大 韓 土 木 學 會 論 文 集
第28卷 第1A號・2008年 1月
pp. 89 ~ 94

혼합구조의 성능 향상을 위한 개선된 접합방식의 개발 (I) : 개선된 접합방식을 도출하기 위한 3차원 비선형 해석

Developments of Advanced Connection Type for Improvements of Mixed Structures(I) : 3D Nonlinear Analysis of the Various Connection Types for Deriving Advanced Connection Type

윤익중*・허택녕・김문겸***・조성용****

Yun, Ik Jung・Huh, Taik Nyung・Kim, Moon Kyum・Cho, Sung Young

Abstract

The problem of interaction between the structures interconnected at discrete points as like composite structures, has a attracted considerable attention for a prolonged period of time. Recently, mixed structures are applied for overcoming structural limits by developed countries. In this paper, advanced connection type of mixed structures are presented by numerical approach. Also it is performed on extensive literature review from theoretical method to numerical analysis. For analysing behaviors of mixed structures according to connection type, 2 different connections and 1 reinforced connection are compared by 3D nonlinear numerical analysis. Nonlinear analysis of mixed structures is carried out by utilizing contact elements of a general purpose structural analysis computer program(ABAQUS). By using 6 criteria, each connections are investigated. From this result, proper reinforcing and well designed connection type are proposed. And results also show that the deflections which are induced by discontinuity on mixed structures, has a linear distribution that should decrease as applying proposed connection type.

Keywords : *mixed structure, nonlinear analysis, discontinuity, advanced connection type*

요 지

서로 다른 부재로 이루어진 혼합구조물은 불연속면인 접합부에 강도저감, 응력집중이 발생하거나 응력전달이 확실하지 않게 되므로 접합부에 대한 연구는 이미 오래전부터 다양한 방법을 통하여 연구되어 왔다. 특히 최근에 장대교량에 혼합구조를 적용하면, 경제성과 시공성이 확보되고 구조적 성능이 증가하는 것으로 알려지면서 일본, 유럽 등과 같은 선진국에서 혼합구조의 연구 및 시공이 활발히 이루어지고 있는 실정이다. 하지만 이에 대한 국내의 연구는 상대적으로 미미한 수준에 있다. 따라서 본 논문에서는 전술한 혼합구조의 접합부가 구조물 전체에 미치는 영향을 분석하기 위하여 기존에 수행된 많은 연구결과를 검토하고, 현재 가장 널리 사용되고 있는 전후면판 방식의 접합부를 갖는 혼합구조의 비선형 해석을 수행하여 그 장단점을 파악하였다. 또한, 이를 기초로 혼합구조 접합부의 성능을 개선할 수 있는 접합부 방식를 제안하고, 이를 기존의 방식과 비교분석하기 위하여 객관적인 6개의 기준을 설정하여 분석하였다. 개선된 모형으로는 형태를 개선안 모형 2개와 불연속면을 보강한 모형 1개 총 3개의 개선모형를 설정하였으며, 객관적인 비교기준으로 하중-처짐관계, 처짐곡선분포, 개구폭, 스터드축력, 소성변형 크기 및 위치, 접합부 응력분포 등을 설정하였다. 이와 같은 기준에 따라 기존 접합부 방식과 개선된 방식을 서로 비교검토한 결과, 본 논문에서 제안한 접합부 방식이 구조물의 성능개선에 큰 효과가 있는 것으로 나타났으므로 혼합구조의 새로운 접합부 방식으로 제안하였다.

핵심용어 : 혼합구조, 비선형 해석, 불연속면, 개선된 접합부 형식

1. 서 론

구조성능의 향상과 재료의 경제적 사용을 위한 이종재료의 결합은 다양한 형태로 시도되고 있으며, 근래에 들어서는 일본의 Kiso-Ibikawa교나 프랑스의 Normandie 교량과 같은 이종부재를 결합한 혼합구조(mixed structure)가 장대교량시공에 있어 크게 각광받고 있다. 혼합구조는 복합구조(composite structure)의 한 형태로서 중앙경간은 강구조로하

