

앵커로 보수한 콘크리트 계면 거동의 고찰

송형수¹⁾·이진용²⁾·윤동용³⁾·민창식^{1)*}·최동욱⁴⁾

¹⁾ 동국대학교 토목환경공학과 ²⁾ (주)케어콘 ³⁾ 현대 INI STEEL ⁴⁾ 한경대학교 건축학부

(2004년 10월 30일 원고접수, 2005년 11월 25일 심사완료)

Investigation on Behaviors of Concrete Interfaces Repaired Using Anchors

Hyung-Soo Song¹⁾, Chin-Yong Lee²⁾, Dong-Yong Yoon³⁾, Chang-Shik Min¹⁾, and Dong-Uk Choi⁴⁾

¹⁾ Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dongguk University, Seoul, 100-715 Korea

²⁾ CareCon, Co, Ltd., Seoul, 134-030 Korea

³⁾ HyunDai INI STEEL Company, Incheon, 401-712 Korea

⁴⁾ Dept. of Architectural Engineering, Hankyong National University, Ansong, 456-749 Korea

(Received October 30, 2004, Accepted November 25, 2005)

ABSTRACT

Recently, the damaged concrete structures are often strengthened or repaired using the polymer concrete or the polymer cement mortar. In the repaired concrete structures at early ages, internal stresses could be developed due to the differential drying shrinkage of the repair material. Due to the difference of the thermal coefficients of the repair material and existing concrete, additional stresses also could be developed as the structures are subjected to the ambient temperature changes. These environmentally-induced stresses can sometimes be large enough to cause damage to the structures, such as debonding of the interface between the two materials. In this study, a rational procedure was developed where anchors can be designed and installed to prevent damages in such structures by thermally-induced stresses. Finally, through the experimental study and numerical study, the effects of the repair method using anchors with debonding was investigated and discussed the results.

Keyword : anchors, repair method, interface stresses, thermal stresses, polymer cement(modified) mortar

1. 서 론

열화된 콘크리트 구조물을 보수 또는 보강하기 위하여 모르타르를 사용하여 단면을 증대시킬 수 있다. 이때 기존 콘크리트와 보수 재료 사이에는 계면이 형성되며, 이러한 계면은 두 층이 합성거동을 할 수 있도록 완전하게 부착되어 있어야 한다. 기존 공법에서 보수 재료는 일반적으로 계면의 합성거동에 충분한 부착강도를 확보할 수 있는 것으로 알려져 있으나, 온도변화와 건조수축 등으로 보수 단면 내부에 불균등한 체적변화가 발생하게 되면, 보수 단면에는 추가적인 응력이 발생할 수가 있다. 이렇게 추가적으로 발생된 응력은 계면파괴를 유도하여 내구성을 저하시킬 수 있으며, 또한 이런 계면의 부분적인 손상은 합성단면의 구조적 효과를 감소시키게 된다.

기존의 보수 공법 연구는 보수 재료의 물리적인 특성을 개선시키거나, 기존 공법에 부착력을 향상시키기 위한 접

착 재료를 추가하는 방법 등을 포함한다. 그러나 이러한 보수 재료만의 특성으로는 보수면의 상태에 따라서 부착 강도가 많은 차이를 나타낼 수 있기 때문에 안전한 방법이 될 수 없다. 특히, 열악한 환경(저온, 동해, 습윤환경 등)에 노출된 단면에서 기존의 보수 재료만으로는 시공과 품질관리에 어려움이 있어, 재료적인 성능개선 만으로는 한계가 있다. 이러한 보수면을 기존 방법으로 시공하는 경우 내구성은 건조한 면을 시공할 때 보다 현저히 감소되고, 따라서 보수된 구조물의 수명이 감소할 수 있다. 이러한 기존 공법이 갖고 있는 문제점을 해결하고자 본 연구에서는 단면보수 및 증대를 위해 사용되는 보수 모르타르에 섬유앵커를 추가로 적용함으로써, 계면강도가 증진되는지 여부를 실외 실험을 통하여 검토하였다.

2. 계면에 발생하는 응력

2.1 Chen의 방법을 이용한 온도응력 연구의 개요

Chen et al.⁶⁾은 두 층의 목재가 접착체에 의해 부착된

* Corresponding author

E-mail : csmn@dongguk.edu

©2005 by Korea Concrete Institute

Table 1 Material properties used for thermal stress analysis of beam in Fig. 1

Layer	Elastic modulus E(MPa)	Thickness h(mm)	Thermal coefficient α (m/m/°C)	Poisson's Ratio ν	Temperature change ΔT (°C)	Remarks
1	15,000	25	20×10^{-6}	0.20	-20	Repair material
2	25,000	200	10×10^{-6}	0.18		Existing concrete

Length = 2,000 mm, Width = 1.0 mm

합성보에 발생하는 온도응력에 관한 연구에서 2차원 탄성론(2D elasticity)에 의한 엄밀해를 제시하였다. Chen의 방법은 다음 가정에 근거한 평면응력조건(plane stress condition)의 선형해석이다.

- 1) 접착제 층의 두께는 다른 층의 두께에 비하여 무시할 수 있을 만큼 작고,
- 2) 합성보는 균일한 온도변화를 받으며,
- 3) 모든 재료는 균질하고 등방성을 갖는 조건으로 계산이 가능하다.

