

슬립을 고려한 혼합구조 접합부의 비선형 해석

Nonlinear Analysis of Mixed Structure with Connection Slip

성재진* · 허택녕** · 이윤수*** · 조성용****

Sung, Jae-Jin · Huh, Taik-Nyung · Lee, Yoon-Soo · Cho, Sung-Yong

ABSTRACT

As construction technique and design are developing, the bridge tend to be longer, and also the type of bridge is verity. Steel and concrete combination improve the mechanics characteristic and economical efficient which Hybrid Structure divide Mixed Structure with Composite Structure. The connected section of the Mixed Structure should integrate steel and concrete that should show the same behavior as well, And also this connection needs big internal force and stiffness because it used to be a most dangerous section. This study carry out a nonlinear analysis technique with slip, check out each different type of section force's transfer mechanism on the connection. And this analysis was carried out using parameter that are front plate thickness, connection length, filled concrete strength and so on. We confirmed the profitable type of connection is front · backward type. The biggest stiffness and certain stress transmission are showed at the ratio 0.075 between total length and connection length, and also most economical front plate thickness is judged when it set three times thicker than flange.

Keywords: mixed structure, connection type, slip

1. 서론

교량의 설계 및 시공기술의 발달로 인해 교량은 장대화되고 있으며 교량형식 또한 다양화되어 있다. 최근에는 강과 콘크리트를 조합하여 역학적 특성과 경제성을 향상하고 있으며 적용되는 사례도 증가되는 추세이다. 강과 콘크리트를 조합한 복합구조는 합성구조(Composite Structure)와 혼합구조(Mixed Structure)로 구분할 수 있으며, 합성구조는 부재단면이 강과 콘크리트의 이종재료로 구성된 구조를 가리키며, 혼합구조는 이종재료로 된 부재를 이음부에 의해 결합한 구조를 가리킨다. 혼합구조 교량에서는 부재접합부에 있어서 단면력을 효율적으로 전달하는 메카니즘이 필요하며 접합부에서는 전단연결재의 설치 유무, 전단연결재의 횡변형 등에 의해 슬립(slip)이 발생하는 부분합성의 거동을 나타내고 있으므로 합성구조체의 보다 정확한 거동 예측을 위해서는 강-콘크리트부재 경계면의 슬립을 고려한 해석기법이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 이중

* 창원대학교 토목공학과 공학석사 E-mail: sjj78@nate.com

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

*** GS건설(주) 기술본부 토목구조팀 부장 E-mail: yslee7@gsconst.co.kr

**** GS건설(주) 기술본부 토목구조팀 과장 E-mail: sycho71@gsconst.co.kr

재료의 접합부는 인터페이스 요소로, 강과 콘크리트 부재는 3차원 유한요소로 모형화한 후, 재료의 비선형 해석을 통하여 혼합구조교량의 역학적 거동을 규명하고자 한다.

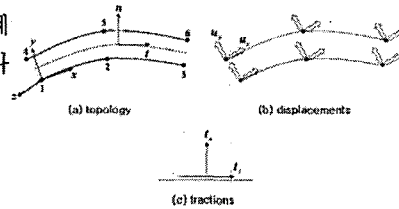
2. 인터페이스 요소

연속체 내부 혹은 연속체의 접촉부분에 존재하는 불연속 부위에 위치하여 상호 연속체 사이를 연결시켜 줄 수 있는 요소를 인터페이스(Interface)요라 한다. 인터페이스 요소는 2차원 뿐만 아니라 3차원 영역에 까지 사용이 가능하며 그 적용범위도 암반의 절리나 단층, 지반과 지하 구조물의 상호작용, 비선형물체 내의 유체의 흐름 등 넓은 범위의 접촉 문제에 까지 널리 사용되고 있으며 본 연구에서는 강재와 콘크리트의 경계면을 모델링 하는데 적용하였다.

강재와 콘크리트 혼합구조는 일반적으로 전단연결재의 유무나 종류, 또는 전단연결재의 휨 변형 등에 의해 슬립이 발생하는 부분합성 거동을 나타내며 Euro-code4에서는 이러한 부분합성 거동을 설계시 반영하도록 하고 있다.

