

수치해석에 의한 직매형 앵커기초의 전단설계기준 평가

An Evaluation of Shear Design Criteria by Numerical Analysis for Cast-In-Place Anchor

장정범

한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

본 연구에서는 국내 원전에서 기기 정착을 위하여 가장 널리 적용되는 직매형 앵커기초를 대상으로 앵커기초의 전단 설계기준에 대한 적정성을 검토하기 위하여 수치해석이 수행되었다. 본 연구에서 수치해석모델에 적용된 파괴기준으로서 콘크리트와 같은 유사 취성재료에는 Microplane 모델이, 앵커볼트와 같은 연성재료에는 탄성-완전 소성모델이 적용되었다. 그리고, 균열 발생현상을 모사하기 위하여 Smeared Cracking Model 을 채택하였다. 개발된 수치해석모델은 다양한 경우의 실증시험결과를 근거로 신뢰성이 검증되었으며, 검증된 수치해석모델과 앵커볼트의 유효매입깊이, 앵커볼트의 직경 및 콘크리트 연단과 앵커볼트 사이의 거리를 해석변수로 한 다양한 경우에 대한 수치해석을 통하여 직매형 앵커기초의 전단설계에 적용이 가능한 ACI 349 Code 와 CEB-FIP Code 가 평가되었다.

Abstract

Numerical analysis is carried out to identify the appropriateness of the design codes that is available for the shear design of fastening system at Nuclear Power Plant (NPP) in this study. This study is intended for the cast-in-place anchor that is widely used for the fastening of equipment in Korean NPPs. The microplane model and the elastic-perfectly plastic model are employed for the quasi-brittle material like concrete and for the ductile material like anchor bolt as constitutive model for numerical analysis and smeared crack model is employed for the crack and damage phenomena. The developed numerical model is verified on a basis of the various test data of cast-in-place anchor. The appropriateness of both ACI 349 Code and CEB-FIP Code is evaluated for the shear design of cast-in-place anchor through the numerical analysis considering the analytical variables like effective embedment depth, diameter of anchor bolt and edge distance.

1. 서 론

국내 원자력발전소 내에 설치되는 기기, 배관 및 전기설비 등을 콘크리트 구조물에 정착하기 위한 앵커기초는 ACI 349 Code 를 기준으로 설계되어 왔다. 그러나, 유럽에서 수행된 많은 앵커기초의 성능평가 관련 시험결과들과 CEB-FIP Code 가 ACI 349 Code 에 의하여 설계된 앵커기초가 일부 경우에 대해 실제 성능보다 과대평가되는 문제점을 지적하였다. 이에 따라 앵커기초의 성능이 과대평가되는 문제점을 개선하기 위하여 ACI 349 Code 가 2001 년도에 CEB-FIP Code 를 근거로 개정되었다.

그러나, 개정된 ACI 349 Code 의 적용범위가 앵커볼트의 직경이 2 in. 이하이고, 유효매입깊이가 25 in. 이하인 앵커기초로 한정됨에 따라 격납건물 내 주요 기기들, 즉 PZR, SG, RCP 및 RV 등에 요구되는 대형 직매형 앵커기초에는 ACI 349 Code 의 적용이 불가능한 실정이다. 이에 대한 대안으로 미국 NRC 가 발행한 SRP 3.8.4 의 Appendix E (Draft, Rev. 2) 에 나타난 바와 같이 각 경우별로 실증시험결과에 일치하는 설계방법을 채택하여 적용할 수 있으나, 원전 내 설치되는 수많은 대형 앵커기초에 대해 각각 실증시험을 수행하여 실증시험결과를 확보한다는 것은 불가능하다. 또한, 유럽의 CEB-FIP Code 역시 직매형 앵커기초의 전단성능 평가시 앵커볼트의 직경을 3 cm, 앵커볼트의 유효매입깊이에 대한 직경비 (l_f/d_{nom}) 를 8 로 제한하고 있다.

따라서, 본 연구에서는 기존에 수행된 다양한 경우의 직매형 앵커기초에 대한 실증시험결과에 일치하는 수치해석모델을 개발하고, 검증된 수치해석모델과 앵커볼트의 유효매입깊이 및 콘크리트 연단과 앵커볼트 사이의 거리를 해석변수로 하여 직매형 앵커기초의 전단설계를 위한 ACI 349 Code 및 CEB-FIP Code 에 대한 적용성을 평가하였다.

