강-콘크리트 계면의 계면상수 결정 : 부착 및 비부착 슬립실험

이 타¹⁾ · 주영태²⁾ · 이용학^{1)*}

¹⁾건국대학교 토목공학과 ²⁾마이다스아이티

Determination of Steel-Concrete Interface Parameters : Bonded and Unbonded Slip Tests

Ta Lee,¹⁾ Young-Tae Joo,²⁾ and Yong-Hak Lee^{1)*}

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Konkuk University, Seoul 143-701 Korea

²⁾R&D Center, MIDAS IT, Seongnam 462-807, Korea

ABSTRACT Experiments on steel-concrete interface are performed to investigate and determine the mechanical roles and properties of interface parameters. The intrinsic different nature of bonded and unbonded interfaces are addressed based on the experimental observations that were obtained from two types of tests considering bonded and unbonded interfaces. The unbonded tests are performed for the specimens that are in unbonded when the initially bonded specimens are tested first. Four cases of lateral confinements including pure slip, and low and medium levels of lateral pressure are taken into account to investigate the effects of lateral confinements on interface behavior. It is shown that the maximum shear strengths, the levels of residual strengths and the Mode II fracture energy release rates are linearly related to the confinement levels. Based on the experimental evidences obtained from this study, the values of interface parameters required in a steel-concrete interface constitutive model will be presented in the companion paper.

Keywords : steel-concrete interface, interface parameters, interface slip test, Mohr-Coulomb failure criterion, confining pressure

1. 서 론

강-콘크리트 계면거동은 계면 법선방향과 접선방향으로 구성되는 직교평면 상에서 정의되며, 계면법선과 접선방향을 따르는 인장과 전단거동은 각각의 임계값에 도달한 이후에 파괴역학적으로 모드 I 탈부착거동과 모드 II 슬립거동을 하게 된다. Rabbat 등¹⁾과 Chiew 등²⁾의 계면거동실험으로부터 계면의 부착 및 비부착 여부에 따라 확연하게 다른 슬립거동이 관찰됨에 따라 계면상의 슬립거동은 부착슬립거동과 비부착 슬립거동으로 구분한다. 계면의 거동은 계면의 부착상태뿐만 아니라 계면법선방향으로 작용하는 구속압의 크기에 따라 매우 민감하게 작용한다. 계면의 부착상태와 법선방향 응력에 대해 계면거동이 갖는 민감성 때문에 계면의 거동현상 파악을 위한 실험은 매우 정교함을 요구하며 또한, 구조적 거동 실험을 통한 재료성질의 파악이라는 실험의 특수성으로 인해 실험 결과의 분석 또한 복잡하고 난해해서 Rabbat 등,¹⁾ Sahkir-Khalil,^{3,5)} Chajes 등,⁶⁾ Chiew 등,²⁾ Barnes 등⁷⁾을 포함하

는 소수의 연구자에 의해 제한적 범위 내에서 수행되어 왔다.

계면거동에 관한 실험적 연구에서의 어려움과는 달리 구성모델의 개발을 중심으로 하는 이론적 연구는 Katona⁸⁾의 Lagrange 승수법(Lagrange multiplier method)과 Stankowski 등^{9,10)} 및 Lofti 등¹¹⁾의 Mohr-Coulomb 파괴규준에 근거하는 연속체 소성역학을 중심으로 활발히 진행되어 왔다. Carol 등¹²⁾이 부착계수 및 마찰계수의 두 계수로서 쌍곡선형상 파괴포락선의 팽창과 수축을 제어하는 계면구성모델을 연속체 소성역학에 근거하여 개발하고, 골재와 시멘트풀 간의 계면으로 국부화되는 콘크리트의 균열거동 해석에 적용한 예는 이론적 연구의 깊이와 다양성을 보여주는 적절한 예가 된다. 그러나 이러한 계면구성모델의 개발과 이를 이용한 거동해석에서 모델을 구성하는 각 변수의 적절한 값의 결정과 해석 결과의 검증에 위한 재료차원 성격의 실험 결과의 부족은 수치해석 결과의 검증과 지속적인 연구개발에 대한 커다란 장애가 되고 있다.