2.1 인터페이스 요소의 구성관계

인터페이스 요소는 그림 1과 같이 0의 두께를 가지며, 경계면에서의 힘(t)과 변위(u)의 관계를 이용하여 식 1과 같이 나타낼 수 있다.



$$t = \begin{pmatrix} t_n \\ t_t \end{pmatrix} \quad \text{and} \quad u = \begin{pmatrix} u_n \\ u_t \end{pmatrix} \quad (1)$$

그림 1 인터페이스 요소

여기서 n과 t축은 각각 경계면에 대한 수직방향과 접선방향을 나타낸다. 슬립에 대한 구성방정식은 경계면에서의 힘을 전체 상대변위의 함수로 나타내는 전체변형이론(total deformation theory)을 바탕으로 하며, 2차원 문제에서 힘 Δt 와 상대변위 Δu 사이의 선형구성관계는 식 2와 같이 나타낼 수 있다(Frits 등,1998).

$$\begin{pmatrix} \Delta t_n \\ \Delta t_t \end{pmatrix} = [K_i] \begin{pmatrix} \Delta u_n \\ \Delta u_t \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} k_n & 0 \\ 0 & k_t \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta u_n \\ \Delta u_t \end{pmatrix} \quad (2)$$

여기서, $[K_i]$ 는 강·콘크리트 경계면의 인터페이스 요소에 대한 강성행렬이고, k_n 과 k_t 는 인터페이스 요소에 대해 경계면에 수직방향의 힘-상대변위 관계를 나타내는 수직강성과 접선방향의 힘-상대변위 관계를 나타내는 접선강성을 각각 나타낸다. 일반적으로 이들 두 계수를 슬립계수 또는 슬립물성이라 하고 단위길이에 대한 응력으로 나타내며, 일반적으로 인터페이스 요소의 수직강성은 선형탄성으로, 접선강성은 비선형함수로 가정된다(Kohnke, 1994 ; Frits 등, 1998).

2.2 슬립계수

슬립계수(slip coefficients)는 강·콘크리트 경계면을 모사한 인터페이스 요소의 수직강성(k_n)과 접선강성(k_t)을 포함하지만, 주로 슬립과 많은 관련이 있는 접선강성을 나타낸다. 슬립계수는 경계면에서의 콘크리트

강도와 강재의 형상 및 재료적 성질에 따라 다른 특성을 나타내며, 콘크리트 충전강관(CFT, concrete filled tube), 콘크리트/원형철근 등과 같이 콘크리트와 강재사이에 접착제와 요철을 적용하지 않고 평면을 이루는 경우의 슬립계수는 약 10~50MPa/mm이며, 콘크리트/이형철근 등과 같이 경계면에 요철을 적용한 경우는 100~500 MPa/mm, 주로 손상된 콘크리트면의 보강에 이용되는 탄소섬유시트와 같이 접착제(에폭시)를 적용하는 경우는 1000~5000 MPa/mm의 슬립계수를 나타내는 것으로 나타났다(Hajjar 등, 1998).

3. 혼합구조의 접합부

강상자형거더와 PSC거더의 접합부는 강상형과 PSC상형의 연결부로서 강성의 변화가 심하고 응력흐름이 급변하는 구조이다. 강상형 단면의 강성과 PSC 단면의 강성차이로 인해 전체적인 거동의 연속성을 확보하기 위해서는 접합부강성은 상대적으로 커야 한다. 따라서 이 접합부는 교량의 전체적인 거동에 있어서 매우 중요하다. 특히, 강성의 변화가 심하여 응력의 흐름이 원활히 전달되지 않을 수 있으므로 강성변화를 완화시키고 응력의 흐름을 매끄럽게 하기 위한 구조상세가 매우 중요하다고 할 수 있다. 구조적으로는 축방향 압축력 및 휨과 비틀림에 의한 전단응력을 동시에 받기 때문에 구조적 특성을 잘 파악하여야 한다. 접합구조에 의해 강형부와 PSC형부가 완전히 일체화 되면 힘의 흐름이나 구조물의 변형 등이 확실하게 전달된다. 이러한 강·콘크리트 접합구조는 기존에 건설된 교량에 적용하였던 형식을 참조로 다음과 같은 3가지 유형으로 분류할 수 있다.