*교신저자・연세대학교 사회환경시스템공학부 박사과정 (E-mail : ijloved@yonsei.ac.kr)
**정회원・창원대학교 토목공학과 교수・공학박사 (E-mail : tnhuh@sarim.changwon.ac.kr)
***정회원・연세대학교 사회환경시스템공학부 교수・공학박사 (E-mail : applymkk@yonsei.ac.kr)
****GS건설(주)・토목구조팀 기술본부 과장・공학박사 (E-mail : sycho71@gsconst.co.kr)

고 측경간을 PSC 구조로 가설하는 형식을 취하는 이종부재의 결합이 특징이다. 이를 통하여 강구조 사용을 통한 중앙경간의 경량화 PSC구조의 경제성과 시공성의 장점을 동시에 얻을 수 있다. 이러한, 혼합구조는 중앙지간을 장대화하거나 하부구조에 미치는 반력을 감소시킬 수 있으며, 측경간에 발생하는 부반력을 PSC 거더의 자중을 통하여 제어할 수 있는 장점이 있으나, 강구조와 PSC구조를 연결하는 접합부 경계면의 불연속면에 의해 국부적인 응력집중이 발생할 수 있으며, 응력저감이 나타나고 응력전달 메카니즘이 불확실하므로 이를 개선하기 위한 새로운 접합부 형식의 필요성이 증가하고 있다. 일본, 유럽 등과 같은 선진국의 경우 혼합구조 접합부에 대한 연구 및 시공이 활발히 이루어지고 있으며, 현재 혼합구조 접합부 형식은 금속판 방식, 전면판 방식, 후면판 방식, 전후면판 병용 방식과 같은 다양한 방식이 사용되고 있다.

혼합구조는 근래에 새롭게 대두되고 있는 구조형식으로 이와 관련된 직접된 연구는 많지 않으나, 불연속면이 존재하는 구조물의 거동에 대한 연구는 오랜 시간에 걸쳐 다양한 방법으로 수행되어 왔다(H. Seyyedian, 2006). 이론적 연구로는 Yabari 등(2001)이 기하·물리적 불연속성이 있는 구조물을 베르눌리-오일러 보의 방법을 사용하여 처짐곡선을 제시한 바 있고, Blondi(2005) 디락델타 함수의 곱을 이용하여 불연속면이 있는 구조물의 강도저감계수를 표현하고 이를 이용하여 구조물의 처짐곡선을 나타내었다. 이러한 연구는 고전이론에 근거하여 처짐식을 해석하였기 때문에 구조물의 거동을 직관적으로 나타낼 수 있으나, 불연속면의 연속조건이나 강도저감계수의 추정이 힘들어 실무에 적용하기 힘든 단점이 있다. 혼합구조와 형태적 유사성이 있는 부수아보(voussoir beam)의 경우 고전이론에 의한 처짐곡선의 도출보다는 불연속면의 안정성을 분석하는데 초점을 맞추었으며, 불연속면을 구성하는 2개의 구조물의 개구(opening)과 닫힘(closing)에 대한 분석을 통하여 안정한 상태를 수치해석에 의하여 구하였다(Diederichs와 Kasiser, 1999). 부수아보는 혼합구조에 있는 불연속면과 유사한 형태의 경계면을 가지고 있으나, 구성재료가 암반이므로 혼합구조의 접합부에 정착되는 프리스트레싱봉과 스터드에 의한 거동특성을 직접적으로 모사하기 어렵다. 이러한 혼합구조 접합부의 복잡한 거동을 표현하기 위하여 경계 비선형 모델을 적용하여 강·콘크리트 혼합구조체의 거동을 해석한바 있다(권희정, 2005; 허택녕, 2006; Dias A.M.P.F 등; 2007).

본 논문의 목적은 혼합구조의 성능 개선을 위한 새로운 접합부 형태의 제시에 있으며 이를 위하여 3개의 개선안을 제시하였다. 제시된 개선안의 성능 향상을 확인하기 위하여 경계비선형과 재료비선형 모형을 적용하여 수치해석을 동일한 조건하에서 수행하였으며 해석 결과의 비교·분석을 위하여 7가지 기준을 설정하였다. 이를 통하여 제시된 조건하에서 개선안의 성능이 기존안의 성능보다 우수함을 확인하였다.

