

전단하중을 받는 앵커시스템 정착부 콘크리트의 파괴거동

Fracture Behavior of Concrete Anchorage Zone of Anchor System subjected to Shear Load

손지웅* 송하원** 변근주**
Son, Ji Woong Song, Ha Won Byun, Keun Joo

ABSTRACT

In this paper, structural behaviors of anchor systems subjected to shear loads are analyzed by using fracture analysis and experiments. Two dimensional finite element analyses of concrete anchor systems to predict breakout failure of concrete through progressive fracture are carried out by utilizing the so-called embedded crack model. Three dimensional finite element analyses are also carried out to investigate the fracture behavior of anchor systems having different effective lengths, edge distances, spacings between anchors, and direction of loads. Results of analyses are compared with both experimental results and design values of ACI code on anchor, and then applicability of finite element method for predicting fracture behavior of concrete anchor systems is verified.

1. 서 론

앵커시스템은 다양한 구조물에 적용되어 그 적용성이 더욱 커지고 있으며 이에 따라 앵커시스템의 극한저항능력과 파괴거동의 예측에 대한 연구는 공학적으로 큰 의미가 있다. 현재까지 수치해석을 위해 사용된 파괴모델들은 앵커의 인장거동, 특히 콘크리트 파괴에 대한 해석에 잘 적용되는 것으로 보고되고 있으나 전단하중, 또는 조합하중 등에 적용된 앵커시스템에 관해서는 연구가 많이 부족한 실정이다. 따라서 파괴인자의 영향을 고려한 앵커시스템의 거동에 대한 이해는 아직 완전히 정립된 상태가 아니며 이를 위하여 앵커시스템의 파괴실험과 파괴해석이 필요하다. 본 연구에서는 전단하중을 받는 단일 앵커시스템에 대하여 매입균열법을 이용한 이차원 해석을 수행하여 균열의 진행, 하중-변위 곡선을 예측하고, 이를 실험결과와 비교하여 검증한다. 또한 분포균열 모델을 이용한 삼차원 해석을 통하여 이차원 해석결과의 검증과 함께 관입깊이, 연단거리, 앵커간격, 적용된 하중방향의 변화에 따른 영향인자가 앵커시스템에 미치는 거동을 연구하도록 한다.

* 정회원, 현대건설 엔지니어

** 정회원, 연세대학교 토목공학과 교수

2. 앵커시스템의 파괴거동

전단하중을 받는 콘크리트 앵커시스템에 대한 거동을 알아보기 위해 전단 및 반복하중에 대한 저항력 및 거동실험이 수행되었다.¹⁾ 볼트형 앵커를 타설시 위치시킨 C/P 앵커시편 12개와 타설 28일 후의 콘크리트에 매입한 P/앵커 36개의 시편이 제작되었다. 관입깊이는 10cm와 15cm 이며, 연단거리는 콘크리트파괴를 유도하기 위한 연단거리 10cm와 앵커 파괴를 유도하기 위한 연단거리 30cm 두 종류에 대해서 이루어 졌다. 실험체의 명칭 및 치수, 정적하중 실험결과는 표 1과 같다.

표 1. 실험체의 명칭 및 치수, 정적하중 실험결과

기호		의미					
d10 / d30		연단거리 10cm / 연단거리 30cm					
h10 / h15		관입깊이 10cm / 관입깊이 15cm					
C / P		cast-in-placed anchor / post-installed anchor					
GN / GW		narrow group anchor / wide group anchor					
시편	연단거리 d _e (cm)	관입깊이 h _{ef} (cm)	측정 파괴하중 (kN)		설계값 (kN)	측정값 설계값	
d10-h15-C-S	10cm	15cm	22.6	평균: 25.67 (표준편차 : 0.37)	23.9	1.07	
			29.7				
			24.8				
d10-h15-P-S	10cm	15cm	28.6	평균: 29.3 (표준편차 : 0.25)	23.9	1.22	
			32.1				
			27.3				
d10-h10-P-S	10cm	10cm	26.3	평균: 24.9 (표준편차 : 0.09)	22.7	1.09	
			25.1				
			24.5				
d30-h15-C-S	30cm	15cm	104.5	평균: 114.7 (표준편차 : 1.16)	109.1	1.05	
			127.0				
			112.7				
d30-h15-P-S	30cm	15cm	115.6	평균: 114.6 (표준편차 : 0.44)	109.1	1.05	
			118.3				
			109.9				
d30-h10-P-S	30cm	10cm	82.3	평균: 83.1 (표준편차 : 0.12)	109.1	0.76	
			83.9				
			실패				
GN-h15-P-S	10cm	15cm	31.6	평균: 34.2 (표준편차 : 0.23)	32.9	1.04	
			36.1				
			34.9				
GW-h15-P-S	10cm	15cm	44.1	평균: 45.9 (표준편차 : 0.52)	47.8	0.96	
			41.8				
			51.7				

