

개선된 접합부 방식을 갖는 혼합구조의 비선형 거동

Nonlinear Behaviors of Mixed Structure Considering Advanced Connection Types

허 태 녕* · 윤 익 중** · 김 문 겸*** · 조 성 용**** · 심 별*****

Huh, Taik Nyung · Yun, Ik Jung · Kim, Mun Kyum · Cho, Sung Yong · Shim, Byul

ABSTRACT

Nonlinear analysis of mixed structures is carried out by utilizing contact elements of a general finite element analysis computer program(ABAQUS). The present analysis focuses on the enhancing behaviors of mixed structure's connection type. Main 2 issues are related with discontinuity which reduce the stiffness of structure and proposing enhanced connection type. To validate the present study approaching 2 way, analytic one and experimental test.

Keywords: mixed structure, advanced connection type, nonlinear analysis, discontinuity on beam

1. 서 론

혼합구조는 이종부재를 서로 결합하여 구조적 효율성을 지니고 재료를 경제적 사용이 가능하도록 하지만, 이결재료인 강구조와 PSC구조의 접합부 경계면에서 단면과 재료의 성질이 급변하므로 강도저감현상과 불안정성이 발생한다. Yabari 등(2001)은 이러한 기하·물리적 불연속성이 있는 구조물의 불연속면을 회전에 대해 저항하는 내부힌지와 연직방향 스프링으로 대체함으로써 연속적인 해를 구할 수 있는 방법을 제시하였다. Blondi(2005) 등은 분배이론을 이용하여 4차 미분방정식을 풀어 불연속면이 있는 구조물의 처짐곡선을 구하였다. 이러한, 해석적 연구는 혼합구조 접합부의 거동을 직관적으로 설명할 수 있는 장점이 있으나 해석에 사용되는 내부 스프링의 강성이나 강도저감계수를 추정하기 힘든 어려움이 있다.

따라서, 본 연구에서는 수치실험을 통하여 접합부의 불연속면이 구조물에 미치는 영향을 보이고, 실재하 실험의 결과와 비교함으로써 혼합구조 접합부 경계면의 불연속성에 의한 거동특성을 밝히고자 한다. 또한, 이를 기초로 혼합구조 접합부의 성능을 향상시키고자 새로운 접합부 방식을 제안하고자 한다.

* 정회원 · 창원대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 · E-mail: tnhuh@sarim.changwon.ac.kr

** 학생회원 · 연세대학교 토목공학과 · 박사과정 · E-mail: ijloved@yonsei.ac.kr

*** 정회원 · 연세대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 · E-mail: applymkk@yonsei.ac.kr

**** GS건설 토목구조팀 기술본부 과장 · 공학박사 · E-mail: sycho71@gconst.co.kr

***** VSL KOREA 차장 · 공학석사 · E-mail: bshim@vsl.co.kr

2. 혼합구조 접합부의 비선형 해석 및 실험

본 논문에서는 혼합구조의 접합부 거동을 연구하기 위하여 그림 1과 같이 전·후면판 공용모형과 개선모형에 대해 각각 완전합성의 경우와 부분합성으로 나누어 접합부의 경계면에 의한 거동특성 차이와 개선된 모형의 접합부의 성능을 수치해석과 실 재하 실험을 통하여 비교·검토 하였다. 해석 및 실험에 사용된 모형의 종류는 표 1에 나타난 바와 같이 해석 및 실험의 종류와 접합부의 형상으로 구분하였다.

2.1 혼합구조 접합부 실험 모델

본 연구에서는 순경간 4,800mm의 실험체를 제작하여 휨 성능 실험을 수행하였다. 휨 실험은 변위제어 방식으로 수행되었으며, 하중재하방법은 가력보를 사용하여 중앙부에서 각각 500mm씩 떨어진 위치에 하중을 가력하였다. 실험체의 변위를 측정하기 위하여 실험체의 L/2지점(중앙부)에 변위계(LVDT)를 설치하여 하중에 따른 변위를 측정하였다. 또한 PSC형부와 강형부의 변형률을 측정하기 위하여 변형률 게이지(strain gauge)를 부착하여 각각의 변형률을 측정하였으며, 접합부의 개구폭을 측정하기 위해 실험체의 L/2지점인 PSC형부와 복합형부의 접합면 하단에 균열게이지를 설치하였다.

