

LMC로 덧씌우기 보수된 RC보의 계면응력에 관한 연구

Theoretical Study on Interfacial Stresses at RC Beam Repair-Purpose Overlayed by Latex Modified Concrete

김 현 오^{*} 김 성 환^{**} 김 동 호^{***} 이 봉 학^{****}
Kim, Hyun-Oh Kim, Seong-Hwan Kim, Dong-Ho Lee, Bong-Hak

Abstract

Each year, new technological advancements for repair-purpose are being introduced to overlay the old deterioration of RC bridge deck at highway by latex-modified concrete. The days may come when this old problem will be successfully resolved. While the experimental works and researches are very active at both laboratory and field, only a few theoretical studies were performed on interfacial problems, especially on stress distribution and concentration of RC beam overlayed by latex-modified concrete. The repaired and strengthened structures would induce a premature failure due to the stress concentration at the adhesive layer of different material before the design expected failure.

This paper investigated and proposed an analytical model for predicting interfacial shear and normal stresses of RC beam repair-purpose overlayed by latex-modified concrete. This would be used for predicting interfacial stresses and preventing premature failure at interfaces.

This study modified Smith-Teng method for applying to cementitious repairing material, which was based on a direct governing equation and linear-elastic approach for interfacial normal and shear stresses. The proposed theoretical model was verified using commercial FEA program, LUSAS, in terms of interfacial stresses predicted by the proposed model and calculated by LUSAS.

키워드 : 계면응력, 조기파괴, FEA

Keywords : interfacial stress, premature failure, finite element analysis

1. 서론

국·내외의 많은 토목구조물 및 기간시설의 노후화로 인하여 구조물의 내하력과 성능이 저하되

고, 이에 따른 보수·보강의 관심이 집중되고 있는 실정이다. 최근 국내에서는 하층 보수·보강 기법으로 강판, FRP, 탄소섬유시트 등을 사용하여 손상된 구조물의 하층을 보강하여 내하력 및 성능을 회복하는 기법이 많이 사용되고 있다. 또한 이러한 재료의 사용에 따른 계면박리, 계면균열, 단부파괴 등의 문제점들이 실내 실험과 해석을 통하여 많은 연구가 진행되고 있다.

이와는 달리 상부의 보수·보강 기법인 교면포장 및 덧씌우기 등에 사용되는 시멘트계 보수재료의 경우, 대부분 국내의 교량 및 도로의 보수·보

* 강원대학교 대학원 토목공학과 석사과정

** 강원대학교 대학원 토목공학과 공학박사 수료

*** 강원대학교 토목공학과, 공학박사 후 과정

**** 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사

강 분야를 차지함에도 불구하고 현재까지 계면박리, 계면균열, 단부파괴 등의 문제점에 관한 연구가 진부한 상태이다. 따라서 이러한 시멘트계 보수재료의 역학적 특성과 구조적 거동에 관한 연구가 필요한 실정이다.

콘크리트 보수·보강에 사용되는 재료는 구조물의 잔존수명동안 구조물 본래의 기능을 유지할 수 있도록 기존 구조물과 일체가 되어야한다. 보수재료와 기존 구조물은 하나의 조합체로써 외부의 물리적, 화학적, 침식에 견딜 수 있어야 하며 그러기 위해서는 두 재료 사이의 강한 부착력이 요구된다. 최근 교면포장에 사용되는 LMC는 높은 부착력으로 인해 이러한 조건을 만족하는 것을 확인하였고(박선규, 2001) 더 나아가 구체 콘크리트와의 일체화 거동으로 구조보강체로써의 역할까지 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

일체화 거동에 따른 구조보강체로써의 역할은 작용되는 하중에 대해 계면에서 휨 및 전단에 대한 이질재료간의 부착력 확보가 반드시 수반되어야 한다. 일반적으로 복합 구조체의 경우 초기 휨균열이 진전되다가 이질재료의 계면에서 발생하는 응력집중으로 인하여 계면 끝단에서부터 수평균열이 발생하여 보강기능을 발휘하기도 전에 단부 박리파괴 등의 조기파괴를 유발하게 된다 이러한 급작스러운 취성파괴를 방지하기 위해서는 사전에 계면의 파괴거동을 예측하는 것이 중요하다.

