

단순 PC빔교의 연속 바닥슬래브에 발생하는 모멘트 분포

Moment Distribution in Continuous Slabs of Simply Supported Bridges

최창근*

Choi, Chang Koon

송명관**

Song, Myung Kwan

Abstract

The finite element program is presented for the analysis of the moment distribution in continuous slabs of simply supported girders. The program includes the material nonlinearity of the concrete and steel reinforcements of the RC slabs, but assumes that the PC beam and cross beam behave linearly. In modeling the RC slabs and girders, the four node degenerated shell element formulated based on the assumed strain interpolation and the 3D beam element are used, respectively.

Using the program, the influence of the existence of the cross beam, the filling of open joints on the continuous at supports, and the perfect continuation of precast girder elements are examined.

1. 서 론

PC빔 합성형 교량의 건설에 있어서 PC빔은 단순 지지되며 연속지점부에서 바닥슬래브를 연속 시공하여 승차감을 향상시키고 공사비의 절약을 도모한다. 그러나, 여러 가지 원인으로 인하여, 연속지점부 바닥슬래브에서 균열이 발생하게 된다. 이러한 균열은 장기적인 관점에서 본다면 누수에 의한 철근의 부식 등으로 인하여 교량의 사용성(serviceability)을 저하시키고 잦은 교량 보수를 필요로 한다. 이러한 균열 발생의 원인들 중의 하나는 교량에 작용하는 교통하중의 영향이며, 따라서, 재하 하중에 대한 연속 바닥슬래브의 정역학적인 거동에 대한 고찰이 요구되어진다.

* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

** 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

2. 연구목적 및 범위

PC빔 합성형 교량의 해석에 있어서, 이러한 교량 형식이 갖는 다양한 구조 요소, 재료 특성, 하중 상태 등을 고려하기 위해서 유한요소 해석 방법을 사용한다. 교량 상부구조를 크게 두 가지로 구분하면 바닥슬래브와 거더(girder)로 구분할 수 있다. 바닥슬래브는 대체 변형률장을 이용한 4절점 쉘요소(Choi and Paik, 1994)로 모델링하고, PC빔은 2절점 3차원 보요소로 모델링한다. 그리고, PC빔의 긴장력(prestrressing force)은 등가의 힘을 3차원 보요소에 재하하는 방법을 사용한다. 이러한 모델링을 통하여 비선형 유한요소 해석을 실시하여 가로보(cross beam)의 유무, open joint 채움콘크리트의 유무, PC빔 단부의 완전 연속화 여부에 따라 연속 바닥슬래브에 발생하는 단위 폭(cm)당 휨 모멘트의 고찰에 의한 거동 특성 파악에 주안점을 둔다.

3. 비선형 해석을 위한 모델링

바닥슬래브의 철근과 콘크리트의 재료적 비선형성을 각각 모델링하여 비선형 유한요소 해석을 시행한다. RC쉘의 문제에 있어서는 압축 콘크리트의 비선형 거동, 콘크리트의 균열, 철근의 거동 등은 두께 방향으로 표현이 가능하며, 쉘의 ζ 에 따라 불연속적인 재료 특성을 가질 경우 강성행렬을 구성함에 있어서 두께 방향으로 적절한 적분이 이루어져야 한다. 재료 비선형 문제에 있어서는 재료 구성 방정식(constitutive law)을 만족시키는 두께 방향으로의 응력 측면(Profile)이 적절한 개수의 점에서 계산되어야 한다. 본 연구에서의 유한요소 코드는 쉘의 각 layer에 대해 중간점 적분규칙(midpoint rule integration scheme)을 사용한 layered 모델을 단순하고 효율적으로 적용하여 위의 거동들에 대해 고려한다.