2. 혼합구조 접합부의 비선형 해석

2.1 혼합구조의 접합부방식

혼합구조의 접합부는 강형부, 접합부, PSC형부의 3개부분으로 구성되며, 강형부와 PSC형부는 접합부에서 접합된다. 효율적인 혼합구조 시스템의 구성을 위해서는 접합부의 성능확보가 필수적이므로 본 논문에서는 접합부 성능개선을 위한 새로운 형태의 개선안을 설정하여 기존의 접합부와 성능을 비교·검토하였다. 접합부에서의 하중전달은 전단연결재와 접합부를 둘러싼 밀폐판이나 프리스트레싱 강선에 의하여 전달되므로 이를 고려하여 그림 1과 같이 개선안을 선정하였다. 개선 모형 1은 전단키 역할을 수행할 수 있도록 접합부를 L모양으로 돌출시켰으며, 개선 모형 2는 전단연결재와 프리스트레싱력이 사선으로 하중을 받도록 하여 면내 전

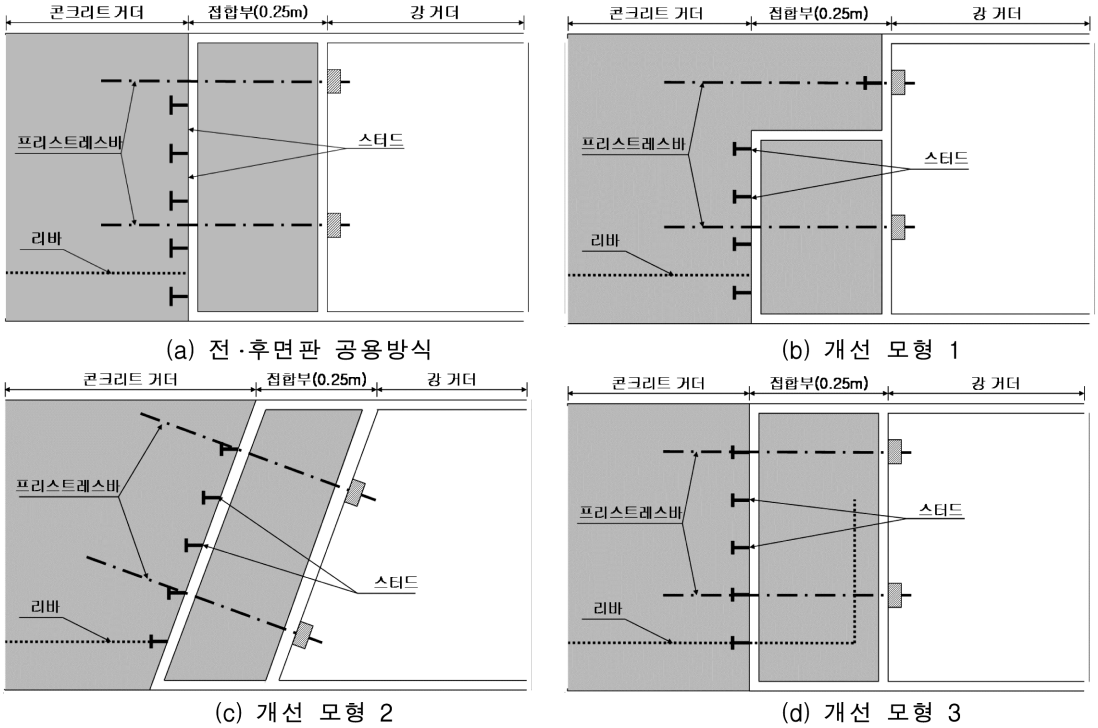
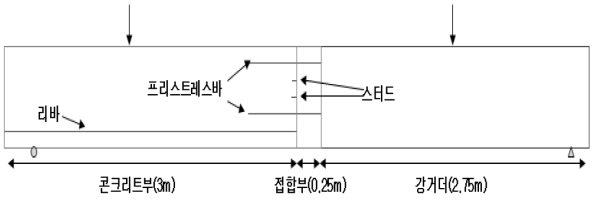
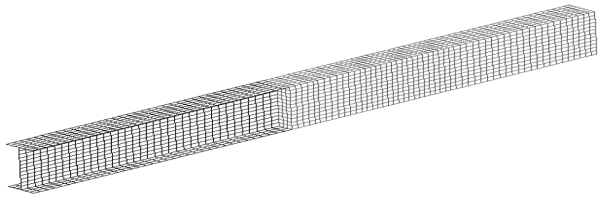