계면 파괴거동의 예측은 임의의 하중에 대해 계면에서 발생하는 최대 계면전단응력과 최대 계면수직응력을 수치적으로 모델화함으로써 예측할 수 있다. 그러나 아직까지 시멘트계 보수재료의 계면에서의 전단 및 수직응력에 대한 수치적 계산 모델이 없는 실정이다.

본 연구에서는 시멘트계 보수재료인 LMC를 철근콘크리트 보의 교면포장 재료로 사용했을 때 급작스러운 조기파괴를 유발하는 계면에서의 파괴거동을 예측하고자 최대 계면전단응력과 최대 계면수직응력을 수치적으로 모델화하고자 하였고 유한요소해석을 통해 제안된 모델을 검증하고자 하였다.

2. 계면응력의 이론적 배경

보수·보강된 구조물의 계면응력 산정 이론은 기본적으로 선형탄성재료이며 접착층의 두께를 따라 일정한 전단응력과 수직응력의 영향을 받는다고 가정한다. 이것은 계산 과정의 복잡함과 시간을 절약하고 단순한 Closed-Form의 해를 얻는 중요한 바탕이 된다. 일반적인 예로 교면포장의 경우는 간단한 철근콘크리트보의 거동과 유사하므로 계면응력 산정은 보의 굽힘 변형과 보강재의 축 변형

을 고려하여 보 이론에 따르는 계면 수직응력과 전단응력의 지배 미분방정식을 이끌어내어 일반해를 도출하고 다양한 경계조건을 적용하여 특수해를 구한 값이 최종적으로 알고자 하는 계면 응력의 값이 된다.

2.1 Roberts의 실용식

굽힘과 축력의 영향을 받는 계면의 전단과 수직응력은 그림 1과 같이 나타난다. 계면 전단응력은 자유단에서 0으로 감소되며 수직응력은 자유단에서 가까운 지점에서 0이 됨을 쉽게 알 수 있다. 하지만 이러한 결과를 얻기 위한 해법은 계산과정이 너무 복잡하고 많은 시간을 필요로 하는 단점을 가지고 있다.

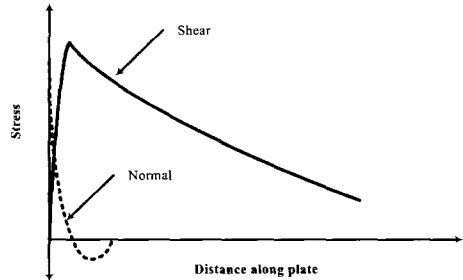


그림 1 접착층 끝단에서의 전단과 수직응력

Roberts(1989)는 계산의 복잡함과 시간을 줄이고 좀 더 실용적인 해법을 얻기 위하여 부분상호작용이론(Partial Interaction Theory)을 토대로 단계적인 힘의 평형과 경계조건을 이용하여 식(1),(2)와 같은 계면 전단응력과 수직응력 산정식을 제안하였다. 그림 2는 산정식에 사용된 RC보의 단면치수와 힘의 관계를 개략적으로 나타낸 것이다.

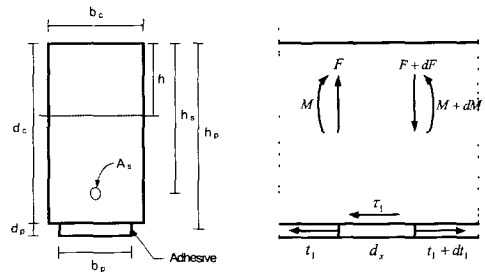


그림 2 판으로 된 RC보에서 단면 치수와 힘의 관계

$$\tau_1 = \frac{Fb_p d_p}{I} (h_p - h) \quad (1)$$

$$\tau_2 = \sqrt{\frac{K_s}{E_p b_p d_p}} \left(-t_{10} \sinh ax + \frac{(t_{10} \cosh aa - t_{12})}{\sinh aa} \cosh ax \right) \quad (2)$$

$$\sigma_3 = 2e^{-\gamma x} \{ (f_{20} \gamma + m_{20} \gamma^2) \cos \gamma x - m_{20} \gamma^2 \sin \gamma x \} \quad (3)$$

