

# RC-T형교의 비선형거동해석을 위한 하중분배법에 관한 연구

## A Study on the Method of Load Distribution for Nonlinear Behaviour in RC-T Bridge

임정순<sup>1)</sup>                      김성철<sup>1)</sup>                      박성용<sup>2)</sup>  
Im, Jung-Soon      Kim, Sung- SunChil      Park, Sung-Yong

### Abstract

The characteristic of load-distribution is investigated by using nonlinear analysis with a field loading test of existing bridge. In this study, nonlinear load-distribution technique for quantitative analysis was adopted. The results were compared with linear solution technique with data from failure test at existing RCT-girder bridge and examine the adequacy of the failure mode.

The results of this study showed that the linear solution technique and the proposed nonlinear solution technique agreed well in linear region but did not matched well in nonlinear region because of load-redistribution, and that the effect of load-redistribution was considered to analysis of nonlinear region by linear solution.

**Key words** : nonlinear analysis, failure mode, load-redistribution

### 1. 서      론

최근 들어 교통량의 증가와 차량의 대형화로 말미암아 기존교량에 대한 내하력 평가가 중요시 되고 있다. 그리고 현장재하실험에 의해 각 거더의 내하력을 추정하는 경우 하중분배의 영향이 가장 크게 좌우된다. 기존 교량에 대한 파괴실험을 통하여 상부구조를 이루고 있는 각 거더의 하

중 분배특성에 관한 연구가 선형적 거동범위를 지나 비선형적 거동의 범위까지 확대해석하는 연구가 진행되어지고 있다. 1990년 Miamato<sup>8)</sup>는 실 교량으로부터 거더의 수에 따라 슬래브를 커터하여 현장재하실험을 실시하였다. 그 결과에 의하면, 재하중과 분배율은 허용응력내에서는 선형적 관계에 있고, 그 후 비선형적인 관계가 되는 것을 보고하였다. 1993년 Matsui 연구팀<sup>9)</sup>은 다 주형으

1) 정회원, 경기대학교 건설공학부 토목공학과 교수

2) 경기대학교 대학원 토목공학과 석사

• 본 논문은 교내 연구비(1997)지급에 의해 완성되었음.

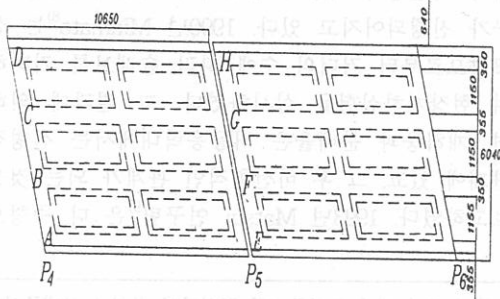
• 본 논문에 대한 토의를 4월 30일까지 학회로 보내주시면 1998년 7월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

로 된 교량 구조의 거동파악을 목적으로, 기존 RC-T형교에 대하여 내·외측 주형의 중앙에 하중을 단계적으로 재하하여 파괴실험을 실시하였다. 그런데 여기서는 부재의 극한강도를 평가하기 위하여 극한상태시의 내력을 재하중과 측정변위와의 선형적 관계식으로 계산하였다. 일반적으로 부재가 탄성거동 이후 거동은 구성된 재료의 특성과 거더의 강성에 따라 비선형 거동을 하게 되므로 교량 구조를 이루고 있는 거더들의 강성, 횡보와 슬래브의 강성에 따라 많은 변화가 있을 것으로 판단된다. 본 연구에서는 문헌<sup>9)</sup>의 연구보고서를 근거로 하여 교량의 강성모델에 대한 비선형 거동방정식을 증분법에 의해 유도하고 이 방정식에 의한 각 거더의 비선형적 하중분배를 재하중과 측정변위의 관계에 의해 타당성 여부를 검토하고, 선형적 관계식에 의한 하중분배와 비교 분석하여 비선형영역에서의 재하하중에 따른 재분배에 대해서 고찰하고자 한다.