그림 1. 기존 및 개선된 접합부 방식



(a) 해석모형의 개략적인 형상



(b) 해석모델의 유한요소망

그림 2. 시험체의 형상 및 유한요소망

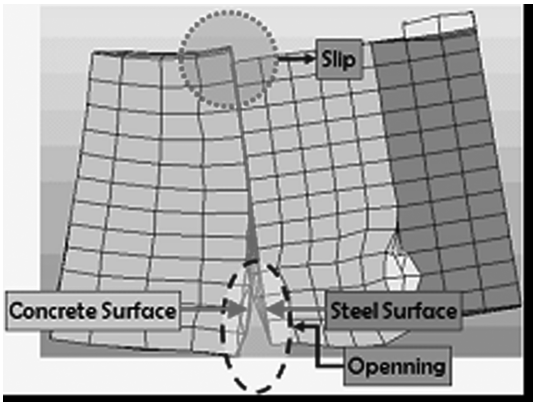


그림 3. 경계비선형의 거동 특성(개구와 슬립)

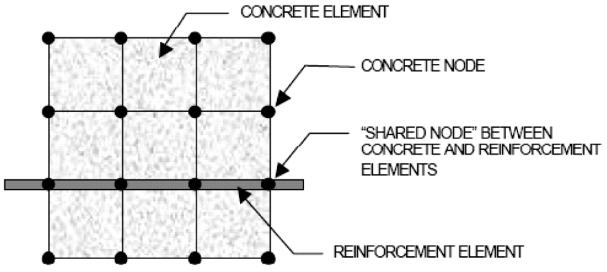


그림 4. 이산모델

단에 강하게 저항하는 것을 목적으로 하였다. 개선 모형 3은 접합부 내부를 충진시키는 콘크리트와 밀폐판과의 부분합성거동을 감소시키기 위하여 철근을 접합부를 관통시키고 철근의 절곡을 접합부내에서 하는 구조로 하였다. 시공성 측면에서는 기존안과 개선 모형 모두 개별부위를 별도로 제작하여 조립하는 형식을 취하므로 작업의 난이의 조정은 없을 것으로 예상된다. 다만, 접합부 내에 스터드나 철근등의 추가적인 부재설치로 인해 접합부 내부가 복잡해질 경우 접합부 충진 콘크리트의 확실한 시공이 필요하다.

2.2 유한요소해석모델

비선형 해석을 위한 모델은 단면치수 300 mm×600 mm×6000 mm로 그림 1에 제시된 4개의 접합부 형태를 적용하여 그림 2와 같이 구성하였다. 그림에서 보는 바와 같이 단부 구속조건은 강성이 큰 강거더부는 핀조건을 적용하였고, 콘크리트부는 롤러로 하여 단순지지보를 구성하였다. 재하하중은 접합부가 순순휨상태에 있도록 하기 위하여 왼쪽 지점으로부터 1,500 mm, 4,500 mm 지점에 각각 재하하였다. 콘크리트는 절점당 3개의 자유도를 갖는 8절점 3차원 솔리드요소로, 강재는 절점 당 5개의 자유도를 갖는 4절점 Mindlin 쉘요소로, 철근 및 PS 강연선은 절점 당 1개의 자유도를 갖는 2절점 트러스요소로, 스터드는 2절점 보요소를 각각 사용하였다. 유한요소 해석 프로그램으로 범용 프로그램인 ABAQUS 6.5-1을 사용하였다.

표 1. 수치해석에 사용된 물성

	콘크리트	강재
두께 (mm)	-	13
탄성계수 (MPa)	31,965.5	210,000
포와송비	0.18	0.3
압축강도 (MPa)	40	400
인장강도 (MPa)	4	400

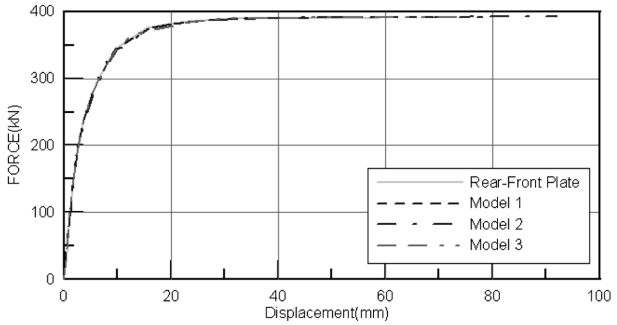
2.3 비선형 모델

유한요소해석에 사용된 물성치는 표 1과 같이 적용하였으며, 콘크리트는 Damaged plasticity model을 적용하였고, 철근 및 긴장재 등의 강재는 항복응력에 도달하기 전에는 선형 탄성의 거동을 보이며 항복 후에는 완전소성 거동을 나타내는 Bilinear한 것으로 가정하였다.

