

수치해석에 의한 직매형 앵커기초의 인장설계기준 평가

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

장 정 범†

Jang, Jung-Bum

서 용 표*

Suh, Yong-Pyo

(논문접수일 : 2004년 12월 2일 ; 심사종료일 : 2005년 5월 27일)

요 지

본 연구에서는 국내 원전에서 기기 정착을 위하여 가장 널리 적용되는 직매형 앵커기초를 대상으로 앵커기초의 인장 설계기준에 대한 적정성을 검토하기 위하여 수치해석이 수행되었다. 본 연구에서 수치해석모형에 적용된 파괴기준으로서 콘 크리트와 같은 유사 취성재료에는 Microplane모형이, 앵커볼트와 같은 연성재료에는 탄성-완전 소성모형이 적용되었다. 그리고, 균열 발생현상을 모사하기 위하여 분산균열모형을 채택하였다. 개발된 수치해석모형은 다양한 경우의 실증시험결과를 근거로 신뢰성이 검증되었으며, 검증된 수치해석모형과 앵커볼트의 유효매입깊이를 변수로 한 다양한 경우에 대한 수치해석을 통하여 직매형 앵커기초의 인장설계기준으로서 적용이 가능한 ACI 349 Code와 CEB-FIP Code가 평가되었고, 그 보수성이 확인되었다.

핵심용어 : 직매형 앵커기초, ACI 349 Code, CEB-FIP Code, 수치해석

Abstract

Numerical analysis is carried out to identify the appropriateness of the design codes that is available for the tensile 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 to simulate 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 tensile design of cast-in-place anchor and it is proved that both design codes give a conservative results for real tensile capacity of cast-in-place anchor.

keywords : cast-in-place anchor, ACI 349 Code, CEB-FIP Code, numerical analysis

1. 서 론

국내 원자력발전소 내에 설치되는 기기, 배관 및 전기설비 등을 콘크리트 구조물에 정착하기 위한 앵커기초는 ACI 349 Code를 기준으로 설계되어 왔다. 그러나, 유럽에서 수행된 많은 앵커기초의 성능평가 관련 시험결과들과 CEB-FIP Code의 CCD(Concrete Capacity Design) 방법이 ACI 349 Code에 의하여 설계된 앵커기초가 일부

경우에 대해 실제 성능보다 과대평가되는 문제점을 지적하였다.(Fuchs 등, 1995; Klingner 등, 1999) 이에 따라 ACI 349 Code는 앵커기초의 성능이 과대평가되는 문제점을 개선하기 위하여 2001년도에 CEB-FIP Code의 CCD방법을 근거로 개정되었다.(ACI, 2001)

그러나, 개정된 ACI 349 Code의 적용범위가 앵커볼트의 직경이 2in.이하이고, 유효매입깊이가 25in.이하인 앵커기초로 한정됨에 따라 격납건물 내 주요 기기들, 즉

† 책임저자, 정회원 · 한국전력공사 전력연구원 구조연구실 책임연구원
전화: 042-865-5735 ; Fax: 042-865-5729
E-mail: jbjang@kepri.re.kr

* 한국전력공사 전력연구원 구조연구실 책임연구원

• 이 논문에 대한 토론을 2005년 12월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2005년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

Pressurizer, Steam generator, Reactor coolant pump 및 Reactor vessel 등에 요구되는 대형 직매형 앵커기초에는 ACI 349 Code의 적용이 불가능한 실정이다. 이에 대한 대안으로 미국 원자력 규제위원회가 발행한 SRP (Standard Review Plan) 3.8.4의 부록 E (Draft, Rev. 2)에 나타난 바와 같이 각 경우별로 실증시험결과에 일치하는 설계방법을 채택하여 적용할 수 있으나, (US NRC, 1996) 원전 내 설치되는 수많은 대형 앵커기초에 대해 관련 시험규정에 의거 각각 실증시험을 수행하여 시험결과를 확보한다는 것은 불가능한 실정이다(장정범 등, 2004).