구성변수 값의 결정에 있어 실험 결과의 부족으로 인한 어려움을 기존의 실험 결과들에 대한 분석을 통해 해결하고자 하는 노력이 최근에 주영태^{13,14)}를 통해 수행되었다. 주영태^{13,14)}는 모드I 및 모드II 파괴에너지 방출률로

*Corresponding author E-mail: leeyo@konkuk.ac.kr
Received June 18, 2009, Revised September 14, 2009
Accepted September 24, 2009
©2009 by Korea Concrete Institute

서 Mohr-Coulomb 파괴포락선의 팽창과 수축을 제어하는 구성모델을 개발하고 요구되는 구성변수의 값을 Rabbat 등,¹⁾ Sahkir-Khalil³⁻⁵⁾ 및 Chiew 등²⁾의 각기 다른 실험 결과에 근거하여 결정함으로써 실험 결과에 근거하여 구성변수의 값을 결정하는 해석적 방법을 제시하였다. 그러나 이러한 계면거동특성을 정의하는 계면상수의 값이 각기 다른 목적으로 수행된 강-콘크리트 계면거동 실험 결과에 근거하여 결정되었음을 고려할 때 각 구성변수 값의 적절성 검증을 위한 단일 목적의 일관된 실험수행이 요구된다.

이 논문에서는 강-콘크리트 계면의 거동현상을 정의하는 구성변수의 물리적 특성 파악과 크기를 결정하기 위한 목적으로 강-콘크리트 계면에 대한 슬립거동실험을 수행하였다. 구속압을 받는 계면의 취성으로부터 연성까지의 파괴거동 성질을 포괄하기 위해 $\sigma_N=0, 0.2, 0.5, 1.0$ MPa를 포함하는 네 종류 구속압 경우를 고려하여 각 구속압의 경우당 3개씩 총 12개의 시편을 제작하였다. 부착계면과 비부착계면 간의 거동현상 차이를 규명하기 위해 부착계면에 대한 파괴실험을 먼저 수행한 후에 분리된 계면에 대해 비부착계면 실험을 수행하였다. 강-콘크리트계면 실험으로부터 관찰된 부착계면 및 비부착계면의 거동특성 차이 및 구속압의 변화에 따른 거동변화를 포함한 실험결과의 분석내용을 중심으로 구성된 이 논문에 이어지는 후속논문에서는 해석적 방법에 의해 계면상수의 값을 결정하는 방법과 결정된 계면상수 값을 이용하는 계면유한요소해석을 수행하여 실험 결과의 예측 및 비교를 중심으로 구성하였다.

2. 강-콘크리트 계면의 거동특성

강-콘크리트 계면 상의 거동성질을 정의하는 재료적 성격의 물성종류를 결정하고 대응하는 크기를 결정하기 위해서는 초기 탄성거동으로부터 파괴에 이르기까지의 점진적 파괴진행과정을 정확하고 포괄적으로 묘사할 수 있는 파괴규준의 정의를 필요로 한다. 계면의 파괴는 Fig. 1에 보인 바와 같이 계면의 법선 방향과 접선방향을 따르는 인장응력과 전단응력이 각각의 임계값에 도달한 이후에 모드 I 탈부착거동 및 모드 II 슬립거동으로서 진행되며 이에 따라 결과적인 파괴는 모드 I 부착파괴 및 모드 II 슬립파괴로서 정의된다.

계면의 파괴규준은 인장과 전단으로 구성되는 응력특성을 고려하여 Mohr-Coulomb 파괴규준에 근거하여 개발되어 왔으며, Plesha¹⁵⁾와 Beer¹⁶⁾ 직선형 파괴규준, Stankowski 등^{9,10)}의 포물선형 파괴규준, Lotfi 등¹¹⁾과 Carol 등¹²⁾의 쌍곡선형 파괴규준 등의 연구 결과를 찾아 볼 수 있다. 그러나 이러한 파괴규준은 Rabbat 등,¹⁾ Sahkir-Khalil,³⁻⁵⁾ Chajes 등,⁶⁾ Chiew 등,²⁾ Barnes 등⁷⁾이 비부착계면에 대한 거동실험을 통해 관찰한 비부착계면의 거동성질이 부착계면의 그것과 확연하게 다르다는 실험결과에 근거할 때 부착계면으로 적용성이 제한되는 단점을 갖는다.