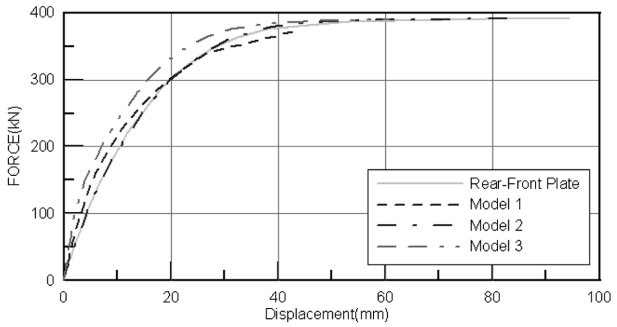
혼합구조 접합부의 강과 콘크리트 접촉면은 완전히 부착되어 일체로 거동 하지 않고 그림 3과 같이 콘크리트와 강재 사이의 경계면에서 슬립(slip)과 개구(opening)가 발생하므로 단차가 생기거나 하중-처짐 관계와 콘크리트와 강재의 응력상태, 하중전달 메카니즘 등이 변화하게 된다. 전술한 혼합구조의 특성을 해석에 고려하고, 접합부의 성능을 분석하기 위하여 완전합성모형과 불완전합성모형에 대하여 해석을 각각 실시하였으며, 접합부내에 충진되는 콘크리트는 밀폐판에 의해 강하게 구속되므로 완전합성으로 모델링하였다. 부분합성모형의 구현을 위하여 Contact 요소를 사용하였으며 해석 알고리즘은 Largrange Multiplier Method 적용를 적용하였다. 마찰모델은 Columb의 모델을 적용하였다. 콘크리트 표준 시방서에 따르면 스터드나 철근에 의하여 구조강에 정착된 보통 콘크리트의 경우 마찰계수를 0.7을 적용하는 것으로 하지만, 본 연구의 경우 실재 설계시 안전확보를 위하여 마찰에 의한 영향을 무시하는 것을 고려하여 값의 15%수준을 취하였다. 정정구조일 경우 불연속면에서 발생하는 슬립과 개구에 의하여 불안전성이 나타나므로 이를 방지하기 위해 철근과 스터드, 프리스트레스 강선은 그림 4와 같이 이산모델을 이용하여 수치모델을 구성하였다.

3. 접합부의 비선형 해석 결과

본 절에서는 혼합구조의 개선된 접합부 방식을 기존의 것과 비교하기 위하여 다음과 같이 7개의 규준에 대한 수치해석을 수행하고 얻은 결과를 상호 비교분석하였다.



(a) 완전합성모델의 하중-처짐 곡선



(b) 부분합성모델의 하중-처짐 곡선

그림 5. 하중-처짐곡선

표 2. 접촉면의 연직강성계수(200 kN 하중)

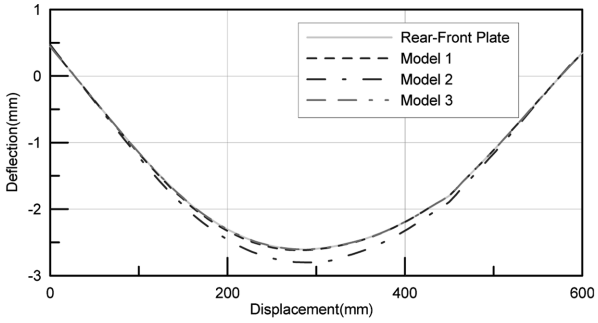
	전・후면판 방식	개선 모형 1	개선 모형 2	개선 모형 3
완전합성모형 (kN/mm)	76.77	76.39	71.35	76.75
부분합성모형 (kN/mm)	19.82	23.09	19.02	29.04