따라서, 본 연구에서는 기존에 수행된 다양한 경우의 직매형 앵커기초에 대한 실증시험결과에 일치하는 수치해석 모형을 개발하고 그 신뢰성을 검증하였다. 이와같이 검증된 수치해석모형을 이용하고 앵커볼트의 유효매입깊이와 콘크리트 연단과 앵커볼트 사이의 거리영향인 Edge effect를 해석변수로 하여 앵커볼트의 직경이 2in. 이상이고 유효매입깊이가 25in. 이상인 직매형 앵커기초의 인장설계를 위한 ACI 349 Code 및 CEB-FIP Code의 적용성을 평가하였다.

2. 설계기준

2.1 ACI 349 Code

인장하중하에서 균열이 발생한 콘크리트 부재에 설치된 앵커기초의 기본 콘크리트 인장파괴강도, N_b 는 식 (1)과 같으며, 공칭 콘크리트 인장파괴강도, N_{cb} 는 식 (2)와 같다.

$$N_b = k \sqrt{f_c} h_{ef}^{1.5} \text{ (단위: lb)} \quad (1)$$

$$N_{cb} = \frac{A_N}{A_{M0}} \psi_1 \psi_2 \psi_3 N_b \text{ (단위: lb)} \quad (2)$$

여기서 k 는 직매형 앵커기초의 경우 24이며, f_c 는 콘크리트의 압축강도(psi), h_{ef} 는 앵커볼트의 유효매입깊이(in.)이다. 또한, A_N 은 앵커볼트의 중심으로부터 $1.5h_{ef}$ 만큼 한쪽 외부방향으로 파괴가 발생하는 단일 및 다중 앵커기초의 파괴 투영면적을 나타내며, A_{M0} 는 콘크리트의 연단으로부터 멀리 떨어진 단일 앵커기초의 파괴 투영면적으로 식 (3)과 같다.

$$A_{M0} = 9h_{ef}^2 \quad (3)$$

식 (2)에서 ψ_1 은 편심하중을 받는 다중 앵커기초의 수정계수이고, ψ_2 는 콘크리트 연단과 앵커볼트 사이의 거리에 의하여 발생하는 수정계수, 그리고 ψ_3 는 균열발생에 따른 수정계수를 나타내나 본 연구에서는 ψ_2 만을 고려하며 식 (4)와 같다.

$$\psi_2 = 1 \text{ if } c_{\min} \geq 1.5h_{ef} \quad (4a)$$

$$\psi_2 = 0.7 + 0.3 \frac{c_{\min}}{1.5h_{ef}} \text{ if } c_{\min} < 1.5h_{ef} \quad (4b)$$

여기서, c_{\min} 은 콘크리트 연단과 앵커볼트사이의 가장 짧은 거리를 나타낸다.

2.2 CEB-FIP Code

균열 콘크리트 부재에서 외부영향이 없는 단일 앵커기초의 경우, 기본 콘크리트 인장파괴강도, N_{M0} 는 식 (5)와 같으며, 공칭 콘크리트 인장파괴강도, N_N 는 식 (6)과 같다.(CEB Task Group, 1994; 1996)

$$N_{M0} = k_1 \sqrt{f_c} h_{ef}^{1.5} \text{ (단위: N)} \quad (5)$$

$$N_N = \frac{A_N}{A_{M0}} \psi_1 \psi_2 \psi_3 \psi_4 N_{M0} \text{ (단위: N)} \quad (6)$$

여기서, k_1 은 직매형 앵커기초의 경우 9이며, f_c 는 콘크리트의 압축강도 (MPa), h_{ef} 는 앵커볼트의 유효매입깊이 (mm)이다.

식 (6)에서 ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 , A_N 및 A_{M0} 는 상기 2.1절에서 언급한 것처럼 ACI 349 Code와 동일한 계수이며, ψ_4 는 Shell spalling factor이나 무근 콘크리트를 대상으로 하는 본 연구에서는 고려하지 않는다.