3. 앵커시스템의 유한요소 해석

본 연구에 사용된 매입균열법은 요소내에 불연속변위를 매입하여 이산균열법의 결점을 보완한 방법으로 이산화된 균열진전에 따른 콘크리트 파괴를 해석할 수 있다.²⁾ 그러나 삼차원 해석은 삼차원적인 이산균열의 진행을 구현하는 어려움 때문에 분포균열법에 비해 복잡하다. 본 논문에서는 매입균열법을 사용한 이차원 해석과 회전분포균열법을 사용한 삼차원 해석으로 앵커시스템의 콘크리트 파괴의 균열진행 예측 및 파괴거동을 규명하도록 한다.

3.1 매입균열법을 적용한 이차원 유한요소 해석

매입균열법에서는 유한요소 정식화를 위하여 불연속 형상함수 $\mathbf{N}^{(\beta)}$ 의 도입한다. 절점과 국소화 절점으로 연속체 영역을 이산화하여 절점변위와 변형률의 증분을 절점 변위벡터 증분 $\Delta \bar{\mathbf{u}}$ 와 국소화절점 변위벡터 증분 $\Delta \bar{\mathbf{d}}$ 을 사용하여 각각 식 (1), 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta \mathbf{u} = \mathbf{N}^{(\alpha)} \cdot \Delta \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{N}^{(\beta)} \cdot \Delta \bar{\mathbf{d}} \quad (1) \quad \Delta \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{B}^{(\alpha)} \cdot \Delta \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{B}^{(\beta)} \cdot \Delta \bar{\mathbf{d}} \quad (2)$$

여기서, 윗첨자 α, β 는 각각 연속과 불연속을 의미하며, $\mathbf{N}^{(\alpha)}$ 는 일반적인 4절점 사변형요소의 형상함수이다.

내부 불연속요소에 대한 요소강성행렬은 식 (3)으로 나타나며, 이를 이용하여 기존의 유한요소 해석기법을 도입할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{K}_{\alpha\alpha} & \mathbf{K}_{\alpha\beta} \\ \mathbf{K}_{\beta\alpha} & \mathbf{K}_{\beta\beta} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta \bar{\mathbf{u}} \\ \Delta \bar{\mathbf{d}} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \Delta \mathbf{f}_\alpha \\ \Delta \mathbf{f}_\beta \end{Bmatrix} \quad (3)$$

여기서, $\mathbf{K}_{\alpha\alpha}$ 는 체적강성, $\mathbf{K}_{\alpha\beta}$, $\mathbf{K}_{\beta\alpha}$ 는 체적과 불연속면의 상호강성, $\mathbf{K}_{\beta\beta}$ 는 불연속면의 강성이다. 강성행렬

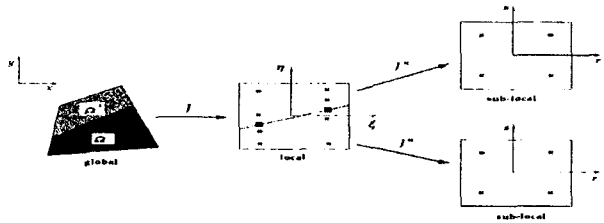


그림 1 이중사상법 (Song, et al., 2001)

\mathbf{K}_{ij} 의 수치적분은 그림 1과 같이 이중 사상 기법을 이용하여 불연속면에 2개의 적분점을 더 두어서 각 영역에 대해 분리하여 수행된다.

본 연구에서 사용한 연화모델은 Hordijk³⁾의 비선형 연화모델 식 (4)를 사용하였다.

$$\frac{\sigma}{f_t} = \left\{ 1 + \left[C_1 \frac{w}{w_c} \right]^3 \right\} \exp \left[-C_2 \frac{w}{w_c} \right] - \frac{w}{w_c} \left[1 + C_1^3 \right] \exp(-C_2) \quad (4)$$

여기서, $C_1 = 3$, $C_2 = 6.93$ 이다.