layer들은 쉘의 바닥으로부터 연속적인 층을 이룬다. 각 layer는 중간 표면(midsurface)에 응력점(stress point)을 갖는다. layer의 응력 성분들은 이 응력점에서 계산되고 각 층의 두께 방향으로 일정하다고 가정한다. 요소 당 다른 개수의 layer의 사용 뿐만 아니라, 다른 두께를 갖는 layer의 사용이 가능하다. 쉘의 두께가 변함에 따라 적분함으로써, 합응력(stress resultant)을 구할 수 있다.(그림1)

두꺼운 평판이나 쉘 해석에 있어서 연직 전단 효과를 고려하기 때문에 삼축에 대한 항복 규준을 사용하며, 다음과 같은 항복 규준을 사용한다.

$$f(\sigma) = \{1.355[\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y] + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)\} + 0.355\sigma_0[\sigma_x + \sigma_y]^{1/2} = \sigma_0$$

여기서, σ_0 은 등가유효응력이다.

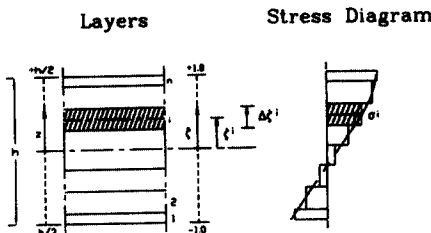


그림 1 layered 모델과 응력 표시

변형률-경화 모델에서는 초기의 항복은 유효응력이 최대 응력 f'_c 의 30%에 도달했을 때 일어난다고 가정한다. 유효응력과 유효소성변형률과의 관계는 다음과 같다.

$$\sigma = -E_0 \epsilon_p + \sqrt{2E_0^2 \epsilon_0 \epsilon_p}, \quad 0.3f'_c < \sigma < f'_c$$

여기서, E_0 는 초기 탄성계수이며 ϵ 는 총변형률, ϵ_0 는 압축강도(f'_c)에서의 변형률을 나타내며, $2f'_c / E_0$ (Hognested(1951))의 값을 갖는다. 위 식을 이용하여 현재의 유효소성변형률 ϵ_p 에서의 유효응력을 결정할 수 있다.

삼축 응력상태에서의 콘크리트의 파괴 규준은 변형률을 사용하여 정의하였다. 이러한 파괴 규준의 구성은 항복 함수의 응력항에 변형률을 대치시킴으로써 얻어질 수 있다. 그러므로 아래와 같은 식으로 구성된다.

$$1.355 \left[(\epsilon_x^2 + \epsilon_y^2 - \epsilon_x \epsilon_y) + \frac{3.0}{4} (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2) \right] + 0.355 \epsilon_u (\epsilon_x + \epsilon_y) = \epsilon_u^2$$

여기서, ϵ_u 는 일축압축실험 결과로부터 얻어지는 최대변형률이다.

인장응력 하의 콘크리트의 거동은 콘크리트에 균열이 발생하기 전까지는 탄성 거동을 한다고 가정하며, 이러한 균열 발생의 기준은 최대인장응력에 의해 결정한다.(그림 2(b)) 구조물의 주응력 방향이 1, 2라고 가정할 경우, 1, 2 방향의 응력이 인장강도를 초과할 경우 새로운 응력-변형률 관계를 도입한다.

부차 효과에 의해 균열이 생긴 콘크리트는 균열면에 수직인 인장응력을 약간 가진다. 이런 효과를 인장강성증진 (tension stiffening) 효과라고 한다. 이 효과를 고려하기 위해서 균열이 생긴 요소의 균열에 수직한 방향 응력 σ_1 은 다음과 같이 가정한다.

$$\sigma_1 = \alpha f'_t \left[1 - \frac{\epsilon_1}{\epsilon_m} \right], \quad \epsilon_t \leq \epsilon_1 \leq \epsilon_m$$

여기서, $\alpha \epsilon_m$ 은 인장강성증진 계수이고, ϵ_1 은 1방향으로서 현재의 인장변형률이다.