3.1 하중-처짐 관계

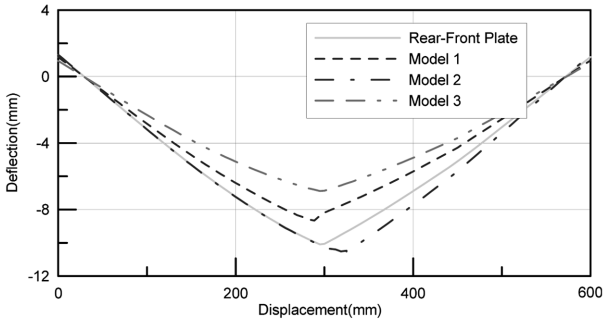
혼합형 구조물의 완전합성상태에서는 그림 5(a)에 나타난 바와 같이 접합부의 형식에 관계없이 유사한 하중-처짐 곡선이 나타났으며 부분합성상태에서는 보다 큰 처짐과 접합부 형식에 따른 상이한 거동이 나타남을 확인하였다. 표 2에 200 kN에서의 하중-처짐 값을 이용하여 각 접촉면 연직강성계수을 정리하였다. 완전합성모형인 경우 개선 모형 2를 제외하고 모두 1%이내의 강성비를 나타낸다. 개선 모형 2의 경우 경사면을 따라 보강재가 배치되어 완전합성시에도 타 모형에 비하여 휨에 대한 저항능력이 떨어지는 것으로 판단된다. 부분합성모형의 경우 개선 모형3과 개선 모형 1의 강성이 각각 29.04 kN/mm와 23.09로 타 접합형식보다 크게 나타났다. 또한, 그림 5(b)에 나타난 바와 같이 개선 모형 1과 3이 설계하중에서 보다 적은 처짐을 나타내고 있음을 확인 할 수 있다.

3.2 처짐분포

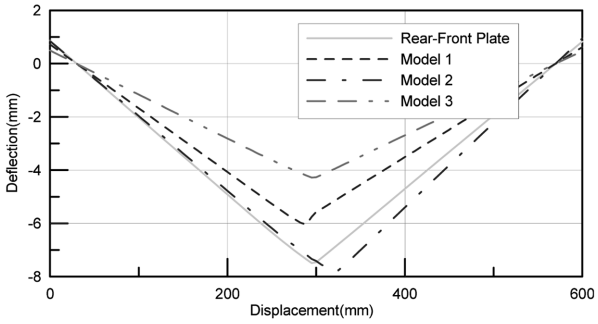
혼합구조물의 경간위에 분포하고 있는 200 N 하에서의 처짐분포곡선을 그림 6에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 하중-처짐관계는에서와 같이 완전합성모델의 경우 개선 모형 2를 제외한 나머지 3개의 모형이 1%이내의 처짐분포의 오차를 보였다. 부분합성모형의 처짐분포는 하중-처짐관계에서와 같이 개선모형 3이 가장 적은 처짐분포를 보였다. Blondi(2005)의 결과에 의하면 불연속면이 존재하는 구조물의 처짐분포는 완전합성시의 거동과 불완전합성시의 거동으로 나누어 설명이 가능케 하여주므로 완전합성모델의 처짐과 부분합성모델의 차를 그림 6(c)에 도시하였다. 이를 통하여 불연속면을 중심으로 하여 선형에 가까운 처짐이 발생하는 것을 확인하였다.



(a) 완전합성모델 처짐분포



(b) 부분합성모델 처짐분포



(c) 부분합성모델과 완전합성모델 처짐분포 차

그림 6. 처짐분포곡선

표 3. 접합부 개구폭

	전・후면판 방식	개선 모형 1	개선 모형 2	개선 모형 3
접합부 최대 개구폭 (mm)	12.18	12.13	17.99	7.63
개구폭 비(% , 모형/전・후면판방식)	100	99.59	147.70	62.64

3.3 접합부 개구폭

각 모형에서 나타나는 개구폭과 폭의 비를 표 3에 정리하여 도시하였다. 표에서 보는 바와 같이 접합부의 개구폭은 개선 모형 2에서 17.99 mm로 가장 크게 나타났으며, 전후면판 병용 방식에서는 12.18 mm가 발생함을 알 수 있다. 또한, 개선 모형 3은 개구폭이 7.62 mm로 전후면판 병용 방식에 비해 62% 수준인 것으로 나타났다.

