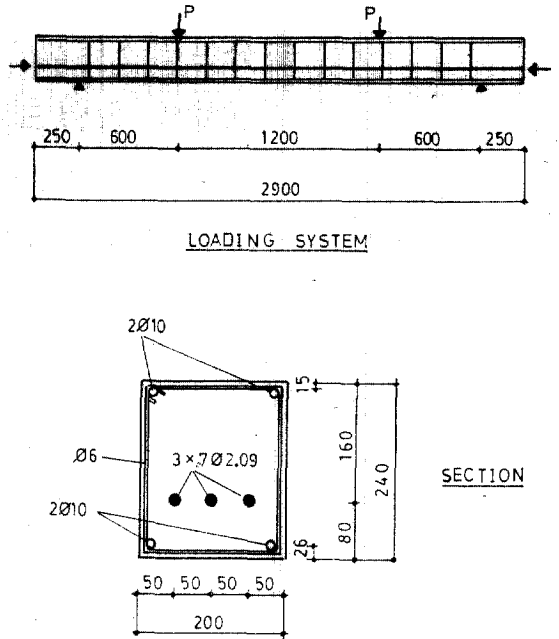


그림 1. Section Properties and Reinforcement Detail

3. 實驗材料

3.1. R.C. 鐵筋과 P.S. 鋼線

R.C. 鐵筋은 SBD 24 ϕ 10을 引張鐵筋으로 2個 使用하였고, 剪斷破壞를 防止하기 위하여 스티럽을 15 cm 간격으로 SBD 24 ϕ 6을 使用하였다. P.S. 鋼線으로는 7 \times ϕ 2.09 스트랜드를 使用하였는데, 이 鋼線의 性質은, 降伏強度가 $\sigma_s=155$ kg/mm², 引張強度는 $\sigma_u=177$ kg/mm²이다. 補助鐵筋 및 P.S. 鋼線의 彈性係數 E_s -값은 둘다 $E_s=E_s=2.05 \times 10^6$ kg/cm²을 基準으로 하였다.

3.2. 콘크리트

콘크리트의 配合設計는 1 m³當 cement PZ 300 kg, 모래 0/4 966 kg, 자갈 8/16 966 kg, 물 168 kg, 물-시멘트비 $W/C=0.56$ 으로 하고 슬럼프치는 2.5 cm를 基準으로 하여 28日 壓縮強度를 $\sigma_{ck}=300$ kg/cm²로 만들려고 勞力하였다. 壓縮強度實驗은 10 \times 20 cm의 圓筒形試片으로, 軸引張強度는 10 \times 10 \times 55 cm의 보의 引張實驗에 의하여 測定하였다.

아래 表 1 에서는 콘크리트 材料의 性質을 적은 것이다.

表 1. 콘크리트 材料의 性質

| 部 材 | 養生日 | 壓縮強度 | 引張強度 | 彈性係數 |
|-----|-----|--------------------|--------------------|--------------------|
| No. | 日 | kg/cm ² | kg/cm ² | kg/cm ² |
| 1 | 23 | 310 | 26.0 | 264,100 |
| 2 | 23 | 380 | 29.0 | 292,400 |
| 3 | 25 | 225 | 21.0 | 225,000 |
| 4 | 24 | 312 | 26.0 | 264,950 |
| 5 | 23 | 274 | 23.0 | 248,300 |

4. 프리스트레스의 導入

프리스트레스의 導入은 7×φ0.209의 스트랜드 3 個에 대하여 각각 同一量을 NPA 40 B/M Model No. 10010(Andrew Eraser & Co. LTD. London-System)에 의하여 行하였다.

5. 實驗過程

5.1. 實驗部材의 製作

實驗部材는 鋼材로 만들어진 몰드 兩端에 아바트먼트(abutment)를 設置하고 이 아바트먼트에 引張된 鋼線을 固定시킨 후 몰드속에 콘크리트를 타설하고 1日 증기양생 시킨다. 部材에 프리스트레스의 도입은 23~25日 양생후에 行하였다. 프리스트레스의 程度는 各 部材마다 달리하여 普通鐵筋콘크리트로부터 完全프리스트레스드 콘크리트까지 5等級으로 구분하였다. 部材에 加하는 荷重은 部材가 純圓狀態下에 있게 하기 위하여 兩支點에서 1/4 떨어진 곳 두 곳에서 同時에 集中荷重을 재하시켰다. 이 荷重은 手動式 流壓계키를 使用하여 加했으며 그 크기는 20t 容量의 프로빙링(proving ring)을 通하여 測定하였다. 그림 2는 재하장치 및 測定計測器를 나타낸 것이다.

