

직매형 앵커기초의 설계기준 개선

An Improvement of Design Criteria for Cast-In-Place Anchor

장정범, 서용표, 이종립
한국전력공사 전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

요 약

본 연구에서는 국내 원전에서 기기 정착을 위하여 가장 널리 적용되는 직매형 앵커기초를 대상으로 앵커기초의 설계기준에 대한 적정성을 검토하기 위하여 실증시험이 수행되었다. 본 실증시험을 위하여 무균열 및 무근 콘크리트 조건에서 7 경우에 대한 35 개의 직매형 앵커기초시험체가 ASTM E488 에 근거하여 제작되었다. 주요 시험변수로서는 앵커볼트의 유효매입깊이, 앵커볼트와 콘크리트 연단사이의 거리 및 다중 앵커기초 등이 고려되었다. 본 시험에서 인장하중을 유발시키기 위하여 100 tonf 용량의 Actuator 가 0.5 mm/min. 의 변위제어를 통하여 적용되었다. 본 연구를 통하여 ACI 349-01 과 CEB-FIP Code 의 CCD 방법의 보수성이 확인되었고, 원전의 경제성을 향상시키기 위하여 실증시험결과를 근거로 개선된 설계기준식을 제안하였다.

Abstract

Actual model tests are carried out to examine the appropriateness of design criteria that is available for the anchorage design in this study. These tests are intended for the cast-in-place anchor that is widely used for the fastening of equipment in Korean NPPs. 35 test specimens taking account of 7 test conditions are manufactured on a basis of ASTM E488 under non-cracked and plain concrete for these actual model tests. As principal test variables, effective anchor embedment depth, anchor with edge effects, and anchor with overlapping failure volume etc. are chosen. In order to apply the tensile force, 100 tonf-capacity actuator is used with displacement control of 0.5 mm/min. It is proved that ACI 349-01 and CCD procedure of CEB-FIP Code are very conservative against test results through these actual model tests and the improved design criterion is proposed on a basis of test results in order to better the economical efficiency of NPPs in this study.

1. 서 론

국내 원자력발전소 내에 설치되는 기기, 배관 및 전기설비 등을 콘크리트 구조물에 정착하기 위한 앵커기초는 ACI 349-85 를 기준으로 설계되어 왔다. 그러나, 최근 유럽에서 수행된 많은 앵커기초의 성능평가 관련 시험결과들과 CEB-FIP Code 의 CCD 방법이 ACI 349-85 에 의하여 설계된 앵커기초가 일부 경우에 대해 실제 성능보다 과대평가되는 문제점을 제시하였다. 이에 따라 미국 NRC 에서도 1996 년에 발행한 SRP 에 상기의 문제와 관련하여 앵커기초 설계시 ACI 349 가 개정될 때까지 각각의 경우에 대해 시험결과에 부합되는 설계를 수행하도록 요구하였다.

ACI 349-85 와 CEB-FIP Code 의 CCD 방법 사이의 주요 차이점은 첫째, 앵커의 지압연단으로부터 콘크리트 표면까지의 파괴경사각을 CCD 방법은 ACI 349-85 의 45° 대신 35° 로 가정하고 있고, 둘째 ACI 349-85 는 Concrete breakout strength 가 앵커볼트 유효매입깊이의 2 층에 비례하나 CCD 방법은 1.5 층에 비례하며, 셋째 ACI 349-85 가 파괴면을 원추형으로 이상화한데 반해서 CCD 방법은 사각형 피라미드 형태로 가정하고 있다는 점이다. 이외에도, CCD 방법은 ACI 349-85 가 고려치 않는 앵커볼트와 콘크리트 연단사이의 거리에 의한 영향과 다중 앵커기초에서 편심하중에 의하여 발생하는 응력교란 등을 고려하였다.