표 4. 부분합성거동시의 스터드 축력

	전・후면판 방식	개선 모형 1	개선 모형 2	개선 모형 3
최대 축력 (kN)	59.63	53.54	104.40	43.47
축력비 (%, 모형/전・후면판방식)	100	89.79	175.08	72.90

표 5. 소성변형의 크기

	전・후면판 방식	개선 모형 1	개선 모형 2	개선 모형 3
최대 소성변형크기 (완전합성)	1.12	1.86	1.109	1.11
최대 소성변형크기 (부분합성)	0.12	0.03	1.04	0.05
최대 소성변형크기비 (부분합성/완전합성)	10.71	1.61	93.78	4.50

3.4 스터드의 축력

각 모형에서 나타나는 스터드의 축력과 축력비를 표 4에 정리하여 도시하였다. 표와 같이 스터드의 축력은 개선 모형 2에서 104.40 kN로 가장 크게 나타났으며, 전후면판 병용 방식에서는 59.63 kN이 발생하였다. 개선 모형 3은 43.47 kN으로 전후면판 병용 방식에 비해 72% 수준으로 나타났다.

3.5 소성변형 발생 위치 및 크기

완전합성시의 거동과 부분합성시의 거동의 차이를 분석하기 위하여 표 5와 그림 7에는 소성변형이 발생하는 위치와 크기를 각각 도시하였다. 그림과 표에서 보는 바와 같이 전・후면판 병용방식의 경우, 부분합성모델이 완전합성모델에 비해 소성변형의 크기가 10%수준이며, 변형 발생위치와 형태가 유사함을 알 수 있다. 또한, 개선 모형 2의 경우, 소성변형의 크기비가 93% 정도이고 발생위치 및 형상이 완전합성모델과 부분합성모델간의 차이가 작음을 알 수 있다. 마지막으로 개선 모형 1과 3의 경우, 크기비가 각각 1%와 4% 수준으로 변형의 발생위치나 형상이 상이한 것으로 나타났다.

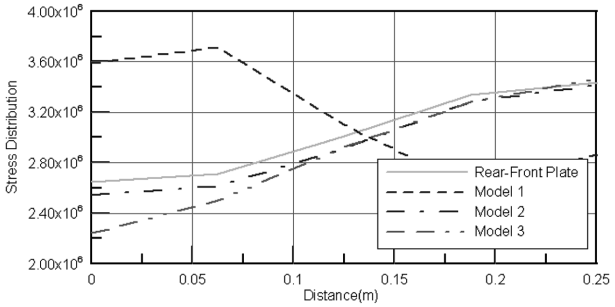
(a) 전·후면판 방식 (완전합성) (e) 전·후면판 방식 (부분합성)

(b) 개선 모형 1 (완전합성) (f) 개선 모형 1 (부분합성)

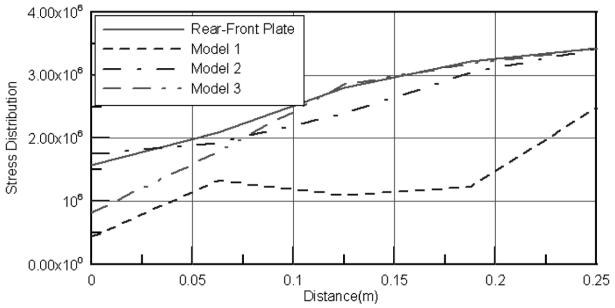
(c) 개선 모형 2 (완전합성) (g) 개선 모형 2 (부분합성)

(d) 개선 모형 3 (완전합성) (h) 개선 모형 3 (부분합성)

그림 7. 소성변형 발생 위치



(a) 완전합성모델 접합부의 응력변화



(b) 부분합성모델 접합부의 응력변화

그림 8. 충진 콘크리트의 교축방향 응력변화

3.6 접합부 콘크리트의 응력변화

그림 7은 접합부의 교축방향 응력을 콘크리트 거더측을 중심으로하여 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 완전합성모델의 경우, 개구부가 발생하지 않아 부분합성모델보다 비교적 큰 응력이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 최종적으로 강거더측에 발생하는 응력은 완전합성모델과 부분합성모델이 비슷하게 발생하였다. 강거더 측과 콘크리트 거더측의 응력차이는 완전합성모델에서는 전후면판 병용방식이 가장 작고, 부분합성모델에서는 개선 모형 2가 가장 작게 나타났다.