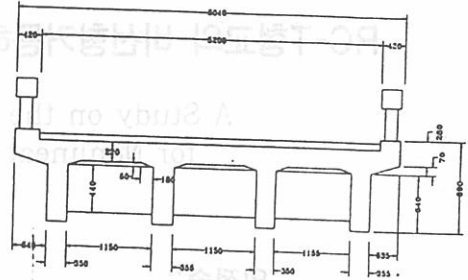
## 2. 대상교량의 제원과 파괴실험<sup>9)</sup>

### 2.1 실험교량의 제원

본 대상교량은 1955년에 건설된 단순 RC-T형(4-Girder)으로 사각이 右60도인 사교이다. 교장 74.45m, 폭원 6.0m으로, 형고 및 형폭은 H=0.80m, B=0.35m이고, 실험경간에 대한 일반도는 Fig 1과 같다.



(a) 평면도



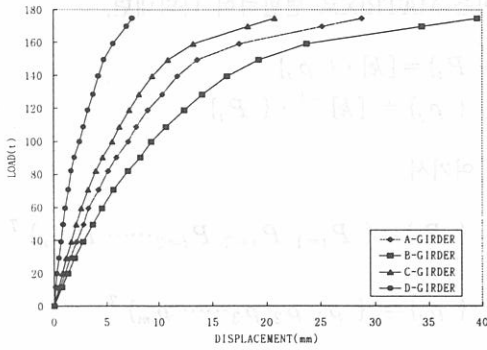
(b) 단면도

Fig 1. 실험 경간의 일반도

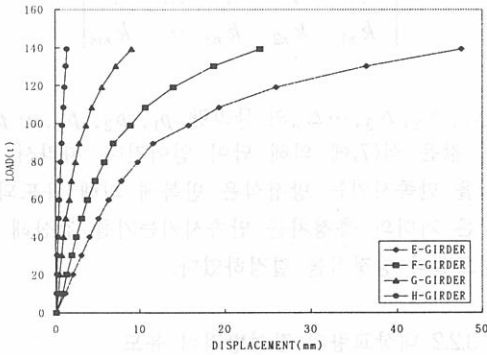
### 2.2 파괴실험개요 및 결과

Fig 1에서의 실험경간에 대해 loading-frame 을 설치한 후 자키를 이용하여 파괴실험을 실시하였다. 재하위치는 경간 P4~P5에서는 내측거더(B-Girder)중앙, 경간 P5~P6에서는 외측거더(E-Girder)중앙에 집중하중을 재하하였다.

재하하중은 단계적으로 5t씩 재하하여 내측거더는 50 t ~150 t, 외측거더는 50 t ~120 t의 사이클로 재하 후에 천천히 항복하중까지 증가하는 방법으로 재하하였다. 재하위치의 각 거더의 중앙 하단에 변위계를 설치하여 재하하중별 처짐을 측정하였고 그 결과 재하중별 변위와의 관계도는 Fig 2(a), (b)와 같다. 실험결과에 의해 하중별 각 거더의 거동을 살펴보면 Fig 2(a)에서 B-거더에 하중을 재하할 경우 A~D거더중 A, B, C거더가 거의 같은 시점에서 항복점에 도달하는 것을 Fig 2(b)에서 외측거더에 하중이 작용할 경우 E, F가 단계적으로 항복에 도달하고 있음을 알 수 있었다. 재하시험 결과분석에 의하면 내·외측거더의 파괴하중은 각각 175 t, 140 t 정도이며, 50 t까지는 탄성거동을 하는 것으로 보고되었다. 그리고 각 거더별의 항복하중은 약 120 t, 약 90 t으로 추정되었고 항복하중이 재하된 이후 변위는 급격히 증가함을 보였다.



