

CREEP에 의한 못 結合部の 剛性度の 變化에 관한 研究*¹

張 祥 植*²

Study on the change in stiffness of nailed joints due to creep*¹

Sang Sik Jang*²

SUMMARY

Nailed joints, which are commonly used in Wooden structures, transmit loads from one member to another and induce partial composite actions between members. Long-term loads induce creep slip in nailed joints and affect load sharing and partial composite action, which may reduce joint stiffness. Two theoretical viscous-viscoelastic models were developed for nailed joints to predict creep behavior under long-term variable loads. Those models were also used to predict stiffness changes under long-term variable loads. The stiffness of nailed joint is defined as a Secant modulus which is called the joint modulus or slip modulus. Input data for the models are the results of constant load tests under three different load levels. To verify the models, nailed joints were also tested under two long-term variable load functions. The predictions of the models were very close to the experimental data. Therefore, the theoretical viscous-viscoelastic models and procedures developed in this study can be applied to predict creep slip and the changes in joint moduli of nailed joints under long-term variable loads.

1. 緒 論

우리 生活 周邊에는 많은 양의 木材가 여러 形態의 荷重을 받는 곳에 使用되고 있다. 이들 木材는 大部分 使用중에 長期荷重을 받으므로 그 creep 舉動은 중요한 意味를 지닌다. 특히 部材간 結合部는 構造物 전체의 強度(strength)와 剛性度(stiffness)에 큰 影響을 미치므로 木構造物의 設計와 分析에 있어서 結合

部の creep 舉動은 반드시 考慮되어야 하는 重要한 要素이다. 木材結合部の creep 試驗에는 많은 反復數와 오랜 期間이 要求되기 때문에 材料性質의 變異, 樹種, 周邊環境의 變化, 荷重函數(load function)의 變化 등과 같은 모든 因子를 包含하는 實驗은 事實상 不可能한 實情이다. 이와 같은 實驗상의 어려움을 克服하기 위하여 지금까지 여러 種類의 理論模型(theo-

*1. 接受 1989年 6月 30日 Received June 30, 1989

이 研究는 1989年度 韓國科學財團 研究費支授에 의한 結果임.

*2. 忠南大學校 農科大學, College of Agriculture, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

retical model)⁽⁷⁾⁽⁸⁾⁽¹¹⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾들이開發되었다.

既存의 3 要素, 4 要素, 3 積分 模型 등의 粘彈性 模型(viscoelastic model)에 의해 木材 및 木質板狀製 品의 creep 舉動은 어느 정도 나타낼 수 있으나 이들 模型에는 瞬間塑性變形(instantaneous plastic defo- rmation)을 나타내는 要素가 포함되어 있지 않다.

그러나 結合部에서는 瞬間塑性變形이 顯著하게 나 타나므로 이를 무시하거나 다른 성질의 變形으로 看 做하면 豫測에 誤差를 가져오게 된다. 이 缺點을 補完 하기 위하여 張(1987)⁽⁹⁾은 瞬間彈性(instantaneous elastic), 瞬間塑性, 遲延彈性(delayed elastic), 粘性 變形(viscous deformation) 등을 모두 包含하는 粘性- 粘彈性模型(viscous-viscoelastic model)을 開發하 여 長期固定 및 長期可變荷重하에서 木結合部의 creep 舉動을 效果의으로 豫測할 수 있었다.

結合部는 木, 나사木, bolt 등의 結合物을 통하여 部材간에 荷重을 傳達하며 이때 部材간의 荷重分擔 (load sharing)과 部分複合作用(partial composite action)에 의해 일반 部材内の 荷重傳達와는 다른 樣 相을 나타낸다. 結合部의 이와 같은 特殊한 作用의 정도는 結合部의 剛性度, 즉 變形에 대한 抵抗度에 影響을 받는다. 따라서 creep에 의한 結合部의 剛性 度의 變化는 木構造物의 設計와 分析에 重要한 入 力資料가 될 것이다.

Foschi와 Bonac(1977)⁽⁶⁾은 彈性基礎 위의 보의 理 論과 有限要素 彈性塑性 分析法(finite element elasto-plastic analysis)에 의해 短期荷重하에서 木結合 部の 強性도를 나타내는 結合係數(joint modulus) 또 는 미끄러짐 係數(slip modulus)가 短期荷重하에서 減少한다고 報告하였고 Loferski와 Polensek(1982)⁽¹²⁾는 短期荷重하에서 木結合部의 剛性도를 3개의 直 線區間으로 나타내는 三線刑法(trilinear method)을 提案하였다. Jenkins 등(1979)⁽¹⁰⁾은 結合係數 曲線을 區分線形으로 看做함으로써 長期固定荷重하에서의 荷重-變形 曲線으로 부터 長期可變荷重하에서의 變 形과 結合係數를 예측하고자 하였다. Polensek(1982)⁽¹³⁾는 3 積分模型(three integral model)을 利用하여 木結合部의 creep變形을 豫測하고 剛性도의 값을 直 線으로 假定하여 그 값을 提示하였다.