2. 설계기준

2.1 ACI 349 Code

전단하중하에서 균열이 발생한 콘크리트 부재에 설치된 앵커기초의 기본 콘크리트 파괴강도, V_b 는 식 (2.1) 과 같으며, 공칭 콘크리트 파괴강도, V_{cb} 는 식 (2.2) 와 같다.

$$V_b = 7 \left(\frac{l}{d_0} \right)^{0.2} \sqrt{d_0} \sqrt{f_c} c_1^{1.5} lb \quad (2.1)$$

$$V_{cb} = \frac{A_v}{A_{v0}} \psi_5 \psi_6 \psi_7 V_b lb \quad (2.2)$$

A_v 는 단일 및 다중 앵커기초에 대한 콘크리트 부재 측면부의 파괴 투영면적을 나타내며, A_{v0} 는 콘크리트의 연단으로부터 멀리 떨어진 단일 앵커기초의 파괴 투영면적으로, 앵커볼트의 중심으로부터 콘크리트 연단까지의 거리가 c_1 인 경우, 식 (2.3) 과 같다.

$$A_{v0} = 4.5c_1^2 \quad (2.3)$$

식 (2.2) 에서 ψ_5 은 편심하중을 받는 다중 앵커기초의 수정계수이고, ψ_6 는 콘크리트 연단과 앵커볼트 사이의 거리에 의하여 발생하는 수정계수를 나타내나, 본 연구에서는 고려치 않는다. ψ_7 은 균열발생에 따른 수정계수로서 사용하중조건의 설계하중 조합하에서 균열이 나타나지 않는 ($f_t < f_r$) 콘크리트 부재에 앵커볼트가 설치된 경우, 직매형 앵커기초의 수정계수는 다음과 같다.

$$\psi_7 = 1.4 \quad (2.4)$$

그러나, 사용하중조건의 설계하중 조합하에서 콘크리트 부재에 균열이 발생하는 경우에는 ψ_7 은 1.0 이 적용된다. 그밖에 l 은 전단에 대한 앵커볼트의 하중전달길이로서 $8d_0$ 를 초과하지 않아야 하며, d_0 는 앵커볼트의 외부직경, f_c' 는 콘크리트의 압축강도를 나타낸다.

2.2 CEB-FIP Code

균열 콘크리트 부재에서 외부영향이 없는 단일 앵커기초의 경우, 기본 콘크리트 파괴강도, $V_{Rk,c}^0$ 는 식 (2.5) 와 같으며, 공칭 콘크리트 파괴강도, $V_{Rk,c}$ 는 식 (2.6) 과 같다.

$$V_{Rk,c}^0 = k_4 \sqrt{d_{nom}} \left(\frac{l_f}{d_{nom}} \right)^{0.2} \sqrt{f_c'} c_1^{1.5} N \quad (2.5)$$

$$V_{Rk,c} = \frac{A_v}{A_{v0}} \psi_5 \psi_6 \psi_7 \psi_8 \psi_9 V_{Rk,c}^0 N \quad (2.6)$$

여기서, k_4 는 0.5 이며, 식 (2.6) 에서 ψ_5 , ψ_6 , ψ_7 , d_{nom} , l_f , f_c' , A_v 및 A_{v0} 는 상기 2.1 절에서 언급한 것처럼 ACI 349 Code 와 동일하다. 그러나, ψ_8 과 ψ_9 은 ACI 349 Code 에서 고려하지 않는 것으로, ψ_8 은 콘크리트 부재 두께의 영향을 ψ_9 은 전단하중이 앵커기초에 작용하는 각도의 영향을 각각 고려한 것이다. 그러나 본 연구에서는 이들 계수의 영향을 고려하지 않는다.

3. 수치해석

3.1 해석모델

본 연구에서는 직매형 앵커기초의 인장성능을 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.

본 연구대상인 직매형 앵커기초의 모델링을 위하여 콘크리트와 같은 유사 취성재료는 Microplane model 을, 철근이나 앵커볼트와 같은 연성재료는 탄성-완전 소성모델 (Elastic-perfectly plastic model) 을 파괴기준으로서 적용하였다.