3.1 후면판 형식

그림 2에서 보는 바와 같이 지압판이 후방에 위치한 구조로, 강 거더에 작용하는 축력과 휨모멘트가 후면판 및 전단 연결재로 전달되므로 접합면에서 강거더의 응력이 중간채움 콘크리트를 통해 전달된다. 따라서 금속판 형식보다 중간채움 콘크리트의 역할이 크게 강조된 형식이다. 한편 전단력은 주형 북부판의 스티드에 의해 중간채움부 콘크리트에 전달된다. 본 형식의 경우 단면력의 전달은 양호하나 합성부 및 보강부의 제작성이 떨어지며 콘크리트부의 시공에 있어서 콘크리트 거더부와 합성부에 동시에 고유동 콘크리트를 타설하게 되므로 타설량이 많아져 품질 확보와 시공관리상의 주의가 필요하다. 북부판과 같이 협소한 부분의 배근 및 형틀공 등의 시공면에서도 어려움이 많다.

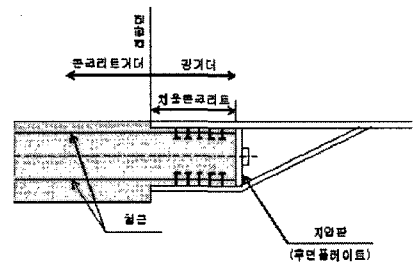


그림 2 후면판 형식 (상부 상세도)

3.2 금속판 형식

금속판 형식은 그림 3에서 보는 바와 같이 강 거더에 작용하는 축력과 휨모멘트가 지압판을 매개로 콘크리트 거더에 전달되는 형식으로 현수교 주탑 저판과 같은 원리이다. 균일한 반력 발생을 위해 일반적으로 지압판은 두겹게 한다. 가설시와 지진시 등의 일시적인 인장응력은 PC강재에 의한 프리스트레스로 저항하며 전단력은 지압판 전면의 스티드로 전달된다. 콘크리트부가 개방된 장소에서 시공되고 PC세그먼트와

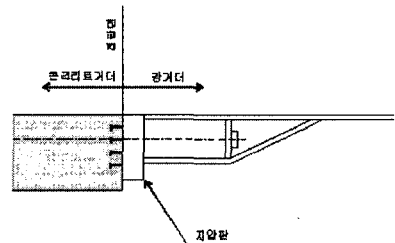


그림 3 금속판 형식 (상부 상세도)

같은 종류의 콘크리트 재질을 사용할 수 있으므로 시공 및 품질관리 측면에서 우수하다. 콘크리트부와 연결된 부분에 지압판을 사용하게 되는데 제작성이 좋은 반면, 금속판 위치에서 강부재에 큰 응력집중이 발생하여, 콘크리트 지압응력이 허용치를 넘어설 수 있다.

3.3 전·후면판 형식

그림 4에서 보는 바와 같이 강형축 접합부 전·후면에 지압판을 설치한 후 프리스트레스를 도입하여 접합하는 형식으로 축력과 휨모멘트는 전·후면판에 작용하는 지압력 및 복합부내 전단연결재에 작용하는 전단력에 의해 전달되고, 전단력, 비틀림 모멘트는 전면판 전단연결재에 작용하는 전단력에 의해 전달된다. 전·후면판 및 복합부내 전단연결재에 의해 축력 및 휨모멘트가 전달되므로 콘크리트 응력과 전·후면판 지압응력을 최소화 시킬 수 있다. 전면판에 설치된 전단연결재를 통해 전단력에 저항하므로 전단연결재 수를 충족시키기 위해 플랜지 및 복부 단면을 증가시켜야 하며, 콘크리트부의 전단연결재 삽입부분에 철근 보강이 필요하다. 또한, 후면판 위치에서 강성이 급격히 변하기 때문에 윤하중에 의한 굴절각이 발생할 가능성이 있다.

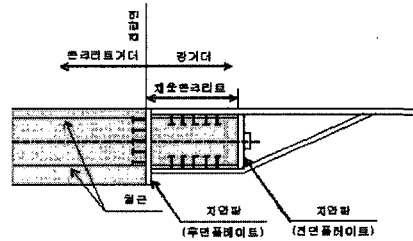


그림 4 전·후면판 형식 (상부 상세도)

4. 혼합구조의 접합부 해석

접합부의 구조거동 특성을 효율적으로 검토하기 위해 본 연구에서는 위에서 언급한 3가지 접합부 형식을 비교검토한 후, 역학적으로 우수한 접합부 형식에 대하여 전면판의 두께, 내부콘크리트의 강도, 접합부의 길이 등과 같은 매개변수에 대한 구조적 거동 특성을 파악하도록 한다. 또한 구조해석에는 일반적인 구조해석에 사용되어 정확성과 적용성이 검증된 범용 유한요소 프로그램인 ANSYS를 사용하였다.

