

# 처짐을 고려한 불완전합성형의 곡률특성에 관한 연구

## A Study on the Curvature Characteristic of the Incomplete Composite Girder Considering the Deflection Effect

용 환 선<sup>1)</sup> · 김 윤 환<sup>2)</sup> · 박 용 찬<sup>2)</sup> · 송 수 엽<sup>3)</sup>  
Yong, Hwan Sun Kim, Yun Hwan Park, Yong Chan Song, Su Yeop

요 약 : 일반적으로 강콘크리트 합성형교는 불완전합성에 대한 해석의 복잡함 때문에 강재와 콘크리트 계면에서의 상대변위가 발생하지 않는 완전합성형으로 설계된다. 그러나, 이러한 설계는 기존 강합성형의 거동을 평가하는 경우 실제 구조물의 내하력과 내구성을 정확하게 도출하지 못하게 된다. 이러한 경우에는 불완전합성이론을 이용하여 구조물의 거동을 정확히 반영해야 한다. 본 연구에서는 집중하중을 받는 단순합성형교에 대하여 처짐 거동을 고려한 불완전합성곡률의 변화양상을 확인하기 위하여 유한요소해석 모델을 이용하여 전단연결재의 배치간격과 배치열수 그리고 콘크리트 탄성계수를 매개변수로 선택하여 해석을 수행하였다. 본 연구의 결과로서 합성형의 처짐이 증가할수록 불완전합성 정도가 증가함을 알 수 있었으며, 콘크리트 슬래브에서 균열의 발생으로 인한 강성 및 강도의 감소가 합성정도에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

ABSTRACT : Current composite steel and concrete bridges are designed using full-interaction theory assuming there is no relative slip, between the steel and concrete components along their interface, because of the complexities of partial-interaction analysis techniques. However, in the assessment of existing composite bridges this simplification may not be warranted as it is often necessary to extract the correct capacity and endurance from the structure. This may only be achieved using partial-interaction theory which truly reflects the behaviour of the structure. In this paper, Parametric analyses have been carried out in order to confirm the partial-interaction curvatures with deflection effect using the finite element method. Therefore, the model is considered for simply supported steel and concrete composite bridges with a uniform distribution of connectors subjected to a single concentrated load. For the case studies, this study applicate a parameters such as the number and space of stud shear connector and elastic modulus of concrete slabs. From this study, it is known that partial-interaction effect was in the increase to the increasing the deflection of composite bridges, and stiffness and strength of slab concrete considering the occurrence of crack effect seriously to the partial-interaction behavior.

핵심용어 : 불완전합성 곡률, 곡률확대계수, 처짐특성, 전단연결재

KEYWORDS : Partial interaction curvature, Curvature magnification factor, Deflection characteristic, shear connector

### 1. 서론

합성형구조란 강재주형과 콘크리트 바닥판사이에 충분한 강도와 강성을 가진 전단연결재를 배치하여 두 부재를 일체된 구조부재로 거동하게 함으로써 강재와 콘크리트의 장점을 최대한으로 살린 구조형식이다. 합성형은 1920년대 초부터 미국, 캐나다 등지에서 시작되어 1944년 미국고속도로협회

(AASHTO) 설계규준에서 합성보를 채택하였고, 1950년대에 점차적으로 보급되어 일본에서는 1970년대 합성보 구조설계 시공지침이 나온 이후 활발하게 진행되어 왔으며, 우리나라에서도 최근 전단연결재 생산기술의 향상으로 합성형에 의한 강교량이 많이 설계·시공되고 있다.<sup>(13)</sup> 한편, 불완전합성형에 대한 연구는 Newmark[1951]에 의해서 최초로 해석되어 졌으며 Yam[1968]은 기초적으로는 Newmark

1) 정회원, 수원대학교 토목공학과 교수, 공학박사  
2) 정회원, 수원대학교 토목공학과 박사과정  
3) 수원대학교 토목공학과 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2003년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

와 같은 방법을 사용하여 불완전 합성단순교 및 연속교의 탄소성해석을 하였고<sup>(6)</sup>, 2경간 연속합성형의 중간지점부 콘크리트 슬래브에 발생하는 응력의 감소율에 따른 탄성합성에 대한 연구가 橋 善雄, 足立義雄(1964) 등에 의해 진행되었다.<sup>(3)</sup> 유한요소법을 이용한 불완전합성형의 해석은 浜田純夫(1977), 井上稔康, 佐藤浩一(1990) 등이 연구를 하였다.<sup>(2)(5)</sup>