3. 해석모형의 검증

3.1 해석모형

본 연구에서는 직매형 앵커기초의 인장성능을 평가하기 위한 수치해석을 수행하기 위하여 독일 Stuttgart대학에

서 개발한 MASA 3 프로그램을 사용하였다(Ozbolt, 2003; Ozbolt 등, 2001). MASA 3 프로그램은 콘크리트와 같은 유사 취성재료(Quasi-brittle material)로 이루어진 철근 콘크리트 구조물의 비선형 해석을 위하여 개발된 3차원 유한요소해석 프로그램이다.

본 연구대상인 직매형 앵커기초의 모형을 위하여 콘크리트와 같은 유사 취성재료는 Microplane모형을, 철근이나 앵커볼트와 같은 연성재료는 탄성-완전 소성모형(Elastic-perfectly plastic model)을 파괴기준으로서 적용하였다. 그림 1과 2는 Microplane 모형의 응력-변형률 특성을, 그림 3은 탄성-완전 소성모형의 응력-변형률 특성을 보여주고 있다(Chen, 1982).

하중의 작용에 따라 직매형 앵커기초에 발생하는 균열현상을 모사하기 위하여 분산균열모형(Smeared crack model)을 채택하였고, 전형적인 분산균열모델의 단점인 요소 크기에 따라 민감하게 나타나는 해석결과를 방지하기 위하여 균열띠이론(Crack band method)의 일종인 Stress relaxation method를 적용하였다.

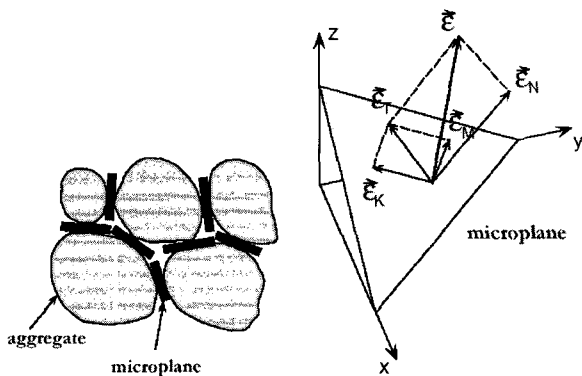


그림 1 Microplane 모형

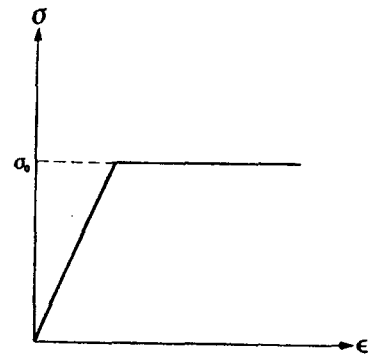


그림 3 탄성-완전 소성모형의 응력-변형률도

3.2 해석모형의 검증

본 연구에서 개발한 수치해석모형의 신뢰성을 검증하기 위하여 기존에 직매형 앵커기초를 대상으로 수행된 다양한 경우의 실증시험(장정범 등, 2003)과 동일한 시험조건, 즉 콘크리트 시험체 및 앵커볼트의 제원, 재료특성, 하중 및 경계조건 등을 반영하여 수치해석을 수행하였다. 표 1은 기존에 수행되었던 시험조건과 그에 따른 콘크리트 인장파괴강도를 나타내고 있으며, 그림 4는 본 연구대상인 직매형 앵커기초를 보여주고 있다.