Microplane model 은 콘크리트의 실제적인 모델링을 위하여 그림 3.1 과 같이 수직변형률 (ϵ_N) 은 Volumetric part (ϵ_V) 와 Deviatoric part (ϵ_D) 로 구분되며, 전단변형률 (ϵ_T) 은 상호 수직성분인 ϵ_M 과 ϵ_K 로 구분된다. Microplane 모델의 응력 및 변형률 관계는 그림 3.2 와 같다.

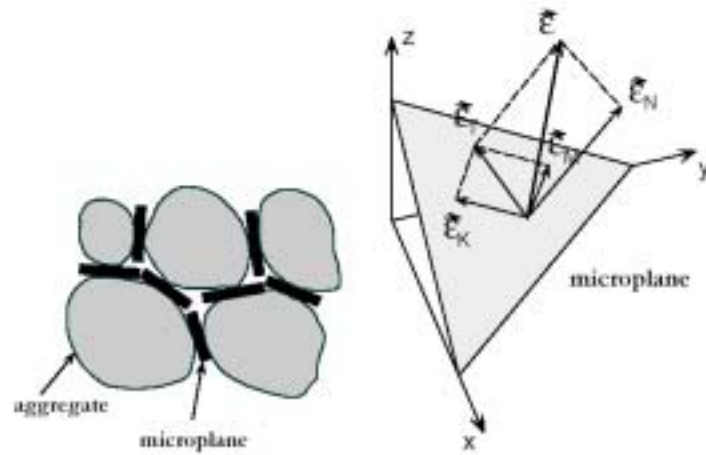


그림 3.1 Microplane 모델

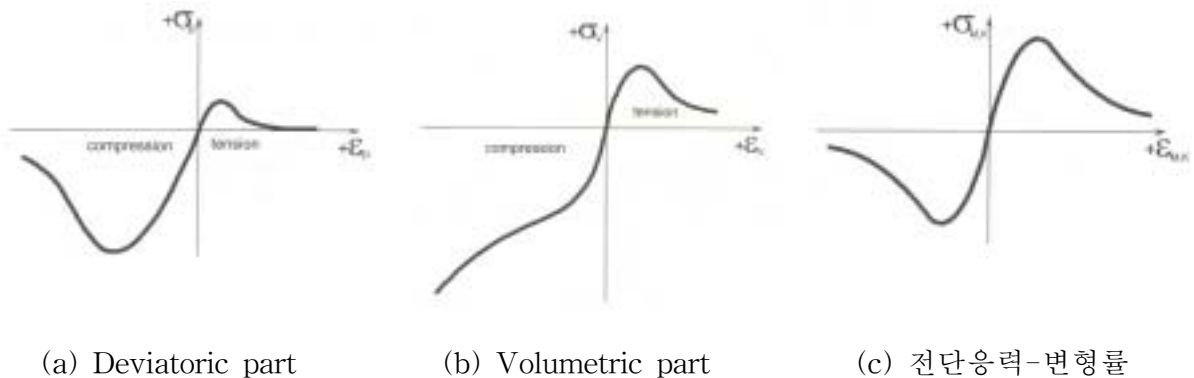


그림 3.2 Microplane 모델의 응력-변형률 관계도

철근이나 앵커볼트와 같은 연성재료를 위한 탄성-완전 소성모델은 그림 3.3 과 같은 응력-변형률 특성을 지닌다.