철근콘크리트 부재에서 철근층은 철근비에 따라서 등가의 두께를 가지는 철근층으로 고려하며, 독립적인 두께를 가지는 것이 콘크리트 층 내에 스며있는 smeared 철근층으로 고려한다. 각각의 철근층은 배근 방향으로 축방향 응력만을 받는 일축압축거동을 하는 것으로 모델링 한다. 철근의 축방향 응력-변형률 곡선은 (그림 3)과 같이 탄성-소성 형태이다.

PC 거더와 가로보 등, 보의 강성행렬(탄성)을 쉘요소에 조합하기 위해서 보 offset의 영향을 고려하여야 하며, 이것은 강연결(rigid links)에 의해서 가능하다. 보요소는 절점 당 6개의 자유도를 가지며, 쉘요소는 절점 당 5개의 자유도를 갖는다. 보요소의 강성행렬 중에서 쉘요소의 자유도와 일치하는

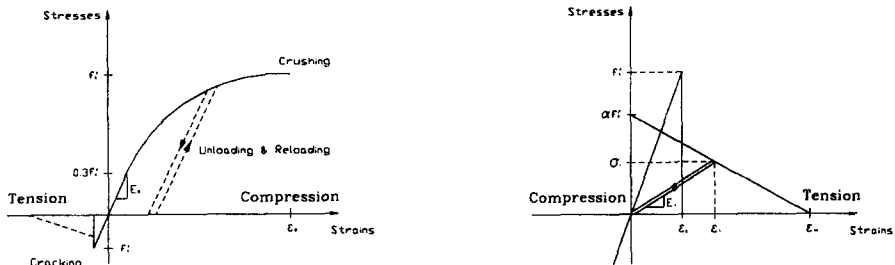


그림 2 콘크리트의 재료 모델

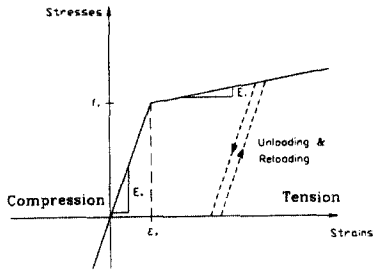


그림 3 철근의 응력-변형률 곡선

자유도에 대해서 변환행렬을 이용하여 쉘요소의 강성행렬로 변환한다.

$$[T] = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -z & 0 & y \\ 0 & 1 & 0 & 0 & z & x \\ 0 & 0 & 1 & x & -y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad [T]_{12 \times 12} = \begin{bmatrix} T & 0 \\ 0 & T \end{bmatrix}$$

여기서, x, y, z 는 각각 x, y, z 방향으로의 offset 거리이다. 따라서, 요소강성행렬과 요소하중행렬의 구성이 가능하다.

$$\{r\} = [T]^T \{r'\} \quad \{K\} = [T]^T \{k'\} [T]$$

위에서 형성된 강성행렬을 강연결 된 쉘요소의 절점에 대해 조합하게 된다.

PC 긴장력은 등가의 하중과 고정단 모멘트로 바꿀 수 있으며(Kenneth W. 1990)(그림 4), 유한 요소 모델에 대해 외력으로 재하가 가능하다. 유효 긴장력을 P 라고 하면 PC빔에 작용하는 등분포하중 값은 다음과 같다.

$$W_a = -\frac{2P(e_1 + e_2)}{a(a+b)}, \quad W_b = +\frac{2P(e_1 + e_2)}{b(a+b)}$$

$$W_c = +\frac{2P(e_2 + e_3)}{c(c+d)}, \quad W_d = -\frac{2P(e_2 + e_3)}{d(c+d)}$$

그러나, 위의 식에서 a, b, c, d 가 0이 될 경우에는 등분포하중은 무한값을 가지며, 이 경우에는 등가의 집중하중으로 대체된다. 등가집중하중은 다음과 같이 계산된다.