이에 따라 ACI 349-85 가 2001 년도에 CEB-FIP Code 의 CCD 방법을 근거로 앵커기초 설계부분이 개정됨으로써 ACI 349-01 은 이전에 논란이 되어왔던 상기의 문제점들이 개선되었다. 따라서, 본 연구에서는 원전의 앵커기초 설계기준으로 적용되고 있는 ACI 349-85 및 개정된 ACI 349-01 과 CEB-FIP Code 의 CCD 방법에 대해 실증시험에 의한 시험결과와 비교분석함으로써 각 설계기준의 문제점 및 적정성을 검토하고자 한다.

2. 설계기준

2.1 ACI 349-85

외부영향으로 인하여 성능저하가 발생하지 않는 단일 앵커기초의 Nominal concrete breakout strength 는 식 (2.1) 과 같다.

$$N_{no} = 4 \sqrt{f_c} \pi h_{ef}^2 \left[1 + \frac{d_u}{h_{ef}} \right] lb \quad (2.1)$$

여기서, d_u 는 앵커볼트의 직경(in.), f_c 는 콘크리트의 압축강도(psi), h_{ef} 는 앵커볼트의 유효매입깊이(in.) 이다.

다중앵커에서 앵커볼트의 인접설치로 인한 파괴영역의 겹침 및 콘크리트 연단과 앵커볼트 사이의 거리가 앵커볼트의 유효 매입깊이보다 작음 ($c < h_{ef}$) 으로 인하여 발생하는 Concrete breakout strength 의 감소는 식 (2.2) 와 같이 실제 투영면적에 대한 단일 앵커기초 투영면적의 비를 곱하는 것으로 고려될 수 있다. c 는 콘크리트 연단과 앵커볼트사이의 가장 짧은 거리를 나타낸다.

$$N_n = \left[\frac{A_N}{A_{N0}} \right] N_{no} \quad lb \quad (2.2)$$

여기서, A_{N0} 는 단일 앵커기초의 투영면적, A_N 는 Concrete breakout strength 의 감소를 일으키는 외부영향을 고려한 실제 투영면적이다.

2.2 ACI 349-01

인장하중하에서 균열이 발생한 콘크리트 부재에 설치된 앵커기초의 Basic concrete breakout strength, N_b 는 식 (2.3) 과 같으며, Nominal concrete breakout strength, N_{cb} 는 식 (2.4) 와 같다.

$$N_b = k \sqrt{f_c} h_{ef}^{1.5} \quad lb \quad (2.3)$$

$$N_{cb} = \frac{A_N}{A_{N0}} \psi_1 \psi_2 \psi_3 N_b \quad lb \quad (2.4)$$

여기서 k 는 직매형 앵커기초의 경우 24 이다. A_N 은 앵커볼트의 중심으로부터 $1.5h_{ef}$ 만큼 한쪽 외부방향으로 파괴가 발생하는 단일 및 다중 앵커기초의 파괴 투영면적을 나타내며, A_{N0} 는 콘크리트의 연단으로부터 멀리 떨어진 단일 앵커기초의 파괴 투영면적으로 식 (2.5) 와 같다.

$$A_{N0} = 9h_{ef}^2 \quad (2.5)$$

식 (2.4) 에서 ψ_1 은 편심하중을 받는 다중앵커의 수정계수이나 본 연구에서는 고려치 않는다.

ψ_2 는 콘크리트 연단과 앵커볼트 사이의 거리에 의하여 발생하는 수정계수를 나타내며, 식 (2.6) 과 같다.

$$\psi_2 = 1 \quad \text{if} \quad c_{\min} \geq 1.5h_{ef} \quad (2.6.1)$$

$$\psi_2 = 0.7 + 0.3 \frac{c_{\min}}{1.5h_{ef}} \quad \text{if} \quad c_{\min} < 1.5h_{ef} \quad (2.6.2)$$

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

ψ_3 는 균열발생에 따른 수정계수로서 사용하중조건의 설계하중 조합하에서 균열이 나타나지 않는 ($f_t < f_r$) 콘크리트 부재에 앵커볼트가 설치된 경우, 직매형 앵커기초의 수정계수는 다음과 같다.

$$\psi_3 = 1.25 \quad (2.7)$$

그러나, 사용하중조건의 설계하중 조합하에서 콘크리트 부재에 균열이 발생하는 경우에는 ψ_3 가 1.0 이 적용된다.