4.1 구조해석 모형

본 연구에서는 혼합구조의 접합부 거동을 파악하기 위해 단면치수 300mm×588mm×6000mm인 부재를 모형화하였다. 콘크리트의 최대 압축강도(f_{ck})와 탄성계수(E_c)는 각각 40MPa, 28571MPa이고, 강재와 텐던의 항복강도(f_y)는 각각 300MPa, 1900MPa이며 탄성계수(E_s)는 2.1×10^5 MPa이다. 그림 5는 ANSYS를 사용하여 부재를 모형화 한 것을 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 콘크리트는 8절점 고체(Solid) 요소, 강재는 4절점 셀(shell)요소, 접합부는 8절점 인터페이스(Interface)요소를 사용하였고, 프리스트레싱 강봉은 링크(LINK)요소로 모형화 하였다.

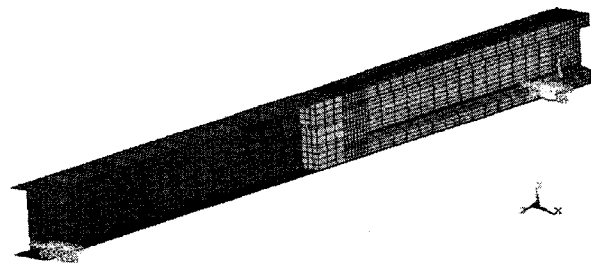


그림 5 부재의 모형화 (전체)

4.2 접합부 형식별 구조검토

전·후면판 형식은 후면판 형식에 비해 전면판이 있어서 콘크리트의 전면부에 발생하는 응력을 감소시켜 콘크리트부와 강재에 발생하는 최대 응력이 작게 나타나고 있으며, 금속판 형식의 경우 전면판의 응력 집중이 크게 발생하였다. 그림 6과 7에서 보는 바와 같이 전·후면판 형식은 금속판 형식에 없는 채움 콘크리트에 의해 응력이 분산 전달되어 응력집중이 적게 일어났으며, 후면판 형식과 비교하였을 경우에는 전면판의 유무로 인해 응력이 작게 발생한다. 따라서 전·후면판 형식은 다른 두 형식에 비해 작은 최대응력을 보이며 응력의 전달에도 유리하다고 판단된다.

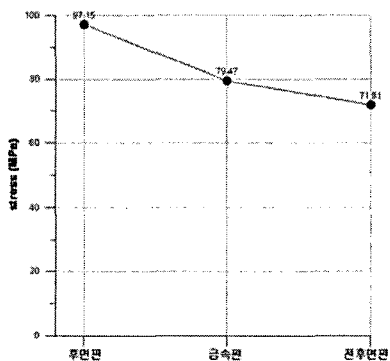


그림 6 콘크리트의 최대응력

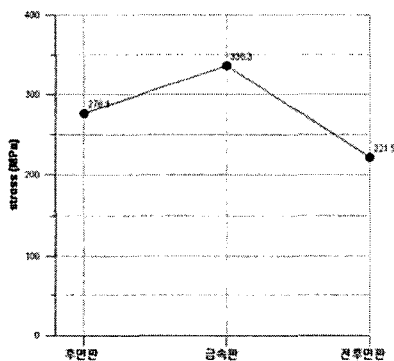


그림 7 강재의 최대응력

4.3 접합부의 거동에 따른 해석

인터페이스 요소의 수직강성과 접선강성은 동일하게 선형탄성으로 가정하였다. 수직강성의 경우, 10^4 MPa/mm 이하에서는 수직강성의 증가에 따라 항복변위는 감소하고 구조체의 강성과 균열하중은 증가한다. 그러나 10^4 MPa/mm 이상에서는 수직강성의 크기는 더 이상 구조체의 성능 뿐만 아니라 전체 거동과 국부적 응력수준에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 또한 접선강성은 10^3 MPa/mm 이하에서는 비합성 거동을, $10^1 \sim 10^3$ MPa/mm에서는 부분합성 거동을, 10^3 MPa/mm 이상에서는 완전합성 거동을 하는 것으로 나타났다(정연주 등, 2002). 수직강성은 10^4 MPa/mm으로 고정하고 접선강성에 따른 구조체의 거동 특성을 분석하였고, 그림 8은 각 합성에 따른 최대처짐을 하중단계별로 도시한 것이다.