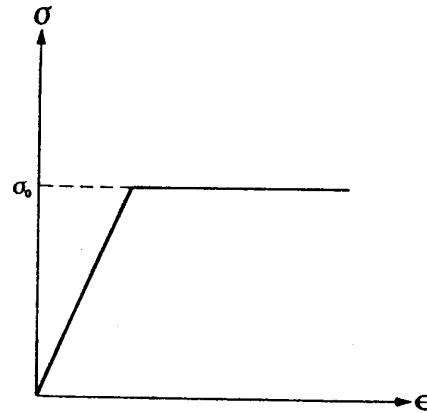


그림 3.3 탄성-완전 소성모델의 응력-변형률도

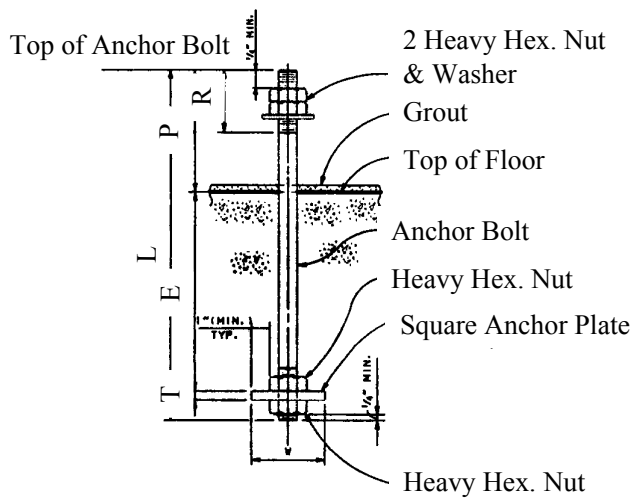
하중의 작용에 따라 직매형 앵커기초에 발생하는 균열현상을 모사하기 위하여 Smeared cracking model 을 채택하였고, 전형적인 Smeared cracking model 의 단점인 요소 크기에 따라 민감하게 나타나는 해석결과를 방지하기 위하여 Crack band method 의 일종인 Stress relaxation method 를 적용하였다.

3.2 수치해석모델의 검증

본 연구에서 개발한 수치해석모델의 신뢰성을 검증하기 위하여 기존에 직매형 앵커기초를 대상으로 수행된 다양한 경우의 실증시험과 동일한 시험조건, 즉 콘크리트 시험체 및 앵커볼트의 제원, 재료특성, 하중 및 경계조건 등을 반영하여 수치해석을 수행하였다. 표 3.1 은 기존에 수행되었던 시험조건과 그에 따른 콘크리트 파괴강도를 나타내고 있으며 그림 3.4 는 본 연구대상인 직매형 앵커기초를 보여주고 있다.

표 3.1 시험조건

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



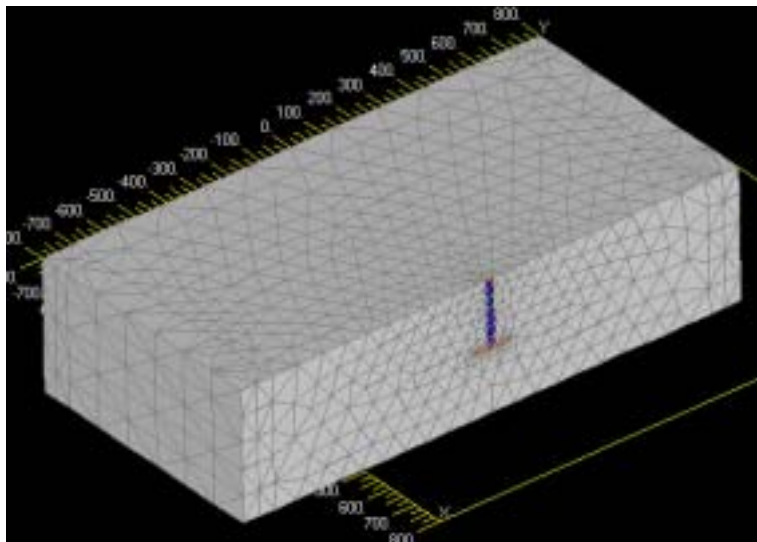
(a) 표준도면



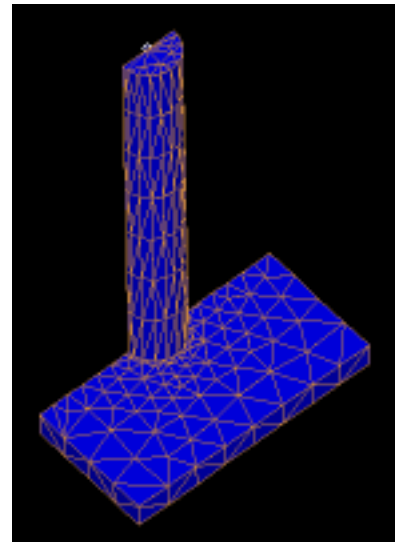
(b) 앵커볼트

그림 3.4 직매형 앵커기초

표 3.1 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 3.5 는 표 3.1 의 시험조건 중 시험조건 1 에 대한 수치해석을 수행하기 위하여 구성된 수치해석모델을 보여주고 있다.