이상에서 살펴본 바와 같이 木結合部의 creep特性 을 完全히 包含할 수 있는 研究는 아직 不足한 상태 이며 특히 creep에 의한 剛性도의 變化에 관한 研究 는 거의 이루어지지 않은 實情이다. 그러나 木構造物 의 設計 및 分析에서 重要한 入 力資料중의 하나가 結合部의 剛性度이고 이 값은 creep에 의해 影響을 받는다는 사실을 감안하면 이에 관한 研究는 效果의 이고 經濟的인 木構造物의 建築에 必須要件이라 할 수 있을 것이다. 또한 長期可變荷重하에서의 實驗의 어려움과 實驗에 所要되는 期間 등을 考慮한다면 理 論模型에 의한 豫測이 더욱 精實히 要求된다.

본 研究에서는 張(1987)⁽⁹⁾에 의해 開發된 粘性- 粘彈性模型들을 利用하여 長期可變荷重하에서 木結 合部의 剛性도를 豫測하는 方法을 提示하고자 한다. 이 理論模型들의 入 力資料는 長期固定荷重하에서의 creep曲線이 되며 出力資料는 각 模型의 係數와 長 期可變荷重하에서의 creep變形과 剛性도가 된다. 본 研究에서 使用한 理論模型과 그 開發課程은 入 力資料만 주어진다던 다른 樹種과 다른 形態의 結合部에 도 適用할 수 있을 것이다.

2. 粘性-粘彈性模型

2.1. 長期固定荷重하에서

木結合部에 長期固定荷重을 가하고 creep變形을 測定하여 時間에 대한 曲線을 그리면 그림1과 같은 形態를 나타낸다. 그림1에서 보는 바와 같이 木結合 部の creep變形은 瞬間彈性(S_e), 瞬間塑性(S_p), 遲延 彈性(S_{de}), 그리고 粘性(S_v)의 變形으로 나눌 수 있다. 이중에 S_e 와 S_{de} 는 回復變形(recoverable deformation : S_r)이고 S_p 와 S_v 는 永久變形(permanent or nonrecoverable deformation : S_n)이다.

이러한 네가지 性質의 變形을 모두 包含하는 模型 이 粘性-粘彈性模型이며 이는 다시 機械模型(mechanical model)과 積分模型(integral model)으로 나 눌 수 있다. 機械模型에는 既存의 非線形 4要素模型 (nonlinear four-element model)⁽¹⁴⁾에서 線形spring 을 非線形spring으로 交替하고 瞬間硬化要素(instan- taneous hardening element)⁽⁹⁾를 追加한 그림2의 非

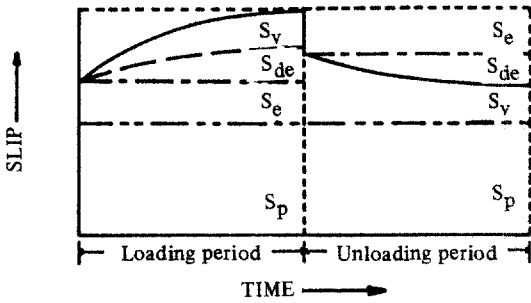


Fig. 1. Typical creep curve of nailed joints under constant loads.

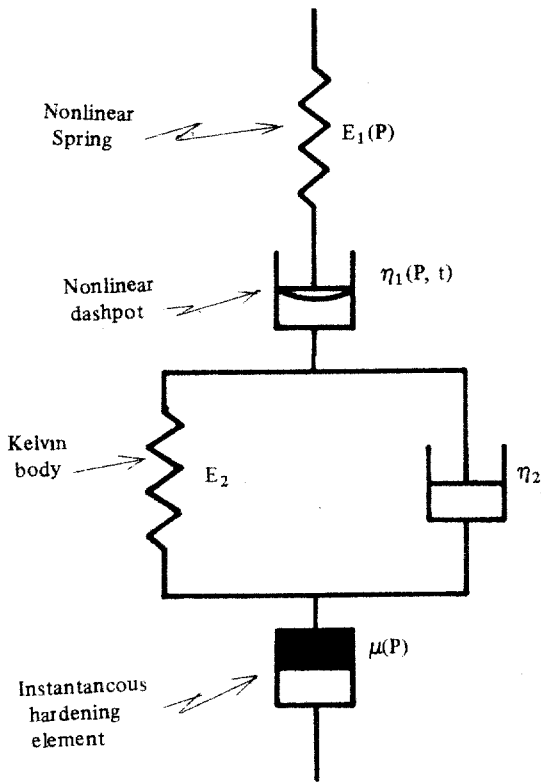


Fig. 2. Nonlinear Five-Element model (N5-E).

線形 5要素模型(nonlinear five-element model : N5-E)이 있다.