표 1 시험조건

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

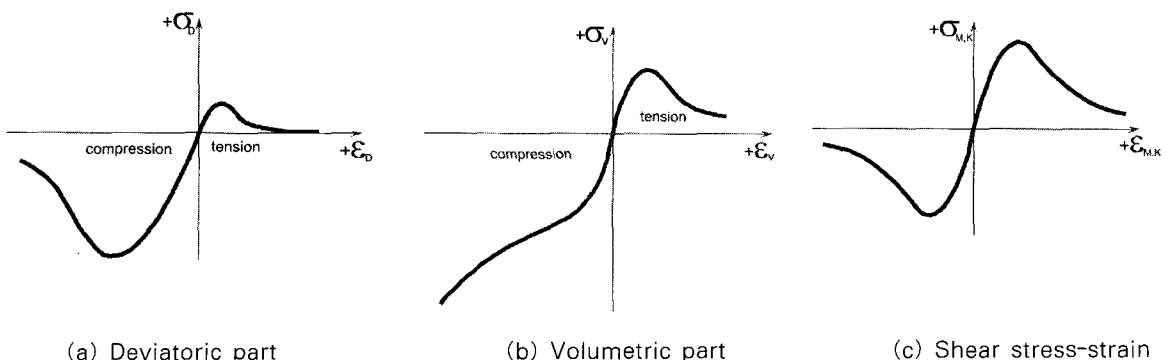
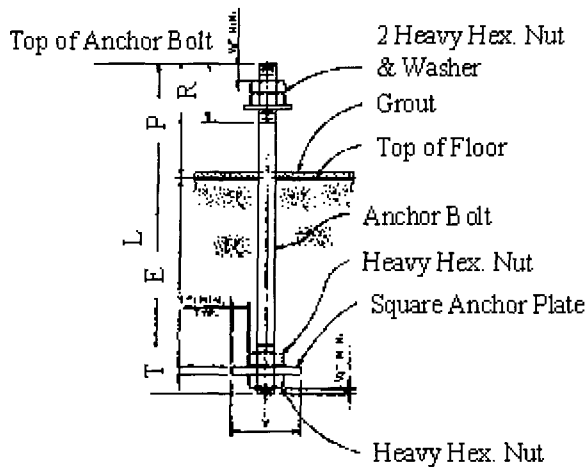
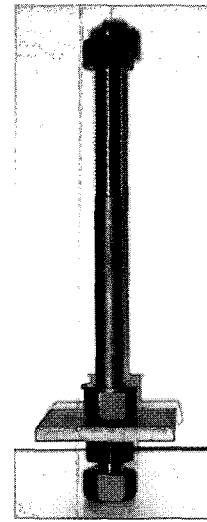