한편, 우리나라에서도 최근 불완전합성율을 고려한 합성형에 대한 연구가 진행되기 시작했으며, 용환선(1997) 등은 단순합성교의 주형과 콘크리트 슬래브 상하연의 응력특성을 이용하여 중립축의 위치로 주형과 슬래브 계면의 합성거동 여부를 정량적으로 추정하였고,<sup>(15)</sup> 장승필(1997) 등은 연속교량의 중간지점부의 불완전합성율에 따른 콘크리트슬래브의 응력특성을 연구하는 등 많은 관심을 보이고 있다.<sup>(16)</sup> 합성형은 완전합성형과 불완전합성형으로 구분되며, 완전합성형은 전단연결재의 강성이 강재와 콘크리트 요소가 일체로 거동할 수 있도록 충분히 확보된 주형을 말한다. 그러나 전단연결재의 강성이 부족하면 강재주형과 콘크리트 바닥판의 계면에서 상대변위가 존재하게 된다. 이와 같이 전단연결재의 강성이 완전합성형에 비하여 부족하여 발생하는 상대변위를 고려한 것을 불완전합성형이라 한다.<sup>(10)</sup> 현재 우리나라의 도로교설계기준에서 합성형에 대한 설계규정은 완전합성형에 대해서는 언급하고 있지만, 슬립이 발생하는 불완전합성형에 대해서는 설계규정이 제시되어 있지 않은 실정이다.

그러나, 현행 설계기준에서처럼 합성형 교량의 설계시 전단강성을 무한대로 갖는 완전합성으로 가정한 후 설계된 교량이라도 주형과 바닥판이 서로 다른 재료성질을 갖는 구조부재로 구성된 관계로 두 부재의 결합에 따른 구조적인 문제와 사용하중 하에서 발생하는 처짐 및 균열, 반복하중에 의한 콘크리트의 손상 등 교량의 사용성과 관련한 많은 문제가 유발되어 불완전합성 거동에 영향을 미치게 되며, 교량의 지간 내의 임의의 위치에서 불완전합성 정도도 각각 달라지므로 이에 따라 유발되는 현상들과 불완전합성 정도와의 관계에 대한 연구가 필요한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 단순집중하중이 작용하는 불완전합성형에 대하여 처짐 거동을 살펴보고 이에 따른 불완전합성 곡률과의 관계를 통해서 단순합성교의 임의의 부분에서의 불완전합성 정도의 변화양상을 알아보기 위하여 유한요소해석 프로그램을 이용한 3차원 해석모델을 통해 전단연결재의 배치간격과 배치열수 그리고 콘크리트 탄성계수를 매개변수로 선택하여 MIDAS/CIVIL 5.4.0을 사용하여 해석을 수행한 후 R. Seracino(2001) 가 제안한 불완전합성형의 곡률식을 이용하여 분석하였다.

## 2. 불완전합성곡률

### 2.1 기본가정

R. Seracino에 의해 개발되어 불완전합성 변화를 예측하기 위해 사용될 수 있는 불완전합성곡률에 따라서 다음과 같은 가정을 적용하였다.

- 1) 강재주형과 콘크리트 슬래브 사이에는 분리가 되지 않았다.
- 2) 전단연결재의 하중-변형관계는 선형이다.
- 3) 전단연결재는 전 지간에 걸쳐 균일하게 배치되었다.
- 4) 하중은 단순집중하중으로만 국한된다.

### 2.2 불완전합성곡률

#### 2.2.1 합성형의 변형분포

주어진 하중조건에서 지간 길이 방향을 따라 어느 임의의 한 점에서의 변형분포를 나타내면 그림 1과 같다. 한 단면에서의 변형 분포에 대해서 2개의 극단적인 범위를 갖는데 하나의 범위는 완전합성 즉, 전단연결재의 강성이 무한대일 때 발생하고 또 다른 범위는 비합성 즉, 전단연결재의 강성이 0 일 때 해석으로부터의 결과이다. 강재와 콘크리트 구성요소 사이에는 분리가 없다는 가정 1)에 의하여 강재주형과 콘크리트의 곡률(curvatures)은 같다고 가정한다. 불완전합성 변형분포는 완전합성과 비합성의 두 개의 범위 사이에 놓여 있어야 한다.

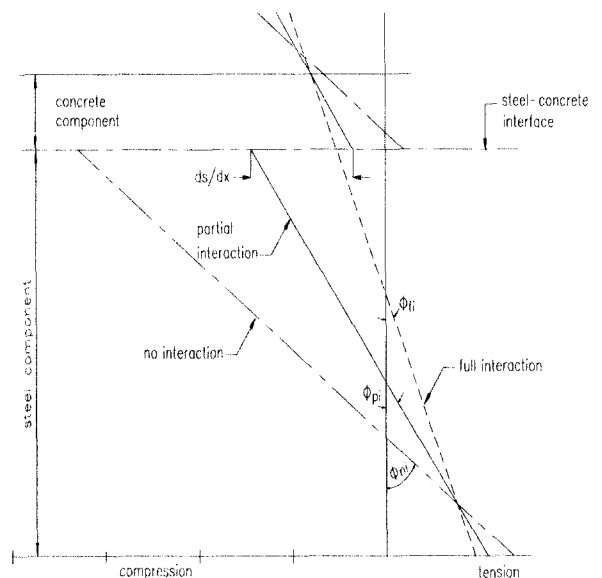


그림 1. 합성형의 변형분포

2.2.2 불완전합성곡률

그림 2는 집중하중이 지간의 1/4 부분에 위치해 있을 때 단순지지된 합성보의 길이방향으로 곡률의 여러 형태를 보여 준다. 그림 2에서 보여지는 것처럼 불완전합성곡률은 항상 완전합성과 비합성의 두 개의 범위 사이에 놓여 있으며 완전 합성곡률보다는 크고 비합성곡률보다는 작게 된다.