N5-E에서는 네가지 性質의 變形이 直列로 連結된 것으로 假定하고 식(1)과 같이 그들의 變形의 疊으로 總creep變形(S_t)을 나타낸다.

$$S_t = S_e + S_{de} + S_v + S_p = S_r + S_n \dots \dots \dots (1)$$

그림2에서 非線形spring, 非線形 粘動板(nonlinear dashpot) 및 瞬間硬化要素의 係數 E₁(P), η₁(P, t) 그리고 μ(P)는 각각 時間(t)과 荷重(P)의 거듭제곱函數

(power function)로 나타내고 S_e, S_p, S_{de}, S_v 등에 대한 變形과 荷重, 時間 간의 關係式을 식(1)에 代入 하면 식(2)와 같은 構成方程式(constitutive equation)이 成立된다.

$$S_t(P, t) = B_1 P^{N_1} + B_2 P [1 - \text{EXP}(-B_3 t)] + B_4 P^{N_2} t^{N_3} + B_5 P^{N_4} \dots \dots \dots (2)$$

B_i (i=1, ... 5), N_j (j=1, ... 4) = 實驗常數

積分模型에는 既存의 3積分模型을 改善한 二重 3積分模型(double three-integral model : D3-I)⁽⁹⁾이 있다. D3-I에서는 回復變形과 永久變形을 각각 三積分으로 나타내고 이들을 더함으로써 식(3)과 같은 構成方程式을 얻는다.

$$S_t(P, t) = F_1(t)P + F_2(t)P^2 + F_3(t)P^3 + F_4(t)P + F_5(t)P^2 + F_6(t)P^3 \dots \dots (3)$$

F_k(t) (k=1, ... 6) = F_k^o + F_k⁺(t) = 重要函數 (kernel functions)

F_k^o = 實驗常數

F_k⁺(t) = 實驗에 의해 결정되는 時間의 函數

식(2)와 (3)에서 B_i, N_j 그리고 F_k(t)는 結合部의 材料 및 形態 등의 特性을 나타내는 값들로써 3개의 서로 다른 크기를 갖는 長期固定荷重하에서의 荷重-變形 曲線으로부터 求해진다.⁽⁹⁾

2.2. 長期可變荷重하에서

長期可變荷重하에서의 creep變形 豫測에 관한 研究는 비교적 最近에 시작되었다. 初期에는 線形變形에 대해 Boltzmann重疊原理(superposition principle)를 適用하였고 후에 이를 補完한 修正重疊原理(modified superposition principle : MSP)를 非線形變形에 適用하였다.⁽⁵⁾ 그러나 이러한 原理들은 永久變形에 대해서는 適用할 수 없으므로 MSP를 回復變形에 適用하고 變形硬化原理(strain hardening principle : SHP)를 永久變形에 適用하는 方法이 粘彈性 材料인 aluminum⁽⁴⁾과 stainless steel⁽²⁾에 대해 開發되어 좋은 結果를 얻었다.

그러나 이러한 材料들에는 瞬間塑性變形의 性質이

없기 때문에 여기에 사용되었던 방법을 그대로 못結合부에適用해서는 正確한 結果를 얻을 수 없다.⁹⁾ 따라서 본 研究에서는 이 방법을 못結合부에 알맞도록 修正하였다. 回復變形에 대해서는 MSP를 그대로適用하여 식(4)와 같은 結果를 얻었다.

$$S_s^r = \int_0^+ [\partial S_r(P(z), t-z) / \partial P(z)] P(z) dz \dots (4)$$

S_s^r = 可變荷重하에서의 回復變形

식(4)는 階段型 荷重函數(stepwise load function) 하에서 다음과 같이 表現된다.

$$S_s^r = \sum_{i=0}^{N-1} [S_r(P_i, t-t_i) - S_r(P_{i+1}, t-t_i)], t > t_{N-1} \dots (5)$$

永久變形에 대하여는 SHP를 適用하되 그 最大值를 취하였다. 먼저 SHP를 永久變形에 適用하면 N 5-E에 대해서는 식(6), D3-I에 대해서는 식(7)이 求해진다.

$$S_s^n(P, t) = B_5 P^{N4} + [\int_0^t (B_4 P^{N2})^{1/N3} dt]^{N3} \dots (6)$$

$$S_s^n(P, t) = G_1(P) + [\int_0^t (G_2(P))^{1/m} dt]^m \dots (7)$$

S_s^n = 可變荷重하에서의 永久變形

$$G_1(P) = F_4^0 P + F_5^0 P^2 + F_6^0 P^3 \dots (8)$$

$$G_2(P) = (F_4^* P + F_5^* P^2 + F_6^* P^3) t^m \dots (9)$$

$$F_i(t) (i=4, 5, 6) = F_i^0 + F_i^* t^m$$

$$F_i^0, F_i^* (i = 4, 5, 6), m = \text{實驗常數}$$

식(6)과 (7)는 階段型 荷重函數에서는 다음과 같이 表現된다.

$$S_s^n(P, t) = B_5 (P_{N-1})^{N4} + [\sum_{i=0}^{N-1} (B_4 (P_i)^{N2})^{1/N3} (t_{i+1} - t_i)^{N3}], t > t_{N-1} \dots (10)$$

$$S_s^n(P, t) = G_1(P_{N-1}) + [\sum_{i=0}^{N-1} (G_2(P_i))^{1/m} (t_{i+1} - t_i)^m], t > t_{N-1} \dots (11)$$