(a) 전체 수치해석모델



(b) 앵커볼트 및 Square anchor plate

그림 3.5 수치해석모델

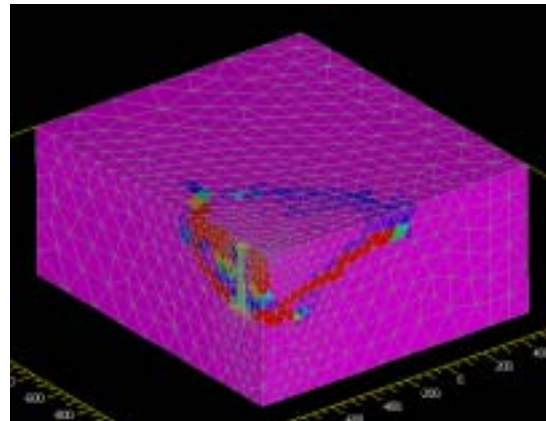
수치해석결과, 표 3.2 에서 알 수 있는 것처럼 수치해석에 의한 직매형 앵커기초의 콘크리트 파괴강도가 시험결과와 거의 일치함을 알 수 있으며, 또한 직매형 앵커기초의 파괴형상도 그림 3.6 에서 알 수 있는 것처럼 본 연구의 수치해석이 실제 파괴형상을 거의 정확히 표현함을 확인할 수 있었다. 따라서, 본 연구에서 개발한 검증된 수치해석모델을 이용하여 직매형 앵커기초의 전단설계기준에 대한 적정성을 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

표 3.2 직매형 앵커기초의 콘크리트 파괴강도 비교

시험조건	시험결과 (tonf)	수치해석결과 (tonf)	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 3.6 직매형 앵커기초의 파괴형상

3.3 수치해석결과

상기 3.2 절에서 검증된 수치해석모델을 이용하여 국내외에서 직매형 앵커기초의 전단 설계기준으로 적용이 가능한 ACI 349 Code 및 CEB-FIP Code 의 적용성을 평가하였다. 해석변수로서는 ACI 349 Code 및 CEB-FIP Code 의 적용 제한범위를 초과하는 경우에 대해서 각 설계기준의 적용성을 평가하기 위하여 앵커볼트의 직경이 2 in. (5.08 cm) 와 앵

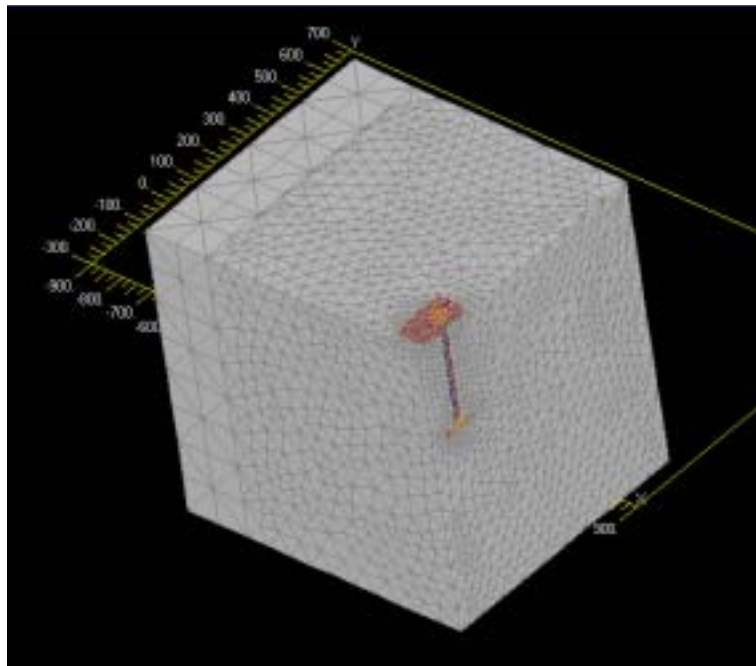
커볼트의 유효매입깊이에 대한 직경비 (l_f/d_{nom})가 8을 초과하는 경우를 고려하였다. 표 3.3은 수치해석조건을 나타내고 있고, 그림 3.7은 해석조건 1을 위한 수치해석모델을 보여주고 있다. 그림 3.7과 같이 수치해석은 해석대상이 앵커볼트를 중심으로 대칭면을 형성하므로 반단면 해석을 수행하였으며, 하중재하판에 전단하중이 작용하는 것으로 하였다.