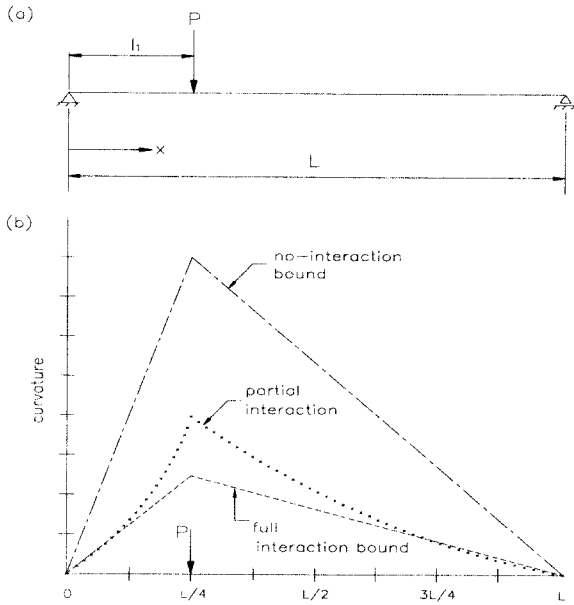


그림 2. 합성형의 곡률형태

불완전합성에 따른 보의 길이방향으로 임의의 점에서의 곡률 관계식을 유도하기 위하여 지점으로부터 설계기준점 (design point)까지의 거리  $x$  까지의 부분을 합친 선형탄성 불완전합성으로부터 다음 식 (1)과 같은 관계를 유도할 수 있다.<sup>(8)</sup>

$$\frac{d\phi}{dx} = \frac{(ks/p)d_c - V^*}{E_s I_o} \quad (1)$$

여기서,  $k$ 는 전단연결재의 강성,  $p$ 는 전단연결재의 간격,  $d_c$ 는 강재의 도심과 콘크리트 도심 사이의 거리,  $V^*$ 는 전단거리 1 또는 2의 범위 안에 위치한 기준점에 의존하는 전단력  $V_1$  과  $V_2$  이며 전단거리 1은 좌측 지점으로부터 단순 집중하중 재하위치까지의 길이를 나타내며 전단거리 2는 우측지점으로부터 단순집중하중 재하위치까지의 길이를 나타낸다.

식 (1)에 의해 주어진 매개변수  $I_o$ 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.<sup>(9)</sup>

$$I_o = I_s + \frac{I_c}{n} \quad (2)$$

여기서,  $n = E_s/E_c$  이다.

식 (1)에서  $s$ 는 전단거리 1 또는 2의 범위 안에 위치하는 기준점에 대하여 강재와 콘크리트의 상호접촉면에서 생기는 슬립  $s_1$  또는  $s_2$  이며 선형탄성 불완전합성이론으로부터 유도하면 다음 식 (3) 및 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$s_1 = \frac{\beta P [\cosh(al_1) - \coth(aL) \sinh(al_1)]}{\cosh(ax) - \beta V_1} \quad (3)$$

$$s_2 = \frac{\beta P [\sinh(ax) - \coth(aL) \cosh(ax)]}{\sinh(al_1) + \beta V_2} \quad (4)$$

여기서  $P$ 는 집중하중의 크기이며, 집중하중  $P$ 와 전단력  $V_1, V_2$  는 (+)값을 취한다.

변수  $l_1$  은 왼쪽 지점으로부터 집중하중 작용점  $P$  까지의 거리이며  $L$ 은 그림 2에 나타낸 지간길이이다. 식 (3)과 (4)에서의 매개 변수  $a$ 와  $\beta$ 는 전단연결재 강성 및 합성형의 단면적에 관한 함수이며 다음 식 (5)로 나타낼 수 있다.<sup>(9)</sup>

$$a^2 = \frac{k}{pE_s I_o A'} \quad (5)$$

$$\beta = \frac{d_c p A'}{k} \quad (6)$$

여기서,

$$\frac{1}{A'} = d_c^2 + \frac{I_o}{A_o} \quad (7)$$

$$\frac{1}{A_o} = \frac{n}{A_c} + \frac{1}{A_s} \quad (8)$$

식 (5)와 식 (6)을 식 (3)에 대입하고, 식 (1)에서  $V^* = V_1$  적용하여 하중작용점  $x$  까지 적분하면 전단거리 1에서의 곡률분포를 구하기 위해 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_1 = \frac{d_c^2 A'}{E_s I_o} \left\{ \frac{P}{a} [\cosh(al_1) - \coth(aL) \sinh(al_1)] \sinh(ax) - V_1 x \right\} + \frac{V_1 x}{E_s I_o} + C_1 \quad (9)$$

여기서, 경계조건이  $x = 0$ 에서  $\phi_1 = 0$ 이므로 적분상수

$C_1 = 0$  이다.