식(10)과 (11)에서 N_3 과 m 은 항상 1보다 작으므로 식(10)와 (11)의 最大값인 식(12)와 (13)를 사용하여 永久變形의 값을 求한다.

$$S_s^n(P, t) = B_5 (P_{N-1})^{N4} + \sum_{i=0}^{N-1} B_4 (P_i)^{N2} (t_{i+1} - t_i)^{N3}, t > t_{N-1} \dots (12)$$

$$S_s^n(P, t) = G_1(P_{N-1}) + \sum_{i=0}^{N-1} G_2(P_i) (t_{i+1} - t_i)^m, t > t_{N-1} \dots (13)$$

식(5)와 (12), (13)를 더하면 階段型 荷重函數에서의 總creep變形(S_s^r)을 求하는 構成方程式이 成立된다. 이상의 全過程을 改善修正重疊原理(MSP improved for nonrecoverable slip: IMSP)라 命名하였다.

荷重이 減少할 때에는 減少하기 전의 最大荷重에서 現段階의 荷重을 뺀 값을 逆方向으로, 즉 壓縮荷重으로 가하고 이때 變形은 回復變形만 일어난다고 假定함으로써 減少荷重하에서의 變形을 求하였다.

2.3. 結合係數(joint modulus)

結合係數 또는 미끄러짐 係數는 結合部の 剛性度를 나타내는 값으로 일반적으로 Secant 係數로 정의된다.¹⁰⁾ 본 研究에서도 Secant 係數로 結合係數를 定義하였고 瞬間變形(S_s^j)에 의한 瞬間結合係數(intantaneous joint modulus: J_i)와 creep變形을 包含하는 creep結合係數(creep joint modulus: J_o)로 區分하였다.

$$J_i^j = (P_j - P_{j-1}) / [S_s^j(P_j, t_j) - S_s^j(P_{j-1}, t_{j-1})] \text{ (Kg/mm)} \dots (14)$$

$$J_o^j = (P_j - P_{j-1}) / [S_s^t(P_j, t_j) - S_s^t(P_{j-1}, t_{j-1})] \text{ (Kg/mm)} \dots (15)$$

$j = 1, \dots, N$ = 荷重函數의 段階

回復時的 結合係數도 測定하여 彈性結合係數(elastic joint modulus: J_E)로 定義하였다.

$$J_E = P_{max} / S_d^r \text{ (Kg/mm)} \dots (16)$$

P_{max} = 最大荷重

S_d^r = 減少荷重에 의해 回復된 變形

식(14), (15), (16)을 比較해 봄으로써 剛性도가 creep에 의해 받는 影響과 強性度에서 回復變形과 永久變形이 차지하는 比重을 評價할 수 있을 것이다.

3. 材料 및 方法

3.1. 供試材料

供試材料는 北美産 美松材와 市中에서 購入한 合板을 使用하였다. 角材는 4cm×9cm×30cm, 로 절단하고 두께 1cm의 合板은 10cm×30cm로 切斷하여 使用하였고 못은 市中에서 直徑 0.25cm, 길이 5cm의 대못을 購入하여 使用하였다. 結合部는 못의 머리부분이 合板 表面과 편편하게 될 때까지 망치질하여 試驗 直前에 製作하였다.

3.2. 試驗方法

結合部의 側方剪斷荷重(lateral shear force)에 의한 試驗方法은 ASTM⁶⁾에 收錄되어 있으나 ASTM의 試驗片은 moment를 發生시킬 可能性이 있기 때문에 Oregon State University⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹²⁾⁽¹⁵⁾에서 提案한 試驗片을 使用하였다. 이 試驗片은 ASTM의 試驗片에서 아래쪽 鐵板의 位置를 바꾸어 줌으로써 moment의 發生 可能性을 적게 하였다.

creep試驗用 荷重은 plastic통에 모래와 물을 넣어 使用하였고 變形은 dial gauge로 測定하였다. 變形의 測定間隔은 荷重을 가하거나 除去한 후 1, 2.5, 5, 10, 20, 30, 60, 120, 240, 480분, 그리고 그 후에는 1일로 하였다. 荷重을 가하거나 除去할 때에는 본 研究를 위하여 考案된 chain block을 利用한 裝置를 使用하여 可能하면 動的인 衝擊을 줄이고자 하였다.

荷重函數는 그림3의 (A)부터 (D)까지의 長期固定 荷重과 (E), (F)의 長期可變荷重을 使用하였다. 荷重函數 (A), (C), (D)하에서의 變形 測定値는 理論模型에 대한 入力資料로 使用되었고 (B), (E), (F)하에서의 測定値는 理論模型의 豫測値와 比較評價하는데 使用되었다. 모든 試驗은 9회 反復하여 그 平均値를 使用하였다.