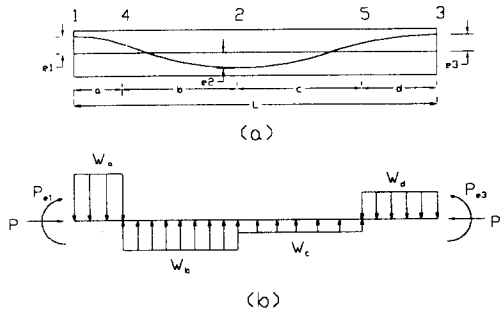
$$F_a = -\frac{2P(e_1 + e_2)}{a+b}, \quad F_b = +\frac{2P(e_1 + e_2)}{a+b}$$

$$F_c = +\frac{2P(e_2 + e_3)}{c+d}, \quad F_d = -\frac{2P(e_2 + e_3)}{c+d}$$

4. 연속 바닥슬래브의 모멘트 분포

최근에 설계되고 건설된 교량에 대해 비선형 유한요소 해석을 실시한다. 해석을 위해 실제 교량을 유한요소 모델링하며, 이 때 교량 전체를 모델링하는 것은 전처리기(preprocessor)가 사용 가능하지 않은 한 비효율적이고 장시간의 해석 시간을 필요로 하므로 교량의 거더 1개를 모델링 영역으로 한다. 따라서, 바닥슬래브의 전단 강성이 무시되어 작용하는 하중에 대해 본 연구의 유한요소 모델은 실제 교량에서 갖는 구조 강성보다는 작은 구조 강성을 가질 것이다.(그림 5)

가로보가 연속지점부의 하중 상태에 미치는 영향을 살펴본다. 가로보는 중간 가로보 5개, 지점 가로



(a) 긴장재의 배치 (b) 등가 하중

그림 4 긴장력의 구현

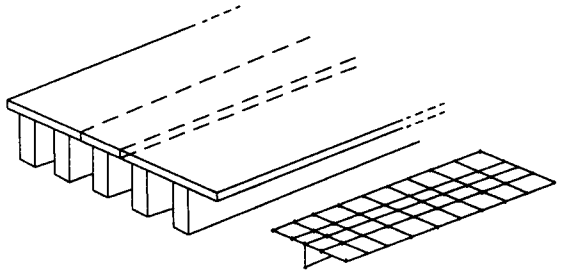


그림 5 모델링 영역

보 2개가 설치되어 있으며, 이러한 가로보가 설치되어 있는 경우와 설치되어 있지 않은 경우에 대해 각각 유한요소 해석을 실시한다. 2개의 거더에 하중 재하 시에는 두 거더 사이의 바닥슬래브 상에 1대의 DB24 하중을 재하시킨다. 1개의 거더에 대한 재하 하중은 1대의 DB24 하중을 교폭 방향으로의 영향선을 고려하여 3점 하중으로 $P_1=2,743\text{kg}$ 중, $P_2=10,971\text{kg}$ 중, $P_3=10,971\text{kg}$ 중을 거더의 중앙에 재하시킨다.

먼저, 1개의 거더의 경우, 가로보의 설치로 인하여 기복이 심한 모멘트 분포를 보이지만, 가로보가 없는 경우는 모멘트 분포가 심하지 않으며, 가로보 설치로 인한 강성 증가에도 불구하고 가로보에 의한 자중의 증가로 인하여 바닥슬래브에 발생하는 휨모멘트는 거의 영향이 없다.