Fig. 1 Stress-relative displacement relationships

Coulomb의 마찰법칙에 따라 수직구속력에 대한 마찰력의 비로서 정의하는 마찰계수가 콘크리트의 건조수축이나 외적하중 작용 혹은 의도된 목적으로 인해 계면이 분리된 비부착계면의 경우에는 1보다 적으나 부착계면의 경우에는 1보다 큰 것으로 관찰된 Rabbat 등¹⁾과 Chiew 등²⁾의 실험 결과는 이에 대한 기본적인 근거가 된다.

이 논문에서는 부착계면 뿐만 아니라 비부착계면의 거동까지 포괄하기 위해 주영태^{13,14)}에 의해 제안된 계면파괴규준에 근거하여 거동현상을 대표하는 물성의 종류와 실험의 수행에서 요구되는 구속압의 크기와 종류를 결정하였다. 부착 및 비부착계면의 점진적 파괴거동을 묘사하기 위해 계면 법선방향과 접선방향을 따르는 두 응력의 함수로서 Mohr-Coulomb의 파괴규준에 근거하여 포물선형상으로 개발된 이 파괴규준은 다음과 같이 표현된다.

$$F(\sigma_N, \sigma_T, \phi_b, b, k) = \sigma_T^2 - \phi_b^2 \{ (\sigma_N - b)^2 - 2k(\sigma_N - b) \} \quad (1)$$

여기서 σ_N =계면법선방향 응력, σ_T =계면접선방향 응력, b =부착계수, k =곡률계수, ϕ_b =부착마찰계수를 각각 정의한다. Fig. 2는 식 (1)의 파괴포락선 관계를 나타낸다.

식 (1)에서 부착된 계면의 마찰계수를 정의하는 부착마찰계수 ϕ_b 는 비부착된 계면의 마찰계수를 정의하는 비부착마찰계수 ϕ_u 에 부착강도에 비례하는 부가적 마찰계수를 추가하여 다음과 같이 주영태^{13,14)}는 표현하고 있다.

$$\phi_b = \phi_u + \eta b \quad (2)$$

식 (2)에서 부가적 마찰계수를 정의하는 우변 둘째 항

Fig. 2 Three-parameter failure envelope for steel-concrete interface

은 부착된 경우의 마찰계수가 비부착 경우의 마찰계수에 비해 증가하는 결과를 보여준 Rabbat 등¹⁾과 Chiew 등²⁾의 실험 결과에 근거하여 부착강도 b 를 사용하여 표현하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 2에 나타낸 식 (1)의 파괴포락선 형상에 근거하여 실험을 계획하였으며 이를 통해 실험의 종류와 대응하는 하중의 크기를 법선방향으로 작용하는 구속응력과 접선방향으로 작용하는 전단응력으로 구분하여 결정하였다.

3. 강-콘크리트 계면의 슬립거동실험

3.1 실험 일반사항

부착계면 및 비부착계면의 거동성질을 관찰하고 점진적 파괴의 진행 동안 발생하는 계면상태의 물리적 변화를 에너지 관점에서 정의하기 위해 $\sigma_N=0$ 의 순수전단슬립을 포함하여 $\sigma_N=0.2, 0.5, 1.0$ MPa의 네 종류 구속압에 대해 각 3개씩 총 12개의 시편을 제작하여 실험을 수행하였다. 이러한 구속압의 크기는 구속압이 증가함에 따라 전단슬립에 대한 저항성이 증가하는 Fig. 3의 파괴포락선 성격을 고려하기 위해 낮은 구속압으로부터 비교적 높은 구속압까지 포함하도록 하였다.