4. 結果 및 考察

4.1. 長期固定荷重下에서의 構成方程式

앞에서 開發된 理論模型들의 係數를 구하기 위하여 N5-E의 境遇에는 非線形 最少自乘法(nonlinear

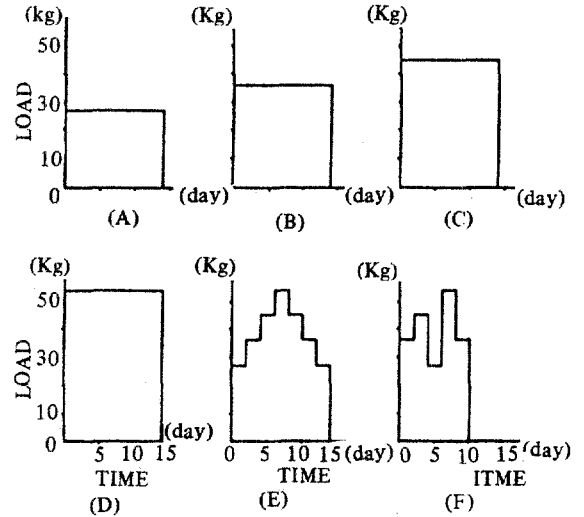


Fig. 3. Experimental load functions.

least squares method)⁹⁾을 利用하였고 D3-I의 境遇에는 Polensek(1982)¹⁵⁾가 提案한 行列計算法을 應用하였다. 以上の 全課程은 IBM personal computer用 BASIC program으로 開發되었다. 27, 45, 54Kg 하에서의 變形曲線이 program의 入力資料로 使用되었다.

본 研究에서 구한 美松材와 合板 間의 못結合部에 대한 N5-E의 係數들은 $B_1=4.3608 \times 10^{-6}$, $B_2=0.2093 \times 10^{-3}$, $B_3=2.6260 \times 10^{-4}$, $B_4=5.7284 \times 10^{-11}$, $B_5=6.3160 \times 10^{-9}$, $N_1=2.4371$, $N_2=4.6551$, $N_3=0.3820$, $N_4=4.2771$ 와 같았다. D3-I의 重要函數들은 다음식 (17)에서 (22)와 같았다.

$$F_1(t) = (-0.08418 + 0.09211t^{0.2554} - 0.5356t^{0.1757} + 0.2856t^{0.1690}) \times 10^{-3} \quad (17)$$

$$F_2(t) = (1.4176 - 0.3753t^{0.2554} - 2.9755t^{0.1757} - 1.6925t^{0.1690}) \times 10^{-5} \quad (18)$$

$$F_3(t) = (1.9417 + 0.3791t^{0.2554} - 3.6734t^{0.1757} + 2.3507t^{0.1690}) \times 10^{-7} \quad (19)$$

$$F_4(t) = (4.2632 + 0.01926t^{0.3820}) \times 10^{-3} \dots (20)$$

$$F_5(t) = (-0.2736 - 0.002482t^{0.3820}) \times 10^{-3} \dots (21)$$

$$F_6(t) = (4.8721 + 0.07425t^{0.3820}) \times 10^{-5} \dots (22)$$

그림3의 荷重函數 (A), (B), (C), (D) 하에서의 變形

測定値와 N5-E와 D3-I에 의한 豫測値는 그림4에 收録하였다.

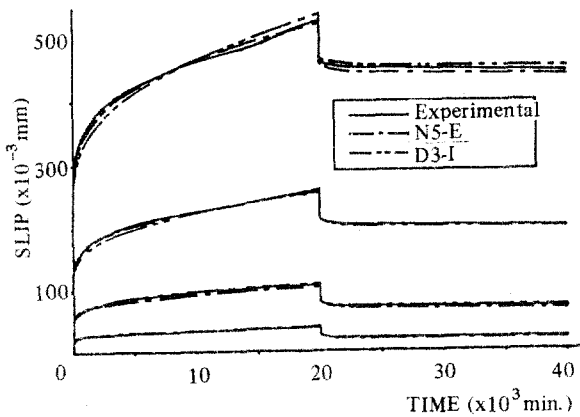


Fig. 4. Predicted and experimental creep slip curves of nailed joints under load functions (A), (B), (C), and (D).

그림4에서 보는 바와 같이 각 模型의 豫測値는 實測値와 매우 近似한 값을 나타내었으며 따라서 N5-E와 D3-I 모두 固定荷重하에서 正確한 結果를 豫測함을 알 수 있었다. 그림4에서 각 豫測値의 R²값은 0.9以上을 나타내었고 두 模型간에는 큰 差異가 없었다.