2.3 CEB-FIP Code 의 CCD 방법

균열 콘크리트 부재에서 외부영향이 없는 단일 앵커기초의 경우, Basic concrete breakout strength N_{N0} 는 식 2.8 과 같으며, Nominal concrete breakout strength, N_N 는 식 (2.9) 와 같다.

$$N_{N0} = k_1 \sqrt{f_c} h_{ef}^{1.5} N \quad (2.8)$$

$$N_N = \frac{A_N}{A_{N0}} \psi_1 \psi_2 \psi_3 \psi_4 N_{N0} \quad (2.9)$$

여기서, k_1 은 직매형 앵커기초의 경우 9 이다.

식 (2.9) 에서 ψ_1 , ψ_2 , ψ_3 , A_N 및 A_{N0} 는 상기 2.2 절에서 언급한 것처럼 ACI 349-01 과 동일하나, 단 ψ_3 의 수정계수는 다음과 같다.

$$\psi_3 = 1.4 \quad (2.10)$$

그러나, 콘크리트 부재에 균열이 발생하는 경우 ψ_3 는 1.0 이 적용된다.

ψ_4 는 Shell spalling factor 이나 무근 콘크리트를 대상으로 하는 본 연구에서는 고려하지 않는다.

3. 실증시험

본 연구의 목적은 원전 기기의 앵커기초 설계기준으로 적용되고 있는 ACI 349-85 및 개정된 ACI 349-01 과 CEB-FIP Code 의 CCD 방법에 대해 실증시험에 의한 시험결과와 비교분석함으로써 각 설계기준의 문제점 및 적정성을 검토하기 위함이다. 따라서, 본 실증시험을 위하여 7 경우의 시험조건에 대해 35 개의 직매형 앵커기초시험체가 ASTM E488 에 근거하여 제작되어 시험이 수행되었다.

본 연구의 세부적인 실증시험계획은 다음과 같다

3.1 시험변수

본 연구의 목적이 국내 원전에서 널리 활용되는 직매형 앵커기초를 대상으로 무균열 및 무근 콘크리트 조건에서 실증시험을 통하여 각 설계기준의 적정성을 비교분석하는 것

이므로 콘크리트의 취성파괴, 즉 콘크리트 취성파괴가 발생하도록 모든 시험변수를 선정하였다.

[1] 하중조건

앵커기초의 설계하중은 인장하중과 전단하중이나 일반적으로 앵커기초는 앵커볼트의 유효매입깊이가 일정 수준 이상의 경우 전단하중에 대하여 충분한 지지력을 발휘하기 때문에 별도로 시험을 수행할 필요가 없다. 따라서, 본 시험에서는 인장하중만을 고려하였다.

[2] 앵커볼트의 직경

앵커볼트의 직경은 앵커볼트의 Nominal strength 가 Nominal concrete breakout strength 를 초과하도록 4 개의 앵커볼트 직경이 선정되었다. 선정된 앵커볼트 직경은 1.91, 2.86, 4.13, 5.08 cm 이며, 재질은 ASTM A193 Gr B7 이다.

[3] 앵커볼트의 유효매입깊이

기존 앵커기초 시험결과를 근거로 볼 때, ACI 349 와 CEB-FIP Code 의 CCD 방법이 앵커볼트의 유효매입깊이가 10 cm 이하의 경우에는 모두 보수적인 설계결과를 보이나, 유효매입깊이가 10 cm 이상부터는 ACI 349-01 및 CEB-FIP Code 의 CCD 방법과 달리 ACI 349-85 가 비보수적인 설계결과를 나타내는 경우가 있다. 따라서, 본 시험의 목적이 실증시험에 의한 앵커기초 설계기준들의 적정성 비교이기 때문에 앵커볼트의 유효매입깊이를 5, 10, 20 cm 의 3 경우로 선정하였다.