5.2. 實驗測定

콘크리트의 引張 및 壓縮變形度를 測定하기 위하여 콘크리트스트레인게이지 68mm 를 보의 中

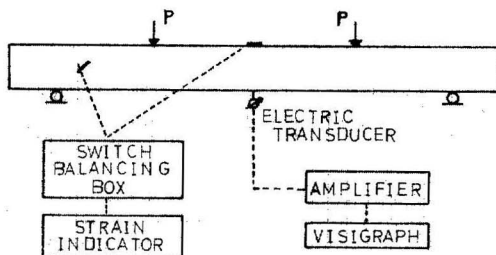


그림 2. Measuring System of Strains & Deflections

央部 上下에 各各 두 곳에 附着하였다. 支點에서 有效高 d 만큼 떨어진 곳에 45° 傾斜로 콘크리트게이지를 附着하여 콘크리트壓縮帶에 作用하는 壓縮應力을 測定하므로써 Mörsch의 트러스트理論을 確認하려 하였다. 補助鐵筋, 스티럽에는 5mm 스트레인게이지를 使用하였는데, 補助鐵筋에는 보中央部に 鐵筋마다 1 個씩을, 스티럽에는 端部に 2 個를 附着하였다. P.S. 鋼線은 꼬여진 스트랜드로 되어 있기 때문에 直接 스트랜드를 附着使用이 不可能하므로 鋼線의 位置에 콘크리트의 變形度를 測定하므로써 代身하였다. 콘크리트 속에 묻는 게이지를 2 個 보中央部に 使用하였다. 스트레인게이지의 變形에 의한 저항의 變化는 밸런스박스(balance box)를 通하여 Indicator에 스트레인으로 나타난다.

보의 처짐은 보의 中央部に Dialgage를 使用하여 測定하였는데 Dialgage에 나타난 눈금은 Amplifier를 通하여 Visigraph에 그래프로써 나

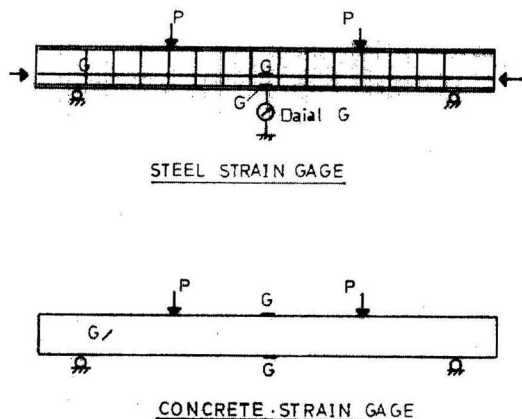


그림 3. Location of Strain Gages and Dialgages

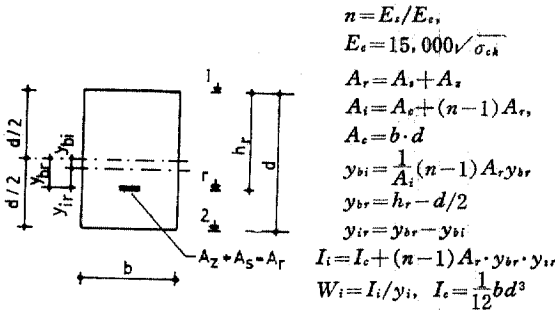
타난다. 이때 Calibration 은 Amplifier 에서 行한다.

균열의 幅은 0.01 mm 까지 읽을 수 있는 확대경으로 가장 큰 균열의 幅을 測定하였다.

表 2 에는 各 部材의 性質을 計算하여 놓았다.