2.2 Malek의 정밀식

강판이나 FRP판으로 보강된 철근콘크리트보의 파괴는 “휨파괴”와 “국부파괴”의 두 가지 형태로 일반적으로 분류되며, “휨파괴”는 압축 콘크리트의 파괴 또는 인장 판의 파괴로 정의되고 “국부파괴”는 강판, FRP판의 박리와 보강재 사이의 콘크리트 층의 전단파괴로 정의된다 보강된 보는 “국부파괴”의 지배를 받기 때문에 콘크리트/강판, FRP 계면에서의 응력에 대한 평가가 보의 해석과 설계에서 중요한 문제가 되어, Malek(1998) 등은 모든 재료는 선형 탄성이며 판과 콘크리트 사이의 활동은 없다는 가정하에, 그림 3과 같은 콘크리트와 판에서의 미분 평형방정식을 이용하여 계면 전단응력과 계면 수직응력의 계산식을 제시하였고, 실험 결과를 유한요소해석과 비교하여 타당성을 인정받았다 식(4), (5)는 각각 계면 전단응력과 수직응력을 나타내며 적분상수 C_1, C_2, D_1, D_2 는 적절한 경계조건을 이용하여 구할 수 있다.

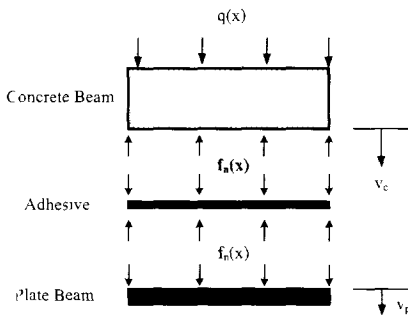


그림 3 콘크리트와 판에서 작용하는 수직응력

$$\tau(x) = t_p [C_1 \sqrt{A} \sinh(\sqrt{A}x) + C_2 \sqrt{A} \cosh(\sqrt{A}x) + 2b_1 x + b_2] \quad (4)$$

$$f_n(x) = e^{-\beta x} [D_1 \cos(\beta x) + D_2 \sin(\beta x)] + \frac{q E_p I_p}{b_p E_c I_c} \quad (5)$$

2.3 기존 이론의 비교 · 검토

위에서 살펴본 기존의 이론에서 Roberts는 단계적인 해석 접근을 통하여 계면응력을 도출하였고, 반면에 Malek은 구조물의 직접적인 변형 적합 상태를 고려하여 계면응력을 해석하였다 또한 Roberts에 의해 산정된 근사해는 일반적인 엄밀해보다 약 30%정도 응력집중을 낮게 평가하였는데, 이는 해석의 1단계에서 근사적 접근으로 인해 해석의 2단계에서 τ_2 값이 낮게 평가되었기 때문이다.

위의 두 개의 이론들은 공통적으로 보에서의 축변형과 판에서의 굽힘 변형이 부분적으로 고려되어지며, 작용되는 하중의 경우 특수한 부분에만 적용이 가능한 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점들은 현재에 와서 여러 연구자에 의해 보완되고 있으며, 특히 Smith-Teng(2001)은 이러한 보의 축변형과 판의 굽힘 문제, 전단변형, 모든 하중의 경우에 적용할 수 있는 제안식을 도출하였다 따라서 Smith-Teng의 제안식은 가장 정확한 계면응력의 값을 표현할 수 있는 방법이라고 생각된다

3. RC보의 계면응력 산정식 제안

3.1 개요

일반적인 Robert(1989)와 Malek(1998) 등의 계면응력 산정이론은 특수한 하중조건에만 적용되며 보강재료의 강성이 기존 구조물의 강성보다 크게 되면 부적절하게 된다. 또한 모든 경우에 있어 보에서 축변형과 판에서 굽힘 변형의 영향이 부분적으로 고려되기 때문에 정확한 결과를 얻기 어렵다. 본 절에서는 보의 축변형, 판에서의 굽힘 변형, 전단 변형이 모두 고려되어 보다 정확한 결과를 얻을 수 있는 기존의 Smith and Teng(2001)의 산정식을 그림 4와 같은 시멘트계 보수재료인 LMC를 사용하여 덧씌우기한 RC보에서 계면응력을 산정할 수 있도록 수정하고자 하였다.