표 2 콘크리트의 물성치 (이차원 해석)

탄성계수 E (kgf/cm ²)	257,830
포아송비 ν	0.18
인장강도 f_t (kgf/cm ²)	25.1
한계균열열림변위 w_c (cm)	0.09

3.2 분포균열법을 적용한 삼차원 유한요소 해석

회전 균열모델은 주응력과 주변형률이 공통축을 가지도록 계산하는 것이다. 이차원 모델의 경우 회전 주축 1,2에서 이 동축성(coaxiality)은 식 (5)의 접선 전단계수를 통해 얻을 수 있다.

$$G_{12} = \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2 \cdot (\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})} \quad (5)$$

식 (5)는 총 강성 βG 와 관계되어 β 는 식 (6)으로 표현되며, 이차원에서의 균열 전단계수는 식 (7)으로 나타난다

$$\beta = \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2 \cdot (\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22})} \cdot \frac{1}{G} \quad (6) \quad D_{II} = \frac{(\sigma_{11} - \sigma_{22}) \cdot G}{2 \cdot (\varepsilon_{11} - \varepsilon_{22}) \cdot G - (\sigma_{11} - \sigma_{22})} \quad (7)$$

회전 균열모델 개념은 균열의 방향이 계속적으로 변한다고 가정한다는 점에서 고정 균열개념과 다르다.⁴⁾ 본 연구의 해석시 앵커의 모델링시 주응력방향이 주변형을 방향을 따르며 전단감소계수가 식 (6)의 응력과 변형을 벡터에 연계되는 회전 분포균열모델이 적합할 것으로 판단되며 범용 구조해석 프로그램 DIANA⁵⁾를 사용하여 연단거리, 그룹앵커의 앵커 간 간격, 하중의 적용각도의 변수에 따른 해석을 수행하여 앵커시스템의 전체적인 거동을 분석한다.

4. 해석결과 및 실험결과와의 비교분석

4.1 이차원 해석결과 및 실험결과와의 비교분석

본 이차원 해석은 단일앵커시스템에 대한 실험을 대상모델로 하였다. 콘크리트 파괴모드를 갖는 연단거리 10cm인 단일앵커시스템을 관입깊이 변수에 따라 모델링 하여 극한전단하중과 균열의 진행을 예측하였다.

1) 연단거리 10cm, 관입깊이 10cm의 경우

그림 2와 그림 4는 각 관입깊이에 대한 하중-변위 곡선이며 그림 6에 각 하중단계에서의 균열진행을 나타내었다. 그림 3과 그림 5의 이차원 해석을 통한 최대하중의 크기는 실험결과에 비해 안전측 결과를 나타냄을 보여준다.

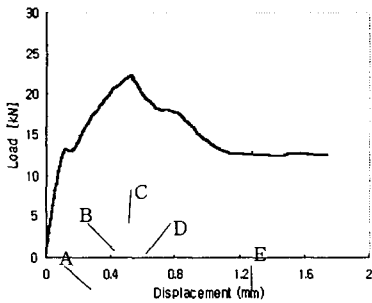


그림 2 하중-변위 곡선 (D10H10)

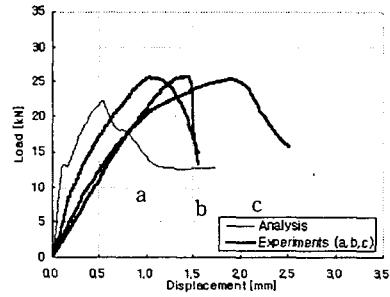


그림 3 하중-변위 곡선의 결과비교 (D10H10)

2) 연단거리 10cm, 관입깊이 15cm의 경우

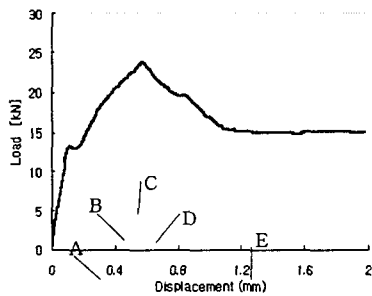


그림 4 하중-변위 곡선 (D10H15)