부착계면 및 비부착계면의 거동을 포함하는 식 (1)의 파괴포락선의 성격을 고려하여 부착계면과 함께 비부착

Fig. 3 Illustration of three confining pressure in failure surface

계면에 대한 거동실험을 수행하였다. 부착계면의 슬립실험 경우에는 구속응력 $\sigma_N=0$ 의 순수전단슬립을 포함하여 $\sigma_N=0.2, 0.5, 1.0$ MPa의 구속압 경우에 대해 실험을 수행하였으며, 비부착 슬립실험의 경우에는 낮은 구속압이 작용하는 경우에 연직하중을 제어하는 어려움 때문에 $\sigma_N=0.5$ 및 1.0 MPa의 비교적 높은 구속압을 갖는 두 경우에 대해 실험을 수행하였다. 제작된 총 12개의 공시체에 대해 부착된 상태로 먼저 부착실험을 1회 수행하고 파괴된 계면에 대해 특별한 표면처리 없이 비부착된 상태로 비부착계면에 대한 거동실험을 수행하였다.

3.2 실험체의 제작

실험체는 강재와 콘크리트에 균등한 압력이 가해지도록 Rabbat 등¹⁾과 Chiew 등²⁾의 실험을 고려하여 Fig. 4(a)에 보인 바와 같이 폭 200 mm, 높이 200 mm, 두께 10 mm의 강재판 사이에 폭 160 mm, 높이 150 mm, 두께 60 mm의 콘크리트를 타설하여 제작하였다.

콘크리트 타설을 위해 강재앵글과 목재를 사용하여 강재판 사이의 거푸집을 제작하였으며 강재표면에 방수처리를 하여 타설된 콘크리트가 누출되지 않도록 하였다. 콘크리트 타설 후에는 습도 60%, 온도 22°C의 항온항습실에서 28일 동안 양생하였다. 강-콘크리트 계면실험체 이외에 실험에 사용된 콘크리트의 물성값 파악을 목적으로 150 mm × 300 mm의 원형 공시체를 제작하여 동일한 항온항습 조건에서 양생하였다.

보통 포틀랜드시멘트와 조립골 2.2 및 굵은골재 최대 치수 20 mm의 골재를 사용하여 제조한 콘크리트의 배합 설계는 Table 1과 같다.

제령 28일에 원형공시체에 대한 강도실험을 수행하여 일축압축강도 32 MPa와 탄성계수 37,200 MPa 및 포아송비 0.22를 각각 얻었다. 강재판의 인장강도 및 탄성계수의 결정을 위해 3개의 인장 시편을 KS B 0801에 따라 제작하였고 인장실험을 수행하여 항복강도 335 MPa 인장강도 460 MPa 및 탄성계수 188,000 MPa를 각각 얻었다.

3.3 실험의 수행

3.3.1 실험체의 계측

실험은 변위 및 하중제어가 가능한 1,000 kN 용량의 UTM을 사용하여 수행하였으며 채널당 0.02초의 측정속도로써 데이터 수집 장치를 사용하여 계측 결과를 저장하였다.

실험체에 대한 하중은 Fig. 4(b)와 (c)에 보인 바와 같이 실험체를 바이스를 사용하여 고정시킨 후에 실험체 상단부에 하중판을 설치하고 재하하였다. $\sigma_N=0.2, 0.5, 1.0$ MPa의 세 구속압 경우에 대해서는 바이스와 강재판 사이에 로드셀을 설치하고 각 구속압의 경우에 대해 4.8 kN, 12 kN, 24 kN의 압축력을 바이스를 이용하여 도입하였다. 이때 구속압이 균등하게 콘크리트부에 가해지도록 하기 위해 바이스와 접촉면에 강재판을 추가로 설치

Fig. 4 Schematic description of slip test

Table 1 Mix proportion

Cement (N/m ³)	Water (N/m ³)	Fine aggregate (N/m ³)	Coarse aggregate (N/m ³)	W/C (%)	Slump (mm)
3,834	1,716	7,171	10,320	44.8	100

하였다.