표 3.3 수치해석조건

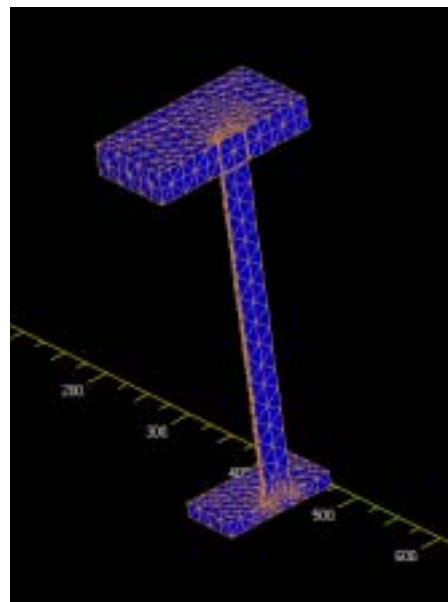
해석조건	d_{nom}, d_0 (cm)	l_f, l (cm)	c_1 (cm)	$\frac{l_f}{d_{nom}}$
1	2.54	30.0	10.0	11.8
2	2.54	30.0	30.0	11.8
3	6.35	63.5	76.2	10.0

그림 3.8은 수치해석결과로서, 직매형 앵커기초의 파괴형상을 도시하고 있으며, 본 연구에서 예측한 바와 동일하게 Concrete breakout failure가 발생함을 알 수 있다. 표 3.4는 수치해석결과와 ACI 349 Code 및 CEB-FIP Code에 의한 직매형 앵커기초의 콘크리트 전단파괴강도를 비교한 것이다. 표 3.4에서 제한조건은 각 설계기준에서 제한하고 있는 앵커볼트의 직경과 앵커볼트의 유효매입깊이에 대한 직경비 (l_f/d_{nom})에 대해 해석대상이 제한치를 초과하는 경우 각 설계기준에서 제시하는 제한치를 입력하여 계산한 경우이며, 비제한조건은 각 설계기준에서 제시하는 제한조건과 상관없이 실제 해석조건을 입력하여 직매형 앵커기초의 전단파괴성능을 평가한 것을 의미한다.

표 3.4에서 알 수 있는 바와 같이 동일한 해석조건에 대하여 CEB-FIP Code가 ACI 349 Code보다 보수적인 설계결과를 제시하고 있음을 알 수 있다. 이는 제한조건의 경우 두 설계기준에서 제시하고 있는 앵커볼트의 직경 차이로 인한 것이며, 비제한조건의 경우는 두 설계기준에서 제시하고 있는 전단파괴성능 평가식의 계수차이로 인한 것으로 나타났다. 또한, 각 설계기준에서 제시하는 제한조건을 고려하여 직매형 앵커기초의 전단파괴성능을 평가하는 경우, 두 설계기준이 모두 수치해석결과에 비하여 보수적인 설계결과를 제시하는 것으로 나타났으나, 비제한조건을 고려하는 경우 ACI 349 Code가 해석조건 3에 대하여 비보수적인 설계결과를 제시하는 것으로 나타났다. 이러한 결과가 발생한 원인은 표 3.4에서 알 수 있는 바와 같이 콘크리트 연단과 앵커볼트 사이의 거리 (c_1)가 증가할수록 수치해석결과와 두 설계기준에 의한 설계결과가 근접하는 것으로 나타나, c_1 이 큰 경우 두 설계기준에서 제시하는 것보다 c_1 이 직매형 앵커기초의 전단파괴강도에 미치는 영향이 감소하기 때문으로 판단된다. 따라서, c_1 이 증가하는 경우, ACI 349 Code는 제한조건을 고려하더라도 직매형 앵커기초의 전단파괴강도에 대해 비보수적인 설계결과를 제시하는 경우가 발생할 것으로 예상되므로 이에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.