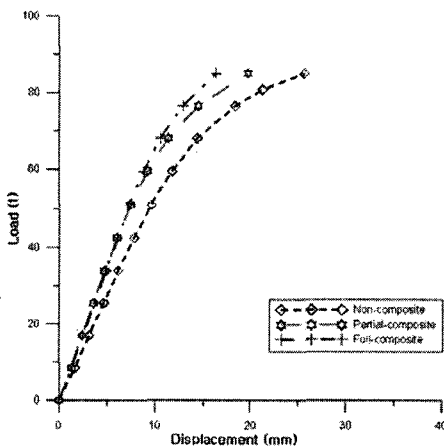


그림 8 처짐 비교

4.4 재료의 비선형성

재료의 물성치를 탄성으로 국한 시켰을 경우와 탄성과 소성을 모두 고려하였을 때 해석에 미치는 영향을 분석하였고, 그림 9는 선형 및 비선형 해석시 하중 단계별 발생한 처짐을 도시하였다. 최대하중(85t)이 작용하였을 때 선형해석 일 경우 처짐은 10.5mm, 비선형 해석일 경우 처짐은 19.77mm 발생하여 비선형일 때 처

짐이 약 46% 더 발생하였다. 따라서 혼합구조와 같은 형식의 교량해석에는 비선형해석을 수행하여야 정확한 거동을 규명할 수 있을 것으로 사료된다.

4.5 접합부의 길이 변화

접합부의 길이 변화가 접합부 거동에 어떠한 영향을 미치는가를 알아보기 위해 접합부의 길이(H)와 전체길이(L)의 비인 0.050H/L(300mm), 0.075H/L(450mm), 0.1H/L(600mm), 0.125H/L(750mm), 0.150H/L(900mm)로 접합부의 길이를 변화시켜 부재에 발생하는 응력을 비교 검토 하였다. 강재부의 응력은 그림 10에서 보는 바와 같이 0.075H/L일 때 최대응력약 315MPa으로 가장 적게 발생하였으며 접합부의 길이가 커짐에 따라 응력은 증가하는 양상을 보여 0.150H/L일 때 약 366MPa의 응력이 발생하는 것으로 나타났다. 그림 11은 접합부의 콘크리트 전면에 발생하는 최대응력을 도시한 것으로 접합부의 길이가 커짐에 따라 응력이 크게 발생하였으나 강재에 비해 응력의 변화가 크게 발생하지는 않았다.

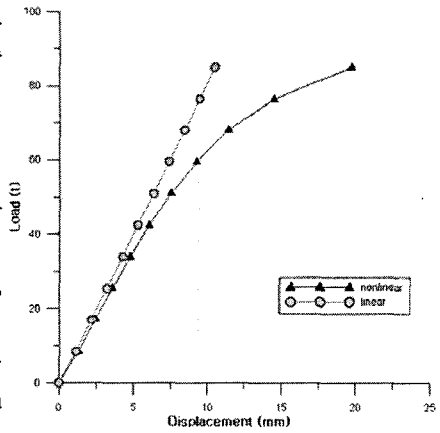


그림 9 선형 및 비선형 해석시 처짐

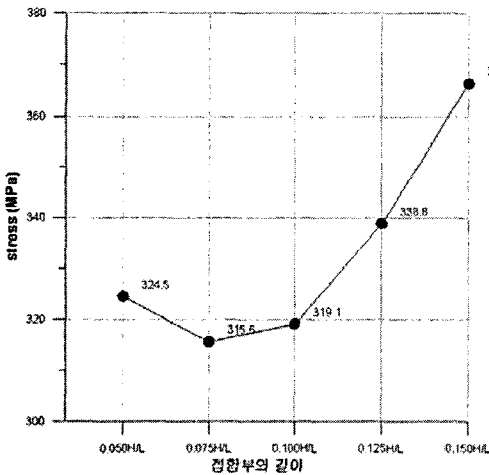


그림 10 접합부 길이별 응력(강재)