그림 2 Microplane 모형의 응력-변형률도

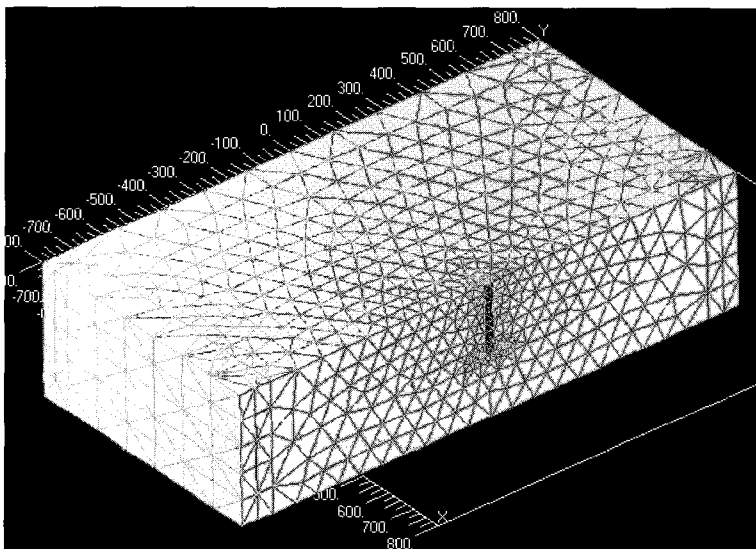


(a) 표준도면

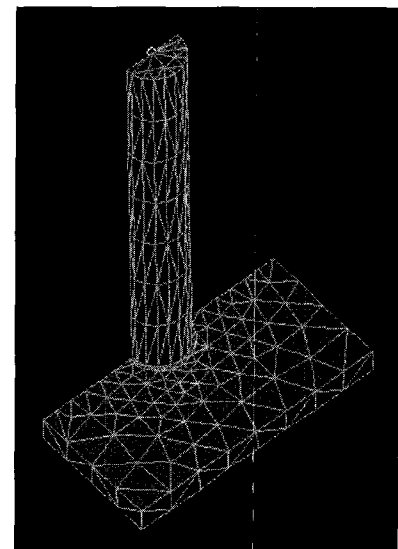


(b) 앵커볼트

그림 4 직매형 앵커기초



(a) 전체 수치해석모형



(b) 앵커볼트 및 Square anchor plate

그림 5 수치해석모형

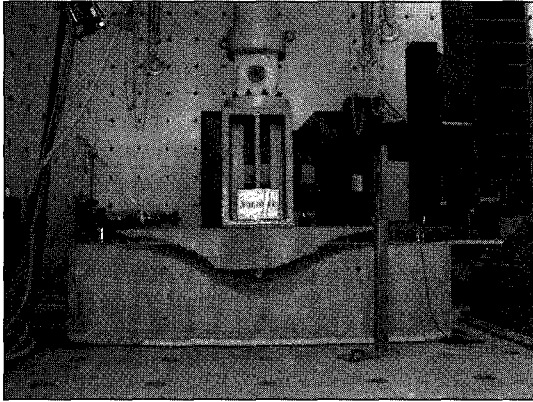
표 1의 각 시험조건에 대한 수치해석을 수행하기 위해 직매형 앵커기초를 구성하는 콘크리트, 앵커볼트 및 Square anchor plate는 4 절점 고체요소로 모형화하였으며, 모든 시험조건이 앵커볼트를 중심으로 대칭면을 형성하므로 반 단면 해석을 수행하였다. 그림 5는 표 1의 시험조건 중 시험조건 1에 대한 수치해석을 수행하기 위하여 구성한 수치해석모형을 보여주고 있다.

수치해석결과, 표 2에서 알 수 있는 것처럼 수치해석에 의한 직매형 앵커기초의 콘크리트 인장파괴강도가 시험결과와 거의 일치함을 알 수 있으며, 또한 직매형 앵커기초의 파괴형상도 그림 6에서 알 수 있는 것처럼 본 연구의

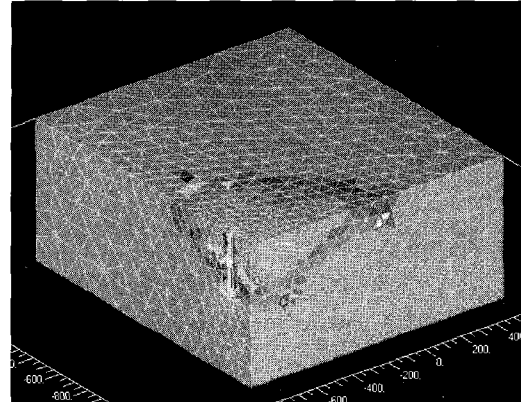
수치해석이 직매형 앵커기초의 실제 파괴형상을 거의 정확히 표현함을 확인할 수 있었다. 따라서, 본 연구에서 개발한 수치해석모형을 이용하여 직매형 앵커기초의 인장 설계기준에 대한 적정성을 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