이러한 원리는 열화로 인하여 단면이 손상된 콘크리트 구조물의 보수공법에 적용할 수 있다. 예를 들어, Fig. 1의 기존 콘크리트와 보수재료는 계면에 부착되어 합성보를 형성하고 있다. 단면복구 후에 밤사이 일교차가 발생하여 합성보의 온도강하($\Delta T < 0$)에 의한 응력해석을 위해 보수재료와 기존콘크리트를 각각 1, 2로 정의하고 1, 2층의 두께(h), 탄성계수(E) 및 열팽창계수(α) 등 재료의 성질을 Table 1에 예를 들어 제시하였다. Table 1에서 기존 콘크리트는 200 mm 두께를 갖는 보통강도 콘크리트를, 보수 재료는 25 mm 두께의 보수 모르타르를 각각 가정한 것이다.

Table 1에서 보수재료의 열팽창계수($\alpha_1 = 20 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$)는 기존 콘크리트의 열팽창계수($\alpha_2 = 10 \times 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}$)보다 크므로 합성보가 온도강하에 접하면 보수 재료는 기존 콘크리트 보다 더 많이 수축하려고 한다. 그러나 보수 재료의 자유수축은 두 층이 완전히 부착되어 있는 계면에서 구속되고, 따라서 합성보 내부에 불균등수축에 의한 휨모멘트 및 축방향힘을 발생⁴¹¹⁾시키는데 이 두 가지 힘에 의하여 Fig. 2에 나타난 것과 같은 온도응력이 합성보 내부에 분포하게 된다.

2.2 응력분포 특성

Fig. 2는 Table 1과 같은 재료적 성질을 갖는 합성보가 -20 °C의 온도강하에 접하는 경우 내부에 발생하는 온도응력을 Chen의 방법에 의해 결정한 예이다. Fig. 2(a), (b), (c)에는 각각 보강 재료와 기존 콘크리트의 계면을 따라 발생한 축방향응력(f_x), 전단응력(τ_{xy}), 계면과 직각방향응력(f_y)이 표시되어 있다. Fig. 2(a)에서 보수 재료의 계면은 단부를 제외하고 일정한 축방향 인장응력을 받고 있음을 알 수 있다.

Fig. 2(b), (c)에서 온도변화에 의한 합성보 계면의 전단응력 및 계면과 직각방향응력은 모두 단부에만 발생하는

것을 알 수 있다. Fig. 2(b)에서 계면의 전단응력(τ_{xy})은 보 중앙부를 포함한 대부분의 구간에서 “0”이고, 보 중앙을 중심으로 대칭이며, 또한 단부에 아주 가까운 지점에서 최대이다. Fig. 2(c)에서 계면과 직각방향응력(f_y)은 역시 대부분 구간에서 “0”이다. f_y 의 분포는 단부 근처에서 “-”값(압축응력)을 갖고 단부에 더 근접하여서는 “+”값(인장

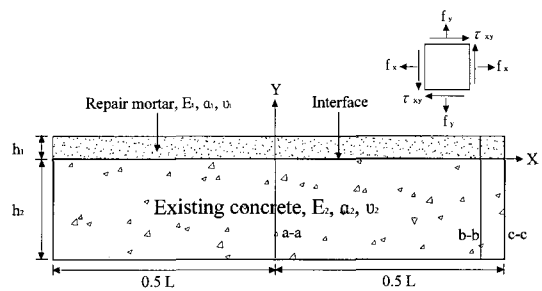
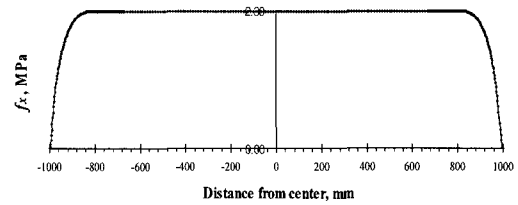
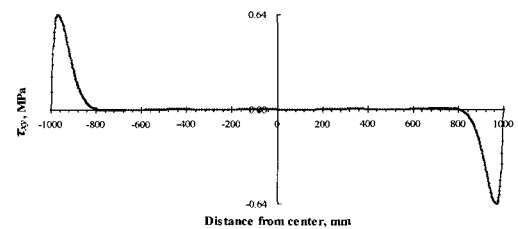


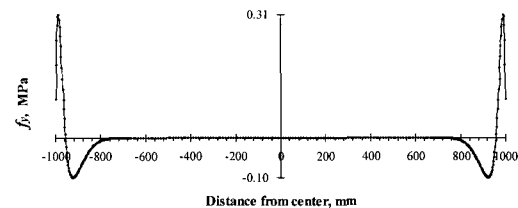
Fig. 1 A composite beam



(a) Axial stress(f_x) in repair material



(b) Shear stress(τ_{xy})



(c) Stress normal to interface(f_y)