실험체의 계면에 작용하는 수직하중은 실험체 상단에 Fig. 4(c)와 같이 로드셀을 설치하여 측정하였으며 실험체의 변위는 콘크리트부의 상부, 중앙부, 하부에 각각 변형률게이지를 부착하여 상부에서 재하되는 하중에 의해 콘크리트에 발생하는 변형률을 콘크리트 깊이에 따라 측정하였고, 콘크리트 하단부에는 LVDT를 설치하여 계면

상에 발생하는 슬립거동량을 측정하였다. Fig. 5는 이러한 측정센서가 부착된 실험체의 실험 형상을 보여준다.

3.3.2 실험체의 거동제어

바이스를 사용하여 요구되는 크기의 구속압을 도입한 후에 슬립하중을 작용시킨 구속압을 받는 경우의 실험체에는 계면의 파괴거동이 진행됨에 따라 콘크리트부에 발생하는 횡 방향 체적팽창이 억제되어 구속압의 변화가 발생하게 되는데 이 구속압의 변화는 Fig. 4(b)에 보이는 강재판에 설치된 로드셀을 이용하여 지속적으로 측정하였다.

모든 실험은 계면의 경화거동 뿐만 아니라 연화거동까지 관찰하기 위해 변위제어로서 수행하였다. 구속압이 0인 순수전단슬립실험의 경우에 최대 하중점 이전의 변위영역이 극히 짧음으로 인해 최대하중점을 측정하지 못할 우려가 있어 변위제어 방법 이외에 하중제어 방법을 별도로 수행하여 측정된 최대하중 값을 비교함으로써 실험 결과의 신뢰도를 검증하였다. 실험체에 작용하는 수직하중은 1.0 mm/min의 변위속도로 재하하였으며, 콘크리트 하단부의 LVDT에서 측정한 슬립변위가 10 mm에 이르렀을 때 충분한 슬립이 발생한 것으로 가정하고 실험을 종결하였다.

4. 슬립 실험 결과 및 분석

4.1. 부착 슬립 실험

Fig. 6은 $\sigma_N = 0, 0.2, 0.5, 1.0$ MPa의 네 경우 구속압의 경우에 대한 부착된 계면 상의 평균전단응력-슬립변위($\sigma_{Tb} - u_{Tb}$) 관계를 보여준다. 여기서 평균전단응력은 수직하중을 계면의 면적으로 나누어 계산하였으며, 변위는 실험체의 콘크리트 하단부에 설치한 LVDT로부터 측정한 결과로서 나타내었다. 각 구속응력의 경우에 대해서 최대평균전단응력과 평균잔류응력 및 모드 II 파괴에너지 방출률 G_{fb}^{II} 을 세 개 실험체의 평균값을 취하여 결정하였다. 순수슬립실험의 경우로부터 얻어진 최대평균전단응력 σ_{Tb}^{max} 는 0.02 MPa이었으며, 대응하는 파괴에너지 방출률 G_{fb}^{II} 는 0.012 N/mm이었다. 모드 II 파괴에너지는 Fig. 7에 보인 파괴에너지 방출률의 개념에 따라 실험으로부터 얻은 전단응력-계면슬립변위 곡선으로부터 결정

Fig. 5 Test setup

Fig. 6 Test results of bonded specimen

Fig. 7 Mode II fracture energy

하였다. Fig. 6으로부터 구속압이 증가함에 따라 최대전단응력과 대응하는 계면슬립변위가 증가하며 또한, 연화영역에서의 잔류응력의 수준 역시 높아지고 있음을 알 수 있다. 구속압의 증가에 따른 최대전단응력과 잔류응력의 크기변화를 관찰하기 위해 각각의 관계를 Fig. 8에 나타냈다. 그림의 관계로부터 구속압의 증가에 따라 최대전단응력과 잔류응력이 거의 선형적 관계로서 증가하는 관계에 있음을 알 수 있다.

Fig. 9는 Fig. 7의 파괴에너지 방출률 개념에 따라 각 구속압의 경우에 대한 모드 II 파괴에너지 G_{fu}^{II} 를 계산한 결과를 보여준다. 그림으로부터 모드 II 파괴에너지

G_{fb}^{II} 와 σ_N 구속압 간에 선형적 관계가 있음을 관찰할 수 있으며, 이 관계에 근거하여 선형회귀분석한 결과 $G_{fb}^{II} = (2.345\sigma_N + 0.012) \text{ N}\cdot\text{mm}/\text{mm}^2$ 의 관계를 얻었다.