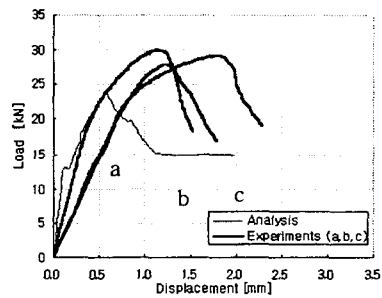


그림 5 하중-변위 곡선의 결과비교 (D10H15)

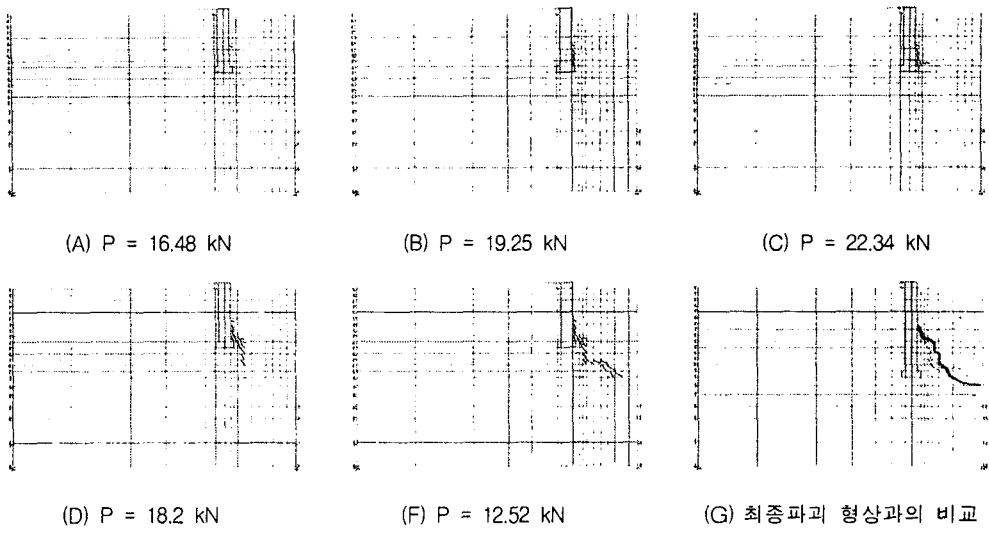


그림 6 하중단계에 따른 균열의 진행 (D10, H10)

4.2 삼차원 해석결과 및 실험결과와의 비교분석

실험변수에 의한 각 파괴모드에 대해 실험결과와 삼차원 해석결과를 분석하면 다음과 같다.

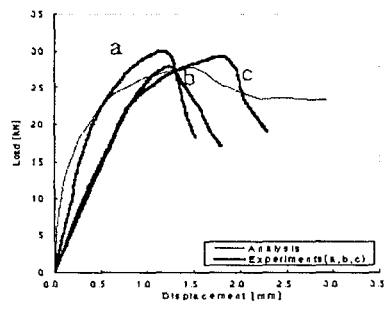


그림 7 단일앵커 (D10, H15)

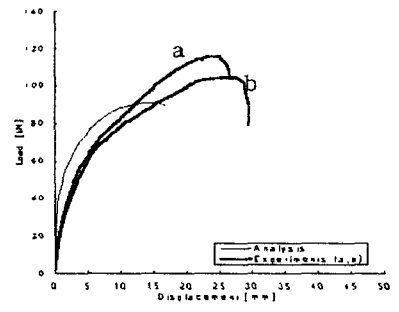


그림 8 단일앵커 (D30, H15)

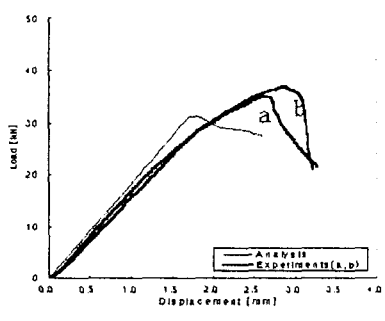


그림 9 그룹 앵커 (앵커간격 15, H15)

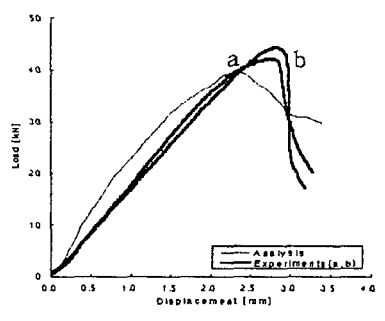


그림 10 그룹 앵커 (앵커간격 30, H15)