표 2 직매형 앵커기초의 콘크리트 인장파괴강도 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

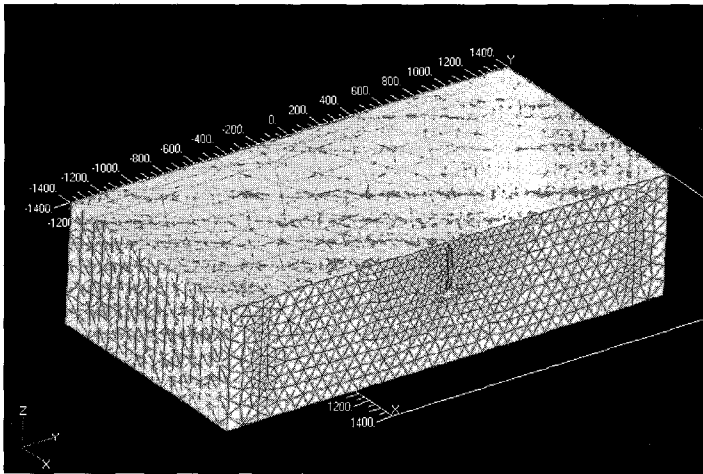


(a) 시험결과

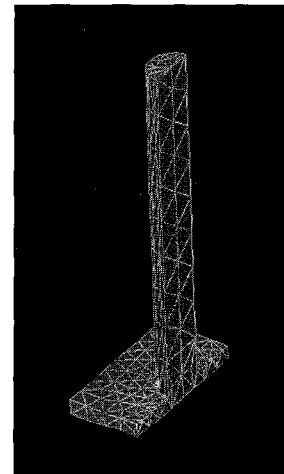


(b) 수치해석결과

그림 6 직매형 앵커기초의 파괴형상



(a) 전체 수치해석모형



(b) 앵커볼트 및 Square anchor plate

그림 7 직매형 앵커기초의 수치해석모형

표 3 수치해석조건

해석조건	앵커볼트의 유효매입깊이 (cm)	앵커볼트의 직경 (cm)	앵커볼트와 콘크리트 연단사이의 거리 (cm)	비고
1	5	1.9	중양부	ACI 349 Code의 적용범위
2	10	1.9		
3	20	2.9		
4	30	4.1		
5	64	7.0		
6	89	9.5	32	ACI 349 Code의 적용 제한범위
7	64	7.0		

4. 인장설계기준 평가

4.1 해석조건

상기 3.2절에서 검증된 수치해석모형을 이용하여 국내

외에서 직매형 앵커기초의 인장 설계기준으로 적용이 가능한 ACI 349 Code과 CEB-FIP Code의 적용성을 평가하였다. 해석변수로서는 직매형 앵커기초가 ACI 349 Code의 적용 제한범위를 초과하는 경우에 대해서도 각 설계기준의 적용성을 평가하기 위하여 앵커볼트의 직경이 2

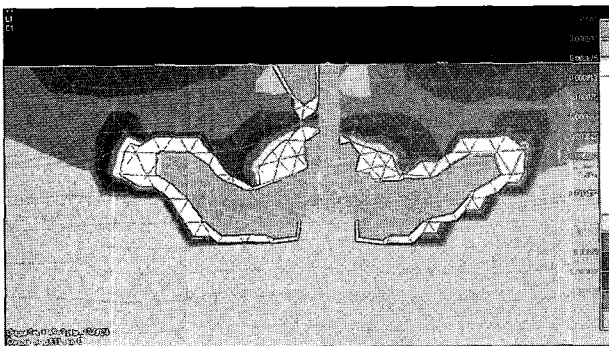
in.(5.08cm)와 유효매입깊이가 25 in.(63.5cm)를 초과하는 경우도 고려하였으며, 또한 ACI 349 Code가 개정되기 이전 비보수적인 설계결과를 주었던 Edge effect 가 존재하는 경우도 고려하였다. 표 3은 본 연구에서 고려된 해석조건을 나타내고 있으며, 그림 7은 표 3의 수치해석을 위한 대표적인 해석모형을 도시하고 있고, 모든 해석조건이 앵커볼트를 중심으로 대칭면을 형성하므로 반단면 해석을 수행하였다.

4.2 해석결과

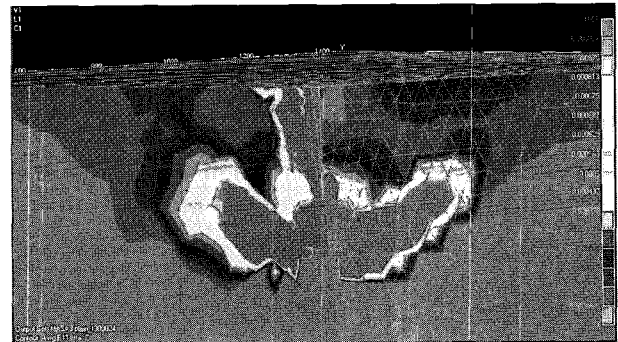
그림 8과 9는 표 3의 해석조건 1~6 및 해석조건 7에서 나타난 대표적인 직매형 앵커기초의 파괴형상을 도시하고 있으며, 모두 본 연구에서 예측한 바와 동일하게 Concrete breakout failure가 발생함을 알 수 있다. 그림 8(a)와 9(a)는 대칭면에서 나타난 직매형 앵커기초의 파괴형상을, 그림 8(b)와 9(b)는 앵커볼트를 중심으로 대칭면을 절단한 면에서 본 직매형 앵커기초의 파괴형상을 나타내고 있다.