2.2 수치해석

해석을 위한 모델은 단면치수 300mm×600mm×5400mm로 그림 1에 제시된 2개의 접합부 형태를 적용하였다. 콘크리트는 8절점 brick 요소로, 강재는 4절점 shell 요소로, 철근 및 PS 강연선은 2절점 truss요소, 스티드는 2절점 beam요소를 사용하였다.

표 2는 각 모델에 적용된 물성으로 수치해석상의 구현을 위해, 콘크리트는 Damaged plasticity model을 적용하였다. 철근 및 긴장재 등의 강재는 항복응력에 도달하기 전에는 선형 탄성의 거동을 보이며 항복 후에는 완전소성 거동을 나타내는 Bilinear한 것으로 가정하였다.

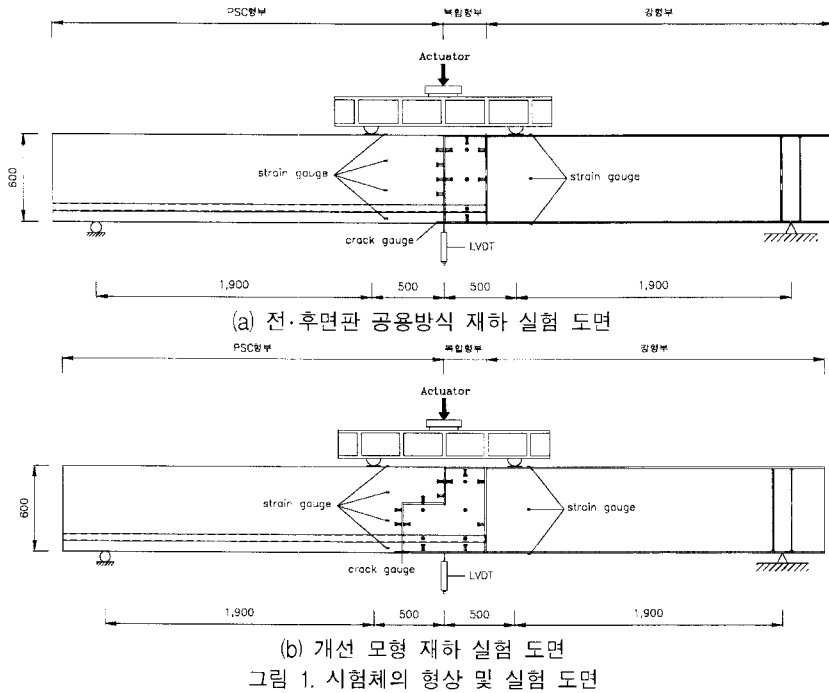
부분합성모형의 경우, 접합부의 강과 콘크리트 접촉면이 완전히 부착되지 않아 일체거동을 하지 않음으로 Contact요소를 적용하여 해석을 수행하였다. 완전합성모형의 경우에도 불연속면의 특성을 반영하기 위해 구속조건을 사용하여 하중만 전달되도록 하였다. 복합부내에 충전되는 콘크리트는 밀폐판에 의하여 강하게 구속되므로 일체거동이 가능하도록 모델링하였다. 본 연구에서는 마찰력이나 미세균열후의 전단전달능력은 고려하지 않고 구조물의 거시적 거동만을 연구대상으로 한정하였다.

표 1. 해석 및 실험 모형의 종류

구분	모형의 종류	단면 (mm)	길이 (mm)	접합부 형상	프리스트레싱력 (kN)
FRP	휨 모형	300×600	5,400	직사각형	560
FLP	휨 모형	300×600	5,400	L형	560

표 2. 수치해석에 사용된 물성

	콘크리트	강재
두께(mm)	-	13
탄성계수(GPa)	27	214
포와송비	0.18	0.3
압축강도(MPa)	30	400
인장강도(MPa)	3	400