단일앵커에 적용된 하중의 적용각도에 따른 영향을 연구하기 위하여 0,의 순수인장하중과 30°, 45°, 60°의 경사하중, 그리고 90,의 순수전단하중이 적용된 실험⁶⁾에 대하여 삼차원 해석을 수행하였다. 사용된 콘크리트 압축강도는 32MPa, 시편의 유효관입깊이 $h_{ef}=80mm$ 이며 연단거리는 140mm이다. 그림 11과 그림 12에 각각 극한하중에서의 수평방향과 연직방향의 하중관계곡선, 변위관계곡선을 실험결과와 비교분석하였다.

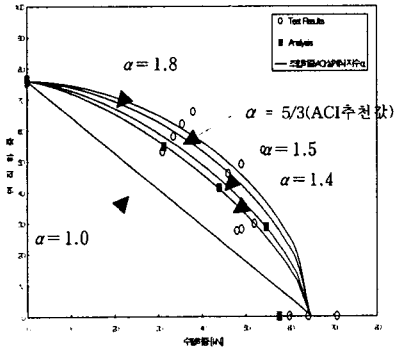


그림 11. 최대하중 관계곡선

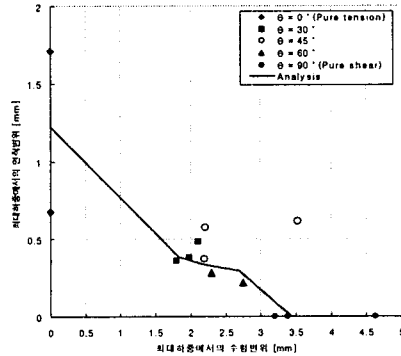


그림 12. 최대하중에서의 변위 관계곡선

5. 결 론

매입균열모델과 분포균열모델을 사용하여 전단하중을 받는 앵커시스템의 파괴해석을 수행한 본 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) 매입균열모델을 적용하여 전단하중을 받는 앵커시스템의 콘크리트 파괴 균열진행을 예측하고 극한하중을 산정하였다. 해석결과 균열의 진행을 앵커가 매입된 면의 실제 균열진행과 매우 유사하게 재현할 수 있으며 콘크리트 파괴에 대한 극한하중도 안전측으로 산정할 수 있었다.
- 2) 삼차원 해석을 통하여 연단거리에 따른 앵커시스템의 파괴모드의 변화를 확인하였다. 또한 앵커간격의 변화에 대한 파괴해석은 파괴영역 중첩에 따른 극한능력의 감소와 함께 실험값을 10~20%이내의 안전측으로 예측하며 설계시 효과적으로 이용할 수 있다고 판단된다.
- 3) 조합하중이 작용할 경우 수평, 연직 방향 최대하중과 최대변위에 대한 관계곡선을 구하였으며, 순수전단하중이 작용한 경우 극한하중은 순수인장하중이 작용한 경우에 비해 약 30%정도 낮게 산정되었다. 해석결과를 통하여 조합하중에 대한 설계규준식이 용이하게 적용될 수 있음을 확인하였다.

참고 문헌

1. 김태상, 송하원, 변근주, 안창모 (2001), "철근콘크리트 교량의 충격전달장치 앵커시스템의 전단파괴 거동," 콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 제13권, 2호, pp. 1097-1102.
2. Song, H.-W., Shim, B., Woo, S.-M. and Koo, J.-C. (2001), "Progressive Fracture Analysis of Concrete using Finite Element with Embedded Displacement Discontinuity," **Structural Engineering and Mechanics**, Vol.11, No.6, pp. 591-604.
3. Hordijk, D. A. (1991), **Local Approach to Fatigue of Concrete**, Ph.D Thesis, Delft University of Technology.
4. Rouba, E. D., Berthaud, Y., Mesurerur, B. and Mounajed, G. (2000), "Three-Dimensional Modeling of Anchorage Subject to Shear Loads," **ACI Structural Journal**, Vol. 97, pp. 408-417.
5. TNO Building and Construction Research (1998), **DIANA Finite Element Analysis; User's Manual, Release7**.
6. Lotze, D., Klingner, R. E. and Herman L. G. III (2001), "Static Behavior of Anchors under Combinations of Tension and Shear Loading," **ACI Structural Journal**, Vol. 98, No.4, pp. 525-536.