Fig. 2 Distribution of thermally-induced interface stresses

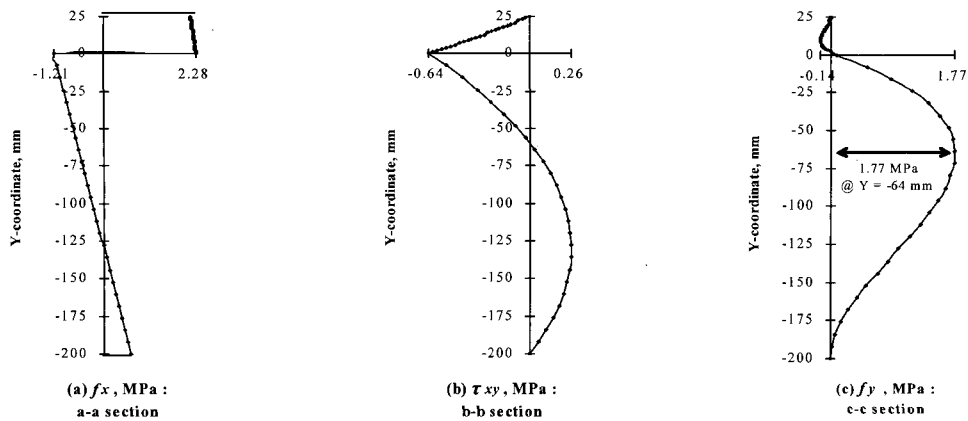


Fig. 3 Stress distribution across cross-section (along Y-axis) in repaired beam of Fig. 1

응력)을 갖는 대칭형태이며, 인장응력은 단부에서 최대이다. Fig. 2에 나타난 응력분포는 다음과 같은 경우에 모두 해당된다.

- (1) 보수 재료의 열팽창계수가 기존 콘크리트의 열팽창계수 보다 크면서 동시에 보강체가 온도강하를 받는다.
- (2) 보수 재료가 기존 콘크리트에 비해 큰 건조수축을 한다.

2.3 파괴 형태

Fig. 2에서 f_x , τ_{xy} , f_y 는 각각 보수체의 중앙부, 단부에 가까운 지점, 단부에서 최대가 된다. 보수체의 파괴 형태를 고찰하기 위하여 각각의 응력이 최대가 되는 지점을 Fig. 1의 합성보에 a-a, b-b, c-c 단면 등 세 가지 Y방향 단면으로 표시하였고 각 단면에 발생하는 응력 분포를 검토하였다.

Fig. 3(a), (b), (c)는 각각 보 a-a, b-b, c-c 단면에 발생한 f_x , τ_{xy} , f_y 의 분포이며, Fig. 3(a)는 보 중심(a-a 단면)에서 f_x 의 Y방향 분포를 나타내고 있다. f_x 는 보수 재료의 전 단면에 걸쳐서 인장이며, 계면(Y=0)에서 최대값을 갖는다. 즉, 보수 재료의 두께가 기존 콘크리트의 두께에 비해 상대적으로 작은 합성보에서 보수 재료는 항상 인장응력을 받는다. 이러한 인장응력이 크게 발생하면 보수층에 인장균열이 발생할 수 있다. Fig. 3(b)에 b-b 단면에 발생한 τ_{xy} 의 Y방향 분포를 나타내었다. τ_{xy} 는 계면에서 최대값을 갖는다. 즉, 최대전단응력은 항상 계면에 발생하는데 보수체 단부에서 계면박리를 일으키는 원인이다. Fig. 3(c) c-c 단면의 f_y 분포는 Y방향 최대인장응력(+)이 계면의 하부에 발생한다는 것과 최대인장응력의 크기는 계면에 발생한 인장응력을 훨씬 상회한다는 것을 보여주고 있다. 즉, 응력이 큰 경우 f_y 는 기존 콘크리트에 수평방향의 인장균열을 발생시킬 수 있다.

여러 가지 Y방향 단면에 대한 응력 분포의 고찰로부터 온도응력에 의해 보수체에서 발생할 수 있는 파괴 형태를

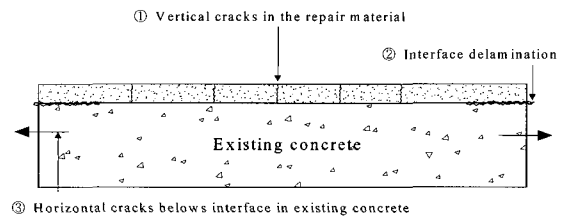


Fig. 4 Failure modes by temperature-induced stress in a repaired beam

다음 세 가지 형태로 나눌 수 있으며, Fig. 4에 나타내었다. ① 보수 재료의 상부 인장균열, ② 계면 전단파괴, ③ 기존 콘크리트의 수평 인장균열. 이러한 보수체의 세 가지 파괴 형태 중에서 가장 자주 발생하는 것은 계면의 전단 파괴(전단응력에 의한 계면박리)이다.

2.4 합성 시 발생하는 응력의 발생 변수

Choi et al.⁸⁾의 연구에서는 합성보의 응력에 영향을 미치는 주요 변수를 다음과 같이 제시하였다.

$$m = h_1 / h_2 \text{ (두 층의 두께 비)}$$

$$n = E_1 / E_2 \text{ (두 층의 탄성계수 비)}$$

$$\Delta\alpha \Delta T = (\alpha_1 - \alpha_2) \times \Delta T$$

(두 층의 열팽창계수 차이와 온도변화)

Choi 등^{7,10)}은 Chen의 해석방법을 이용하여 Table 2의 조건을 갖는 Fig. 1의 합성보에 대하여 온도변화로 인하여 발생하는 응력을 해석하였으며, 해석 결과 나타난 계면의 전단응력과 계면과 직각방향의 응력은 Figs. 5, 6과 같다. Fig. 5는 Table 2의 조건을 갖는 합성보에서 보수 재료의 두께를 증가시켜 두 층의 두께 비(m)를 변화시킨 경우와 Table 3과 같이 두 층의 탄성계수 비(n)를 변화시킨 경우에, 계면에 발생하는 전단응력을 나타낸 것이다. Fig. 5에 나타난 합성보의 계면 전단응력을 통하여, 두 층의 두께