· 가로보 설치에 의해 연속지점부의 하중의 분담율은 커짐과 동시에 open joint 채움콘크리트의 재료 물성치의 변화로 인하여 가로보를 설치하지 않은 경우보다 모멘트 분포가 증가한다. 또한, 가로보가 있는 경우 사하중에 의한 연속지점부의 교량 받침에서 발생하는 지점반력(26.7ton)은 가로보의 사하중에 의한 영향으로 가로보가 없는 경우의 지점 반력(19.2ton)보다 커지게 되며, 이러한 지점 반력의 증가도 모멘트 증가에 영향을 주는 것으로 보인다.(그림 6(a))

2개의 PC빔 거더를 가진 PC 합성형 교량에 대해 거더 사이의 바닥슬래브 상에 하중을 재하시킬 경우는 앞의 해석 결과와는 다른 결과를 얻었다. 가로보의 격자 효과가 나타나며, 하중이 가해진 격자에서는 가로보가 부담하는 모멘트가 있기 때문에 정모멘트가 감소하게 되고, 또한 연속지점부에 발생하는 부모멘트도 감소한다.(그림 6(b))

따라서, 가로보의 격자 효과는 하중이 거더 사이의 바닥슬래브 상에 가해질 경우 나타나며, 바닥슬래브에 발생하는 정모멘트는 감소하고, 연속지점부에서의 부모멘트 또한 감소함을 볼 수 있다. 그러나, 거더의 연직 상단에 가해지는 하중에 대해서는 격자 효과가 나타나지 않으며, 오히려 가로보에 의한 자중의 증가로 인하여 연속지점부에서의 부모멘트는 증가한다.

PC 합성형 교량에서 연결부 시공은 아주 중요하며, 이러한 연결부 시공은 연속지점부에서의 가로보 설치, PC빔 단부에 생기는 open joint를 채움콘크리트를 채우는 작업 등을 포함하게 된다. 과거에는 open joint 채움콘크리트를 시공하지 않았으나, 현재는 시공하는 추세이다. 이러한 open joint 채움콘크리트의 유무(CASE-1, CASE-2)에 따라 바닥슬래브에 발생하는 모멘트 분포를 살펴본다.

1개의 PC빔 거더를 가진 PC 합성형 교량에서 CASE-2의 경우(not continuous)는 CASE-1(continuous)의 경우에 비해 연속지점부에서 발생닥슬래브는 연속 구조체로 타설되었으나, PC빔

단부는 연속화하지 않음으형상적인 불연속이 가장 큰 원인이다. Open joint를 채움콘크리트로 채움으로써 바닥슬래브에 발생하는 부모멘트를 현저히 감소시킬 수 있으며, 이것은 채움콘크리트가 거더 단부의 이동을 구속하기 때문이다.(그림 7(a))

2개의 PC빔 거더를 가진 PC 합성형 교량에 대해 3대의 DB24 하중이 거더 사이의 바닥슬래브 상에 가해질 때, 가로보의 격자 효과가 나타난다. 역시 이러한 격자 효과에도 불구하고 채움콘크리트가 없는 경우에는 큰 부모멘트 발생을 유발한다.(그림 7(b)) 따라서, 연속화 시공시 open joint는 반드시 채움콘크리트로 채우는 것이 바람직하다.

PC빔 단부를 적절한 시공 방법에 의해 완전 연속화하면 연속보로 가정할 수 있다. 유한요소 해석 시, 완전 연속화 시공을 한 경우는 연속지점부에서의 두 거더의 단부 사이를 보요소 모델링하고, 완전 연속화 시공을 하지 않은 경우는 bar 요소로 모델링하며, 가로보가 없고 1대의 DB24 하중이 재하될 경우에 대해 해석하고 비교한다. 연속지점부의 거동에 대해서 살펴보면 완전 연속화 할 경우 전체적으로 바닥슬래브에서 발생하는 정모멘트를 감소시킬 뿐만 아니라, 연속지점부의 부모멘트를 감소시킨다.(그림 8(a))

