

직매형 앵커기초의 전단설계를 위한 ACI 349 Code 의 평가

An Evaluation of ACI 349 Code for Shear Design of CIP Anchor

장 정 범* 황 경 민** 서 용 표***
Jang, Jung Bum Hwang, Kyeong Min Suh, Yong Pyo

ABSTRACT

The numerical analysis is carried out to identify the influence of design factors to shear capacity of cast-in-place (CIP) anchor in ACI 349 Code that is available for the design of fastening system at Nuclear Power Plant (NPP) in this study. The MASA program is used to develop the numerical analysis model and the developed numerical analysis model is verified on a basis of the various test data of CIP anchor. Both l/d_0 and c_1/l are considered as design factors. As a result, the variation of l/d_0 has no influence on the shear capacity of CIP anchor but c_1/l has a large influence on the shear capacity of CIP anchor. Therefore, it is proved that ACI 349 Code may give a non-conservative results compared with real shear capacity of CIP anchor according to c_1/l .

1. 서 론

국내 원자력발전소 내에 설치되는 기기, 배관 및 전기설비 등을 콘크리트 구조물에 정착하기 위한 앵커기초는 ACI 349 Code 를 기준으로 설계되고 있다. 그러나, 최근 국내 및 국외에서 수행된 앵커기초의 전단성능평가 관련 시험결과들과 수치해석결과들이 ACI 349 Code 에 의하여 설계된 앵커기초가 일부 경우에 대해 실제 성능보다 과대평가되는 문제점을 지적하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 기존에 수행된 다양한 경우의 직매형 앵커기초에 대한 실증시험결과에 일치하는 수치해석모델을 개발하고, 검증된 수치해석모델을 이용하여 ACI 349 Code 의 전단설계기준을 구성하는 설계인자인 앵커볼트의 직경에 대한 유효매입깊이비, l/d_0 와 콘크리트 연단과 앵커볼트 사이의 거리, c_1 가 직매형 앵커기초의 전단성능에 미치는 영향을 평가하였다.

2. ACI 349 Code

전단하중 하에서 균열이 발생한 콘크리트 부재에 설치된 직매형 앵커기초의 기본 콘크리트 파괴강도, V_0 와 공칭 콘크리트 파괴강도, V_{cb} 는 식 (1) 및 (2) 와 같다.

* 정회원 · 한국전력공사 전력연구원 책임연구원
** 한국전력공사 전력연구원 연구원
*** 한국전력공사 전력연구원 책임연구원

$$V_b = 7 \left(\frac{l}{d_0} \right)^{0.2} \sqrt{d_0} \sqrt{f_c} c_1^{1.5} \quad (lb) \quad (1)$$

$$V_{cb} = \frac{A_r}{A_{r0}} \psi_5 \psi_6 \psi_7 V_b \quad (lb) \quad (2)$$

여기서, A_r 는 단일 및 다중 앵커기초에 대한 콘크리트 부재 측면부의 파괴 투영면적을 나타내며, A_{r0} 는 콘크리트의 연단으로부터 멀리 떨어진 단일 앵커기초의 파괴 투영면적을 나타낸다.

또한, 식 (2) 에서 ψ_5 는 편심하중을 받는 다중 앵커기초의 수정계수, ψ_6 는 콘크리트 연단과 앵커볼트 사이의 거리에 의하여 발생하는 수정계수, ψ_7 은 균열발생에 따른 수정계수를 나타낸다. 그밖에 l 은 전단에 대한 앵커볼트의 하중전달길이로서 $8d_0$ 를 초과하지 않아야 하며, d_0 는 앵커볼트의 외부직경, f_c 는 콘크리트의 압축강도, c_1 은 전단하중방향의 콘크리트 연단과 앵커볼트 사이의 거리를 나타낸다.

본 연구에서는 단일 직매형 앵커기초를 대상으로 하기 때문에 편심하중의 영향이 발생하지 않으며, 또한 c_1 에 수직방향의 연단거리 c_2 가 $1.5c_1$ 을 초과하기 때문에 ψ_5 와 ψ_6 는 고려하지 않는다. 단, 본 연구에서 대상으로 하는 직매형 앵커기초가 무균열조건에 설치된 것으로 고려하기 때문에 ψ_7 은 1.4 를 고려하였다.