동일한 방법으로 식 (5)와 식 (6)을 식 (4)에 대입하고 식 (1)에서의  $V^* = V_2$  를 적용하여 하중작용점  $x$  까지 적분하면 전단거리 2에서의 곡률분포를 구하기 위해 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_2 = \frac{d_c^2 A'}{E_s I_o} \left\{ \frac{P}{\alpha} [\cosh(ax) - \coth(aL) \sinh(ax)] \sinh(al_1) + V_2 x \right\} + \frac{V_2 x}{E_s I_o} + C_2 \quad (10)$$

여기서, 경계조건이  $x = L$  에서  $\phi_2 = 0$  이므로 적분상수  $C_2$  는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_2 = \frac{-d_c^2 A'}{E_s I_o} \left\{ \frac{P}{\alpha} [\cosh(aL) - \coth(aL) \sinh(aL)] \sinh(al_1) + V_2 L \right\} + \frac{V_2 L}{E_s I_o} \quad (11)$$

### 2.2.3 불완전합성형의 곡률확대계수

곡률확대계수(curvature magnification factor)는 다음과 같이 정의한다.

$$MF_\phi = \frac{\phi_k}{\phi_\infty} \quad (12)$$

$\phi_\infty$  은 전단연결재의 강성  $k$ 가  $\infty$ 에 접근할 때 식 (9)의 극한값을 취하면 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi_\infty = \frac{V_1 x}{E_s I_o} (-d_c^2 A' + 1) \quad (13)$$

그림 2(a) 에서  $l_1 = x$  일 경우 최대 곡률이 발생하며, 전단거리 내에서의 수직전단력은 수직하중  $P$ 를 이용하여 식 (14)로 나타낼 수 있다.

$$V_1 = \frac{P(L-x)}{L} \quad (14)$$

그리고 식 (13)과 식 (14)를 식 (12)에 대입함으로써 곡률확대계수의 수학적 식은 식 (15)와 같게 된다.

$$MF_\phi = (-d_c^2 A' + 1)^{-1} \left\{ d_c^2 A' \left[ \frac{L}{\alpha x(L-x)} (\cosh(ax) - \coth(aL) \sinh(ax)) \sinh(ax) - 1 \right] + 1 \right\} \quad (15)$$

여기서 곡률확대계수는 작용하중이  $x$ 위치에 있을 때 지점으로부터  $x$ 만큼 떨어진 위치에서의 불완전합성에 기인한 곡률의 비례적인 증가를 의미한다. 그림 3은 식 (15)를 사용하여 곡률확대계수의 전형적인 분포를 나타내며  $MF_\phi = 1$ 의 선은 완전합성을 나타낸다.

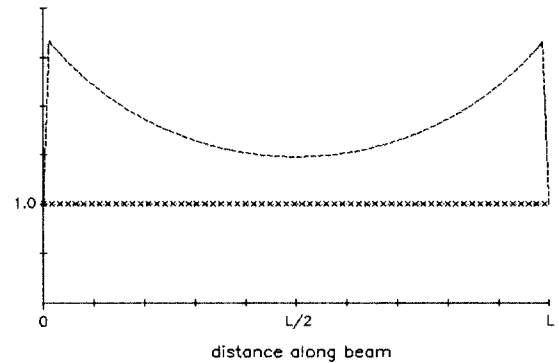


그림 3. 곡률확대계수의 전형적 분포

그림 3의 곡률확대계수의 분포는 이 하중상태에서 보의 중앙점을 기준으로 대칭적이다. 지점 가까이에서의 비교적 큰 곡률확대계수는 모멘트에서 약간 과대평가되었다. 그런 까닭에 곡률이 지점에서 0에 가까워질 때 완전합성곡률로부터의 증가는 무시할만한 결과이다.

곡률확대계수의 크기는 곡률이 가장 크게 나타나는 보의 중간 부분에서 훨씬 더 중요하다.