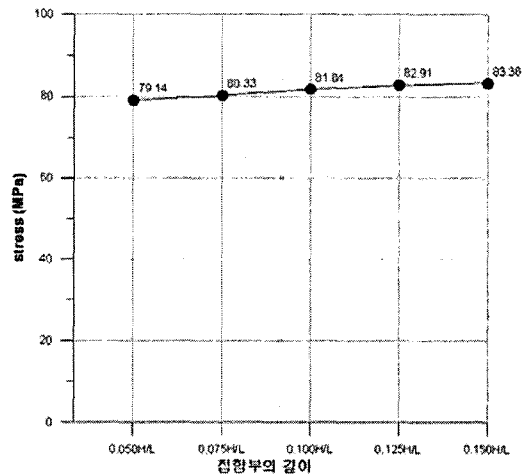


그림 11 접합부 길이별 응력(콘크리트)

4.6 전면판의 두께의 변화

접합부에서 전면판의 두께의 변화가 부재에 거동에 미치는 영향을 알아보기 위해 전면판의 두께를 강재의 두께(S:20mm)와 전면판의 두께(D)의 비로 나타내고 0.5D/S, 1.0D/S, 1.5D/S, 2.0D/S, 2.5D/S, 3.0D/S, 3.5D/S 및 5.0D/S로 변화시켜 구조해석을 수행하였다. 그림 12에서 보는 바와 같이 전면판의 두께가 커짐에 따라 강재부에서 발생하는 최대응력은 감소하는 경향을 보이고 있으며, 전면판의 두께가 0.5D/S일 때는 약 714MPa의 응력이 두께가 3.0D/S일 때는 약 300MPa의 응력이 발생하여 두께가 커짐에 따라 약 57%의 응력감소를 보였다. 또한 전면판의 두께가 3.0D/S이상 커지면 강재에 발생하는 최대응력은 변화가 매우 적은 것으로 나타났다. 따라서 전면판의 두께를 강재의 두께보다 3배이상 크게 한다면 강재의 응력을 상당히 감소시킬 수

있을 것으로 판단된다. 그림 13에서 보는 바와 같이 콘크리트 전면부의 최대응력은 전면판의 두께가 커짐에 따라 0.5D/S 일 경우 94MPa이 발생하였고 5.0D/S일 경우 75MPa이 발생하여 20%의 응력감소를 보였다. 전면판의 두께가 커짐에 따라 콘크리트와 강재의 응력은 감소하는 것으로 나타났으며 콘크리트에 비해 강재의 응력감소가 큰 것으로 판단된다.

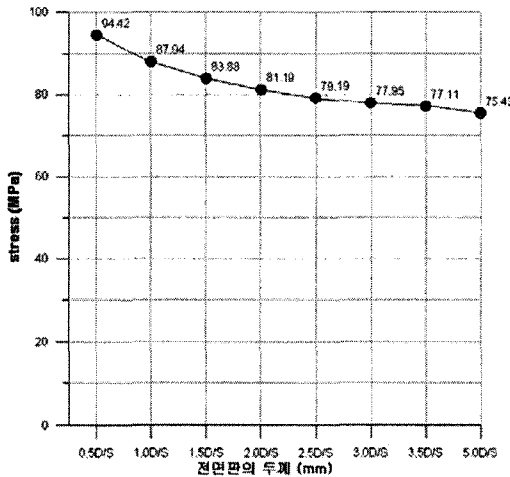


그림 13 콘크리트의 최대응력

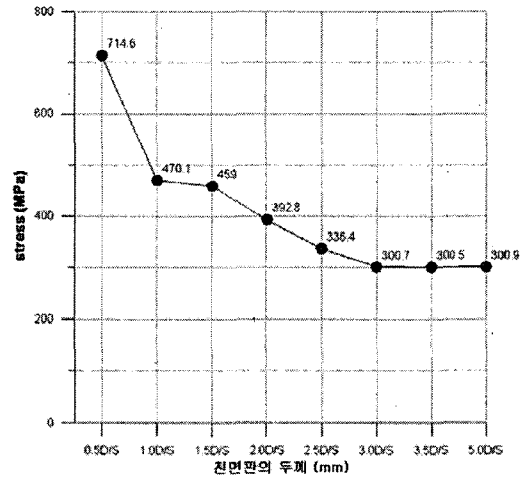


그림 12 강재의 최대응력

5. 결론

1) 세 가지 접합부 형식별 최대응력을 비교한 결과, 전·후면판 형식은 금속판 형식에 없는 채움 콘크리트에 의해 응력이 분산 전달되어 응력집중이 적게 일어났으며, 후면판 형식과 비교하였을 경우에는 전면판의 유무로 인해 응력이 적게 발생하였다. 따라서 전·후면판 형식은 다른 두 형식에 비해 상대적으로 유리한 구조형식임을 확인하였다.