3. 접합부의 비선형 거동

3.1 비선형 해석을 통한 거동특성 분석

혼합형 구조물 접합부에 의한 거동을 살펴보기 위하여 600kN 하중에서 처짐(u), 처짐각(ψ) 및 곡률(κ)의 분포형상을 비교하였다. 처짐의 분포는 수치해석의 결과를 통하여 얻을 수 있으며, 처짐각과 곡률은 오일러-베르누이(Euler-Bernoulli)의 이론에 따르면 식 (1), (2)와 같은 관계에 있으므로 처짐을 수치미분하여 그림 2, 3, 4와 같은 분포를 얻을 수 있다,

$$\psi = u' \dots\dots\dots \text{식 (1)}$$

$$\kappa = \psi' = u'' \dots\dots\dots \text{식 (2)}$$

3.1.1 거동특성

최대 처짐의 분포는 완전합성시에는 그림 2 (a)와 같으며, 부분합성시에는 그림 2 (b)와 같다. 표 3은 처짐의 최대치를 정리한 것으로서 FRP 모델 대비 FLP 모델의 합성정도에 따라, 완전합성시의 처짐비는 0.99이며, 부분합성시에는 0.97로 나타났다. 각 모델간의 합성정도에 따른 처짐비는 전·후면판 공용모델은 0.95, 개선모델은 0.97로 나타났다. 이를 통하여 부분합성에 따른 강도저감현상을 확인하였으며, 개선모델에서 보다 작은 강도저감현상이 발생하는 것을 확인하였다. 또한, 그림 2 (b)와 같이 부분합성모델은 불연속지점(270cm)에서 처짐의 불연속이 나타났다.

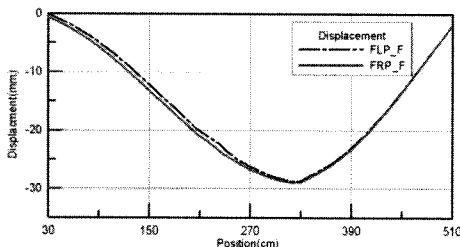
그림 3에 나타난 처짐각 분포와 같이 하중의 가력구간인 220~320cm에서는 완전합성모델의 경우 비교적

전형적인 처짐각 분포를 나타내고 있으나 부분합성모형의 경우 불연속면이 있는 270cm 근방에서 상이한 처짐각이 나타나며, 불연속면에서 벗어난 0~210cm, 330~540cm 구간에서는 완전합성모형과 부분합성모형 모두 동일한 처짐각이 발생하였다. 두 모형의 처짐곡선을 비교할 때 개선모형이 보다 부드러운 형태의 처짐각 곡선이 나타나므로 보다 완전합성모형에 가까움을 확인하였다.

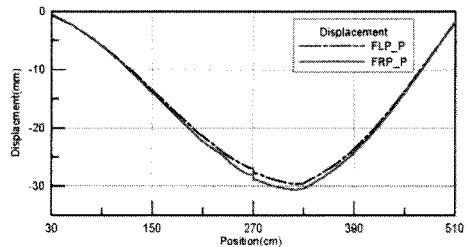
본 연구에서는 4점 휨 시험을 통하여 시험체에 순수 휨 구간을 구성하였다. 의도한 바와 같이, 순수 휨 구간외에서는 완전합성모형과 부분합성모형 모두 선형의 곡률이 나타났으나, 불연속면이 존재하는 270cm 지점에서는 불완전합성모형의 경우 7~9배의 곡률이 나타났다. 경간 위에서 곡률의 변화를 그림 4에 나타내었다.

3.1.2 소결

비선형 해석을 통하여 처짐, 처짐각 및 곡률을 분석하였으며, 혼합구조 접합부 경계면의 불연속성에 의하여 강도저감현상이 나타나는 것을 확인하였다. 또한, 개선모형이 기존 방식인 전·후면판 공용방식에 비하여 보다 적은 강도저감현상이 나타나는 것을 확인하였다.