4.2 비부착 슬립실험

Fig. 10은 구속압 $\sigma_N = 0.5 \text{ MPa}$ 및 1.0 MPa 를 받는 비부착계면 실험체의 평균전단응력과 슬립변위와의 관계를 보여준다. 부착실험체의 경우와 동일한 방법으로 평균전단응력의 크기를 계산하였으며 슬립변위 또한 콘크리트 하단부에 설치된 LVDT를 사용하여 측정한 결과로서 나타내었다. 비부착계면 실험체의 최대평균전단응력은 부착계면실험체에 비해 0.5 MPa 구속압의 경우에 75%, 1.0 MPa 구속압의 경우에 70%의 감소 결과를 보여주고 있다.

잔류응력 또한 0.5 MPa 구속압의 경우에 80%, 1.0 MPa 구속압의 경우에 67%의 정도로 비부착계면의 경우가 부착계면의 경우에 비해 감소하는 결과를 보여준다. 이러한 결과로부터 비부착계면의 경우가 부착계면의 경우에 비해 슬립저항성이 현저히 감소하며 감소정도는 구속압이 증가함에 따라 커지는 경향을 나타낸다. Fig. 11은 두 구속압의 경우에 대한 최대전단응력과 잔류응력의 크기를 각각 보여주고 있다. 구속압의 증가에 따라 최대전단응력과 잔류응력의 수준이 거의 선형적인 관계로 증가하며, 이러한 결과는 부착계면의 경우와 유사한 경향을 나타낸다.

구속압의 증가에 따른 파괴에너지의 변화를 관찰하기 위

(a) Maximum shear stress

(b) Residual stress

Fig. 8 Maximum shear stress value and residual stress levels for bonded

(a) $\sigma_N = 0.5$ MPa confinement

(b) $\sigma_N = 1.0$ MPa confinement

Fig. 10 Test result of unbonded specimen

Fig. 9 Mode II fracture energy G_{fb}^{II} for bonded specimen

해 부착계면의 경우와 동일한 방법으로 구속압 $\sigma_N = 0.5$ MPa와 1.0 MPa 경우에 대해 모드 II 파괴에너지 G_{fu}^{II} 를 계산한 결과를 Fig. 12에 보여준다. 그림으로부터 모드 II 파괴에너지 G_{fu}^{II} 와 구속압 σ_N 간의 관계는 부착계면의 경우와 유사한 선형적 관계로서 관찰되며 이러한 관계에 근거하여 선형회귀분석을 통해 $G_{fu}^{II} = 0.203\sigma_N$ 의 관계를 얻었다.

4.3 구속압의 제어

구속압이 작용하는 경우의 실험체는 바이스에 의해 구속압이 도입된 이후에 슬립하중 작용으로 인한 계면슬립이 진행됨에 따라 콘크리트부에 발생하는 횡방향 체적팽창이 바이스에 의해 억제되어 구속압이 증가하게 된다. 이때 실험체의 횡방향 경계조건은 실험에서 가정된 일정하중을 받는 경계조건이 아닌 일정 변위를 받는 경계조건이 된다. 이러한 횡방향 경계조건 상의 문제는 원천적으로 횡방향 구속응력이 유압식 서보(hydraulic servo)를 사용하는 하중제어 방식을 적용하여야 하나 가용한 실험장비의 제한성과 구속되는 횡방향 변위의 크기가 크지 않다는 공학적 판단에 근거하여 바이스를 사용하는 일정 변위경계조건으로 실험을 수행하였다.