Table 2 Thermal coefficients, Poisson's ratios, and temperature change

Layer	Thermal coefficient $\alpha(m/m/^\circ C)$	Poisson's ratio ν	Temperature change $\Delta T(^\circ C)$	Remarks
1	20×10^{-6}	0.20	-10	Repair material
2	10×10^{-6}	0.18		Existing concrete

1 Length = 2,000 mm, Width = 1.0 mm

$$2\Delta\alpha\Delta T = (\alpha_1 - \alpha_2) \times \Delta T = (20 - 10) \times 10^{-6} \times (-10) = -100 \times 10^{-6} \text{ m/m}$$

Table 3 Elastic modulus included in analysis

$E_1(\text{MPa})$	14,700	20,590	25,490	29,420	32,840	36,280
$E_2(\text{MPa})$	20,590					

비와 탄성계수 비가 각각 증가하면 전단응력도 증가하는 것을 알 수 있다.

Fig. 6에 나타난 계면과 직각방향의 응력은 계면의 전단 응력과 유사한 경향을 볼 수 있으며, 두 층의 두께 비와 탄성계수 비가 각각 증가하면 계면과 직각방향의 응력도 또한 증가하는 것을 알 수 있다.

2.5 건조수축에 의한 계면에 발생하는 응력

온도변화로 발생하는 보수체에 가장 자주 발생하는 계면박리는 보수재료의 건조수축이 큰 경우에도 발생할 수 있다. 보수재료가 기존콘크리트에 비해 큰 건조수축을 하는 경우에는 온도변화로 인하여 발생하는 응력과 동일한 현상이 보수체에 발생한다. 즉, 보수재료의 열팽창계수가 기존 콘크리트의 열팽창계수 보다 크고 온도강하가 일어나는 것과 같다. 이러한 개념을 이용하여 Choi and Lee⁹⁾는 온도변화에 사용된 해석 방법을 건조수축에도 동일하게 적용시키고자 유효변형률 개념을 사용하였다. Table 2에서의 보수재료와 기존 콘크리트의 열팽창계수의 차이 ($\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$)와 온도변화($\Delta T = 10^\circ C$)를 곱하면 식(1)과 같다. 식(1)은 온도변화에 의해 발생한 기존 콘크리트와 보수 재료와의 변형률의 유효차이인 유효변형률이다.

$$\Delta\alpha\Delta T = (20 - 10) \times 10^{-6} \times (-10) = -100 \times 10^{-6} \text{ m/m} \quad (1)$$

Fig. 1의 합성정보에서 보수 재료의 건조수축을 ϵ_{sh1} , 기존 콘크리트의 건조수축을 ϵ_{sh2} 로 하면 건조수축의 유효차이인 유효변형률은 식 (2)와 같다.

$$\Delta\epsilon_{sh} = \epsilon_{sh1} - \epsilon_{sh2} \quad (2)$$

식(2)에서 기존 콘크리트는 일반적으로 재령이 수년이상이며, 따라서 상대적으로 건조수축을 무시할 수 있으므로 유효변형률은 보수재료의 건조수축과 같다.

$$\Delta\epsilon_{sh} = \epsilon_{sh1} \quad (3)$$

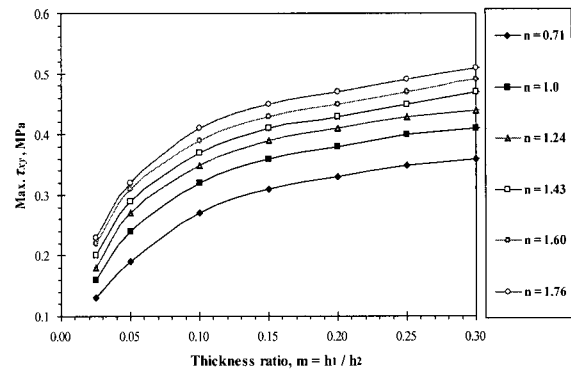


Fig. 5 Maximum τ_{XY} developed at interface

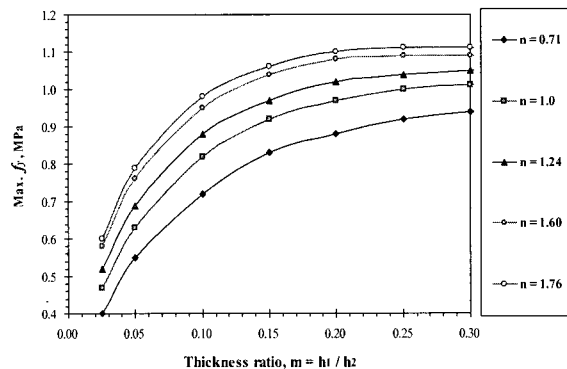


Fig. 6 Maximum f_Y developed in existing concrete

식(4)는 유효변형률($\Delta\epsilon_T$)의 정의이다. 예를 들어, 타설된 보수 모르타르의 3주간 건조수축이 $200 \times 10^{-6} \text{ m/m}$ 인 경우, 유효변형률은 Fig. 2에 제시된 $-20^\circ C$ 의 온도변화를 받는 경우와 같게 되고, 따라서 동일한 응력이 발생한다고 예측할 수 있다.