(a) B-GIRDER



(b) E-GIRDER

Fig 2. 경간 중앙에서 거더의 처짐과 하중과의 관계도

### 3. 실험에 근거한 분배이론 전개

#### 3.1 선형적 분배해석

단계별 재하하중에 따른 각 거더별 측정변위  $\delta_{ij}$  라하면 하중에 대한 분배율( $k_{ij}$ )은

$$k_{ij} = \frac{\delta_{ij}}{\sum \delta_{ij}} \quad (1)$$

여기서  $\delta_{ij}$  = 작용하중에 대한 각 거더별 측정변위,  $\sum \delta_{ij}$  = 하중별 각 거더의 측정변위의 합 각 거더별의 분배하중( $P_{Gi}$ )은 식 (1)에서 구한 하

중분배율에 재하하중을 곱하여 각 재하중별로 더하여 구하면 임의의 교량에 하중을 재하할 경우의 각 거더별의 분배하중을 계산할 수 있다.

#### 3.2 비선형적 분배해석

##### 3.2.1 비선형 거동 방정식의 유도

재하실험에 의한 재하중과 내·외측거더의 처짐 측정치를 경계치로 하고 이것들의 조건을 만족시키는 강성방정식의 값을 중분법에 의해 계산하였다.

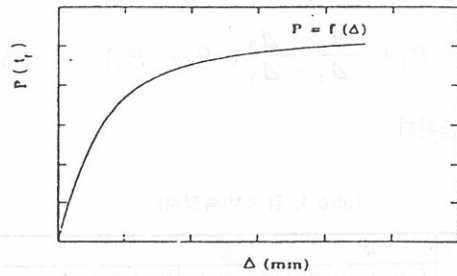


Fig 3. 하중과 변위와의 기본 관계도

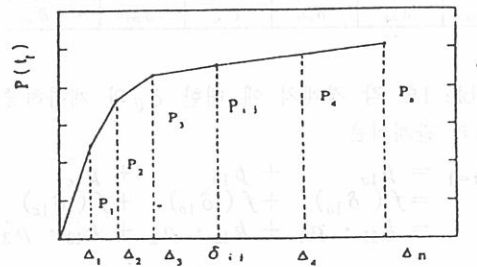


Fig 4. 중분법의 기본 모델

Fig 3에서 볼 수 있듯이 하중  $P$ 와 처짐치  $\Delta$ 의 관계식과 내·외측거더에 있어서 재하하중  $P$ 의 관계식은 다음과 같다.

$$P = f(\Delta) \quad (2)$$

$$P = p_a + p_b + p_c + \dots + p_m = \sum_{j=1}^m p_j \quad (3)$$

여기에서  $p_a, p_b, p_c, p_m$ 은 하중  $P$ 가 작용할 때, 각 거더 중앙에서의 처짐을 발생시키는 각 거더별로의 하중분배량으로 하고, 식 (2)를 식 (3)에 대입하면

$$P = f(\delta_a) + f(\delta_b) + f(\delta_c) + \dots + f(\delta_m) \quad (4)$$

이 된다. 그리고 Fig 3에서 각 처짐( $\delta$ )간의 증분량은 매우 작기 때문에 처짐과 처짐 간의 변화를 선형적으로 가정하면 Fig 4와 같이 나타낼 수 있다.

여기서, 측정 처짐  $\Delta_{ij}$ 에 대한 물리량  $P_{ij}$ 는

$$P_{ij} = P_3 + \frac{\Delta_{ij} - \Delta_3}{\Delta_4 - \Delta_3} (P_4 - P_3) \quad (5)$$

로 계산된다.