4.2. 長期可變荷重下에서의 構成方程式

바로 前項에서 구해진 固定荷重하의 構成方程式

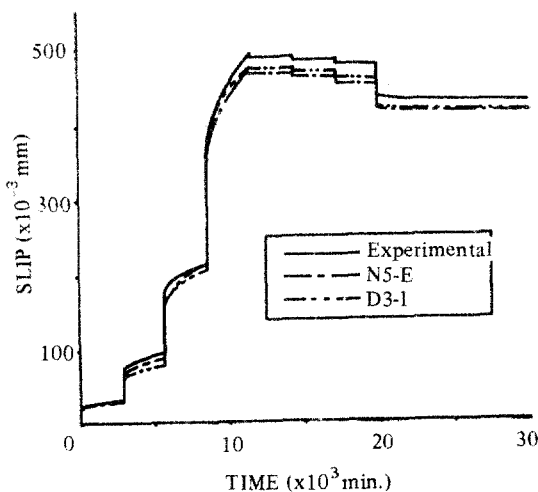


Fig. 5. Predicted and experimental creep slip curves of nailed joints under load function (E).

에 IMSP를 適用하여 可變荷重하에서의 豫測値를 구하였다. 荷重函數(E)하에서의 實測値와 模型에 의한 豫測値는 그림5에 收録하였다.

그림5에서 보는 것처럼 높은 荷重하에서는 豫測値가 實測値보다 조금 적게 나타났으나 全般的으로 잘 一致하였다. 낮은 荷重에서는 N5-E가 조금 더 正確하였고 높은 荷重에서는 D3-I가 조금 더 正確한 값을 나타내었으나 그 差異는 별로 크지 않았다. 그림5의 豫測曲線들은 모두 0.99以上의 R²값을 나타내었다.

荷重函數 (F)하에서의 豫測値와 實測値는 그림6에 나타나 있다.

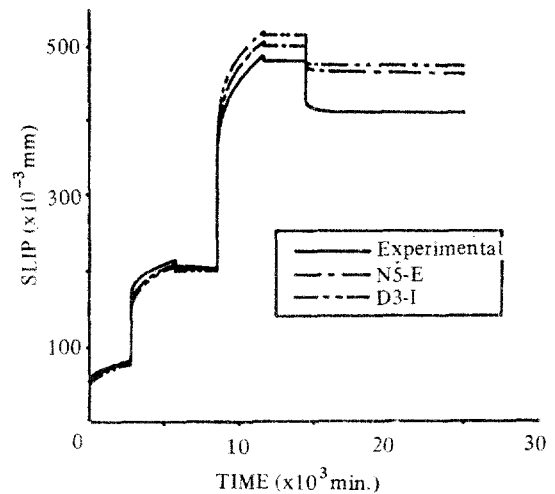


Fig. 6. Predicted and experimental creep slip curves of nailed joints under load function (F).

그림6에서 보면 豫測値는 낮은 荷重에서는 正確하였으나 높은 荷重에서는 實測値보다 약간 높은 값을 나타내었다. 두 模型간에는 큰 差異가 없었으나 높은 荷重에서 D3-I가 약간 큰 豫測値를 보였다. 全般的으로 R²값은 0.99以上으로 正確한 豫測을 할 수 있었다.

4.3. 剛性度の 변화

4.3.1. 長期固定荷重하에서

長期固定荷重하에서의 木結合部의 結合係數는 表1와 그림7에 收録하였다.

荷重除去후 瞬間回復(instantaneous recovery)의 값으로 瞬間彈性結合係數(instantaneous elastic

Table 1. Joint moduli of nailed joints under constant load functions.

Load level	0-27 (Kg)		27-36 (Kg)		36-45 (Kg)		45-54 (Kg)	
	J.M.* ¹	%* ²	J.M.	%	J.M.	%	J.M.	%
Instantaneous elastic	2126.0	100.0	592.1	100.0	588.2	100.0	354.3	100.0
Creep elastic	1516.9	71.3	443.3	74.9	443.3	75.4	354.3	100.0
Instantaneous	1179.0	55.5	296.1	50.0	141.7	24.1	78.7	22.2
		(100.0)* ³		(100.0)		(100.0)		(100.0)
Creep	708.7	33.3	126.6	21.4	60.0	10.2	33.1	9.3
		(60.1)		(42.8)		(42.3)		(42.1)

*¹ Joint modulus values in (Kg/mm) unit.

*² Percentage about instantaneous elastic joint modulus.

*³ Percentage about instantaneous joint modulus.

joint modulus)를 계산하였고 遲延回復(delayed-recovery)까지 포함하여 creep彈性結合係數(creep elastic joint modulus)를 計算하였다. 荷重을 가하고 瞬間的으로 생기는 瞬間彈性 및 瞬間塑性變形的 값으로 瞬間結合係數(instantaneous joint modulus)를 구하였는바 이 값은 木結合部의 靜的試驗에서 얻을 수 있는 값과 一致할 것으로 생각된다. 荷重을 가한 후 時間의 經過에 따라 發生하는 遲延彈性 및 粘性變形的 값까지 合하여 計算된 값은 creep結合係數(creep joint modulus)라 칭하였다. 結合係數를 이와 같이 變形的 性質에 따라 4가지로 區分함으로써 각 性質의 變形이 結合係數에 미치는 影響을 評價하는데 도움이 되리라 생각한다.