$$\Delta\epsilon_T = \Delta\epsilon_{sh} = \Delta\alpha\Delta T \quad (4)$$

아울러, Choi and Lee⁹⁾의 연구에서는 재령 1년 이상인 콘크리트 보의 상부에 20mm 두께의 모르타르를 타설한 후, 1일 후에 strain rosette를 합성보 단부의 계면에 부착하여 모르타르의 건조수축에 의해 계면에 발생한 전단변형률을 계측하였다. 실험 결과는 Chen의 방법에 의한 해석결과와 비교되었고, 계측된 계면의 전단응력과 해석값

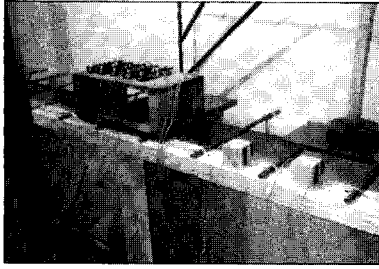


Fig. 7 Mortar cubes used to measure coefficient of thermal expansion

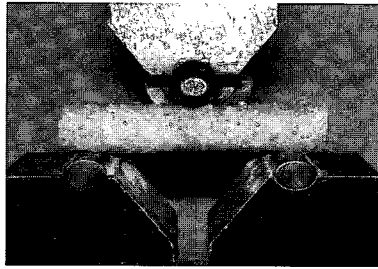


Fig. 8 ISS test setup

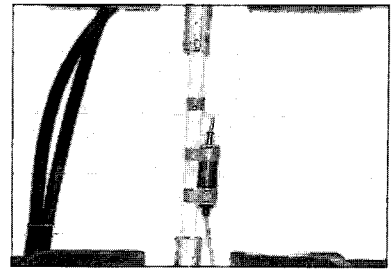


Fig. 9 Tensile test

간의 오차는 최대 50% 수준으로 보고하였고, 이러한 오차의 원인을 다음의 사항으로 판단하였다.

- (1) 모르타르 및 콘크리트는 해석상 가정된 균질한 재료가 아니다.
- (2) 해석은 water jet 등에 의한 계면의 거친 상태를 반영하지 못한다.
- (3) 건조수축은 장기간 진행되므로 크리이프 등의 영향이 있을 수 있다.

2.6 온도변화 및 건조수축에 의한 계면의 응력 예측

Fig. 2(b)의 계면 전단응력은 Fig. 1의 합성도에 Table 1에 정의된 재료의 성질과 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 의 온도변화에 대한 것이므로 식(1)을 이용하면, $200 \times 10^{-6} \text{ m/m}$ 의 유효변형률에 해당된다. 여기서 Chen의 방법은 선형해석이므로, 온도변화가 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 일 경우는 온도차에 비례하여 $400 \times 10^{-6} \text{ m/m}$ 의 유효변형률에 해당된다. 따라서 Chen의 방법은 선형해석이므로, 응력발생 변수가 온도변화, 두 층의 두께비(m)와 탄성계수 비(n)인 점을 감안하면, Figs. 5, 6과 같이 도표화된 해석결과를 이용하여 별도의 해석 없이도 계면에 발생하는 응력을 계산할 수 있다. 또한 계면에 발생하는 응력 예측 시 건조수축도 유효변형률 개념을 사용하여 온도변화와 같이 고려할 수 있다.

3. 실험 연구

3.1 실험 계획 및 방법

본 연구에서 기존 콘크리트 단면의 보수재료는 폴리머 시멘트 모르타르를 적용하였고, 보수 재료의 물성을 측정하고자 압축강도, 탄성계수, 건조수축, 열팽창계수에 대한 시험을 수행하였다. 한편, 단부에서 발생하는 전단응력이 계면에 미치는 영향을 확인하기 위하여, 중앙부와 단부로 구별하여 부착강도를 시험을 수행하였다. 또한 앵커가 단부의 부착강도에 미치는 영향을 확인하기 위하여, 앵커를 설치하지 않은 시험체와 설치한 시험체로 구분하여, 현장

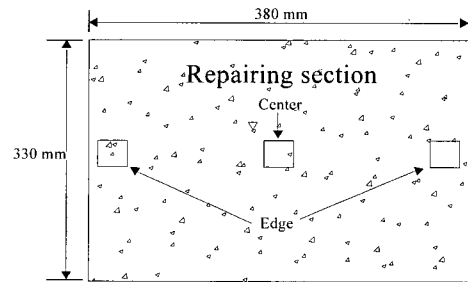


Fig. 10 Pullout test locations

과 동일한 조건으로 계면의 부착강도를 시험하였다. 압축강도시험은 KS L 5105에 따라 실시하였고, 이때 strain gage를 부착하여 탄성계수를 측정하였다. 건조수축시험은 KS F 2424의 다이얼 게이지 방법을 사용하였고, 열팽창계수는 재령 56, 225일에 Fig. 7과 같은 $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}$ 의 시험체를 사용하여 항온항습실의 온도를 $28.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에서 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 로 $-24.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 만큼 변화시킨 4시간 이후에 측정하였다.

단부의 전단보강을 위한 앵커는 섬유앵커를 사용하였으며, 사용된 섬유앵커는 ACI 440R-96³⁾에서 제시한 전단강도와 인장강도 시험방법을 통하여 성능을 평가하였다. 전단강도 시험은 ASTM D4475에 의거하여 Fig. 8과 같이 ISS(Inter laminar Shear Stress)시험으로 수행하였다.

인장강도의 시험방법은 ASTM D3916에 의해서 Fig. 9와 같이 수행하였다.