그림 10은 표 3의 수치해석조건에 대하여 직매형 앵커기초의 콘크리트 인장파괴강도에 대한 수치해석결과와

ACI 349 Code 및 CEB-FIP Code의 설계결과를 비교, 도시한 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 ACI 349 Code 및 CEB-FIP Code는 모든 해석경우에 대해 상호 일치하는 설계결과를 나타내고 있으며, 이들 설계기준들은 수치해석결과에 비해 보수적인 설계결과를 제시하는 것으로 나타났다. 특히, ACI 349 Code가 앵커볼트의 직경 2 in.와 유효매입깊이 25 in.미만의 직매형 앵커기초로 적용상의 제한을 규정하고 있지만, 본 연구의 해석조건 5~7에서 나타난 바와 같이 ACI 349 Code의 적용 제한범위를 초과하면서 직매형 앵커기초의 콘크리트 인장파괴강도에 대한 외부영향의 유무와 상관없이 ACI 349 Code가 모두 보수적인 설계결과를 제시하는 것으로 나타났다. 따라서, ACI 349 Code가 앵커볼트의 직경 2 in.와 유효매입깊이 25 in.를 초과하는 직매형 앵커기초에 대한 인장설계에도 적용이 가능한 것으로 판단된다. 그러나, 앵커볼트의 유효매입깊이가 증가할수록 각 설계기준에 의한 설계결과가 수치해석결과와 큰 차이를 보임에 따라 원전의 최적 설계와 이에 따른 경제성 제고를 고려할 때 이들 설계기준의 개선이 필요할 것으로 판단된다(장정범 등, 2003).