이때 발생하는 구속압의 변화를 강제판에 설치된 로드셀을 통해 계측하였으며, Fig. 13에 바이스를 통해 도입된 각 구속압의 경우에 대한 구속압의 변화를 나타냈다. 그림에 보인 바와 같이 구속압은 최대평균전단응력점까지 점진적으로 증가하여 최대응력점에 도달한 이후에는 일정한 값으로 유지되며, 도입된 구속압이 증가함에 따라 경계조건문제로 인한 구속압의 변화 또한 증가하는

Fig. 11 Maximum shear stress values and residual stress levels for unbonded

Fig. 12 Mode II fracture energy G_{fb}^{II} for unbonded

경향을 보여준다. 이는 계면슬립으로 인하여 발생하는 전단팽창현상(shear dilatancy)으로서 이해되며, 탄-소성론의 소성흐름론(plastic flow theory)에 근거할 때 최대응력점

Fig. 13 Effects of lateral boundary condition on confining pressure

이전까지의 거동에서 소성흐름은 경계조건으로 인한 구속응력의 증가와 더불어 소성흐름의 법선방향성분이 감소하는 방향으로, 파괴포락선에 수직인 방향각 보다 더 큰 방향각을 가지고 진행되는 것으로 분석된다. 반면에 연화영역에서는 구속응력이 일정한 값을 유지하는 결과를 통해 소성흐름 방향은 최대응력점에서 형성된 방향으로 진행함을 알 수 있다. 이러한 구속압의 역제를 통해 실험으로부터 관찰된 결과는 탄-소성론에 근거하는 계면 구성모델링에서 구속압의 변화에 따른 소성흐름의 방향 결정을 목적으로 비상관(non-associated) 소성흐름법칙을 적용하는 경우에 소성흐름의 방향을 결정하기 위한 기초 자료로서 사용성을 갖는다.

5. 결 론

강-콘크리트 계면의 거동을 정의하는 계면상수의 결정을 목적으로 부착된 계면과 비부착된 계면에 대한 슬립 거동실험을 수행하였다. 실험체에 작용한 구속압은 계면의 파괴를 규정하는 파괴포락선의 형상을 정의하기 위해 낮은 구속압과 중간정도 크기의 구속압을 고려하여 결정하였으며, 각 구속압의 경우에 대해 슬립거동실험을 수행하여 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 구속압이 증가함에 따라 최대평균전단응력과 잔류응력의 수준은 선형적 관계로 증가하며 최대평균전단응력점에 대응하는 변위 또한 증가하는 결과를 통해 강도뿐만 아니라 연성도 역시 증가함을 확인하였다.
- 2) 비부착계면의 최대평균전단응력은 구속압 $\sigma_N = 0.5$ 와 1.0 MPa의 경우에 부착계면의 75%와 70%로 각각 감소하였으며, 잔류응력의 수준 또한 80%와 67%로 각각 감소한 결과를 통해 비부착계면의 최대평균전단응력 및 연화영역의 잔류응력의 크기는 구속압의 존재에도 불구하고 부착계면의 경우에 비해

현저히 감소하며 이러한 감소정도는 구속압이 증가함에 따라 커지는 경향을 나타냈다.

- 3) 부착계면의 모드 II 파괴에너지 G_{fb}^{II} 및 비부착계면의 모드 II 파괴에너지를 구속압의 크기로서 나타낸 결과 각각 $2.345\sigma_N + 0.012$ 와 $0.203\sigma_N$ 의 선형적 관계를 얻었다.
- 4) 바이스에 의해 구속압을 도입하는 경우에 실험체는 일정구속압 경계조건이 아닌 일정 변위 경계조건이 되어 슬립파괴거동의 진행 동안에 구속압은 증가하게 되나 이러한 증가는 최대응력점에 도달한 이후에는 일정한 값으로 유지되는 결과를 통해 계면을 슬립으로 인해 발생하는 전단팽창현상을 확인하였다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다(과제번호: 07-기술혁신-A01).