부착강도의 측정을 위하여 $380 \times 330 \times 80 \text{ mm}$ 의 콘크리트 슬래브를 먼저 타설하였다. 콘크리트 슬래브는 재령 91일에, 상부를 보수 재료의 부착이 양호하게 하기 위하여 거칠게 처리한 후 보수용 모르타르를 약 30mm의 두께로 타설하였다. 모르타르 타설 후 재령 28, 56, 225일에 부착강도를 측정하였으며, 계면에 발생하는 전단응력이 단부에 미치는 영향을 확인하기 위하여, Fig. 10과 같이 보수단면의 중앙부와 단부로 구별하여 측정하였다.

또한 보수체 계면단부의 전단응력의 증가로 인한 부착강도 저하현상을 방지하기 위하여 본 연구에서는 앵커를 이용하였다. 앵커를 이용한 효과를 확인하고자 현장 1개소를 선정하여 슬래브 하단에 Fig. 11과 같이 앵커를 설치하

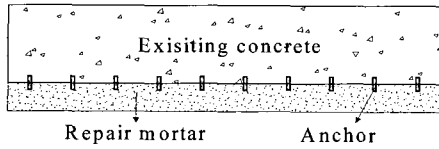


Fig. 11 Cross-section after anchor installation

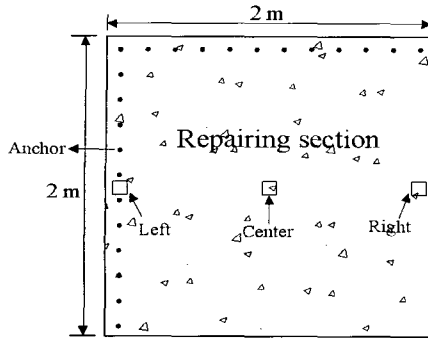


Fig. 12 Anchor and pullout test locations

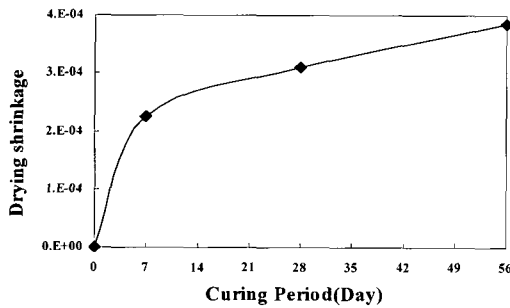


Fig. 13 Drying shrinkage of repairing material

고 보수용 모르타르를 타설하였다. 보수된 단면의 크기는 2,000×2,000×30 mm 이었고, 앵커가 단부에 미치는 영향을 확인하고자 Fig. 12와 같이 가장자리 두 면에는 앵커를 설치하지 않았다. 여기서, 적용된 앵커의 설계 절치는 다음과 같았다.

Step 1: 기존 콘크리트 강도 및 두께(h_1)와 보수 모르타르의 강도, 두께(h_2), 열팽창계수 및 보수면적 가정.

Step 2: 유효온도 변화량 산정(유효 온도변화량 = [보수 모르타르 열팽창계수 - 콘크리트 열팽창계수] × 온도변화)

Step 3: Chen et al.⁶⁾의 이론식을 이용한 계면응력해석 프로그램을 사용하여 계면에 발생하는 전단응력(τ_{xy}) 산정

Step 4: 단위면적당 전단력 계산

$$V_i = \frac{(h_1 + h_2)}{2} \times (\tau_{xy} - \tau_m)$$

여기서, V_i = 총 전단력

τ_m = 보수 모르타르의 부착응력

Step 5: 보수 단면의 단부에 작용하는 부족한 전단력(V_s) 계산

Table 4 Mechanical properties of material(unit: MPa)

Age	Compressive strength	Modulus of elasticity
7 days	57.7	21,990
28 days	66.7	22,850

Table 5 Fiber anchor strength(unit: MPa)

Shear strength	Tensile strength
98.65	1,186.2

Table 6 Pullout strength test result(unit: MPa)

Age	Center	Edge
28 days	1.75	1.29
56 days	1.86	1.33
225 days	2.47	0.92

※ Average of 3 tests.

$$V_s = V_i \times l_e$$

여기서, l_e = 보수단면 단부의 총 길이

Step 6: 앵커가 분담할 수 있는 전단력(V_a = 앵커의 전단강도×0.65(ACI 318-02²⁾ 부록 D 참조)을 산정하여 앵커 배치

$$\text{앵커의 갯수} = V_s / V_a$$

3.2 실험 결과 및 분석

본 연구에서 사용된 보수용 폴리머 시멘트 모르타르의 압축강도 및 탄성계수 시험 결과는 Table 4와 같다.

건조수축은 7, 28, 56일 동안 측정하였으며, 측정 결과는 Fig. 13과 같다. Fig. 13에 나타난 결과는 일반적인 폴리머 시멘트 모르타르의 28일 건조수축 범위⁵⁾인 $8 \sim 16 \times 10^{-4}$ m/m보다 적어 우수한 것으로 나타났다. 열팽창계수는 각각 재령 56, 225일에 시험체를 thermocouple을 사용하여 측정하였으며, 21.5×10^{-6} m/m/°C로 재령 56, 225일의 시험체 모두 동일하였다.

섬유앵커에 대한 성능평가를 위하여 전단강도와 인장강도에 대하여 시험을 하였으며, 측정된 결과는 Table 5와 같다. 사용된 섬유앵커는 보수 시 발생하는 계면 전단응력 보강에 적합하다고 판단된다.