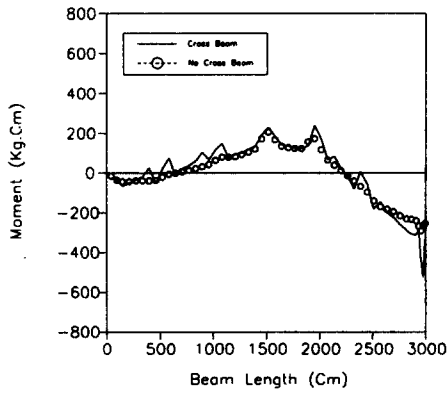
가로보가 있는 경우에는 이러한 완전 연속화에 의한 영향은 더 크게 나타나서, 연속지점부에서의 부모멘트를 현저히 감소시킨다. 부모멘트의 감소는 지점부에서의 가로보 설치와 거더 단부 사이를 완전 연속화함으로써 연속지점부에서 두꺼운 End block을 연결시킨 강성이 큰 하나의 연속보가 형성되었기 때문인 것으로 보인다. 그러므로, 바닥슬래브에서의 휨모멘트 분포에서 보여지듯이 가로보를 설치할 경우에는 반드시 연속지점부를 완전 연속화해야 한다. 그러나, 완전 연속화 시공을 한 경우에는 두 지점 사이의 바닥슬래브가 받는 정모멘트는 더 커지며, 또한 교량 받침에서의 반력 증가로 인하여 교량 받침부 연직 상단의 바닥슬래브가 받는 부모멘트는 커지는 경향이 있는 반면에 연속지점부에서는 부모멘트의 감소로 인한 바닥슬래브 상하단의 철근이 받는 응력 또한 감소하고 있음을 볼 수 있다.(그림 8(b))

따라서, 완전 연속화 시공하는 것이 바람직하다고 할 수 있으며, 이 때에는 연속지점부에서의 교량 받침, 교대 상단과 바닥슬래브에 특별한 보강을 필요로 하며, 완전 연속화를 위한 연속지점부, PC빔 단부에 대한 적절한 시공 방법을 필요로 한다.

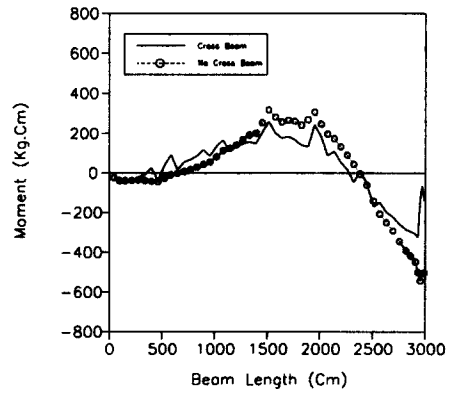
5. 결 론

본 연구에서는 비선형 해석 프로그램을 사용하여 PC빔 합성형교를 해석하고, 바닥슬래브에 발생하는 모멘트 분포, 특히 연속지점부에서의 모멘트 분포와 거동 특성에 대해서 고찰하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 가로보의 격자효과는 하중이 거더 사이의 바닥슬래브 상에 가해질 경우 나타나며, 바닥슬래브에 발생하는 정모멘트는 감소하고, 연속지점에서의 부모멘트 또한 감소함을 알 수 있다. 그러나, 거더의 연직 상단에 가해지는 하중에 대해서는 격자 효과가 나타나지 않으며, 오히려 가로보에 의한 자중의 증가로 인하여 연속지점부에서의 부모멘트가 증가한다.
- 2) 연속화 시공시 open joint는 반드시 채움콘크리트로 채워야하며, 그렇지 않은 경우에는 연속지점부 바닥슬래브에서의 부모멘트 증가를 유발한다.