4. 결론 및 추후계획

본 논문에서는 혼합구조의 개선된 접합부 방식을 제안하기 위하여 기존의 접합부와 개선된 3개의 접합부에 대하여 비선형 해석을 수행하고 이에 근거하여 역학적 거동을 평가한 후, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 하중-처짐 곡선을 통해 개선 모형 1과 3이 전후면판 병용 방식에 비해 큰 강성을 가지고 있으며, 200kN 하중재하시 각각 1.16, 1.47배 크게 나타났다. 200kN 하중에서의 처짐분포를 통하여 부분합성작용에 의해 추가적인 처짐이 발생하고 불연속면을 중심으로 선형적으로 분포하고 있음을 확인하였다.
2. 개선 모형 3의 경우 개구폭이 전후면판 병용 방식의 62% 정도 발생하였다. 개선 모형 3은 불연속면의 보강을 통한 접합부 성능 개선 방안으로 접합부를 적절하게 보강할 경우 구조물의 성능이 향상될 수 있을 것으로 판단되었다.
3. 순수휨상태에서 인장응력에 의해 발생되는 접합부의 슬립과 개구는 스터드와 프리스트레싱력에 의해 그 크기가 결정되므로 같은 단면의 스터드를 사용하더라도 접합 형태에 따라 발생하는 축력이 다르게 나타나고 있음을 알았다.
4. 완전합성상태에서는 전후면판 병용 방식이 가장 응력변동이 적으며, 부분합성상태에서는 개선 모형 2가 응력변동이 최소화되었다.
5. 불연속면에 적절한 보강과 함께 개선 모형 1과 같은 형태의 접합부를 도입할 경우, 기존의 혼합구조 접합부 형식인 전·후면판 병용방식보다 좋은 성능을 확보할 수 있음을 확인하였다.

본 논문은 접합부의 개선안을 도출하기 위한 선행연구로서 혼합구조의 부분합성거동을 비선형 해석을 통하여 확인하였다. 또한 7가지 측면에서 개선안과 기존안과의 결과비교를 수행하였다. 이를 통하여 접합부 성능 개선을 위한 형태와 상세 변경방법을 도출하였다. 연계논문에서는 이상의 자료를 기초로 하여 개선된 접합부의 시공성과 성능개선의 타당성 확보를 위하여 실재하 실험과 수치해석을 수행하였다.

감사의 글

본 연구는 GS건설과 VSL KOREA의 지원으로 수행되었으므로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

권희정(2005) **경계면 비선형 모델을 이용한 강콘크리트 혼합구조체의 거동해석**. 석사학위논문, 연세대학교.

김광수, 정광회, 심정욱, 유성원(2004) 프리스트레스트 콘크리트-강 혼합구조를 갖는 복합거더의 정적 휨 거동. **대한토목학회 정기학술대회 논문집**, 대한토목학회, pp. 48-53.

허택녕, 윤익중, 김문겸, 조성용(2006) 개선된 접합부 방식을 갖는 혼합구조의 3차원 비선형 해석. **대한토목학회 정기학술대회 논문집**, 대한토목학회, pp. 702-705.

Blondi, B. and Caddemi, S. (2005) Closed form solutions of Euler-Bernoulli beams with singularities. *International Journal of Solids and Structures* 42, pp. 3027-3044.

Dias, A.M.P.G., Van de Kuilen, J.W., Lopes, S., and Cruz, H. (2007) A non-linear 3D FEM model to simulate timber-concrete joints. *Advances in Engineering Software* 38, pp. 522-530.

Diederichs, M.S. and Kaiser P.K. (1999) Stability of large excavations in laminated hard rock masses : the voussoir analogue revisited. *International Journals of Rock Mechanics and Mining Sciences* 36, pp. 97-117.

Seyyedian, H. (2006) Effect of Internal Moment Release on the Eigenfrequencies of Combined Linear Systems. *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 132, No. 8, pp. 823-829.

Yavari, A. and Sarkani, S. (2001) On applications of generalised functions to beam bending problems. *International Journal of Solids and Structures* 37, pp. 5675-5705.

(접수일: 2007.8.28/심사일: 2007.10.2/심사완료일: 2007.10.2)