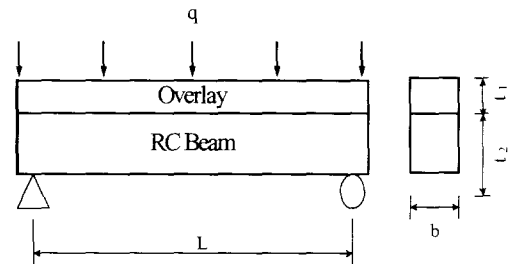


그림 4 덧씌우기된 RC보

3.2 LMC로 덧씌우기된 RC보의 계면 전단 응력식 제안

기존의 RC보 위에 LMC로 덧씌우기 보수된 보강체의 미소자유도가 그림 5에 보여진다. 여기서 계면 전단응력과 수직응력은 $\tau(x), \sigma(x)$ 로 표시되었으며 굽힘모멘트, 전단력, 축력, 작용된 하중에 대해 양의 방향의 부호를 보여준다.

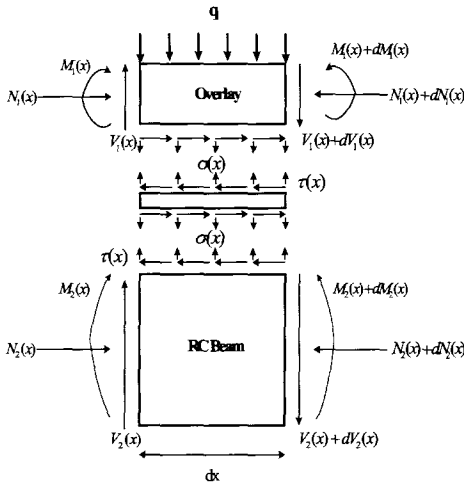


그림 5 덧씌우기된 RC보의 미소자유도

RC보와 Overlay의 접착층에서 전단변형률 γ 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\gamma = \frac{du(x, y)}{dy} + \frac{dv(x, y)}{dx} \quad (6)$$

$$\tau(x) = G_a \left(\frac{du(x, y)}{dy} + \frac{dv(x, y)}{dx} \right) \quad (7)$$

식(7)을 x 에 관하여 미분하면 전단응력에 관한 식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\tau(x)}{dx} = G_a \left(\frac{d^2u(x, y)}{dx dy} + \frac{d^2v(x, y)}{dx^2} \right) \quad (8)$$

또한 보의 곡률은 작용되는 모멘트 $M_T(x)$ 와 관계가 있으므로,

$$\frac{d^2v(x)}{dx^2} = -\frac{1}{EI_T} M_T(x) \quad (9)$$

여기서 (EI_T) 는 두 가지의 접착면 사이의 부분작용을 고려한 복합 단면의 총 휨강성이다. 접착층은 균일한 전단응력의 영향을 받게 된다고 가정되고, 따라서 $u(x, y)$ 는 접착 두께 t_a 를 따라 선형적으로 변화되어야 한다.

$$\frac{du}{dy} = \frac{1}{t_a} [(u_2(x) - u_1(x))] \quad (10)$$

$$\frac{d^2u(x, y)}{dx dy} = \frac{1}{t_a} \left(\frac{du_2(x)}{dx} - \frac{du_1(x)}{dx} \right) \quad (11)$$

여기서 $u_1(x), u_2(x)$ 는 각각 Overlay의 밑면과 RC보의 윗면에서 세로 처짐이고 t_a 는 접착층의 두께이다. 식(8)에 일반적인 보의 변형과 곡률관계를 대입하면 다음과 같은 지배미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d^2\tau(x)}{dx^2} - \frac{G_a b}{t_a} \left(\frac{y_1 + y_2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} + \frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} \right) \tau(x) = -\frac{G_a}{t_a} \left(\frac{y_1 + y_2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) V_T(x) - \frac{G_a y_1 dq}{t_a G_1 \alpha A_1 dx} - \frac{G_a b_2}{t_a} \left(\frac{y_1}{G_1 A_1} - \frac{y_2}{G_2 A_2} \right) \frac{d\sigma(x)}{dx}$$