기존 콘크리트와 보수모르타르 사이의 계면 전단응력이 단부에 미치는 영향을 실험을 통하여 측정된 결과 Table 6과 같았다. 모르타르의 타설 후 재령일의 증가에 따라 보수단면의 중앙부는 강도가 증가되는 현상을 보였다. 단부의 부착강도는 중앙부보다 재령별 약 26~63% 정도의 강도저하를 나타냈으며, 강도저하는 재령일이 증가에 따라 더 크게 나타났다. 이러한 현상은 재령일이 증가에 따라 건조수축 등에 의한 계면의 전단응력이 단부에 집중되어, 부착강도에 더 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

앵커가 기존 콘크리트와 보수 모르타르 계면의 전단응

Table 7 Pullout test results performed on sections with anchors(unit: MPa)

Age	Left ¹	Center	Right ²
7 days	1.15	1.23	0.92

1 : anchors were used
2 : no anchors

Table 8 Properties of materials used for Finite Element Analysis

	Existing concrete	Repair mortar
Modulus of elasticity (MPa)	23,025	21,990
Coefficient of thermal expansion(m/m/°C)	10×10^{-6}	21.5×10^{-6}
Poisson's ratio	0.18	0.16

력에 미치는 영향에 대한 실험의 결과는 Table 7과 같다. 앵커로 단부에 보강을 한 면의 부착강도는 중앙부의 강도보다 약 6% 정도의 강도차이를 보였고, 앵커를 보강하지 않은 면은 중앙부의 강도보다 약 25% 정도의 강도저하를 보였다. 단부에 앵커를 보강한 면과 보강하지 않은 면을 비교하면 약 20%의 강도차이를 보였으며, 이러한 현상은 앵커를 사용한 보강이 계면에 발생하는 전단응력을 저감시키는 효과가 크다는 것을 보여주는 것으로 판단된다.

4. 유한요소해석

4.1 유한요소해석 모델

실험 결과 나타난 단부에 앵커의 적용이 단부측 계면 전단응력을 저하시키는데 미치는 영향을 본 연구에서는 유한요소 해석을 통하여 검토를 시도하였다. 해석에 사용된 프로그램은 구조해석 범용 프로그램인 ADINA 8.1을 사용하였으며, 3차원 모델링을 통하여 온도변화에 따른 계면의 전단응력을 검토하였다. 본 해석에서는 기존 콘크리트와 보수단면이 접합되도록 설정하였다. 재료의 특성은 본 연구의 실험을 통하여 결정된 값을 사용하였으며, Table. 8에 정리하였다. Fig. 14는 앵커를 설치하지 않은 보수 단면의 모델이며, 이 모델을 Fig. 15와 같이 유한요소 모델링을 하였다. 한편 앵커를 고려한 단면을 유한요소 모델링하기 위하여 Fig. 16과 같이 이상화하였다. 단부의 앵커 구속 효과는 Fig. 17과 같이 보수단면의 단부에서 콘크리트가 모르타르를 구속하는 모델로 이상화하였다. 해석 모델의 온도하중재하는 도로교 설계기준¹⁾에 제시된 콘크리트 교의 온도변화 범위인 $\pm 15^\circ\text{C}$ 를 사용하여 모델 전체에 균등하게 재하하였다.

4.2 결과 및 분석

앵커를 보강하지 않은 보수단면의 해석 결과, 계면의 전

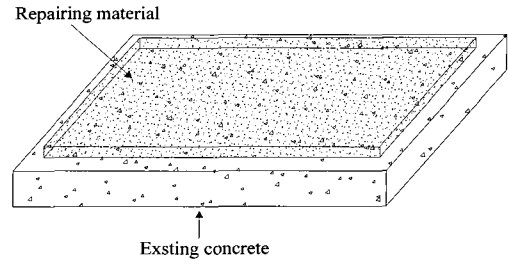


Fig. 14 Repairing section model

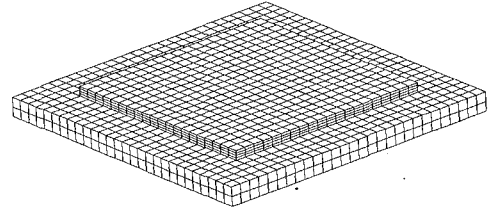


Fig. 15 Repairing section model by Adina

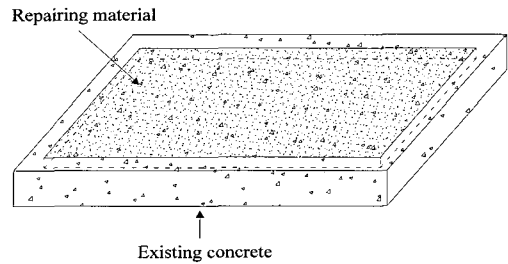


Fig. 16 Repairing section model with anchors

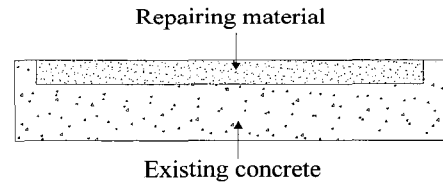


Fig. 17 Repairing cross-section by idealized anchor

단응력 분포는 Fig. 18과 같다. Fig. 18에서는 계면의 전단응력이 단부에 크게 일어나는 것을 보여주고 있으며, 앞선 Fig. 2(b)와 유사하게 최대 전단응력은 Fig. 18에서와 같이 양단 끝부분의 계면에 크게 나타났다. 한편 단부의 앵커 구속효과를 이상화한 응력 분포는 Fig. 19와 같다. 이러한 결과를 통하여 본 연구에서 시도한 유한요소해석 방법은 단부에 앵커의 적용 시 계면응력에 나타나는 영향으로 참고할 수 있을 것으로 판단되며, 본 연구의 단면과 다른 경우 그에 따른 추가적인 검토가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 Chen의 방법을 이용하여, 보수단면에 온도변화 및 건조수축으로 인해 발생하는 계면의 전단응력을 저감시키고자 단부에 앵커를 적용하였으며, 실험을 통