참고문헌

1. Rabbat, B. G. and Russell, H. G., "Friction Coefficient of Steel on Concrete or Grout," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 3, 1985, pp. 505~515.
2. Chiew, S. P., Dong, Y. X., and Sho, C. K., "Concrete-steel Plate Interface Characteristics for Composite Construction," *Computing Developments in Civil and Structural Engineering*, 1999, pp. 35~40.
3. Shakir-Khalil, H., "Pushout Strength of Concrete-filled Steel Hollow Sections," *The Structural Engineer*, Vol. 71, No. 13, 1993, pp. 230~233.
4. Shakir-Khalil, H., "Resistance of Concrete-filled Steel Hollow Sections," *The Structural Engineer*, Vol. 71, No. 13, 1993, pp. 234~243.
5. Shakir-Khalil, H. and Hassan, N. K. A., "Push-out Resistance of Concrete-filled Tubes," *Tubular Structures*, Grundy, P., Holgate, A., and Wong, W. (eds), Melbourne, Australia, A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 1994, pp. 285~291.
6. Chajes, M. J., Finch, W. W. Jr., Januszka, T. F., and Thomson, T. A. Jr., "Bond and Force Transfer of Composite Material Plates Bonded to Concrete," *ACI Struct. J.*, Vol. 93, No. 2, 1996, pp. 208~217.
7. Barnes, R. A. and Mays, G. C., "The Transfer of Stress through a Steel to Concrete Adhesive Bond," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 21, 2001, pp. 495~502.
8. Kantona, M. G., "A Simple Contact-Friction Interface Element with Applications to Buried Culverts," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 7, No. 3, 1983, pp. 371~384.
9. Stankowski, T., Runesson, K., and Sture, S., "Fracture and Slip of Interfaces in Cementitious Composites. I: Characteristics," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 119, No. 2, 1993, pp. 315~327.
10. Stankowski, T., Runesson, K., and Sture, S., "Fracture and Slip of Interfaces in Cementitious Composites II : Implementation," *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 119, No. 2, 1993, pp. 315~327.
11. Lotfi, H. R. and Shing, P. B., "Interface Model Applied to Fracture of Masonry Structures," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 1, 1994, pp. 63~79.
12. Carol, I., Prat, P. C., and Lopez, C. M., "Normal/Shear Cracking Model : Application to Discrete Crack Analysis," *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 123, No. 8, 1997, pp. 765~773.
13. 주영태, 이용학, "강-콘크리트 계면파괴에 관한 비선형 유한요소해석," 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 16권, 2호, 2004, pp. 105~108.
14. 주영태, 부착 및 슬립을 고려한 강-콘크리트 계면거동의 점진적 유한요소해석, 건국대학교 토목공학과, 박사학위 논문, 2005.
15. Plesha, M. E., "Constitutive Models for Rock Discontinuities with Dilatancy and Surface Degradation," *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol. 11, No. 4, 1987 pp. 345~362.
16. Beer, G., "An Isoparametric Joint/Interface Element for Finite Element Analysis," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 21, No. 4, 1985, pp. 585~600.

요약 강-콘크리트 계면거동의 성질을 정의하는 계면변수를 파악하고, 구성모델의 성격을 정의하는 구성변수의 물리적 특성 파악과 값의 크기를 결정하기 위해 강-콘크리트 계면에 대한 거동실험을 수행하였다. 구성변수는 포괄적인 적용을 목적으로 부착계면 뿐만 아니라 비부착계면의 거동까지 포함하기 위해 최근에 Mohr-Coulomb 파괴규준에 근거하여 제안된 구성모델을 기준하여 결정하였으며, 구속압을 받는 계면의 취성으로부터 연성까지의 파괴거동 성질을 고려하기 위해 낮은 구속압 및 중간크기의 구속압을 포함하는 네 종류의 구속압을 고려하였다. 실험 결과에 대한 분석을 통해 최대평균전단응력과 잔류응력 및 모드 II 파괴에너지 방출률과 구속압 간의 관계는 각 경우가 선형적 관계에 있음을 확인하였다. 이 논문에서 얻어진 실험 결과에 근거하여 이어지는 후속 논문에서는 해석적 방법에 의한 계면상수 값의 결정과 결정된 계면상수 값을 이용한 계면유한요소해석을 수행하여 계면상수 값의 적절성을 검증하였다.

핵심용어 : 강-콘크리트 계면, 계면상수, 계면슬립실험, Mohr-Coulomb 파괴규준, 구속압