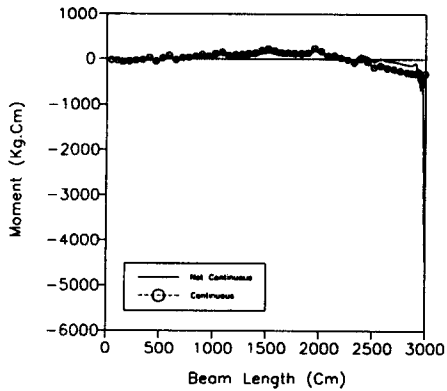


Moment in the Slab
(a) 거더 1개

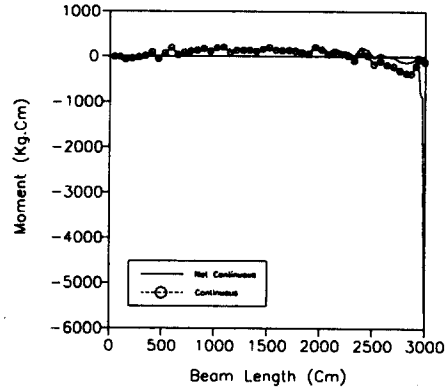


Moment in the Slab
(b) 거더 2개

그림 6 가로보의 영향

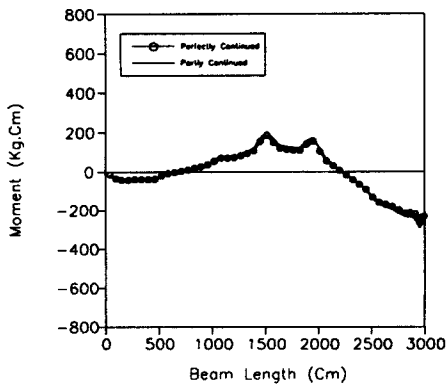


Moment in the Slab
(a) 가로보 없음

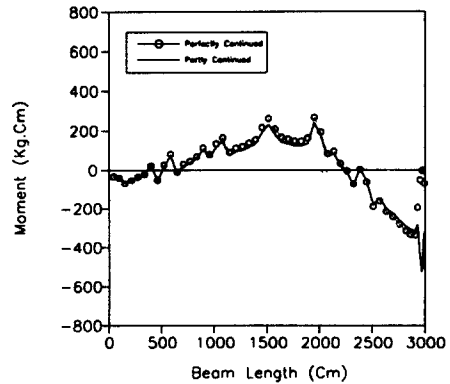


Moment in the Slab
(b) 가로보 있음

그림 7 open joint 채움콘크리트의 영향



Moment in the Slab
(a) 가로보 없음



Moment in the Slab
(b) 가로보 있음

그림 8 PC빔 단부의 완전 연속화의 영향

- 3) 연속지점부 연속화시, 가로보를 설치하고 PC빔 단부를 단지 채움콘크리트만으로 채울 경우는 큰 모멘트 증가를 가져오며, 이러한 현상을 피하기 위해서는 프리캐스트 요소(Precast Girder Element)의 완전 연속화가 필요하다. 완전 연속화 시에는 연속지점부에서의 교량 받침, 교대 상단과 바닥슬래브에 특별한 보강을 필요로 하며, 완전 연속화를 위한 연속지점부, PC빔 단부에 대한 적절한 시공 방법을 필요로 한다.
4. 연속지점부에서 발생하는 부모멘트를 감소시키기 위해서는 가로보를 설치하고, open joint를 채움콘크리트로 채우고, PC빔 거더의 단부를 완전 연속화 시공하여야 한다.

참 고 문 헌

1. A.G. Razaqpur and M. Nofal, "Analytical Modeling of Nonlinear Behavior of Composite Bridges", *Journal of Structural Engineering*, Vol.116, No.6, 1990 pp.1715-1733
2. J.J. Lin, D. Beaulieu and B. Massicotte, "Nonlinear Analysis of Composite Bridges by the Finite Element Method", Vol.40, No.5, 1991 pp.1151-1167
3. N. El-Mezaini, "Finite Element Analysis of Prestressed and Reinforced Concrete Structures", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 117, No.10, 1991 pp.2851-2864
4. J.G. Paik, "대체 변형률장에 의한 효율적인 4절점 쉘 유한요소 개발", 한국과학기술원 박사학위 논문, 1994
5. K.W. Shushkewich, "Simplified Equivalent Loads of Prestressing", *Journal of Structural Engineering*, Vol.117, No.11, 1991 pp.3538-3542