3. 수치해석

3.1 해석모델

본 연구에서는 직매형 앵커기초의 전단성능을 평가하기 위한 수치해석을 수행하기 위하여 독일 Stuttgart 대학에서 개발한 MASA 프로그램을 사용하였다. MASA 프로그램은 콘크리트와 같은 유사 취성재료 (Quasi-brittle material) 로 이루어진 구조물의 비선형 해석을 위한 3 차원 유한요소해석 프로그램이다.

수치해석으로 직매형 앵커기초의 전단성능을 평가하기 위하여 콘크리트는 소성모델로서 Microplane model 을 적용하였고, 앵커볼트는 콘크리트가 전단하중으로 파괴가 발생하는 경우에도 탄성영역 내에서 거동하기 때문에 탄성해석을 수행하였다.

하중의 작용에 따라 직매형 앵커기초에 발생하는 균열현상을 모사하기 위하여 Smeared cracking model 을 채택하였고, 전형적인 Smeared cracking model 의 단점인 요소 크기에 따라 민감하게 나타나는 해석결과를 방지하기 위하여 Crack band method 의 일종인 Stress relaxation method 를 적용하였다.

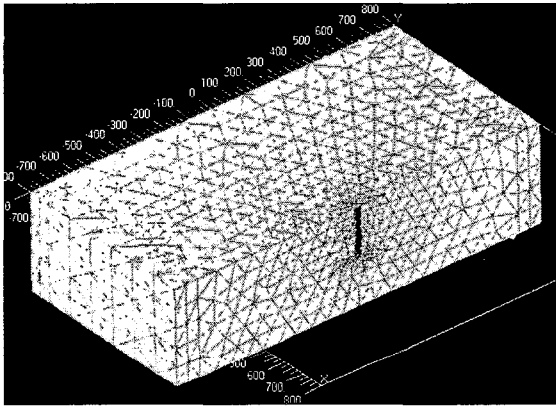
3.2 수치해석모델의 검증

본 연구에서 개발한 수치해석모델의 신뢰성을 검증하기 위하여 기존에 직매형 앵커기초를 대상으로 수행된 다양한 경우의 실험시험과 동일한 시험조건, 즉 콘크리트 시험체 및 앵커볼트의 제원, 재료특성, 하중 및 경계조건 등을 반영하여 수치해석을 수행하였다. 표 1 은 기존에 수행되었던 시험조건과 그에 따른 콘크리트 파괴강도를 나타낸다.

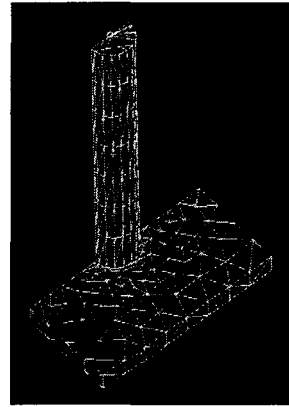
표 1 의 각 시험조건에 대한 수치해석을 수행하기 위해 직매형 앵커기초를 구성하는 콘크리트, 앵커볼트 및 Square anchor plate 는 4 절점 고체요소로 모델링하였으며, 모든 시험조건이 앵커볼트를 중심으로 대칭면을 형성하므로 반단면 해석을 수행하였다. 그림 1 은 표 1 의 시험조건 중 시험조건 1 에 대한 수치해석

표 1 시험조건

시험 조건	하중조건	앵커볼트의 유효매입깊이 (cm)	단일 및 다중앵커	앵커볼트와 콘크리트 연단사이의 거리 (cm)	콘크리트 파괴강도 (ton)	비 고
1	인장하중	20	단일앵커	중앙부	33.8	앵커볼트 간의 거리 : 20 cm
2		20	다중앵커		58.4	
3		30	단일앵커	15	33.4	



(a) 전체 수치해석모델



(b) 앵커볼트 및 Square anchor plate

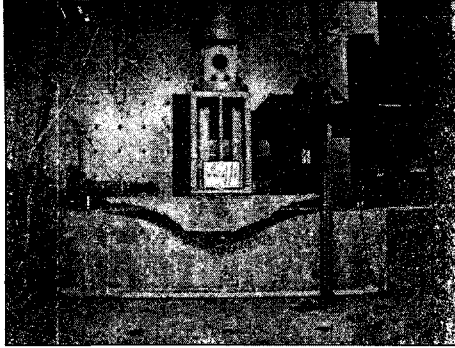
그림 1 수치해석모델

을 수행하기 위하여 구성한 수치해석모델을 보여주고 있다.