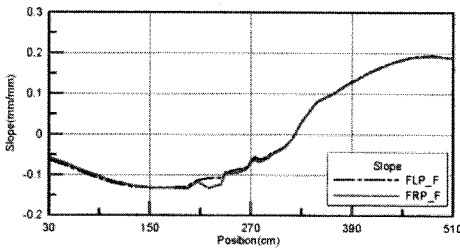


(a) 완전합성시 처짐 분포

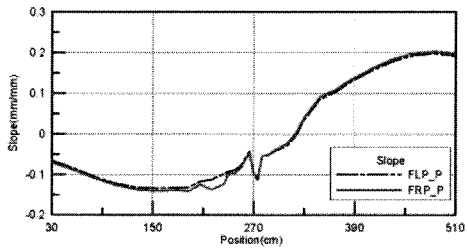


(b) 불완전합성시 처짐 분포

그림 2. 600kN에서의 보상부의 처짐 분포

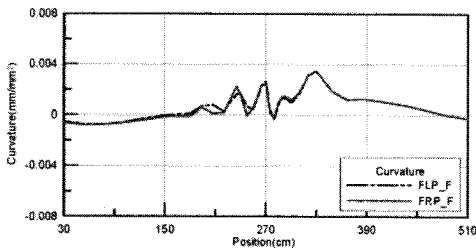


(a) 완전합성시 처짐각 분포

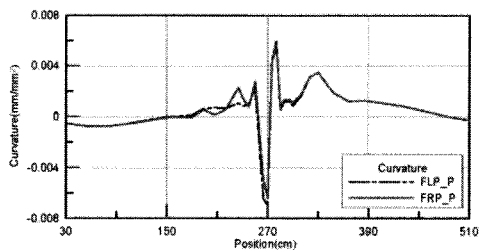


(b) 불완전합성시 처짐각 분포

그림 3. 600kN에서의 보상부의 처짐각 분포



(a) 완전합성시 곡률 분포



(b) 불완전합성시 곡률 분포

그림 4. 600kN에서의 보상부의 곡률 분포

표 3. 처짐 분석

구분	FRP_F	FLP_F	FRP_P	FLP_P	$\frac{FRP_F}{FRP_P}$	$\frac{FLP_F}{FLP_P}$	$\frac{FRP_F}{FRP_F}$	$\frac{FLP_P}{FRP_P}$
처짐(mm)	-29.02	-28.70	-30.63	-29.62	0.95	0.97	0.99	0.97

3.2 수치해석의 검증 및 실험결과 분석

해석의 정확성을 검증하고 개선안의 성능향상을 판별하기 위하여 수치해석을 통하여 얻은 결과와 실험값을 하중-처짐관계와 접합부 개구폭을 비교분석하였다.

3.2.1 검증 및 분석

표 4와 같이 600kN하중을 기준으로 비교할 경우 같은 모델에서 각 모형간의 해석값 대비 실험값의 강성비는 FRP의 경우 0.97 이며 FLP의 경우 1.00으로 해석과 실험의 결과가 3%이하의 차이를 보이고 있다. 또한, 해석과 실험으로 분류하여 모형의 강성비를 구하면 1.40와 1.35로 모두 개선안의 강성증가를 나타내고 있다. 그림 5는 하중-처짐곡선으로, 이를 통해 실험과 해석에 의한 하중-처짐거동이 결과가 유사하였다.

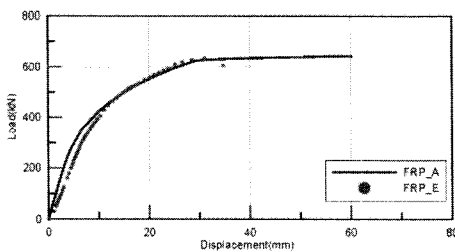
표 5와 같이 600kN하중을 기준으로 비교할 경우 같은 모델에서 각 모형간의 해석값 대비 실험값의 강성비는 FRP의 경우 0.90 이며 FLP의 경우 0.97으로 해석과 실험의 결과가 10%이하의 차이를 보이고 있다. 또한, 해석과 실험으로 분류하여 모형의 개구폭비를 구하면 0.85와 0.79로 모두 개선안의 개구폭감소를 나타내고 있다. 그림 6는 하중-개구폭곡선으로, 이를 통해 실험과 해석에 의한 하중-개구폭거동이 결과가 유사함을 알 수 있다.

3.2.2 소결

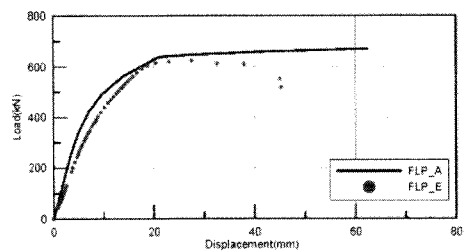
600kN의 하중에서 실험과 해석의 차이는 처짐의 경우 3%이하이고, 개구폭의 경우 10%이하로 나타났다. 다양한 하중하의 처짐과 개구폭을 그림 5, 6에 도시하였으며, 여기서 발생하는 실험값과 해석값의 차이는 논문에서 다루지 않는 마찰력과 균열면에서 전단전달계수등과 같은 인자의 영향으로 보이며, 구조물의 처짐형상과 개구폭 등의 거동양상으로 보아 수치해석을 통해 실험상을 비교적 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 모든 경우에 개선모형의 강성이 크며 개구변위가 작게 나타났다.