Fig. 18 Shear stress of repaired section at interface no anchors



Fig. 19 Shear stress of repaired section at with anchors interface

하여 단부에 설치된 앵커가 보수 단면에 어떠한 영향을 주는지 검토하였다.

건조수축으로 인해 계면의 단부에 나타나는 부착력 저하를 재령 28~225일간 실험을 통하여 측정하였으며, 중앙부보다 약 26~63%의 강도저하가 일어나는 것으로 나타났다. 실험의 결과로부터 나타난 단부의 부착력 저하를 해결하고자 본 연구에서는 단부에 앵커 설치를 고안하였다. 보수단면의 단부에 앵커를 설치했을 때, 앵커가 계면 강도에 미치는 영향을 분석하고자 현장 실험을 통하여 측정된 결과 중앙부와 비교하여 강도저하를 약 6% 정도로 감소시킬 수 있었으며, 앵커를 미설치 한 부분과 비교하면 약 20%의 강도차이를 보였다.

이러한 실험 결과를 통하여, 보수단면의 단부에 앵커를 설치하는 방법은 계면에 발생하는 전단응력을 크게 저감시킬 수 있는 방법이라고 판단된다. 단부에 앵커의 적용이 단부측 계면 전단응력을 저하시키는데 미치는 영향을 유한요소해석을 통하여 검토를 시도한 결과 단부에 앵커의 적용 시 계면응력에 나타나는 영향으로 참고할 수 있을 것으로 판단되며, 보수 단면의 형상과 재료의 특성이 본 연구의 단면과 다른 경우 그에 따른 추가적인 검토가 필요하다.

참고문헌

1. 건설교통부, 도로교 설계기준, 2000, pp.21~22.
2. ACI 318-02, *Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI 318R-02)*, American Concrete Institute, 2002, pp.399~436.
3. ACI 440R-96, *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic(FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Reported by ACI Committee 440, 1996, pp.23~24.
4. Birkland, H. W., "Differential Shrinkage in Composite Beam", *Journals of American Concrete Institute*, Vol.56, No.11, 1960, pp.1123~1136.
5. Chandra, S. and Ohama, Y., *Polymers in Concrete*, CRC Press, 1994, pp.81~185.
6. Chen, D., Cheng, S., and Gerhardt, T. D., "Thermal Stresses in Laminated Beam", *Journal of Thermal Stresses*, Vol.5, No.1, 1982, pp.67~84.
7. Choi, D. U., Fowler, D. W., and Wheat, D. L., *Thermally-Induced Interface Stresses in Polymer Concrete-Portland Cement Concrete Composite Beams*, ISAP99, International Colloquium on Adhesion between Polymer and Concrete, Dresden, Germany, 1999, pp.67~81.
8. Choi, D. U., Fowler, D. W., and Wheat, D. L., *Thermal Stresses in Polymer Concrete Overlays*, America Concrete Institute, ACI Special Publication SP-166, Properties and Uses of Polymers in Concrete, 1996, pp.93~122.
9. Choi, D. U. and Lee, C.-H., "Shrinkage-Induced Stresses at Early-Ages in Composite Concrete Beams", *KCI Concrete Journal*, Vol.14, No.1, 2002, pp.15~22.
10. Choi, D. U. and Lee, C. Y., "Anchor Design to Prevent Failures in Repaired Concrete Member Subjected to Thermal Changes", *Proceeding of Fourth ASPIC Chuncheon*, Korea, May 2003, pp.341~349.
11. Timoshenko, S. P., "Analysis of Bi-Metal Thermostats", *Journal of the Optical Society of America*, Vol.11, No.3, 1925, pp.233~255.

요 약

콘크리트 구조물을 보수 또는 보강하기 위해서 폴리머 콘크리트 혹은 폴리머 시멘트 모르타르를 종종 사용한다. 보수된 콘크리트 구조물의 일교차 또는 열악한 환경에 의한 온도강하 시 두 재료의 상이한 열팽창계수와 보수 재료의 초기양생 시 나타나는 건조수축으로 인해 계면에 응력이 발생하게 된다. 이러한 추가적으로 발생하는 응력은 계면의 부착력을 저하시켜 때로는 구조물에 큰 손상을 유발할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하고자 단면보수 및 증대를 위해 사용되는 보수 모르타르에 섬유앵커를 추가로 적용함으로써, 부착력 저하를 감소시키는지 여부를 실험을 통하여 검토하였다. 또한 보수 단면에 적용하는 앵커가 계면 전단응력에 미치는 영향을 유한요소해석을 통하여 검토를 시도하였다.

핵심용어 : 앵커, 단면보수 공법, 계면응력, 열응력, 폴리머 시멘트 모르타르