表 2. 各 部材의 斷面의 性質

| 部材 No. | A_s cm ² | A_c cm ² | A_i cm ² | I_i cm ⁴ | W_{i1} cm ³ | W_{i2} cm ³ | W_{i3} cm ³ |
|--------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 1 | 1.57 | 2.758 | 509 | 24,572 | 1977 | 2,124 | 3,510 |
| 2 | 1.57 | 2.758 | 509 | 24,411 | 1972 | 2,100 | 3,463 |
| 3 | 1.57 | 2.758 | 509 | 24,856 | 1987 | 2,163 | 3,592 |
| 4 | 1.57 | 2.758 | 509 | 24,567 | 1976 | 2,123 | 3,510 |
| 5 | 1.57 | 2.758 | 509 | 24,678 | 1981 | 2,138 | 3,541 |



6. 프리스트레스량의 決定

6.1. 彈性變形에 의한 損失

彈性變形에 의한 應力損失은 아랫 式에 의하여 求할 수 있다. 여기서 $\sigma_{sv}^{(0)}$ 는 初期引張應力, n 은 鋼線의 數, A_s 는 P.S. 鋼線의 斷面積, A_i 는 合成斷面積이고 y_{is} 는 合成斷面中心에서 P.S. 鋼線까지의 距離를 나타낸다.

$$\Delta\sigma_{sv} = \frac{\alpha_i}{n} \sigma_{sv}^{(0)}, \quad \alpha_i = n \cdot \frac{A_s}{A_i} \left(1 + \frac{A_i}{I_i} y_{is}^2 \right) \quad (1)$$

6.2. 크리이프와 乾燥收縮에 의한 損失

크리이프와 乾燥收縮에 의한 損失은 P.S. 鋼線位置의 섬유가 줄어든 길이의 實測值를 基準으로 하려 했으나 실패하여 부득이 DIN 4227, Teil 1 에 주어진 條項에 의하여 計算하였다. 野外에서의 乾燥收縮 ϵ_{s0} 및 크리이프계수 φ_{f0} 는 各各 $\epsilon_{s0} = -32 \times 10^{-5}$, $\varphi_{f0} = 2.0$ 을 基準으로 하였다.

7. 荷重載荷順序

荷重은 狀態 I 과 狀態 II 의 境界를 可能하면 分明히 하기 위하여 均열이 發生할 것이라고 豫想되는 $P=3.0t$ 되는 하중의 0.8 倍인 $P=2.4t$ 까지 10 回反復載荷시킨 후에 하중을 $P=3.0t$ 까지 增加시킨다. 여기서 다시 $P=0t$ 에서 $P=3.0t$ 까지 45 回 反復載荷시킨 후 10 分동안 재하된 狀態로 내버려둔 채 均열의 발전상황을 관찰하였다. 그 후에는 部材가 파괴가 일어날 때 까지 하중을 증가시킨다. 그림 4 에서 하중재하순서를 개략적으로 읽을 수 있다.

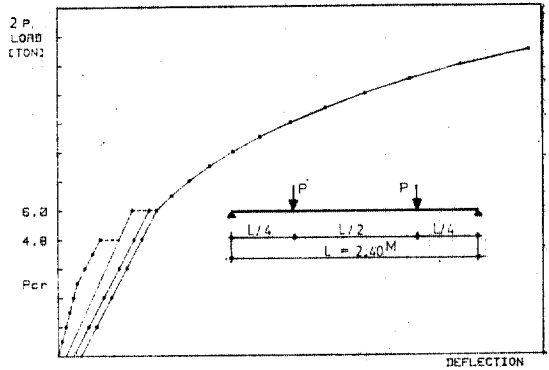


그림 4. Scheme of Loading Program

8. 實驗結果 및 分析

8.1. 均열인장강도

均열의 發生이 始作되는 瞬間에 外部에서 作用하는 모멘트를 測定하기 위하여는 여러 개의 짧은 길이의 스트레인게이지를 下部面에 連續적으로 附着하여 이 게이지들이 均열에 의하여 破壞되는 瞬間의 外部作用모멘트(荷重)를 測定하므로써 얻을 수 있다. 本 實驗에서는 스트레인게이지의 準備가 不足하여 上記한 方法에 의한 均열모멘트 測定을 行하지 못하고 0.01 mm 까지 判讀이 可能한 확대경의 도움으로 實觀測하여 均열모멘트를 구하였다. 不幸히 프리스트레스를 全연 加하지 않은 보의 境遇에는 예측했던 것보다 훨씬 작은 荷重下에서 均열이 始作되었기 때문에 發生均열측정에 실패하였다. 表 3

에서 測定된 均열모멘트와 이 값을 斷面係數로 나누어서 얻어지는 均열인장강도 및 콘크리트의 휨引張強度 σ_{eR} 에 프리스트레스에 의하여 部材 下端에 發生하는 壓縮應力 $\sigma_{e2, vsk}$ 를 더하여 얻어지는 計算均열인장강도를 算할 수 있다.