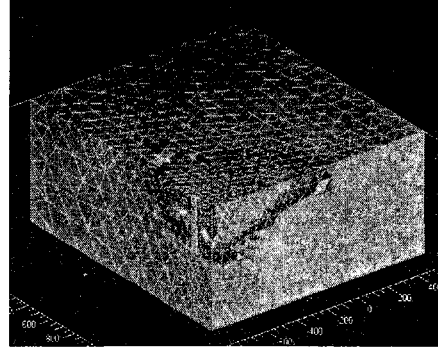
수치해석결과, 표 2 에서 알 수 있는 것처럼 수치해석에 의한 직매형 앵커기초의 콘크리트 파괴강도가 시험결과와 거의 일치함을 알 수 있으며, 또한 직매형 앵커기초의 파괴형상도 그림 2 에서 알 수 있는 것처럼 본 연구의 수치해석이 실제 파괴형상을 거의 정확히 표현함을 확인할 수 있었다. 따라서, 본 연구에서 개발한 검증된 수치해석모델을 이용하여 직매형 앵커기초의 전단성능을 합리적으로 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

표 2 직매형 앵커기초의 콘크리트 파괴강도 비교

시험조건	시험결과 (ton)	수치해석결과 (ton)	차이 (%)
1	33.8	33.3	-1.5
2	58.4	55.5	-5.0
3	33.4	32.9	-1.5



(a) 시험결과



(b) 수치해석결과

그림 2 직매형 앵커기초의 파괴형상

3.3 설계인자의 영향평가

3.3.1 l/d_0

ACI 349 Code 는 2001 년도에 개정되면서, 그 적용범위를 전단설계의 경우, 앵커볼트의 직경에 대한 유효매입깊이비 (l/d_0) 를 8 로 제한하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 l/d_0 이 직매형 앵커기초의 전단성능에 미치는 영향을 평가하기 위하여 표 3 과 같은 수치해석조건에 대하여 수치해석을 수행하였다. 그림 3 은 직매형 앵커기초의 전단성능 평가를 위한 수치해석모델을 보여주고 있으며, 수치해석은 해석대상이 앵커볼트를 중심으로 대칭면을 형성하므로 반단면 해석을 수행하였고, 하중재하판에 전단하중이 작용하는 것으로 하였다.

표 3 수치해석조건

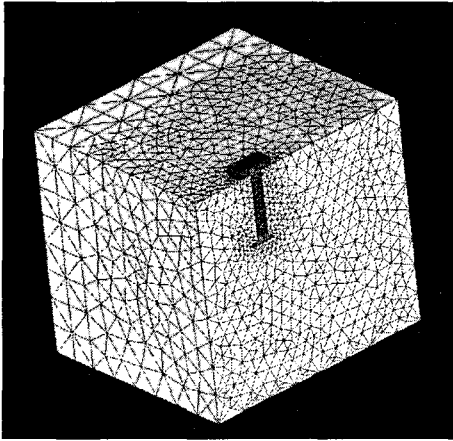
해석조건	d_0 (cm)	l (cm)	c_1 (cm)	$\frac{l}{d_0}$
1	5.08	27.0	30.0	5.3
2	5.08	30.0	30.0	6.0
3	2.54	30.0	30.0	12.0

그림 4 는 수치해석에 의한 직매형 앵커기초의 전단파괴 형상으로서, 본 연구에서 예측한 바와 같이 Concrete breakout failure 가 발생함을 알 수 있으며, 이로부터 본 수치해석결과가 직매형 앵커기초의 전단성능평가에도 신뢰성 있는 결과를 보여줌을 확인할 수 있었다.

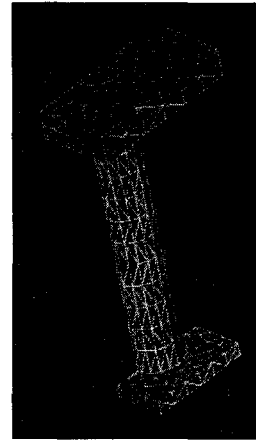
그림 5 는 이들 경우에 대한 수치해석결과를 도시한 것으로서, 그림에서 알 수 있는 바와 같이 앵커볼트의 강성 변화가 직매형 앵커기초의 전단파괴강도에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났으며, 단지 앵커볼트의 강성이 증가할수록 전단파괴강도에 빨리 도달함을 알 수 있다.