Table 1. 경계치(측정치)

| 재하하중      | 측 정 치         |               |               |               |                   |
|-----------|---------------|---------------|---------------|---------------|-------------------|
|           | A-Girder      | B-Girder      | C-Girder      | D-girder      | · · · m           |
| $P_{i=1}$ | $\delta_{1a}$ | $\delta_{1b}$ | $\delta_{1c}$ | $\delta_{1d}$ | · · $\delta_{1m}$ |
| $P_{i=2}$ | $\delta_{2a}$ | $\delta_{2b}$ | $\delta_{2c}$ | $\delta_{2d}$ | · · $\delta_{2m}$ |
| ·         | ·             | ·             | ·             | ·             | ·                 |
| $P_{i=n}$ | $\delta_{na}$ | $\delta_{nb}$ | $\delta_{nc}$ | $\delta_{nd}$ | · · $\delta_{nm}$ |

Table 1의 각 경계치에 대한  $\delta_{ij}$ 와 재하하중  $P_i$ 와의 관계식은

$$\begin{aligned} P_{i=1} &= p_{1a} + p_{1b} + p_{1c} + p_{1d} + \dots + p_{1m} \\ &= f(\delta_{1a}) + f(\delta_{1b}) + f(\delta_{1c}) + f(\delta_{1d}) + \dots + f(\delta_{1m}) \\ &= k_{11} \cdot \rho_1 + k_{12} \cdot \rho_2 + k_{13} \cdot \rho_3 + k_{14} \cdot \rho_4 + \dots + k_{1m} \cdot \rho_m \end{aligned} \quad (6a)$$

$$\begin{aligned} P_{i=2} &= p_{2a} + p_{2b} + p_{2c} + p_{2d} + \dots + p_{2m} \\ &= f(\delta_{2a}) + f(\delta_{2b}) + f(\delta_{2c}) + f(\delta_{2d}) + \dots + f(\delta_{2m}) \\ &= k_{21} \cdot \rho_1 + k_{22} \cdot \rho_2 + k_{23} \cdot \rho_3 + k_{24} \cdot \rho_4 + \dots + k_{2m} \cdot \rho_m \end{aligned} \quad (6b)$$

$$\vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots \quad \vdots$$

$$\begin{aligned} P_{i=n} &= p_{na} + p_{nb} + p_{nc} + p_{nd} + \dots + p_{nm} \\ &= f(\delta_{na}) + f(\delta_{nb}) + f(\delta_{nc}) + f(\delta_{nd}) + \dots + f(\delta_{nm}) \\ &= k_{n1} \cdot \rho_1 + k_{n2} \cdot \rho_2 + k_{n3} \cdot \rho_3 + k_{n4} \cdot \rho_4 + \dots + k_{nm} \cdot \rho_m \end{aligned} \quad (6m)$$

이를 MATRIX로 변환하여 나타내면,

$$\begin{aligned} \{P_i\} &= [k] \cdot \{\rho_j\} \\ \therefore \{\rho_j\} &= [k]^{-1} \cdot \{P_i\} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서,

$$\{P_i\} = \{P_{i=1} \ P_{i=2} \ P_{i=3} \ \dots \ P_{i=n}\}^T$$

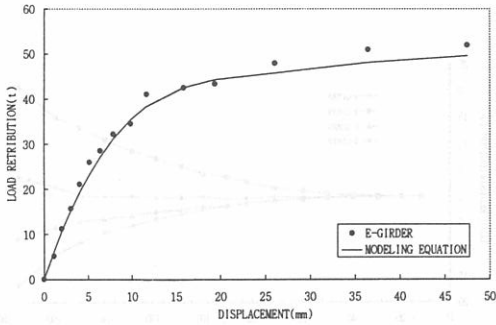
$$\{\rho_j\} = \{\rho_1 \ \rho_2 \ \rho_3 \ \dots \ \rho_m\}^T$$

$$[k] = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & \dots & k_{1m} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & \dots & k_{2m} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & \dots & k_{3m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & k_{n3} & \dots & k_{nm} \end{bmatrix}$$

$\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots, \Delta_n$ 의 물리량  $p_1, p_2, p_3, \dots, p_m$ 의 값은 식(7)에 의해 답이 얻어진다. 따라서, 이 답을 만족시키는 방정식은 반복에 의해 유도되고 다른 거더의 측정치를 만족시키는가를 검산해 강성모델의 방정식을 결정하였다.