表 3. 均열모멘트

| 보 No. | 荷重 t | 均 열 모 멘 트 $M_{R, test}$ t·m | 均 열 인 장 강 도 $\sigma_{eR, test}$ kg/cm ² | 계 산 均 열 인 장 강 도 σ_{eR} kg/cm ² |
|-------|------|-----------------------------|--|--|
| 1 | — | — | — | 21.93 |
| 2 | 1.5 | 0.9 | 42.86 | 39.61 |
| 3 | 1.8 | 1.08 | 49.93 | 46.71 |
| 4 | 1.8 | 1.08 | 50.87 | 66.93 |
| 5 | 2.4 | 1.44 | 67.35 | 78.83 |

$$\sigma_{eR, test} = M_{R, test} / W_{I2}, \quad \sigma_{eR, cal} = \sigma_{eR} + \sigma_{e2, vsk}$$

上記 表에서도 알 수 있듯이, 設計強度가 $\sigma_{ek} = 312 \text{ kg/cm}^2$ 인 보 4의 경우, 그 壓縮強度가 實驗部材 2의 그것의 89%에 지나지 않지만 그 均열인장강도는 部材 2의 均열인장강도보다 約 19%나 더 크다는 것을 알 수 있다. 이것이 프리스트레스의 效果인 것이다.

8.2. 均열간격

均열의 間隔에 대한 研究는 주로 유럽에서 行 하여지고 있다. 本 論文에서는 現在 獨逸示方書 DIN 1045의 均열條項의 母體가 되는 Rehm과 Martin⁽¹⁾에 의하여 提示된 公式를 修定하여 均열의 間격을 求하고 實測値와 比較하였다. 平均 均열간격 a_m 은 아래 式으로 求한다.

$$a_m = \frac{V_0}{2} + k_1(\ddot{u}_L, e) + k_2 \cdot k_3 \cdot \frac{\phi}{\mu_2} \quad (2)$$

여기서,

$$V_0 = \frac{\Delta\sigma_{eR}}{450} \phi, \quad \phi = \sqrt{\frac{(A_s + \alpha A_s) \cdot 4}{n \cdot \pi}}$$

$$\Delta\sigma_{eR} = \sigma_{Rt} + \sigma_{r, vsk} - \sigma_{r, c}$$

σ_{Rt} = 콘크리트의 引張應力

$\sigma_{r, vsk}$ = 프리스트레스에 의한 鐵筋應力

$\sigma_{r, c}$ = 死荷重에 의한 鐵筋應力

$$k_1 = 1.5 \left(\ddot{u}_L + \frac{e}{8} \right) \quad (3)$$

\ddot{u}_L 은 주철근의 피복덮개를 意味하는데 本實驗

에 使用한 鐵筋의 種類가 두 가지이므로 이 두 종류의 철근에 作用하는 引張力의 合力이 作用하는 점에 全鐵筋이 位置하다고 假定하고 等價 피복덮개를 求한다.

$$\ddot{u}_L = d - h_r + \phi / 2 \leq 4.5 \text{ cm},$$

$$h_r^{(4)} = \frac{\alpha A_s \cdot h_2 + A_s \cdot h_1}{\alpha A_s + A_s}$$

또 $e \leq 14\phi$ 는 주철근의 間격을 뜻한다.

k_2 는 콘크리트의 휨引張強度對 平均附着應力의 比를 나타내는데 實驗에 의하여 異形鐵筋의 境遇 $k_2 = 0.4$, 圓形鐵筋의 境遇 $k_2 = 0.74$ 를 取할 수 있다. 두 가지의 鐵筋을 同時에 使用했을 경우 그 平均值를 取한다. 本 研究에서는,

$$k_2 = \frac{1}{5} (2 \times 0.4 + 3 \times 0.74) = 0.604$$

를 採하였다. k_3 는 鐵筋의 둘레와 引張部에 놓인 콘크리트의 斷面積의 影響을 나타낸 것이다. 힘을 받는 부재의 경우에 $k_3 = 0.125$, $d_s < d_w$ 로 쓸 수 있다. 여기서 $d_s = h_r - x$, $d_w = \ddot{u}_L + 7\phi$ 이다 (Leonhardt(2) 페이지 15 參照). 使用鐵筋比 $\mu_2 = \frac{\alpha A_s + A_s}{b \cdot d_s}$ 인데, 여기서 α 는 補助鐵筋의 應力對 追加되는 P.S. 鋼線의 比를 말한다 (Chang, S.P.(4) 參照).