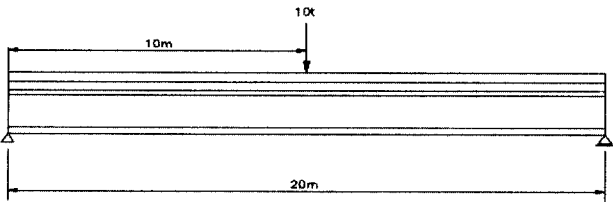
## 3. 유한요소해석

### 3.1 서론

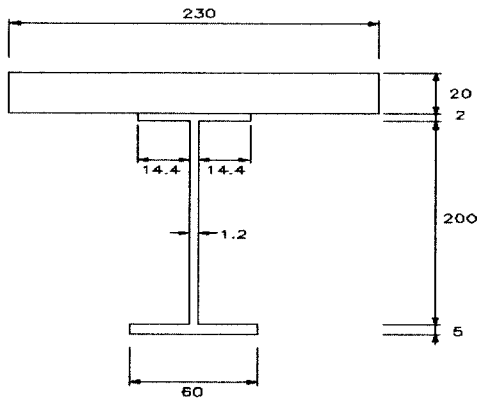
일반적으로 합성형 교량에서 합성정도와 가장 밀접한 관계가 있는 전단연결재의 거동을 규명하기 위한 실험적인 연구는 크게 두 가지 방법으로 나눌 수 있는데 하나는 합성보 시험 공시체를 이용한 것이고, 또 다른 하나는 압발시험 공시체(push-out test)를 이용한 것이다. 이들 방법은 전단연결재의 거동을 정확히 보여주는 것으로 평가되고 있지만 실제 합성형 교량의 거동과는 차이가 있을 것으로 여겨지며 시간과 비용이 많이 드는 단점이 있다. 따라서, 적은 시간과 비용으로 합성형 교량의 거동을 예측하기 위해서는 해석적 접근이 필요하다. 이 연구에서는 매개변수가 합성형 교량의 거동에 미치는 영향을 해석적으로 분석하기 위하여 유한요소해석을 실시하였다.

### 3.2 해석대상교량

매개변수가 합성형 교량의 거동에 미치는 영향을 해석적으로 분석하기 위하여 그림 4와 같이 단순집중하중 10t이 지간 중앙에 작용하는 지간 20m의 단순보를 예제로 선정하였다.



(a) 일반도



(b) 횡단면도

그림 4. 해석예제 단면

### 3.3 해석모델

단순합성형교의 임의의 부분에서 매개변수에 의한 불완전 합성 정도의 변화양상을 알아보기 위하여 MIDAS/CIVIL 5.4.0을 사용하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석모델에서 각 부재의 구성요소는 콘크리트 슬래브는 입체요소(solid element)를 적용하였고, 강재주형의 플랜지와 복부는 판요소(plate element)를 전단연결재는 보요소(beam element)를 적용하였다. 강재주형과 콘크리트 슬래브의 면 접촉의 구성요소는 이 두 면은 서로 접촉해 있지만 결합된 상태는 아니므로 일반적인 구조해석시 일차적으로 변화가 일어나는 강재주형이 콘크리트 슬래브를 파고드는 현상이 발생하게 되므로 접촉요소(gap element)를 적용하여 모델링하였다.

#### 3.3.1 접촉 알고리즘

접촉현상은 여러 개의 부재로 구성되는 구조물에서 흔히

발생하는 현상으로, 구조물의 변형이 크지 않고 재료가 탄성 거동을 하는 경우에도 비선형성을 가지는 문제이기 때문에 수치적 해결이 용이하지 않다. 초기에는 이론적 해석을 통한 접근 방법이 주류를 이루었으나, 수치기법 발달에 따라 유한요소법이 접촉문제의 해를 구하기 위한 주요 도구로 사용되고 있다. 일반적인 유한요소법의 정식화는 변위 자유도에 기초를 두고 이루어지는 바, 접촉문제에 대해서는 접촉영역의 변위가 불가입성 조건에 의해 제한된다. 불가입성 조건이란 한 부재의 표면에 위치한 절점이 다른 부재로 침범할 수 없다는 조건을 의미한다. 불가입성 조건을 구현하는 방법은 정식화 과정 자체에서 변위 제한 조건을 연결시키는 방법이 있다.

#### 3.3.2 합성보의 접촉요소 모델링

강주형과 콘크리트 바닥판의 두 이질적 재료 사이의 거동을 나타내기 위하여 접촉요소를 사용한다. 이 요소는 두 요소 간의 접촉이나 미끄러짐을 나타내기 위하여 사용되고, 접촉이 일어나는 위치에서 절점과 절점사이에 생성시키며, 각 절점당 x, y, z 방향의 이동 및 회전자유도를 가지고 있고, 비교적 큰 미끄러짐을 고려할 수 있는 요소이다. 합성보의 모델링 적용에 있어서 두 절점간의 수평마찰력은 무시하며, 절점간의 수직접촉 강성은 충분히 큰 값으로 두어 재료간의 침입을 방지하도록 하였다.<sup>(18)</sup>

해석 대상교량에 적용한 재료의 물리적 성질은 표 1에 나타내었으며 그림 5는 대상교량의 해석모델이다.