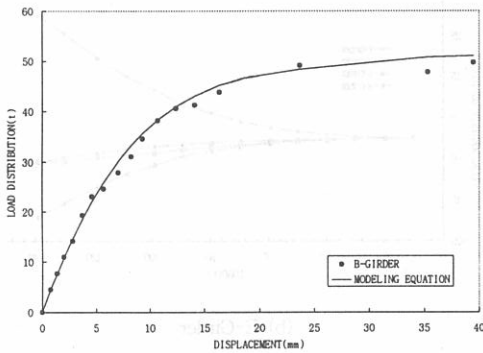
### 3.2.2 대상교량의 강성방정식 유도

내·외측거더에 대한 재하하중과 처짐 측정치로부터 대상교량의 강성모델을 만족하는 거동방정식은 다음과 같다.



$$P_{ij} = -5E-05 \delta^4 + 0.00062 \delta^3 - 0.285 \delta^2 + 5.98 \delta$$

Fig 5. B-GIRDER 감성모델



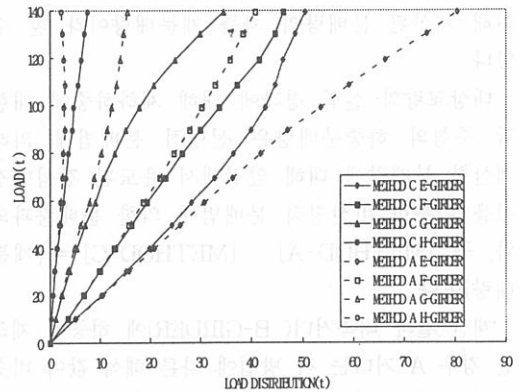
$$P_{ij} = -5E-05 \delta^4 + 0.0063 \delta^3 - 0.288 \delta^2 + 5.8675 \delta$$

Fig 6. E-GIRDER 감성모델

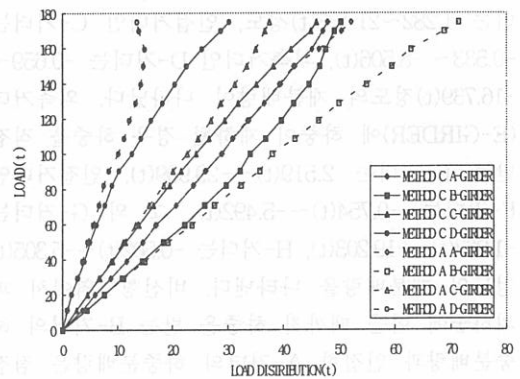
#### 4. 해석결과 검토

선형적 분배해석(METHOD A)과 비선형적 분배해석(METHOD C)에 의한 각 거더별 하중분배량을 비교하면 Fig 7(a), (b)와 같다. Fig 7에서 선형거동 영역에서는 2개의 방법이 서로 잘 일치되지만 비선형거동 영역에서부터는 방법 A와 방법 C는 서로 일치되지 않음을 보여 주고 있다. 이는 교량 상부를 구성하는 각 거더 중 어느 하나가 비선형 거동을 하게 되면 하중의 분배는 재분배가 발생하게 되어 선형일 때와는 다르게 나타난다. Fig 4.1의 방법 C에서 보는 바와 같이 직

접하중을 받는 거더가 소성상태에 도달하면 하중분배량의 증가폭이 감소하고 인접한 다른 거더의 하중분배량이 증가하는 것을 보여주고 있다. 따라서, 극한상태에 있어서는 Fig 7(a)와 같이 A, B-거더가 소성상태이고 C-거더까지 소성상태에 도달함으로 인해서 구조물이 파괴상태에 도달하며 Fig 7(b)와 같이 E-거더가 소성상태에 도달할과 거의 같은 시점에 F-거더도 도달하므로 구조물은 파괴상태에 도달한 것으로 판단된다. 따라서, 이는 Fig 2의 재하하중과 측정 처짐과의 관계에서의 각 거더의 거동과 잘 일치한다.