(a) 전체 수치해석모델



(b) 앵커볼트, Square anchor plate, 하중재하판

그림 3.7 수치해석모델

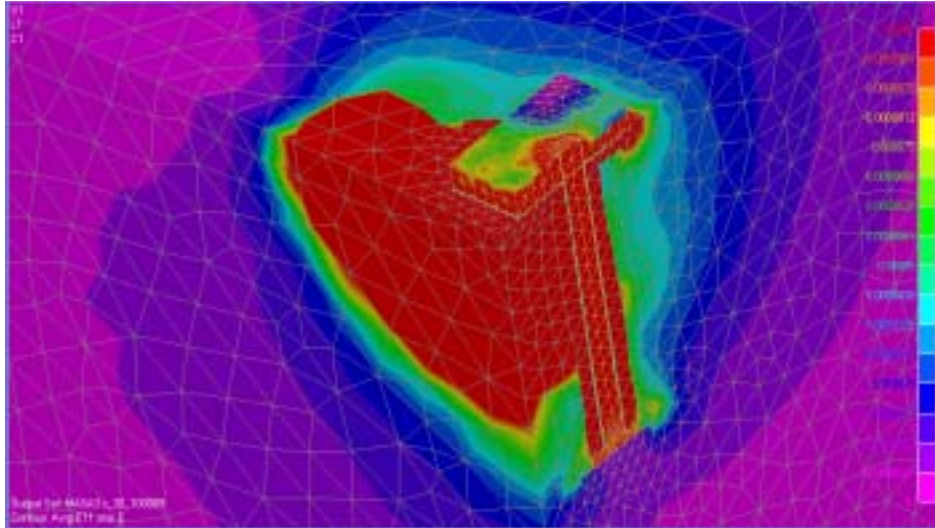


그림 3.8 직매형 앵커기초의 파괴형상

표 3.4 전단파괴강도의 비교

(단위 : tonf)

해석조건	수치해석	ACI 349 Code		CEB-FIP Code	
		제한조건	비제한조건	제한조건	비제한조건
1	5.9	3.3	3.6	2.9	3.1
2	26.4	17.2	18.6	14.8	16.1
3	126.0	116.1	135.7	76.8	116.8

4. 결 론

본 연구에서는 원전의 기기기초용으로 널리 적용되고 있는 직매형 앵커기초에 대한 전단설계기준인 ACI 349 Code 및 CEB-FIP Code 에 대한 적용성을 평가하였다. 설계기준의 적용성을 평가하기 위하여 기존에 수행된 다양한 경우의 직매형 앵커기초에 대한 실증시험결과에 일치하는 수치해석모델을 개발하고, 검증된 수치해석모델과 앵커볼트의 유효매입깊이, 앵커볼트의 직경 및 콘크리트 연단과 앵커볼트 사이의 거리를 해석변수로 하여 수치해석을 수행하였다.

수치해석결과, 콘크리트 연단과 앵커볼트 사이의 거리 (c_1) 가 증가하는 경우 두 설계기준에서 제시하는 것보다 c_1 이 직매형 앵커기초의 전단파괴강도에 미치는 영향은 감

소하는 것으로 판단되며, 따라서 직매형 앵커기초의 전단파괴강도에 미치는 c_1 의 영향에 대한 재평가가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] 장정범, 서용표, 이종립, “ 직매형 앵커기초의 설계기준 개선에 관한 연구 ”, **대한토목학회 논문집**, 제 23 권 6A 호, pp. 1331-1338, 2003.
- [2] 장정범, 서용표, 이종립, “ 직매형 앵커기초의 설계기준 개선 ”, **한국원자력학회 춘계 학술발표회**, 경주, 2003.
- [3] 장정범, 서용표, 이종립, “ 원전 기기기초의 최적설계를 위한 인장성능 평가기준 제안 ”, **대한토목학회 학술발표회**, 대구, 2003.
- [4] US NRC, “ Standard Review Plan 3.8.4 - Other Seismic Category I Structures ”, *NUREG-0800*, 1996.
- [5] Ozbolt, J., Li, Y., Kozar, I., “ Microplane model for concrete with relaxed kinematic constraint ”, *Int. J. of Solids and Structures* 38, pp. 2683 - 2711, 2001.
- [6] Chen, W.F., *Plasticity in Reinforced Concrete*, McGraw-Hill, 1982.[1] R.E. Klingner, H. Muratli, and M. Shirvani, *A Technical Basis for Revision to Anchorage Criteria*, NUREG/CR5563, 1999.
- [7] Fuchs, W., Eligehausen, R., & Breen, J.E. “ Concrete Capacity Design (CCD) Approach for Fastening to Concrete ”, *ACI Structural Journal*, V. 92, No. 1, 1995.
- [8] ACI 349, *Code Requirements for Nuclear-Safety-Related Concrete Structures*, 2001.
- [9] CEB Task Group, *Design of Fastenings in Concrete*, Design guide, 1996.