표 4. 혼합형 구조물의 강성비

하중(kN)	FRP_A	FLP_A	FRP_E	FLP_E	$\frac{FRP_F}{FRP_P}$	$\frac{FLP_F}{FLP_P}$	$\frac{FRP_F}{FRP_F}$	$\frac{FLP_P}{FRP_P}$
	강성 (kN/cm ²)	강성 (kN/cm ²)	강성 (kN/cm ²)	강성 (kN/cm ²)				
600	22.18	31.04	22.93	30.94	0.97	1.00	1.40	1.35



(a) 전·후면판 공용방식의 하중-처짐 곡선

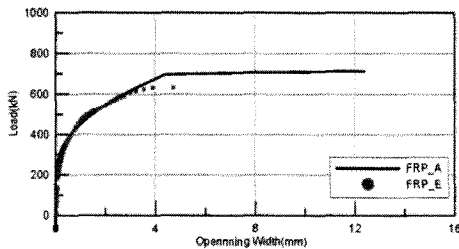


(b) 개선모형의 하중-처짐 곡선

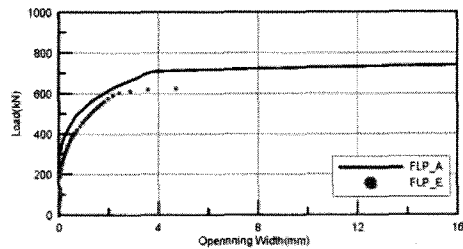
그림 5. 하중-처짐곡선

표 5. 혼합형 구조물의 개구폭비

하중 (kN)	FRP_A	FLP_A	FRP_E	FLP_E	FRP_F	FLP_F	FRP_F	FLP_P
	개구폭 (cm)	개구폭 (cm)	개구폭 (cm)	개구폭 (cm)	FRP_P	FLP_P	FRP_F	FRP_P
600	2.67	2.27	2.96	2.34	0.90	0.97	0.85	0.79



(a) 전·후면판 공동방식의 하중-균열폭 곡선



(b) 개선모형의 하중-균열폭 곡선

그림 6. 하중-균열폭 곡선

4. 결론 및 추후계획

본 논문에서는 혼합구조의 개선된 접합부 방식을 제안하기 위하여 기존의 접합부와 개선 모형의 접합부에 대하여 비선형 해석과 실험을 병행한 후, 다음과 같은 결론을 얻었다. 처짐, 처짐각 및 곡률 분포를 통하여 접합면에 존재하는 불연속면이 강도저감현상의 주요 원인이며, 개선모형이 기존방식보다 작은 강도저감이 나타나는 것을 확인하였다. 또한, 실험결과와 해석결과를 개구폭과 처짐을 하중을 매개변수로 하여 분석하여, 구조물의 거동양상이 수치해석에 의한 결과와 실제하 실험에 의한 결과가 일치하고 있음을 확인하였다. 또한 해석과 실험의 모든 경우에 개선 모형의 강성이 크며 개구변위가 작게 나타났다.

추후 다양한 수치해석으로부터 얻은 자료를 기초로 보다 정확한 접합부의 거동을 예측할 수 있는 해석적·실험적·이론적 접근을 수행할 것이며, 개선된 접합부를 갖는 구조의 정·동적 거동을 분석할 것이다. 또한 실험결과와 수치해석값의 차이를 줄이기 위하여 본 논문에서는 다루지 않은 마찰력이나 전단전달계수 등의 인자를 역해석하여 추정할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 GS건설의 지원으로 이루어진 것으로, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 허택녕, 윤익중, 김문경, 조성용 (2006) 개선된 접합부 방식을 갖는 혼합구조의 3차원 비선형 해석, 대한토목학회 정기 학술대회, 대한토목학회, pp.702-705
- Blondi, B., Caddemi, S., (2005). Closed form solutions of Euler-Bernoulli beams with singularities. *International Journal of Solids and Structures* 42, 3027-3044.
- Yavari, A., Sarkani, S., (2001). On applications of generalised functions to beam bending problems. *International Journal of Solids and Structures* 37, 5675-5705.