(a) P4~P5 재하한 경우



(b) P5~P6 재하한 경우

Fig 7. 해석방법별 하중분배량 비교

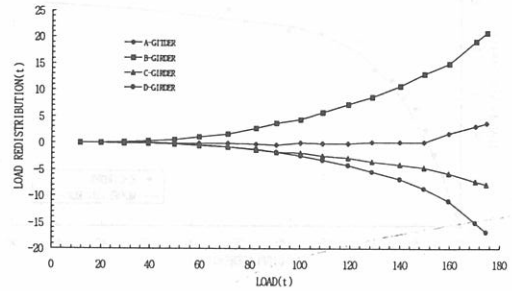
## 5. 하중의 재분배

하중의 재분배라 함은, 상판을 구성하고 있는 여러 개의 거더중에 직접하중을 받거나, 강성이 적은 거더가 탄성한도를 넘어 항복강도에 도달하여 소성 힌지상태에 있게 되므로 이 경우 작용하중이 증가하여도 이것에 대한 저항력이 증가하지 못하여 인접 거더에 하중이 더 분배되는 현상을 재분배라 한다. 본 대상구조물은 내·외측거더의 강성들이 거의 차이가 없으므로 대상교량에 있어서 재하하중조건에 따른 각 거더의 재분배량은 선형적 해법에 의한 분배량과 비선형적 해법에 의해 계산된 분배량의 차를 재분배량이라 할 수 있다.

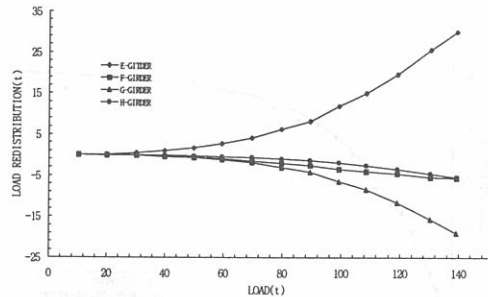
대상교량의 실험 공간에 대해 재하하중에 대한 각 주형의 하중분배량은 선형적 분배법에 의해 계산한 분배량에 대해 앞장에서 유도된 강성방정식을 이용한 비선형적 분배법에 의한 분배량과의 차, 즉, [METHOD-A] - [METHOD-C] = [재분배량]이다.

계산 결과 내측거더(B-GIRDER)에 하중이 재하한 경우 A-거더는 각 방법에 따른 해석 값이 비슷한 양상을 보이다가 재하하중이 159.44~174.64(t)에서 1.266~4.114(t)정도의 재분배량이 나타나며 선형거동영역을 지나면서 하중을 직접 받는 B-거더는 1.282~21.133(t)정도, 인접거더인 C-거더는 -0.533~ -8.506(t), 외측거더인 D-거더는 -0.659~ -16.739(t)정도의 재분배량이 나타났다. 외측거더(E-GIRDER)에 하중이 재하될 경우 하중을 직접 받는 E-거더는 2.519(t)~-29.999(t), 인접거더인 F-거더는 -0.754(t)~-5.492(t), 그 외 G-거더는 -1.263(t)~-19.203(t), H-거더는 -0.502(t)~-5.305(t)정도의 재분배량을 나타낸다. 비선형영역에서 파괴하중에 이를 때까지 하중을 받는 B-거더의 하중분배량과 인접한 A-거더의 하중분배량은 점점 줄어드는 대신 C-거더와 D-거더의 하중분배량은 증가하고 있으며 또한 하중을 받는 E-거더의 하중분배량이 줄어드는 대신 인접한 거더 F-거더, G-거더, H-거더의 하중분배량이 증가함을 알 수

있다.