윗 식에 대하여 접착면에서 전단 변형의 영향을 무시하고, 등분포 하중에 대한 계면 전단응력의 일반해를 구하면 다음과 같다.

$$\tau(x) = B_1 \cosh(\lambda x) + B_2 \sinh(\lambda x) + m_1 V_T(x)$$

$$\lambda^2 = \frac{G_a b_2}{t_a} \left(\frac{y_1 + y_2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} + \frac{1}{E_1 A_1} + \frac{1}{E_2 A_2} \right)$$

$$m_1 = \frac{G_a}{t_a} \frac{1}{\lambda^2} \left(\frac{y_1 + y_2}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right) \text{이다.}$$

식(13)에 경계조건 $x=0$ 에서 $V_T(0)=qL/2$, $x=0$ 에서 $V_T(0)=0$ 을 대입하면 다음과 같은 적분상수가 결정될 수 있다.

$$B_1 = m_2 - m_1 \frac{qL}{2}, B_2 = -B_1 \quad (14)$$

여기서 $m_2 = \left(\frac{h^2}{4} - y_c^2 \right) \frac{qL}{4I}$ 이다.

3.3 LMC로 덧씌우기된 RC보의 계면 수직 응력식 제안

시멘트계 보수재료인 LMC로 덧씌우기 보수된 RC보가 하중을 받게 되면 Overlay와 RC보 사이의 수직 분리가 발생된다. 이러한 분리는 접착층에서 계면 수직응력을 만들어낸다. 수직응력 $\sigma(x)$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma(x) = \frac{E_a}{t_a} [\nu_2(x) - \nu_1(x)] \quad (15)$$

여기서 $\nu_1(x), \nu_2(x)$ 는 각각 Overlay와 RC보의 수직 처짐이다. Overlay와 RC보의 곡률 평형은 다음과 같은 관계를 이끌어 낸다.

접착면 1:

$$\frac{d^2\nu_1(x)}{dx^2} = -\frac{1}{E_1 I_1} M_1(x) - \frac{1}{G_1 \alpha A_1} [q + b\sigma(x)]$$

$$\frac{dM_1(x)}{dx} = V_1(x) - b y_1 \tau(x) \quad (16)$$

$$\frac{dV_1(x)}{dx} = -b\sigma(x) - q$$

접착면 2:

$$\frac{d^2 v_2(x)}{dx^2} = -\frac{1}{E_2 I_2} M_2(x) - \frac{1}{G_2 a A_2} b \sigma(x)$$

$$\frac{dM_2(x)}{dx} = V_2(x) - b y_2 \tau(x) \quad (17)$$

$$\frac{dV_2(x)}{dx} = b \sigma(x) \text{이다.}$$

위의 평형방정식에 근거하여, Overlay와 RC보의 굽힘에 대한 지배 미분 방정식을 계면 전단응력과 수직응력의 항으로 표현하여 일반해를 구하면 다음과 같다.

$$\sigma(x) = e^{-\beta x} [C_1 \cos(\beta x) + C_2 \sin(\beta x)] - n_1 \frac{d\tau(x)}{dx} - n_2 q$$

여기서 $\beta = \sqrt[4]{\frac{E_o b}{4t_a} \left(\frac{1}{E_1 I_1} + \frac{1}{E_2 I_2} \right)}$.

$$n_1 = \left(\frac{y_1 E_2 I_2 - y_2 E_1 I_1}{E_1 I_1 + E_2 I_2} \right), n_2 = \frac{E_2 I_2}{b_2 (E_1 I_1 + E_2 I_2)}$$