[4] 앵커볼트와 콘크리트 연단사이의 거리

앵커볼트와 콘크리트 연단사이의 거리에 따른 Concrete breakout strength 의 영향을 분석하기 위하여, 콘크리트의 취성파괴가 발생하는 경우 나타나는 원추형이나 피라미드 파괴형상의 반경보다 작도록 앵커볼트의 유효매입깊이의 1/2 을 앵커볼트와 콘크리트 연단사이의 거리로 하여 시험변수로 선정하였다. 선정된 앵커볼트와 콘크리트 연단사이의 거리는 5, 15 cm 이다.

[5] 다중 앵커기초

원전 내 기기에 적용되는 앵커기초의 경우 앵커볼트 사이의 거리가 짧아 파괴영역이 겹쳐짐으로 인해 앵커기초의 Concrete breakout strength 가 감소하는 경우가 대부분이므로 본 연구에서도 이러한 다중 앵커기초의 영향을 고려한 시험을 수행하였다. 다중 앵커기초의 영향을 고려하기 위한 규격 및 제원은 다음과 같다.

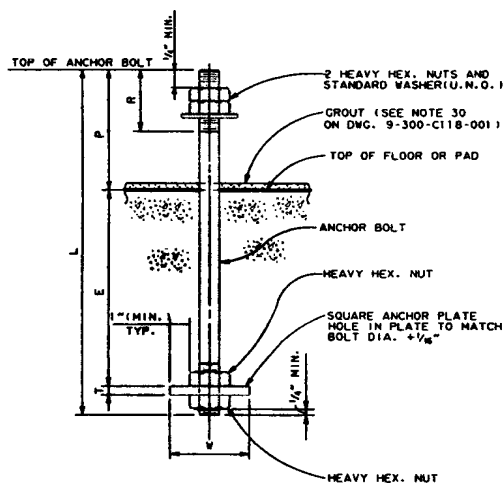
- 앵커볼트의 수 : 4 개
- 앵커볼트 사이의 간격 : 20 cm
- 앵커볼트의 유효매입깊이 : 10, 20 cm

기타 시험변수로서 콘크리트의 설계기준 압축강도는 310kgf/cm^2 이며, 표 3.1 은 본 연구에서 수행된 시험경우의 수를 나타낸다. 그림 3.1 은 표준원전에 적용되는 직매형

앵커기초의 표준도면과 본 연구에 적용된 직대형 앵커기초를 보여주고 있다.

표 3.1 시험경우의 수

시험 변수	하중조건	앵커볼트의 유효매입깊이 (cm)	단일 및 다중앵커	앵커볼트와 콘크리트 연단사이의 거리 (cm)	수 량 (개)	비 고
1	인장하중	5	단일앵커	중앙부	5	앵커볼트 간의 거리 : 20 cm
2		10			5	
3		20			5	
4		10	다중앵커		5	
5		20			5	
6		10	단일앵커		5	
7		30			5	
합 계				35		



(a) 표준도면



(b) 본 시험

그림 3.1 직대형 앵커기초

3.2 앵커기초시험체

본 실증시험을 위하여 제작된 앵커기초시험체는 ASTM E 488 에 따라 지지부 사이의 경간은 $4.0h_{ef}$ 로, 두께는 $2.0h_{ef}$ 로 하였다. 따라서, 제작된 앵커기초시험체의 제원은 $1.6\text{ m} \times 1.6\text{ m} \times 0.4\text{ m} - 20$ 개 와 $2.8\text{ m} \times 2.6\text{ m} \times 0.7\text{ m} - 15$ 개 (가로 \times 세로 \times 두께 - 개수) 로, 그림 3.2 는 제작된 앵커기초시험체를 보여준다.

또한, 시험횟수의 경우 ASTM E 488 에 따라 동일한 시험조건에 대하여 5 회의 시험을 수행하고 최종결과는 5 회의 시험결과에 대한 평균값을 사용하였다.