그림 5. 대상교량의 해석모델

표 1. 재료의 물리적 성질

구분	물리적 성질 (kgf/cm <sup>2</sup> )	비고	
콘크리트 슬래브	압축강도	270	설계 기준강도
	탄성계수	$2.464 \times 10^9$	
강재 주형	탄성계수	$2.1 \times 10^9$	SM490
전단연결재	탄성계수	$2.0 \times 10^9$	

### 3.4 매개변수

합성보에서의 휨강성은 강재와 콘크리트의 특성에 의존한다.<sup>(11)</sup> 앞서 언급했듯이 본 연구는 단순집중하중 재하시 유발되는 처짐과 불완전합성곡률과의 관계를 통해 합성정도의 변화 양상을 알아보기 위한 연구이다. 이 연구에서는 다음과 같은 매개변수를 선택하여 합성형 교량의 합성정도에 미치는 영향을 해석적으로 평가하고자 하였다.

#### 3.4.1 전단연결재

스터드의 치수를 적용함에 있어 스테드의 직경은 합성형에서 주로 사용하고 있는 19mm를 적용하였고 스테드의 길이는 스테드 헤드부분을 포함하여 줄기지름에 상관없이 15cm로 적용하였다. 스테드의 배치열수는 1열과 2열로 2가지 형태로 적용하였으며 교축방향의 배치간격은 1열인 경우 24cm, 2열인 경우 48cm로 적용하였고 2열 설치인 경우 교축 직각방향의 간격은 16cm로 적용하였다. 또 스테드와 플랜지 연단과의 간격은 10cm로 적용하였다.

해석경우별 전단연결재의 배열상태는 그림 6과 같다.

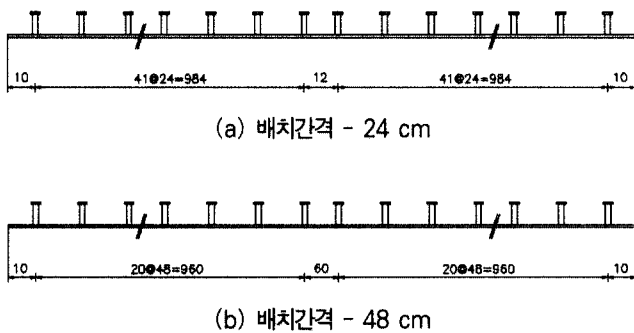


그림 6. 해석경우별 전단연결재의 배열상태

#### 3.4.2 콘크리트 탄성계수

합성형 교량에서 강재주형과 콘크리트 슬래브사이의 거동에 중요한 요소인 전단연결재의 효율성은 연결재료들의 탄성특성과 콘크리트의 장기적인 효과에 의존한다. 그러나, 균열이 발생한 콘크리트 슬래브에서는 강성 및 강도가 저하되므로 지압대에서 삼축구속 효과의 감소는 물론 전단연결재의 dowel 강도를 감소시켜 전단연결재의 효과는 줄어들게 되어 결과적으로 불완전합성정도가 더 커지는 결과를 가져오게 된다. 오랜 공용기간을 통해 노후화된 합성형교량은 전단연결재의 dowel action으로 콘크리트의 강성 및 강도가 저하되므로 이를 고려하기 위해 콘크리트의 탄성계수를 감소시켜 적용한점을 고려하여<sup>(14)</sup> 콘크리트 슬래브에서 균열의 발생으로 인한 강성 및 강도의 감소를 고려하기 위한 매개변수로 콘크리트의 탄성계수를 선택하였고, 균열의

발생에 따른 콘크리트의 탄성계수의 변화에 대해서는 정량적으로 평가하기가 어려우므로 압축강도 270kg/cm<sup>2</sup>일 때의 초기탄성계수  $2.46 \times 10^5$  kg/cm<sup>2</sup>를 기준으로 하여 25%, 33.3%, 50% 각각 감소시킨 경우를 해석경우로 선정하였다. 보 실험을 통한 균열 발생과정을 살펴보면 초기 하중 단계에서는 전단연결재 부근에서 균열이 발달하고 파괴에 이르는 하중단계에서는 지점부에서 약 30cm~40cm 떨어진 부분의 콘크리트 하면에서 발달한 균열이 재하판 아래까지 발달한다고 밝히고 있다.<sup>(17)</sup> 그러나 실제 20m 지간을 갖는 합성형 교량에서의 균열이 발생한 국부적 부분에 대한 콘크리트 탄성계수 감소의 적용에 대해서는 어려움이 있어 콘크리트 슬래브 전체에 대해 적용하였다.

위의 매개변수를 적용시켜 해석할 모델에 대해 표 2에 나타내었다.

표 2. 매개변수에 따른 종류별 모델

	전단연결재 직경 (mm)	배치간격 (cm)	배치열수 (열)	배치갯수 (개)
MODEL 1	19	24	1	84
MODEL 2	19	48	2	84

(a) MODEL 1

(b) MODEL 2

그림 7. 매개변수에 의한 처짐 현상

## 4. 해석결과 및 분석

### 4.1 처짐거동분석

매개변수의 변화에 의한 각 MODEL들의 처짐 거동을 완전합성과 비합성일 때의 처짐 거동과 비교하여 그림 7에 나타내었다.