표1에서 보면 낮은 荷重에서는 瞬間結合係數가 瞬間彈性結合係數의 50%정도였으나 높은 荷重에서는 20%정도로 減少함을 알 수 있었다. 따라서 荷重이 높을수록 瞬間塑性變形이 많아지고 結合係數에 미치는 影響도 큰 것으로 생각된다. 瞬間彈性 및 creep彈性結合係數간에는 큰 差異가 없었으며 荷重이 높을수록 그 差異가 작아짐을 알 수 있는데 이는 遲延塑性變形이 전체彈性變形에서 차지하는 比率이 점점 작아지기 때문으로 생각된다.

creep結合係數는 瞬間結合係數에 대해 낮은 荷重에서는 60%정도였으나 높은 荷重에서는 40%정도로

낮아졌다. 따라서 荷重이 增加할수록 粘性變形的 比率이 높아짐을 알 수 있었다. 4가지 結合係數 모두 荷重이 增加할수록 減少하였는데 減少하는 정도가 瞬間彈性, creep彈性, 瞬間 및 creep結合係數의 순으로 갈수록 크게 나타났다.

그림7에서 보듯이 豫測値와 實測値간에는 큰 差異가 없었으며 두 模型간에도 비슷한 값을 나타내었다. 따라서 開發된 模型들은 長期固定荷重하에서의 結合係數를 豫測하는데 매우 效果的인 것으로 생각된다.

4.3.2. 長期可變荷重하에서

荷重합수 (E)와 (F)하에서의 計算된 結合係數는 각각 그림8과 9에 收錄하였다.

荷重합수 (E)하에서의 結合係數는 荷重이 段階적으로 增加할수록 減少하는 傾向을 보였고 荷重이 段階적으로 減少하는 境遇에도 減少하였으나 그 크기는 무시할만한 정도였다. 따라서 減少荷重하에서는 처음과 마지막 變形値를 利用하여 하나의 結合係數만을 定義하여 使用하여도 무리가 없을것이다.

그림8에서 보는 것처럼 荷重합수(E)하에서 模型의 豫測値는 實測値와 類似한 값을 나타내었다. 增加荷重하에서는 結合係數의 減少傾向이 그림7의 傾向과 비슷하였고 그 값은 瞬間結合係數와 creep結合係數의 中間 정도를 나타내었다. 따라서 階段적 增加합수

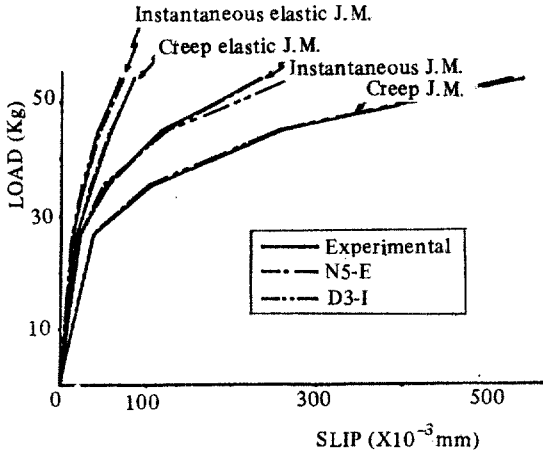


Fig. 7. Predicted and experimental joint moduli of nailed joints under load functions (A), (B), (C), and (D).

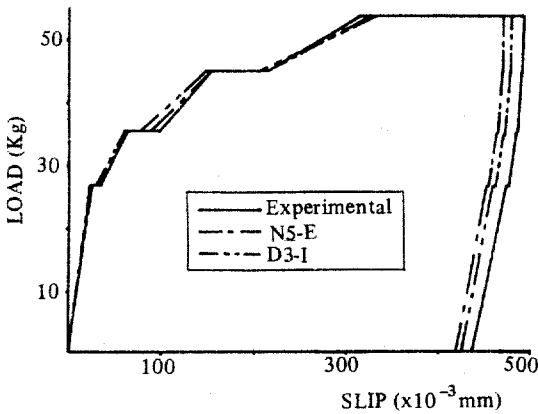


Fig. 8. Predicted and experimental joint moduli of nailed joints under load function (E).

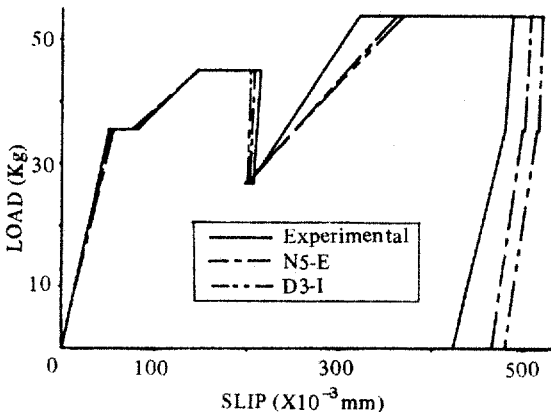


Fig. 9. Predicted and experimental joint moduli of nailed joints under load function (F).