본 시험에서 사용하는 앵커볼트의 항복강도가 $73,000\text{ tonf/m}^2$ 이므로 앵커기초의 파괴가 콘크리트의 취성파괴라고 가정할 경우, 앵커볼트 자체의 탄성변위는 매우 작기 때문에 무시할 수 있으나, 본 연구에서는 시험의 정확도를 확인하기 위하여 인장하중 작용에 따른 앵커볼트 자체의 Slip 변위와 앵커기초시험체의 변위를 측정하였다. 앵커볼트의 자체 변위는 가력장비인 Actuator 에서 측정하였으며, 앵커기초시험체의 변위는 LVDT 를 설치하여 측정하였다.

그림 3.3 은 본 실증시험을 수행하기 위하여 설치된 100 tonf 용량의 Actuator, 가력프레임, 시험체 고정장비 및 하중전달장치 등을 보여준다.



그림 3.2 앵커기초시험체



그림 3.3 시험설비

3.3 시험결과

표 3.1 에 근거하여 실증시험을 수행한 결과를 그림 3.4, 3.5 및 3.6 에 도시하였다. 그림 3.4 는 시험변수 1 ~ 3 까지 앵커볼트의 유효매입깊이에 따른 단일 앵커기초의 시험결과를, 그림 3.5 는 시험변수 4 ~ 5 까지 콘크리트 파괴영역의 겹침으로 인해 앵커기초의 Concrete breakout strength 가 영향을 받는 다중 앵커기초의 시험결과를, 그림 3.6 은 시험

변수 6 ~ 7 까지 앵커볼트와 콘크리트 연단사이의 거리에 의하여 앵커기초의 Concrete breakout strength 가 영향을 받는 단일 앵커기초의 시험결과를 도시하고 있다.

그림 3.4, 3.5 및 3.6 에서 알 수 있는 것처럼 ACI 349-85 는 다중 앵커기초에서 앵커볼트의 인접설치로 인하여 콘크리트 파괴영역이 겹치는 경우와 앵커볼트와 콘크리트 연단사이의 거리가 앵커볼트의 유효매입깊이보다 작은 경우에 비보수적인 설계결과를 나타낸 반면, ACI 349-01 과 CEB-FIP Code 의 CCD 방법은 모든 경우에 대하여 유사한 크기로 보수적인 설계결과를 제시하는 것으로 나타났다.

따라서, 2001 년도에 개정된 ACI 349 를 국내 원전의 직매형 앵커기초 설계에 적용하는 것은 적절한 것으로 판단되나, 시험결과에 비해 매우 보수적이기 때문에 원전의 경제성을 향상시키기 위해서는 설계기준을 개선하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

3.4 설계기준 개선

상기 3.3 에서 언급한 것처럼 현재 원전 내 기기 앵커기초의 설계기준으로 적용중인 ACI 349-01 및 CEB-FIP Code 의 CCD 방법이 시험결과에 비해 보수적인 결과를 나타내고 있으며, 특히 앵커볼트의 유효매입깊이가 커질수록 그 보수성은 기하학적으로 증가하는 것으로 나타났다. 기존 설계기준을 개선함에 있어, 표 3.1 의 시험경우에 대한 두 설계기준의 결과가 시험결과에 비하여 각 경우에 있어서 일정한 60 % 정도의 크기를 나타냄에 따라 설계기준식에서 설계변수를 변화시키기보다는 k 계수를 일정 크기 증가시키는 것이 적절한 것으로 판단된다. 실증시험결과에 근거하여 본 연구에서 제안하는 설계기준식은 (3.1) 과 같다.

$$N_b = 36 \sqrt{f_c} h_{ef}^{1.5} lb \quad (3.1)$$

그림 3.4, 3.5 및 3.6 에 대해 본 연구에서 제안된 설계기준식 2.11 에 의한 설계결과를 추가하면 그림 3.7 ~ 3.9 와 같다. 그림에서 알 수 있는 것처럼 모든 경우에 대하여 본 연구에서 제시한 설계결과가 ACI 349-01 및 CEB-FIP Code 의 CCD 방법에 비하여 시험결과를 적절하게 표현하는 것으로 나타났다.