8.3. 均열幅의 算定

均열의 幅은 아래 式에 의하여 求할 수 있다 Leonhardt(2) 페이지 18~23 參照).

$$W_m = V_0 \epsilon_s^I + (a_m - V_0) \epsilon_m$$

$$\epsilon_m = \epsilon_s^I - \Delta\epsilon_s = \frac{\sigma_s^I - \Delta\sigma_s}{E_s}$$

$$\Delta\sigma_s \approx 0.36 \frac{\sigma_{eR}}{\sigma_s^I} \cdot \frac{\sigma_{Rt}}{\mu_2}, \quad \sigma_{Rt} : \text{휨인장강도}$$

表 4에는 集中荷重 $P = 2.4 \text{ t}$ 인 경우와 $P = 3.0 \text{ t}$ 일 때의 均열의 間격과 均열의 폭을 實測値와 計算値들을 대비하여 놓았다.

그림 5에는 作用모멘트의 增加에 따르는 均열의 間격을, 그림 6에는 作用모멘트에 따르는 均열의 폭을 각각 그림으로 나타낸 것이다. 均열의 폭은 프리스트레스정도가 클수록 작아지고, 均열의 間격은 均열의 폭이 작은 상태에서는 프리스트레스정도가 클수록 커지나, 均열의 폭이 0.1~0.2 mm 정도 되면서부터 그 규칙성이 없어진다.

表 4. 균열의 간격 및 균열의 폭

| 부재의 번호 | 하중 $P(t)$ | 균열의 간격 (cm) | | 균열의 폭 (mm) | | |
|-----------|--------------|----------------|-------|------------|-------|------|
| | | 실측치 | 계산치 | 실측치 | 식 (4) | ACI |
| 1 | 2.4 | 13.80 | 12.30 | 0.20 | 0.12 | 0.18 |
| | 3.0 | 10.50 | 11.71 | 0.30 | 0.10 | 0.16 |
| 2 | 2.4 | 10.80 | 12.20 | 0.15 | 0.02 | 0.04 |
| | 3.0 | 10.50 | 10.60 | 0.22 | 0.03 | 0.06 |
| 3 | 2.4 | 14.2 | 12.74 | 0.15 | 0.00 | 0.00 |
| | 3.0 | 10.9 | 12.21 | 0.20 | 0.00 | 0.02 |
| 4 | 2.4 | 15.0 | 13.82 | 0.08 | 0.00 | 0.00 |
| | 3.0 | 10.6 | 13.26 | 0.20 | 0.00 | 0.00 |
| 5 | 2.4 | 19.4 | 14.37 | 0.03 | 0.00 | 0.00 |
| | 3.0 | 14.8 | 13.93 | 0.12 | 0.00 | 0.00 |