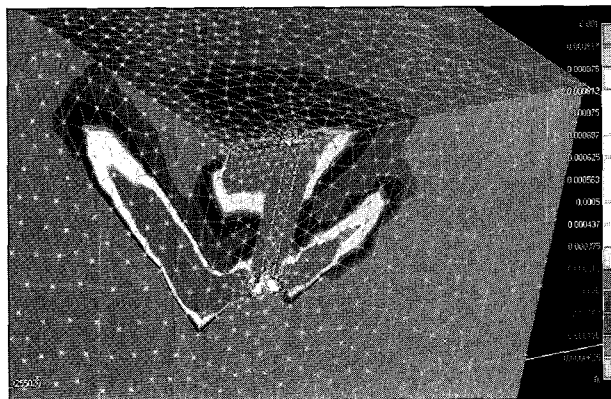


(a) 정면도

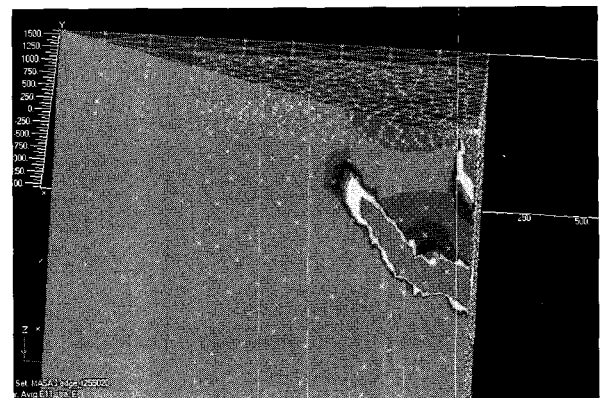


(b) 단면도

그림 8 외부영향이 없는 직매형 앵커기초의 파괴형상

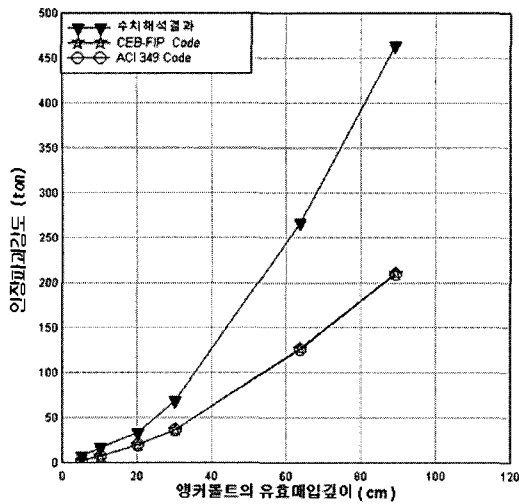


(a) 정면도

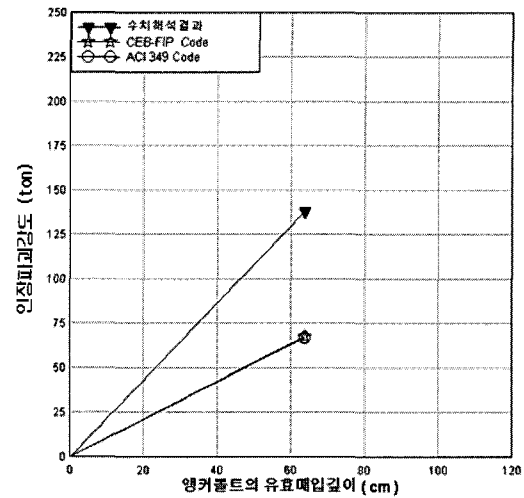


(b) 단면도

그림 9 Edge effect 가 존재하는 직매형 앵커기초의 파괴형상



(a) 해석조건 1 ~ 6



(b) 해석조건 7

그림 10 수치해석결과와 각 설계기준의 설계결과 비교

5. 결 론

본 연구에서는 원전의 기기기초용으로 널리 적용되고 있는 직매형 앵커기초에 대한 인장 설계기준인 ACI 349 Code와 CEB-FIP Code의 적용성을 수치해석을 통하여 평가하였다. 설계기준의 적용성을 평가하기 위하여 기존에 수행된 다양한 경우의 직매형 앵커기초에 대한 실증시험결과에 일치하는 수치해석모형을 개발하고 그 신뢰성을 검증하였으며, 검증된 수치해석모형을 이용하고 앵커볼트의 유효매입깊이와 콘크리트 연단과 앵커볼트 사이의 거리영향인 Edge effect를 해석변수로 하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석결과, ACI 349 Code와 CEB-FIP Code는 ACI 349 Code의 적용 제한범위를 초과하는 경우를 포함하여 모든 수치해석결과에 비해 보수적인 설계결과를 제시하는 것으로 나타나, ACI 349 Code의 적용 제한범위인 앵커볼트의 직경 2 in.와 유효매입깊이 25 in.이상의 직매형 앵커기초에 대한 인장설계에도 적용이 가능한 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력 연구개발 중장기 계획사업의 일부로 수행되었으며, 이에 깊이 감사드립니다.

참 고 문 헌

장정범, 서용표, 이종립(2003) 직매형 앵커기초의 설계기

준 개선에 관한 연구, 대한토목학회 논문집, 23(6A), pp.1331~1338.

장정범, 서용표, 이종립(2004) 수치해석에 의한 직매형 앵커기초의 인장 설계기준 평가, 한국전산구조공학회 학술발표회 논문집, 17(1), pp.209~216.

ACI 349(2001) *Code Requirements for Nuclear-Safety-Related Concrete Structures*.

CEB Task Group(1994) *Fastenings to Concrete and Masonry Structures*, State of the art report.

CEB Task Group(1996) *Design of Fastenings in Concrete*, Design guide.

Chen, W. F.(1982) *Plasticity in Reinforced Concrete*, McGraw-Hill.

Fuchs, W., Eligehausen, R., Breen, J.E. (1995) Concrete Capacity Design(CCD) Approach for Fastening to Concrete, *ACI Structural Journal*, 92(1), pp.73~94.

Klingner R.E., Muratli H., Shirvani M. (1999) *A Technical Basis for Revision to Anchorage Criteria*, NUREG/CR5563.

Ozbolt, J.(2003) *MASA 3(Finite element program for 3D nonlinear analysis of concrete and reinforced concrete structures)*.

Ozbolt, J., Li, Y., Kozar, I.(2001) Microplane model for concrete with relaxed kinematic constraint, *Int. J. of Solids and Structures* 38, pp.2683~2711.

US NRC(1996) *Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants 3.8.4 Appendix E(Draft Rev. 2)*.