4. 결 론

실증시험을 통하여 원전의 앵커기초 설계기준으로 적용되고 있는 ACI 349 및 CEB-FIP Code 의 CCD 방법의 적정성을 검토한 결과, 일부 경우에 대해 ACI 349-85 의 비보수성을 확인할 수 있었으며, 개정된 ACI 349-01 과 CEB-FIP Code 의 CCD 방법은 모든 경우에 대해 보수적이며 상호 유사한 설계결과를 제시하는 것으로 분석되었다.

기존 설계기준의 보수성을 개선하기 위하여 설계결과와 시험결과를 비교분석한 결과, 앵커볼트의 유효매입깊이에 대해 일정한 차이를 보임에 따라 본 연구에서는 기존 설계기준식을 근거로 시험결과에 근접하는 개선된 설계기준식을 제안하였다.

ACI 349-01 과 CEB-FIP Code 의 CCD 방법이 매우 보수적인 설계결과를 제시함에 따라 향후 원전의 경제성 향상을 위해 이 기준들을 개선할 필요가 있는 것으로 판단된다.

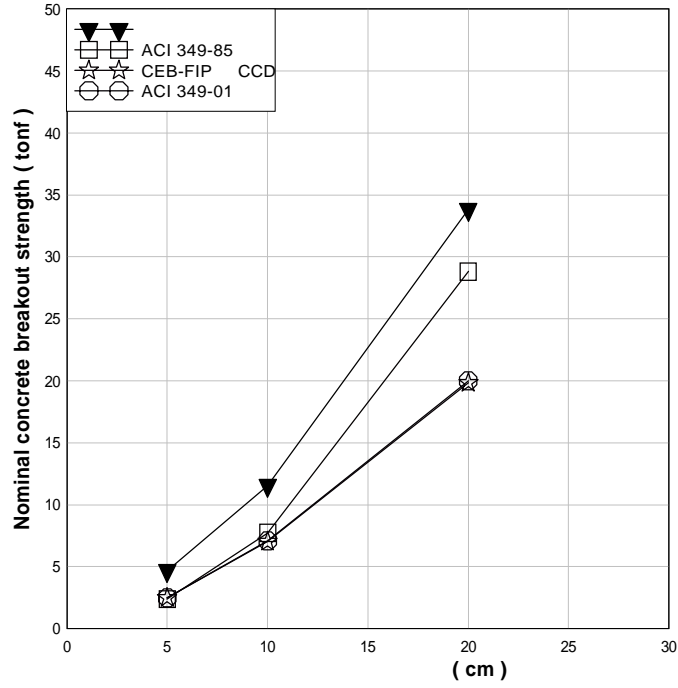


그림 3.4 앵커볼트의 유효매입깊이에 따른 시험결과