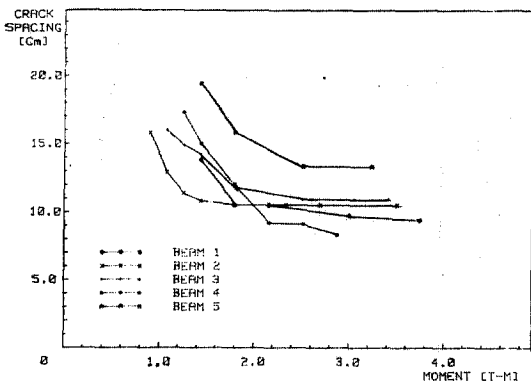


그림 5. Crack-Spacing-Moment Curves of Beams

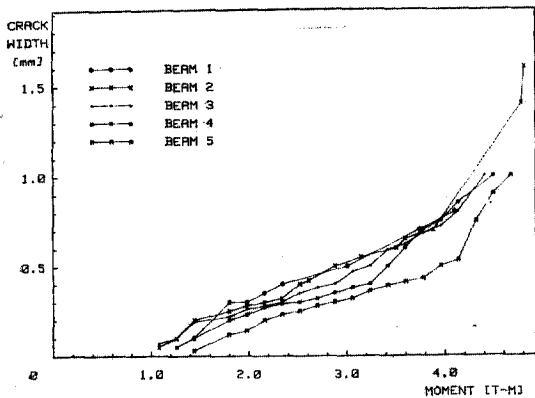


그림 6. Crack width-Moment Curves of Beams

9. 結 論

本論文은 서로 다른 프리스트레스程度를 갖는 5個의 矩形鐵筋콘크리트보의 純粹휨모멘트에 대한 極限耐荷力을 實驗的으로 研究한 結果를 정리한 것이다. 特히 研究의 重點은 휨모멘트에 의하여 발생하는 균열의 간격과 폭을 적당한 정도의 프리스트레스를 가하므로써 어떻게 效果的으로 줄일 수 있는가를 實驗을 通하여 考察하고 現在까지 一般鐵筋콘크리트에 使用되고 있는 균열간격이나 균열폭을 구하는 公式을 부분프리스트레스 콘크리트부재 設計時에도 適用할 수 있는가에 대하여 확인함에 있다.

아래는 실험을 통하여 얻은 結果들을 적은 것이다.

—München에서 行한 實驗(3)에서와 같이 부재에 균열이 발생하였다해도 그때까지 콘크리트가 받고 있던 인장응력을 갑자기 鐵筋이 代身받지 않는다.

—균열모멘트에 주는 影響의 程度는 壓縮強度의 크기보다는 프리스트레스에 의한 影響이 현저하게 크다.

—균열의 간격은 理論值가 實測值보다 最大 45%까지 더 큰 것과 最小 26%까지 더 작은 것이 관측되었다. 이로 미루어 現在 使用되고 있는 公式에 적당한 補正係數를 導入하여 부분프리스트레스部材設計에 使用하여도 可能할 것으로 判斷된다.

—균열의 폭은 Rehm & Martin⁽⁶⁾의 公式을 조금 補正한 式으로 計算한 값들은 프리스트레스를 전혀 가하지 않은 부재 이외에는 實測值들과 그 差異가 엄청나게 크다. 그 理由로는 균열폭 계산에 使用된 인장응력이 보조철근응력이 아니라 철근群의 中心引張應力을 使用하였기 때문이라고 判斷되며, 또 하나 생각할 수 있는 요인은 P.S. 강선자체가 본 실험의 경우에 균열폭 억제에 크게 影響을 끼치지 않은데 있다고 判斷된다.

—그림 6에서 보이는 바와 같이 프리스트레스를 完全프리스트레스의 25%程度만 加하여도 部材에 발생하는 균열의 幅을 效果的으로 억

제할 수 있다.

- 균열의 간격은 그림 5에서 보이는 바와 같이 프리스트레싱을 많이 행한 순서에 따라서 커지나 使用하중 $M_d=1.8 t \cdot m$ 程度에서부터 그 규칙성이 없어진다.
- 프리스트레스에 의한 鐵筋콘크리트부재의 極限耐荷力の 增加는 設計時에 考慮하지 않는 것이 바람직하다.

謝 辭

本 研究는 1983 年度 아산재단 연구조성비에 의하여 이루어진 것으로, 이에 관계기관에 감사드린다.

參 考 文 獻

1. Rehm, G. & Martin, H.: *Zur Frage der Rißbegrenzung in Stahlbetonbau*. Beton-u Stahlbetonbau 63 (1968), H. 8, S.175~182.
2. Leonhardt, F.: *Vorlesungen über Massivbau, vierter Teil. Nachweis der Gebrauchsfähig-*

keit, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New-York, 1978.

3. Janovic, K. & Kupfer, H.: *Teilweise vorge-spannte Bauteil mit kleinen Vorspanngraden und kleinen Bewehrungsprozentsätzen*, Bericht Nr. 1236/Ja/Ku. Lehrstuhl für Massivbau, T.U. München 1981.
4. Chang, S.P.: *An Analysis and Design Method for a Partially Prestressed Concrete under Bending and Axial Loads*. Eng. Report Vol. 14, No. 2, Seoul National University 1982.
5. Martin, H., Schießl, P., and Schwarzkopf, M.: *Ableitung eines allgemein gültigen Berechnungsverfahrens für Rißbreiten aus Lastbeanspruchung auf der Grundlage von theoretischen Erkenntnissen und Versuchergebnissen*, Bericht Nr. 471 des IBS, München 1979.
6. Rüsck, H. & Jungwirth, D.: *Stahlbeton und Spannbeton Band 2*, Werner-Verlag 1976.

(接受 : 1985. 2. 8)