그림 7의 해석 결과를 살펴보면 단순합성보에서 콘크리트 슬래브에 생긴 균열로 인한 콘크리트 탄성계수의 감소값이 커질수록 각 MODEL의 증가율은 커져 처짐값이 증가함을 알 수 있다. 또한 전단연결재의 간격 그리고 배치열수에 의한 증가율의 변화는 콘크리트 탄성계수의 감소에 의한 변화보다 작은 것을 알 수 있다.

### 4.2 곡률변화 분석

매개변수에 의한 불완전합성곡률을 식 (9)에 의하여 구한 후 그 산정결과에 의한 변화 양상을 그림 8에 나타내었다. 곡률값에 대입한 전단연결재의 강성값은 기존의 D. J. Oehler가 제안한 초기강성값 중 19mm의 강성값을 사용하

였다. 실제로 균열 발생시 국부적 부분에 대한 전단연결재의 강성 감소값은 제각기 다르지만 적용에 대한 어려움이 있으므로 각 매개변수 해석에 대한 곡률값을 구함에 있어 초기강성값을 그대로 사용하였다.

그림 8에 나타난 결과를 살펴보면 각 MODEL들의 곡률형상들은 완전합성곡률의 위쪽에 위치하여 불완전합성 거동을 하고 있음을 나타내고 있다. 각 MODEL들은 콘크리트 탄성계수의 감소에 의해 불완전합성곡률의 값이 증가되었으며 전단연결재의 배치 간격이 MODEL 1보다 넓게 배치된 MODEL 2에서 불완전합성곡률값의 증가가 더 커지는 것으로 나타났다.

### 4.3 처짐과 불완전합성곡률과의 관계

앞 절에서 살펴본 매개변수에 의한 MODEL에서의 처짐 거동과 불완전합성곡률과의 관계를 그림 9에 나타내었다. 각 결과는 중앙부에서 대칭인 점을 고려하여 1/2 부분만 나타내었다.

(a) MODEL 1

(a) MODEL 1

(b) MODEL 2

(b) MODEL 2

그림 8. 매개변수에 의한 불완전합성곡률 변화

그림 9. 매개변수에 의한 처짐과 곡률의 관계

그림 9에 나타난 매개변수에 의한 각 MODEL들의 처짐과 불완전합성곡률과의 관계를 살펴볼 때 단순합성보에서 처

짐이 증가할수록 불완전합성곡물의 값도 비례적으로 증가하는 것을 볼 수 있으며 콘크리트의 탄성계수와 전단연결재의 배치간격이 처짐과 불완전합성곡물과의 관계에 큰 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

#### 4.4 곡률확대계수에 의한 합성정도 추정

단순합성교의 임의의 부분에서의 불완전합성 거동 변화 정도를 분석하기 위하여 집중하중이 지간 중앙에 작용하는 경우 매개변수에 따른 2가지 모델에 대해 곡률확대계수의 변화 양상을 그림 10에 나타내었다. 각 결과는 양 끝 지점과 L/4 지점 그리고 중앙부 지점을 선택하여 나타내었다.

(a) MODEL 1

(b) MODEL 2

그림 10. 매개변수에 의한 처짐과 곡률의 관계

그림 10에 나타난 각 MODEL들의 곡률확대계수의 변화 양상 중 지점 가까이에서의 비교적 큰 곡률확대계수는 과대 평가 되었으므로 처짐이 가장 크게 일어나는 보의 중앙부 지점을 선택하여 곡률확대계수의 변화양상을 그림 11에 나타내었으며 중앙부 지점에서의 곡률확대계수 값은 표 3과 같다.

그림 11. 중앙부에서의 곡률확대계수 변화

표 3. 매개변수에 의한 중앙부에서의 곡률확대계수변화

	초기탄성계수	25% 감소	33.3% 감소	50% 감소
MODEL 1	1.3803	1.4552	1.5004	1.5815
MODEL 2	1.5359	1.5959	1.6324	1.6985

매개변수에 의한 중앙부에서의 곡률확대계수의 변화양상을 살펴본 결과 콘크리트 탄성계수가 초기에서 50%정도 감소했을 때 각 MODEL들의 곡률확대계수값은 약 16~20%정도 증가되었음을 알 수 있었다. 그러나 비합성시의 곡률확대계수 값을 고려한다면 좀 더 정확한 합성정도의 양상을 알 수 있을 것이다.

전단연결재의 설치 개수가 동일한 경우 전단연결재의 배치간격이 넓고 콘크리트의 탄성계수가 감소될수록 곡률확대계수는 큰 값을 나타내어 불완전합성 정도가 커짐을 나타냈다. 그러므로, 합성형 교량의 합성능력을 효과적으로 발휘하기 위해서는 설계시 전단연결재의 간격, 배치열수 등을 고려 후 합리적으로 설계하여야 하며 시공된 합성형교량의 불완전합성 정도를 증가시키지 않기 위해서는 무엇보다도 콘크리트 슬래브의 균열제어에 대처하여야 한다.