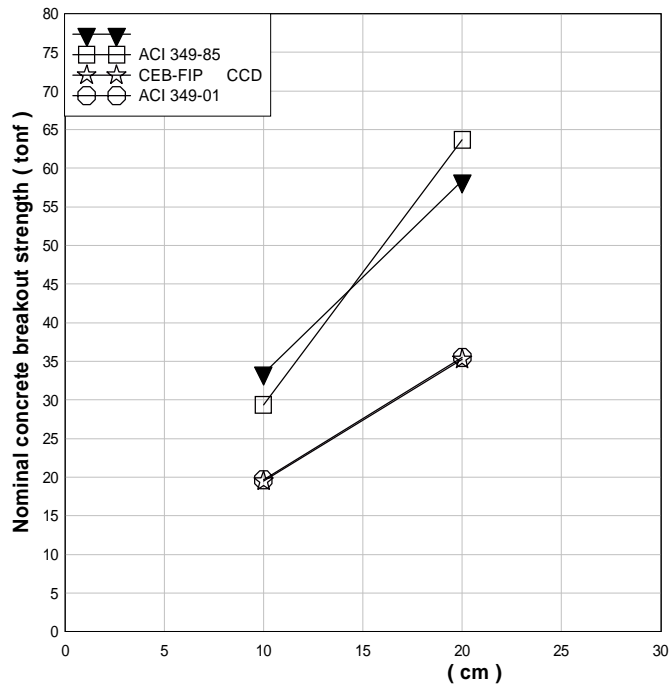


그림 3.5 다중 앵커기초의 시험결과

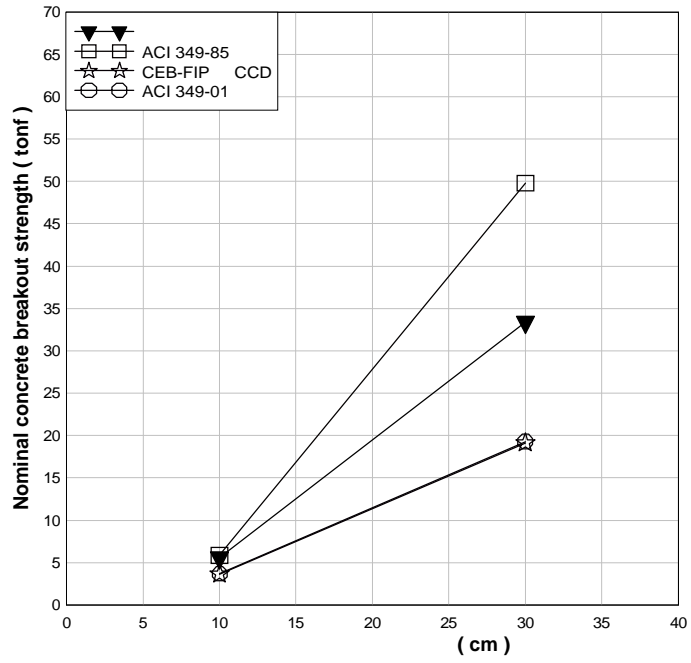


그림 3.6 앵커볼트와 콘크리트 연단사이의 거리에 따른 시험결과

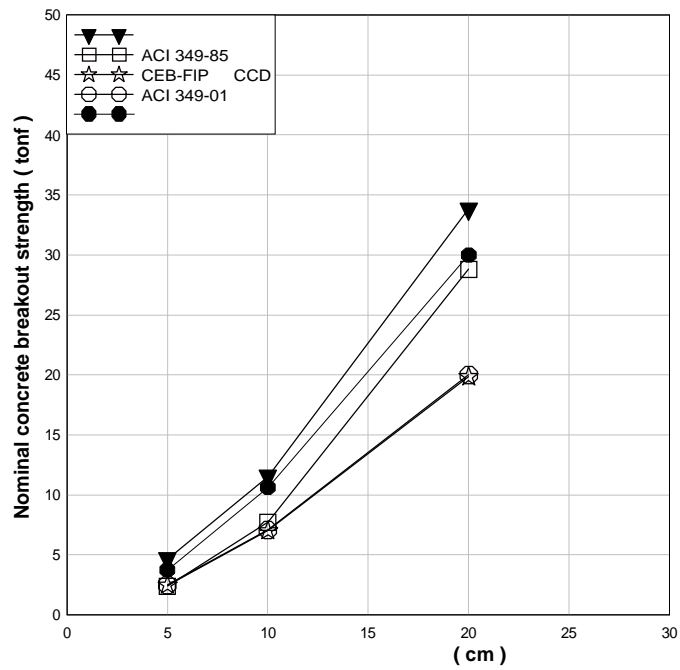


그림 3.7 앵커볼트의 유효매입깊이에 따른 시험결과

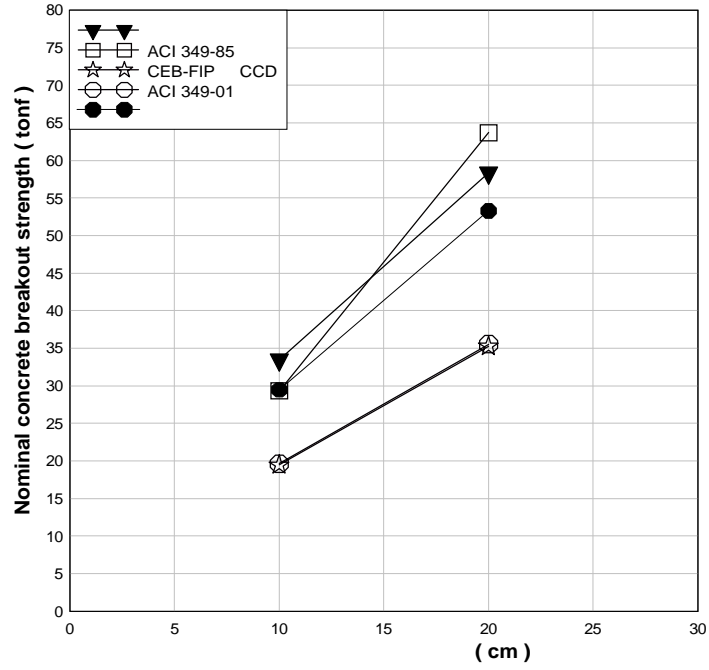


그림 3.8 다중 앵커기초의 시험결과

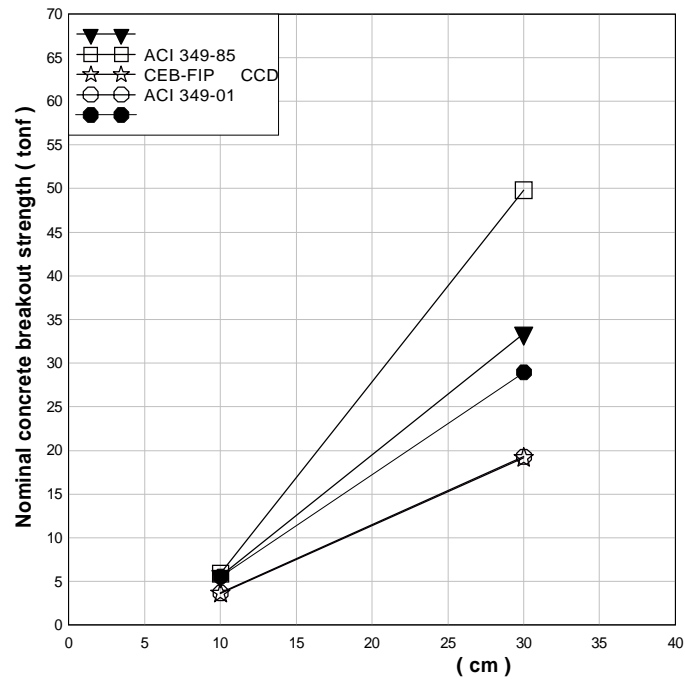


그림 3.9 앵커볼트와 콘크리트 연단사이의 거리에 따른 시험결과

감사의 글

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

참고문헌

- [1] R.E. Klingner, H. Muratli, and M. Shirvani, *A Technical Basis for Revision to Anchorage Criteria*, NUREG/CR5563, 1999.
- [2] Fuchs, W., Eligehausen, R., & Breen, J.E. " Concrete Capacity Design (CCD) Approach for Fastening to Concrete ", *ACI Structural Journal*, V. 92, No. 1, 1995.
- [3] ACI 349, *Code Requirements for Nuclear-Safety-Related Concrete Structures*, 2001.
- [4] CEB Task Group, *Fastenings to Concrete and Masonry Structures*, State of the art report, 1994.
- [5] CEB Task Group, *Design of Fastenings in Concrete*, Design guide, 1996.
- [6] ASTM E488, *Standard Test Methods for Strength of Anchors in Concrete and Masonry Elements*, 1996.