식(18)에서 상수 C_1, C_2 는 $x=0$ 에서 작용하는 굽힘모멘트 $M_T=0$ 을 적용하고 $x=L/2$ 에서 $V_T(L/2)=0$ 을 대입하면 다음과 같이 구할 수 있다

$$C = \frac{n_1 [\cos(\beta x) + \sin(\beta x)]}{2\beta^2 [\cos(\beta x) - \sin(\beta x)]} \times \frac{d^3 \tau(x)}{dx^3} \Big|_{x=0} \quad (19)$$

$$C_2 = -\frac{n_1}{2\beta^2} \times \frac{d^3 \tau(x)}{dx^3} \Big|_{x=0} \quad (20)$$

4. 유한요소법을 이용한 제안식 검증

4.1 개요

이론적인 방법에 의하여 제안된 계면응력 예측 모델에 재료특성과 형상등을 부여하여 수치해석을 실시하였다. 이러한 모델은 범용 유한요소해석 프로그램인 LUSAS의 선형탄성해석 결과와 비교·검토하여 제안된 모델의 타당성을 검토하였다. 여기서 보의 대칭성으로 인하여 해석모델은 중심에서 좌절할 경계조건을 부여하여 반만 고려하였다. 정확한 결과를 도출하기 위하여 이론에 사용된 재료의 물성치와 형상을 유한요소해석에 동일하게 적용하였으며 부착 경계면에서의 Mesh는 조밀하고 등 간격이 되게 부여하였다.

4.2 사용물성 및 모델링

Smith and Teng(2001)에 의해 제안된 계면응력 산정식을 시멘트 보수재료인 LMC를 사용했을 경우 계면응력을 얻을 수 있는 산정식으로 수정한 모델식에 있어, 실제 재료특성과 단면을 부여하여 발생하는 계면 전단응력과 수직응력의 값을 구하고자 하였다.

표 1 RC보에 사용된 재료의 역학적 특성

Materials	Modulus of Elasticity E (kgf/cm ²)	Shear Modulus of Elasticity G (kgf/cm ²)	Poisson's Ratio ν
RC Beam (OPC)	260672	110454	0.18
Overlay (LMC)	273313	115810	0.18
Adhesive	266993	113130	0.18

표 2 RC보의 형상과 단면 특성

Material	Moment of Inertia I (cm ⁴)	Section Area (cm ²)	Thickness t (cm)	Width b (cm)	Neutral Axis yc (cm)
RC Beam (OPC)	19531	375	25	15	14.9
Overlay (LMC)	156	75	5		
Adhesive	Variable				

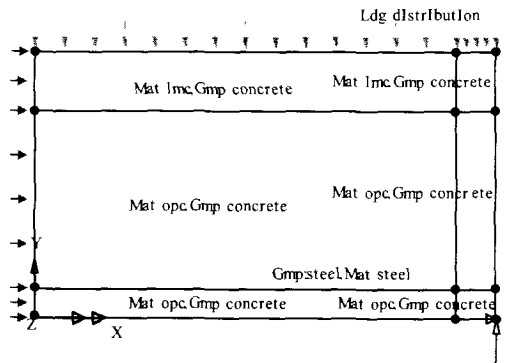


그림 6 덧씌우기된 RC보의 모델링

사용된 재료특성과 단면형상은 표 1과 표 2에 나타내었고 그림 6과 같이 모델링 하였다.

4.3 결과의 비교·검토

FRP판의 계면 응력을 구하는 Smith-Teng의 산정식을 LMC로 덧씌우기 보수된 RC보에 적용하여 수정한 식에 의해 계산된 계면 응력 뿐만 아니라 유한요소해석에 의한 계면 응력 결과가 그림 7과 그림 8에 보여진다.