### 5. 결론

처짐을 고려한 불완전합성형의 곡률특성을 연구하면서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 전단연결재의 직경과 간격 그리고 배치열수의 영향은 콘크리트 탄성계수의 감소에 비해 상대적으로 적었다.
- (2) 처짐이 증가할수록 불완전합성곡물의 값도 비례적으로 증가하였고 이는 처짐이 증가할수록 불완전합성 정도가 커짐을 나타내며 콘크리트 슬래브에서 균열의 발생으로 인한 강성 및 강도의 감소가 합성정도에 큰 영향을 미쳤다.



본 연구는 바닥판의 균열발생 등에 의한 불완전합성형의 합성거동을 추정하기 위한 기초자료로서 활용할 수 있을 것이다. 이로 인해 처짐을 통한 불완전합성 정도를 좀 더 쉽게 파악할 수 있을 것이며, 현존하는 합성교량의 잔여수명을 평가함에 있어서도 유효할 것으로 생각된다. 보다 신뢰성 있는 합성정도 추측을 위해서는 비합성시의 곡률값을 고려한 합성보의 곡률확대계수 범위의 선정과 실험을 통해 균열 발생시 국부적인 부분에서의 콘크리트 탄성계수와 전단연결재의 강성 감소와의 관계를 제시할 수 있는 충분한 데이터의 축적이 필요하다.

앞으로 연속형 교량에서의 처짐과 곡률과의 관계, 전단연결부의 파괴거동을 고려한 합성효과, 단부에 집중 배치되는 전단연결재의 배치영향과 합성정도와의 관계 등 불완전합성형에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

### 참 고 문 헌

1. 中島章典, 溝江慶久, 1996. 4, 不完全合成桁の不完全度の簡易推定法, 日本土木學會論文集, No.537, pp.89~96.
2. 浜田純夫, 有住康則, 1977.9, 不完全連續合成桁の有限要素解析, 日本土木學會論文集, No.265, pp.1~9.
3. 橋 善雄, 足立義雄, 1964. 12, 不完全合成桁について, 日本土木學會論文集, No. 112, pp.11~19.
4. 島田靜雄, 熊 周明, 1983. 1, 合成桁の理論と設計, 山海堂.
5. 井上稔康, 佐藤浩一, 渡邊 昇, 1990. 3, 不完全合成桁の差分剛性マトリックス解析法について, 日本構造工學會論文集, Vol.36A, pp.1223~1236.
6. Yam, 1981, Design of Composite Steel-Concrete Structures, Surrey University Press.
7. Y. C. Wang, 1998, Deflection of steel-concrete composite beams with partial shear interaction, ASCE, VOL.124, NO.10, pp.1159~1165.
8. R. Seracino, D. J. Oehlers, M. F. Yeo, 2001, Partial-interaction flexural stresses in composite steel and concrete bridge beams, Engineering Structures 23, pp.1186~1193.
9. R. P. Johnson, 1994, Composite Structures of Steel and Concrete, Vol 1. Beams, slabs, columns, frames for buildings. Oxford: Blackwell Scientific Publications Ltd.
10. D. J. Oehlers, M. A. Bradford, 1995, Composite Steel and Concrete Structural Members, PERGAMON.
11. D. J. Oehlers, M. A. Bradford, 1999, Elementary behaviour of composite steel and concrete structural members, Oxford: Butterworth-Heinemann.
12. 한국도로교통협회, 2000, 도로교설계기준.
13. 한국강구조학회, 강구조편람 제 4 권, 강도로교의 설계
14. 이원호, 이재연, 이리형, 1996. 5, 합성보에서 쉬어 코넥터의 거동에 관한 해석적 연구, 대한건축학회논문집, 제12권 제5호, pp 189~197.
15. 용환선, 1997. 12, 불완전합성율을 고려한 단순합성형의 합성거동에 관한 연구, 한국강구조학회 논문집, 제9권 제 4호, pp 545~555.
16. 장승필, 강상규, 심창수, 1997. 9, 연속합성형 교량의 전단연결재 설계에 관한 연구, 한국강구조학회 논문집, 제9권 제3호, pp 351~362.
17. 김용희, 이갑중, 문태경, 1997. 10, 강-콘크리트 합성바닥판에 있어서 전단연결재 설계에 관한 기초적 연구, 대한토목학회 학술발표회 논문집(1), pp 153~156.
18. 정경섭, 윤재석, 김종열, 2002. 5, 강상자형교의 전단연결재에 의한 합성거동, 한국구조물진단학회 학술발표회 논문집, 제6권 제1호, pp 153~156.

(접수일자 : 2002년 9월 16일)