(a) B-Girder



(b) E-Girder

Fig 8. 거더별 하중의 재분배량 비교

## 6. 결 론

본 논문은 건설후 27년이 지난 R.C.T.형교의 파괴실험을 통하여 얻은 측정치를 이용하여 비선형 거동방정식을 유도, 하중분배의 특성에 대하여 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 재하하중과 변위와의 관계도를 증분법에 의해 이상화하여 실험치에 대한 분배량을 계산, 이를 만족시키는 강성방정식을 유도하였다. 이 방정식에 의해 계산된 각 거더의 분배량은 실험거동과 거의 일치함을 보였고, 재하하중에 대한 부분별 약간의 차이를 보이는 것은 실험시의 오차로 생각된다.

2) 선형적 해법과 제안된 비선형적 해법은 선형영역에서는 2개의 방법이 잘 일치하는 것을 볼 수 있었지만, 비선형영역의 파괴모드에 대해서는 제안한 해법은 비교적 잘 일치함을 보여주나, 선형적 해법은 하중 재분배로 인하여 불일치함을 보여주었다.

3) 선형적해법에 의해 대상교량의 비선형거동을 해석해야 할 경우는 하중 재분배에 대한 영향을 고려해야 한다는 것이 검증되었다.

4) 비선형 거동영역에서 하중의 재분배는 각 하중재하 방법별로

① 내측거더(B-GIRDER)에 하중이 재하되는 경우 하중을 직접 받는 B-거더는 2.16%~12.1% 정도 감소를 보이며, 나머지 거더인 A-거더는 0.8%~2.36%, C-거더는 0.9%~4.87%, D-거더는 1.1%~9.58%정도 증가되었음을 알 수 있었다.

② 외측거더(E-GIRDER)에 하중이 재하되는 경우 하중을 직접 받는 E-거더는 4.24%~21.57% 정도 감소를 보이며, 나머지 거더인 F-거더는 1.27%~3.95%, G-거더는 2.13%~13.81%, H-거더는 0.85%~3.81%정도 증가되었음을 알 수 있었다.

5) 내·외측 거더의 강성변화 또는, 구조의 형식과 형상 변화에도 정량적 분배량 계산이 가능케 하기 위해서는 보다 많은 실험과 연구가 계속되어야 한다고 생각된다.

#### 참 고 문 헌

1. James Harold, Ph.D, "Investigation of Variables Affecting Beam-Slab Bridge Load Capacity" the Univ of Tennessee, 1987

2. Guyon, Y., "Calcul des Ponts Large a Poutres Multiples Solidarises par des Entretoises" Annales des Ponts et Chaussées, Paris, pp 553-612 (Sept-October. 1946)

3. Massonnet, C., "Methode de Calcul des Ponts a'Poutres Multiples Tenant Compte de Leur Reistance a' la Tortion" Publications, International Association for Bridge and Structural Engineering, Zurich vol. 10, pp 147-182, 1950

4. Moriee, p.b. and Little, G., "Load Eistribution in Prestressed Concrete Bridge System," Structural Engineer, Vol. 32, pp. 83-111, March 1954.

5. K. Sattler : Bauingenieur 34 Januar. (1959)

6. Mattock, A., H., Kaar, P. H., "Test of Half-Scale Highway Bridge Continuous Over Two Spans," Reprint from the Journal of the PCA Research and Development Laboratories, Vol. 3, No. 3, September 1961, pp 30-70

7. Sanders, W. W., Klaiber, F. W., Elleby, H., Timm, L. W., "Ultimate Load on Highway Bridges" National Cooperative Highway Research program Report No. 83, 1970

8. 宮本文穂 외 2人. "현장시험에 의한 콘크리트교의 안전성 평가수법의 실용화" 일본 콘크리트 공학연차 논문보고집, 12-1990

9. S. Matui, T. Hogashi, Y. Meno, T. Horage, Y. Furukawa, "System Failure and Utimate Load-Carrying Capacity of Reinforced concrete T-Beam Brigde" ICSF 4th-Symposium

10. 김성철, Ph. D., "콘크리트 형교의 역학적 특성과 내하력 평가에 관한 기초적 연구" 일본 경도대학 1995.

(접수일자 : 1997. 12. 15)