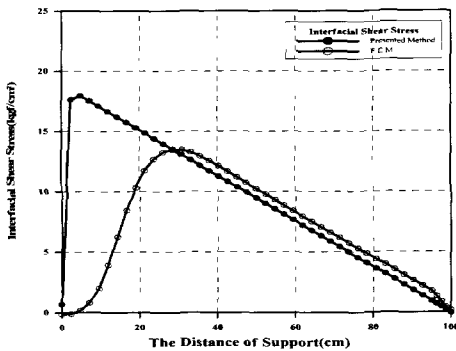


그림 7 계면 전단응력의 비교($t_a=0.1\text{cm}$)

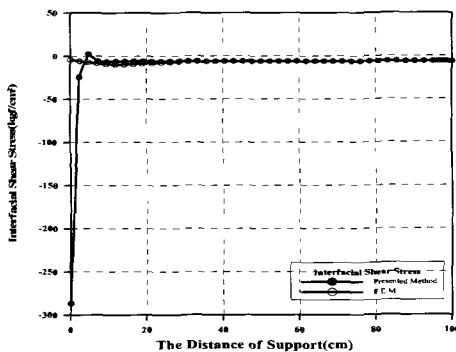


그림 8 계면 수직응력의 비교($t_a=0.1\text{cm}$)

그림 7에서 보는 바와 같이 계면 전단응력의 경우 RC보의 지지점으로부터 거리 0~20cm까지는 최대로 4.48kgf/cm^2 의 응력차이를 보이며, 지지점에서 20cm를 지나 중앙에 근접할수록 응력의 차이는 보이지 않음을 알 수 있다.

또한 그림 8의 계면 수직응력의 경우 RC보의 지지점으로부터 거리 0~5cm까지는 최대로 -282.45kgf/cm^2 의 응력차이를 보이다가, 지지점에서 5cm를 지나 중앙에 근접할수록 응력의 차이는 보이지 않으며 계산 값과 유한요소해석에 의한 값이 일치함을 알 수 있었다. 그림에서 보듯이 지지점에 근접할수록 응력 차이가 급격하게 증가하는 이유는 지지점에서의 응력집중 영향이 유한요소해석에서는 고려되어지나 이론적인 산정식에는 이러한 영향이 고려되지 못한 결과로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 선형탄성이론을 토대로 계면 수직응력과 전단응력의 직접적인 지배방정식을 이용하여 기존의 Smith-Teng의 산정식을 시멘트계 보수재료로 덧씌우기 보수된 RC보에 맞게 수정·적용하여 계면에서 발생하는 계면 전단응력과 수직

응력의 분포를 예측하고 모델의 타당성을 확인하기 위하여 범용으로 널리 사용되고 있는 Lusas를 이용하여 유한요소해석과 비교·검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 선형탄성 이론을 토대로 FRP판의 계면응력을 예측할 수 있는 Smith-Teng의 산정식을 시멘트계 보수재료에 적용할 수 있는 식으로 수정하여 제안하였다.

둘째, 산정식에 의한 계면응력과 유한요소해석에 의한 계면응력은 지지점에 근접할수록 큰 차이를 보이는 경향을 나타내었으며, 이러한 이유로는 지지점의 경계조건에 의한 응력집중 영향이 유한요소해석에서는 고려되는 반면 계산에 의한 산정식에는 고려하지 못한 결과라고 판단된다.

향후, 지지점에서의 응력집중을 고려한 계면응력의 영향과 실제 구조물 실험을 통하여 이론과 해석, 실험의 결과를 비교·고찰함으로써 신뢰성을 확보하는 연구가 계속적으로 수행되어야 될 것이라 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단지정 강원대학교 부설 “석재복합신소재제품연구센터” 지원에 의해 이루어진 것입니다. 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 양동석, 한경봉, 박선규, “시멘트계 보수재료를 이용한 철근콘크리트 보의 휨내력 특성에 관한 실험적 고찰”, *대한토목학회논문집*, 제 21권, 제2-A호, pp.287~274, 2001.
- [2] Roberts, T. M., “Approximate Analysis of Shear and Normal Stress Concentrations in the Adhesive Layer of Plated RC Beams”, *The Structural Engineer*, Vol.67, No.12, pp 229~233, 1989.
- [3] Malek, A. M., Saadatmanesh, H. and Ehsani, M. R., “Prediction of Failure Load of R/C Beams Strengthened with FRP Plate Due to Stress Concentration at the Plate End,” *ACI Structural Journal*, Vol.95, No.1, January-February, pp.142~152, 1998.
- [4] Smith, S. T. and Teng, J. G., “Interfacial Stresses in Plated Beams,” *Engineering Structures*, Vol.23, pp. 857~871, 2001.