2) 최대 하중하에서 선형과 비선형해석을 통하여 지간중앙의 처짐을 산정한 결과, 비선형해석에 의한 처짐이 선형해석에 의한 것보다 46% 크게 나타났다. 따라서 재료의 비선형성을 고려하여 해석을 수행하여야 정확한 거동을 규명할 수 있을 것으로 사료된다.

3) 접합부의 길이가 미치는 영향을 분석하기 위하여 다양한 지간길이와 접합부길이의 비를 갖는 경우에 대하여 비선형 해석을 수행한 결과, 지간과 접합부의 길이 비가 0.075에서 가장 강성이 크고 응력전달이 확실하게 이루어지는 것으로 나타났다.

4) 전·후면판 방식의 채움 콘크리트의 강도변화에 따른 강재와 콘크리트의 최대응력을 산정한 결과, 채움 콘크리트 강도변화에 따른 강재 및 콘크리트의 최대응력은 거의 변화하지 않음을 확인하였다. 따라서 채움 콘크리트의 강도는 접합부의 거동에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

5) 전면판의 두께변화에 따른 강재 및 콘크리트의 최대응력을 분석한 결과, 전면판 두께가 강재의 플랜지

두께보다 3배 이상 되면 응력의 변화가 거의 없이 일정한 값에 수렴함을 알았다. 따라서 전면판의 두께를 플랜지 두께의 3배 정도로 가정하는 것이 가장 경제적인 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- Matsuishi, M., Hattori, Y., Iwata, S., Ishihama, T., Yamamoto, T., and Kitazono, M.(1985) Ultimate Strength of Composite Steel-Concrete Structure of Sandwich System, *J. SNA, Japan*, Vol. 157, pp. 233-240.
- Link, R.A. (1992) Finite Element Analysis of Composite Ice Resisting Walls, *thesis of Ph.D., Univ. of Alberta, Canada*
- Link, R.A., and Elwi, A.E. (1995) Composite Concrete-Steel Plate Walls: Analysis and Behavior, *J. of Strukt. Engrg.*, Vol. 121, No. 2, pp. 260-271.
- Kohnke, P. (1994) ANSYS Theory Reference-Release 5.5, ANSYS, Inc.
- Frits, C.W., and Peter, H.F. (1999) DIANA User's Manual: Nonlinear Analysis-Release 7, TNO.
- Hajjar, J.F., Schiller, P.H., and Molodan, A. (1999) A Distributed Plasticity Model for Concrete- filled Steel Tube Beam-columns with Interlayer Slip, *Engng. struct.*, Vol. 20, No 8, pp. 663-676.
- 정연주, 정광희 (2002) 슬립을 고려한 합성구조체의 비선형해석, *대한토목학회논문집*, 제22권, 제1-A호, pp. 31-42.
- 정연주, 정광희, 김병석 (2003) 강·콘크리트 경계면의 비선형성에 따른 합성구조체의 거동(I) -비선형 경계면 모델에 따른 매개변수 연구-, *한국강구조학회논문집*, 제15권 5호(통권 66호), pp. 499-507.
- 정연주, 정광희, 김병석 (2003) 강·콘크리트 경계면의 비선형성에 따른 합성구조체의 거동(II) -강·콘크리트 경계면의 거동 특성-, *한국강구조학회논문집*, 제15권 5호(통권 66호), pp. 509-518.
- 정원기, 박상우, 구형선 (2003) 복합교량의 설계 사례, *한국강구조학회지*, Vol.15, No.1, pp. 90-99.
- 곽효경, 서영재 (2000) 부분 강합성보의 슬립거동, *대한토목학회논문집*, 제20권, 제6-A호, pp. 1017-1027.
- 김광수, 정광희, 심정욱, 유성원 (2004) PSC-강 혼합거더의 연결부 거동해석, *한국콘크리트학회 불학술대회 논문집*, 제16권 제1호(통권 제30호), pp. 766-769.
- M. A. Crisfield (1997) Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures (Volume 2: Advanced topics), *John Wiley & Sons*, pp 100-157.