의 境遇에는 固定荷重하에서의 瞬間 및 creep結合係數의 平均値로 그 結合係數를 豫測할 수 있을 것으로 생각되나 이에 관해서는 더 많은 實驗에 의한 確認이 要求 된다.

그림9에서 보면 重荷函數 (F)하에서도 역시 荷重이 增加할수록 結合係數는 減少하였으며 減少荷重하에서는 하나의 結合係數로 定義할 수 있었다. 두번째 段階의 增加荷重에서는 첫段階의 creep效果 때문에 結合係數가 減少하였으나 네번째 段階의 荷重增加에서는 그 前段階가 減少荷重이었으므로 creep效果가 없어 結合係數의 減少가 없었다. 여기에서 보아도 creep이 結合係數에 미치는 影響이 매우 큼을 알 수 있었다. 以上の 過程들은 다른 材料와 다른 形態의 結合部에도 똑같은 方法으로 適用될 수 있을 것으로 생각된다.

5. 結 論

본 研究의 結果에 의하면 creep이 木結合部의 剛性度에 미치는 影響은 매우 크며 이 效果는 木構造物의 設計와 分析에 반드시 考慮되어야 한다고 생각한다. 본 研究에서 얻은 結論은 다음과 같다.

- 1) 본 研究에서 開發된 粘性-粘彈性模型들에 의하여 長期可變荷重하에서 木結合部의 creep變形 및 結合係數의 變化를 效果적으로 豫測할 수 있었다.
- 2) 長期固定荷重하에서 結合係數의 값은 瞬間彈性, creep彈性, 瞬間 및 creep結合係數로 나눌 수 있으며 그 크기는 列擧한 順序대로 減少하였다.
- 3) 荷重이 커질수록 瞬間塑性 및 粘性變形이 全體變形중에 차지하는 比率이 增加하였으며 結合係數에 미치는 影響도 增加하였다.
- 4) 段階의 增加荷重하에서 木結合部의 結合係數는 減少하였으며 이는 長期固定荷重하에서의 傾向과 비슷하였다.
- 5) 減少荷重하에서는 木結合部의 結合係數를 하나로 定義할 수 있었다.

參 考 文 獻

1. American Society for Testing and Materials. Standard methods of testing metal fasteners in wood. ASTM D1761. Philadelphia, PA.
2. Cho, U.W. and W.N. Findley. 1982. Creep and plastic strains of 304 stainless steel at 593°C under step stress changes, considering aging. *Journal of Applied Mechanics*. 49: 297-304.
3. Chou, C. and A. Polensek. 1987. Damping and stiffness of nailed joints: Response to drying. *Wood and Fiber Science*. 10 (1): 48-58.
4. Findley, W.N. and J.S. Lai. 1978. Creep and recovery of 2618 aluminum alloy under combined stress with a representation by a viscous-viscoelastic model. *Journal of Applied Mechanics*. 45: 507-514.
5. _____, _____, and K. Onaran. 1976. Creep and relaxation of nonlinear viscoelastic materials. North-Holland Pub. Co. New York, N.Y.
6. Foschi, R.O. and T. Bonac. 1977. Load-slip characteristics for connections with common nails. *Wood Science*. 9 (3): 118-123.
7. Gerhards, C.C. 1977. Effect of duration and rate of loading on strength of wood and wood-based materials. USDA Forest Service. Res. Paper FPL 283.
8. _____, 1977. Time-related effects of loads on strength of wood. pp. 613-623 in *Proceedings of Conference on Environmental Degradation of Engineering Materials*. College of Engineering, Virginia Tech. Blacksburg, Va.
9. Jang, Sangsik. 1987. Prediction models for creep behavior of nailed joints between Douglas-fir lumber and plywood. Ph.D. dissertation. College of Forestry, Oregon State University. Corvallis, OR.
10. Jenkins, J.L., A. Polensek, and K.M. Basteindorff. 1979. Stiffness of nailed wall joints under short and long-term loads. *Wood Science*. 11 (3): 145-154.
11. Kingston, R.S.T. and B. Budgen. 1972. Some aspects of the rheological behavior at high stresses in bending and compression. *Wood Science and Technology*. 6: 230-238.
12. Loferski, J.R. and A. Polensek. 1982. Predicting inelastic stiffness moduli of sheathing to stud nail joints. *Wood Science*. 15 (1): 39-43.
13. Pierce, C.B. and J.M. Dinwoodie. 1977. Creep in chipboard, Part 1: Fitting 3- and 4-element response curves to creep data. *Journal of Materials Science*. 12: 1955-1960.
14. _____, _____, and B.H. Paxton. 1985. Creep in chipboard, Part 5: An improved model for prediction of creep deflection. *Wood Science and Technology*. 19: 83-91.
15. Polensek, A. 1982. Creep prediction for nailed joints under constant and increasing loading. *Wood Science*. 15 (2): 183-192.
16. Senft, J.F. and S.K. Suddarth. 1971. An analysis of creep-inducing stress in Sitka spruce. *Wood and Fiber Science*. 2 (4): 321-327.