3.3.2 c_1

ACI 349 Code 의 전단설계기준인 식 (1) 에서 알 수 있는 것처럼 직매형 앵커기초의 전단파괴강도에 가장 큰 영향을 미치는 설계인자는 콘크리트 연단과 앵커볼트 사이의 거리인 c_1 이다. 따라서, c_1 이 직매형 앵커기초의



(a) 전체 수치해석모델



(b) 앵커볼트, Square anchor plate, 하중재하판

그림 3 수치해석모델

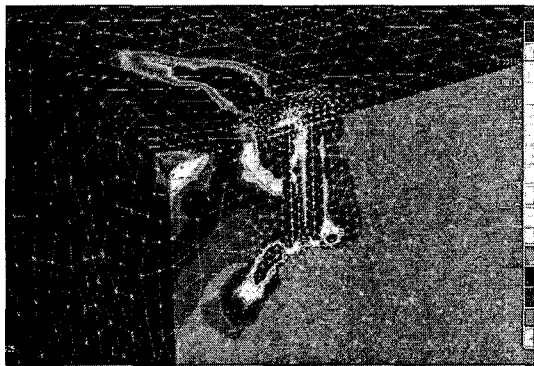


그림 4 직매형 앵커기초의 전단파괴형상

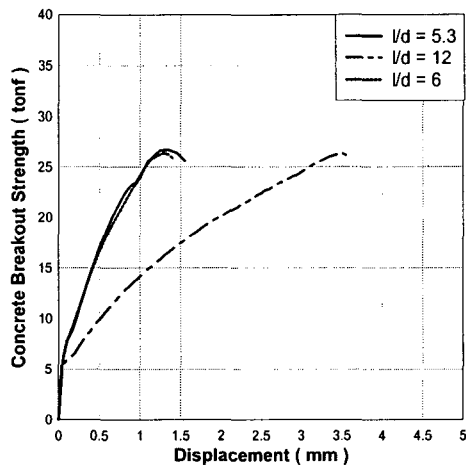


그림 5 l/d_0 에 따른 직매형 앵커기초의 하중-변위 이력곡선

전단파괴강도에 미치는 영향을 평가하기 위하여 표 4 와 같은 수치해석조건에 대하여 수치해석을 수행하였다. 표 4 이외의 수치해석조건인 콘크리트 기초의 제원은 ASTM E488 를 준용함으로써 콘크리트 기초가 직매형 앵커기초의 전단파괴강도에 미치는 영향을 배제하였다.

표 4 수치해석조건

해석조건	d_0 (cm)	l (cm)	c_1 (cm)	$\frac{c_1}{l}$
1	5.0	30.0	15.0	0.5
2	5.0	30.0	30.0	1.0
3	5.0	30.0	60.0	2.0
4	8.9	63.5	114.3	1.8

그림 6 은 표 4 의 해석조건들에 대한 수치해석결과와 ACI 349 Code 에 의한 전단파괴강도를 비교, 도시한 것이다. 그림 6 에서 알 수 있는 바와 같이, 해석조건 3 과 4 에서 ACI 349 Code 에 의하여 예측된 직매형 앵커기초의 전단파괴강도가 수치해석결과를 상회하는 것으로 나타났다. 이를 그림 7 과 같이 나타내면 앵커볼트의 유효매입깊이에 대한 콘크리트 연단과 앵커볼트 사이의 거리비, c_1/l 이 1.5 를 기준으로 그 이상인 경우에는 ACI 349 Code 가 직매형 앵커기초의 전단설계에 대하여 비보수적인 설계결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉, 콘크리트와 앵커볼트의 강성비가 직매형 앵커기초의 전단성능에 큰 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다. 따라서, ACI 349 Code 가 c_1/l 에 대한 적용상의 제한을 설정하지 않은 상태에서 이 설계기준을 이용하여 직매형 앵커기초에 대한 전단설계를 수행하는 경우 비보수적인 설계도 발생할 가능성이 높은 것으로 판단된다.

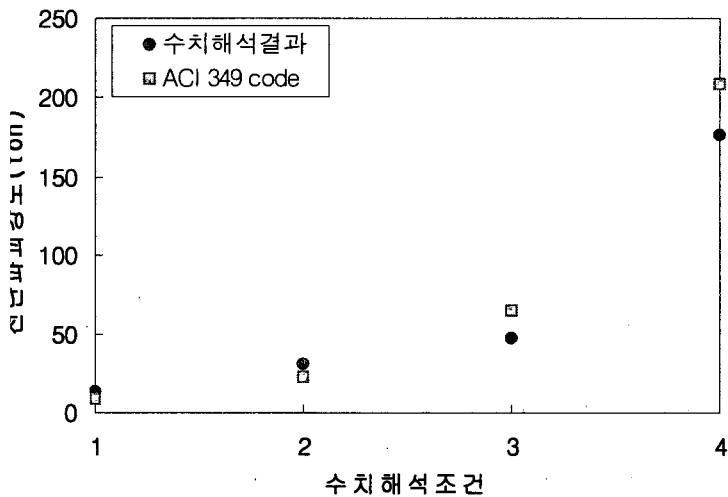


그림 6 수치해석결과와 ACI 349 Code 의 전단파괴강도 비교

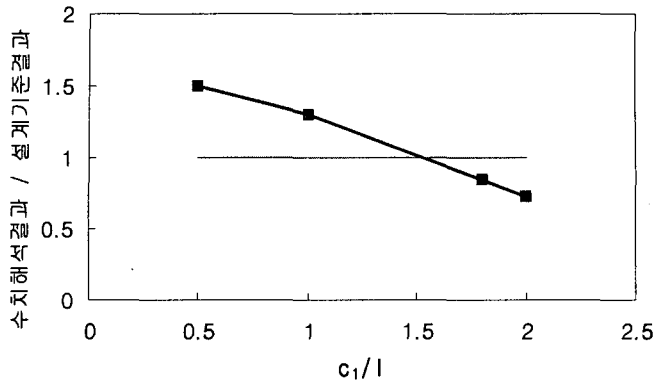


그림 7 직매형 앵커기초의 전단파괴강도에 대한 c_1/l 의 영향

4. 결 론

본 연구에서는 기존에 수행된 다양한 경우의 직매형 앵커기초에 대한 실증시험결과에 일치하는 수치해석 모델을 개발하고, 검증된 수치해석모델을 이용하여 ACI 349 Code 의 전단설계기준을 구성하는 설계인자인 앵커볼트의 직경에 대한 유효매입깊이비, l/d_0 와 콘크리트 연단과 앵커볼트 사이의 거리, c_1 가 직매형 앵커기초의 전단성능에 미치는 영향을 평가하였다.

수치해석결과, 앵커볼트의 강성비, l/d_0 의 변화가 직매형 앵커기초의 전단파괴강도에 미치는 영향은 없는 것으로 나타났으며, 단지 앵커볼트의 강성이 증가할수록 전단파괴강도에 빨리 도달함을 알 수 있다. 그러나, c_1/l 은 1.5 를 기준으로 그 이상인 경우에는 ACI 349 Code 가 직매형 앵커기초의 전단설계에 대하여 비보수적인 설계결과를 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉, 콘크리트와 앵커볼트의 강성비가 직매형 앵커기초의 전단성능에 큰 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다.

따라서, 직매형 앵커기초의 전단설계를 위하여 ACI 349 Code 에 c_1/l 에 대한 적용상의 제한을 설정하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Fuchs, W., Eligehausen, R., & Breen, J.E. " Concrete Capacity Design (CCD) Approach for Fastening to Concrete ", *ACI Structural Journal*, V. 92, No. 1, 1995.
2. 장정범, 서용표, 이종립, " 직매형 앵커기초의 설계기준 개선에 관한 연구 ", 대한토목학회 논문집, 제 23 권 6A 호, 2003, pp. 1331-1338.
3. ACI 349, *Code Requirements for Nuclear-Safety-Related Concrete Structures*, 2001.
4. US NRC, " Standard Review Plan 3.8.4 - Other Seismic Category I Structures ", *NUREG-0800*, 1996.
5. CEB Task Group, *Design of Fastenings in Concrete*, Design guide, 1996.
6. Ozbolt, J., MASA 3 (Finite element program for 3D nonlinear analysis of concrete and reinforced concrete structures), 2003.
7. Ozbolt, J., Li, Y., Kozar, I., " Microplane model for concrete with relaxed kinematic constraint ", *Int. J. of Solids and Structures* 38, 2001, pp. 2683 - 2711.
8. Chen, W.F., *Plasticity in Reinforced Concrete*, McGraw-Hill, 1982.