

균열을 고려한 직매형 앵커기초의 인장성능평가

An Evaluation of Tensile Capacity of Cast-In-Place Anchor with Crack

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 앵커기초에서 발생할 수 있는 다양한 균열의 영향을 정확히 평가할 수 있는 모델을 개발하기 위하여 실증시험이 수행되었다. 본 실증시험을 위하여 23 경우의 균열이 발생한 무근 콘크리트 조건에서 115 개의 직매형 단일 앵커기초시험체가 ASTM E488 에 근거하여 제작되었다. 균열과 관련된 주요 시험변수로서는 균열폭, 균열깊이, 균열과 앵커볼트사이의 거리 및 균열 개수 등이 고려되었다. 직매형 앵커기초에 인장력을 유발시키기 위하여 100 tonf 용량의 Actuator 가 0.5 mm/min. 의 변위제어를 통하여 적용되었다. 본 연구를 통하여 개발된 직매형 앵커기초의 균열영향 평가모델은 USI A-46 원전의 기기 내진검증시 앵커기초 성능평가 및 신규원전의 앵커기초 설계시 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract

Actual model tests are carried out to develop the model that can accurately incorporate the effect of the various types of cracks 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. 115 test specimens with single anchor are constructed on a basis of ASTM E488 under 23 cracked conditions and plain concrete for these actual model tests. As principal test variables related to crack, the crack width, the crack depth, and the distance between crack and anchor etc. are chosen. In order to apply the tensile force, 100 tonf-capacity actuator is used with displacement control of 0.5 mm/min. Through these test results, the model incorporating the effect of various types of cracks accurately, is developed and will be available for the anchorage capacity evaluation for seismic qualification of equipment in USI A-46 NPPs and anchorage design of new NPPs.

1. 서론

원전내에 설치되는 기기, 배관 및 전기설비 등을 콘크리트 구조물에 정착시키는 앵커기초는 그 중요도에 비해 거동 및 성능평가에 대한 이해가 매우 부족한 실정이다. 특히, 가동중 원전을 대상으로 수행중인 주기적 안전성평가 (PSR) 의 기기 내진검증시 정확한 앵커기초의 성능평가는 매우 중요하다. 이와같이 신규원전의 앵커기초 설계 및 가동중 원전의 앵커기초 성능평가를 위하여 적용 가능한 기준으로는 ACI 349, CEB-FIP Code 의 CCD 방법 및 SQUG GIP 가 있다. 그러나, 앵커기초가 설치된 콘크리트 부재에 균열이 발생하는 경우 이러한 기준 등을 적용하여 균열의 영향을 앵커기초의 성능평가에 정확히 반영하기는 매우 어렵다. 그 이유는 ACI 349 와 CEB-FIP Code 의 CCD 방법이 단순히 균열의 존재 유무에 따른 수정계수를 채택하고 있고, 또한 SQUG GIP 도 단순히 균열폭에 따른 감소계수만을 채택하고 있기 때문이다. 실제로 원전내 앵커기초에 다양한 형태의 균열이 발생하고 있고, 또한 균열이 앵커기초의 성능에 큰 영향을 미침에도 불구하고 균열의 영향을 정확히 고려할 수 없는 중요한 이유는 시험결과의 부족이다. 따라서, 충분한 시험결과를 통하여 다양한 형태의 균열로 인한 앵커기초의 성능을 정확히 평가하기 위한 모델을 개발하는 것은 필수적이다.

본 연구에서는 국내 원전에서 가장 널리 적용되는 직매형 앵커기초를 대상으로 대규모 실증시험을 통하여 균열의 영향을 고려한 앵커기초의 성능평가모델을 개발하고자 한다.

2. 설계기준

국내는 물론 전 세계적으로 원전 기기의 앵커기초 설계 및 기준에 설치된 앵커기초의 성능평가에 적용되는 설계기준 및 평가기준은 다음과 같다.

2.1 ACI 349

인장하중하에서 균열이 발생한 콘크리트 부재에 설치된 앵커기초의 Basic concrete breakout strength, N_b 는 식 (2.1) 과 같으며, Nominal concrete breakout strength, N_{cb} 는 식 (2.2) 와 같다.

$$N_b = k \sqrt{f_c} h_{ef}^{1.5} lb \quad (2.1)$$

$$N_{cbg} = \frac{A_N}{A_{N0}} \psi_1 \psi_2 \psi_3 N_b \quad lb \quad (2.2)$$

여기서 k 는 직매형 앵커기초의 경우 24 이며, f_c 는 콘크리트의 압축강도 (psi), h_{ef} 는 앵커볼트의 유효 매입깊이(in.) 이다. 또한, A_N 은 앵커볼트의 중심으로부터 $1.5h_{ef}$ 만 큼 한쪽 외부방향으로 파괴가 발생하는 단일 및 다중앵커의 파괴 투영면적을 나타낸다. A_{N0} 는 콘크리트의 연단으로부터 멀리 떨어진 단일앵커의 파괴 투영면적으로 식 (2.3) 과 같다.

$$A_{N0} = 9h_{ef}^2 \quad (2.3)$$

식 (2.2) 에서 ψ_1 은 편심하중을 받는 다중앵커의 수정계수이며, ψ_2 는 콘크리트 연단과 앵커볼트 사이의 거리에 의하여 발생하는 수정계수를 나타내나, 본 연구에서는 직매형 단일앵커기초를 대상으로 하고 있고, 콘크리트 연단과 앵커볼트사이의 거리도 충분하기 때문에 이들 계수는 고려하지 않는다.

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

$$\psi_3 = 1.25 \quad (2.4)$$

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

2.2 CEB-FIP Code 의 CCD 방법

균열 콘크리트 부재에서 콘크리트 연단과 앵커볼트사이의 거리에 의한 영향이 없는 단일앵커기초의 경우, Basic concrete breakout strength N_{N0} 는 식 (2.5) 와 같으며, Nominal concrete breakout strength, N_N 는 식 (2.6) 과 같다.

$$N_{N0} = k_1 \sqrt{f_c} h_{ef}^{1.5} N \quad (2.5)$$

$$N_N = \frac{A_N}{A_{N0}} \psi_1 \psi_2 \psi_3 \psi_4 N_{N0} \quad (2.6)$$

여기서, k_1 은 직매형 앵커기초의 경우 9 이다.

식 (2.6) 에서 ψ_1 과 ψ_2 는 상기 2.1 절에서 언급한 것처럼 ACI 349 와 동일한 수정계수이며, ψ_4 는 Shell spalling factor 이나 무근 콘크리트를 대상으로 하는 본 연구에서는 고려하지 않는다.

앵커볼트가 설치된 콘크리트 부재에 균열이 발생하지 않는 경우, 직매형 앵커기초의 수정계수는 다음과 같다.

$$\psi_3 = 1.4 \quad (2.7)$$

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

2.3 SQUG GIP

SQUG GIP 는 가동중 원전 중 기기내진검증요건으로 IEEE 344-71 이 적용된 원전 기기의 내진적합성 평가, 즉 미국 NRC 가 GL 87-02 로 제기한 미해결 안전성 문제 (USI A-46) “ 가동중 원전내의 기계 및 전기기기에 대한 내진적합성 입증 ” 을 해결하기 위하여 개발된 방법이다.

직매형 앵커기초의 경우 콘크리트 부재에 발생한 균열을 고려하여 Concrete breakout strength 를 평가하는 식은 (2.8) 과 같다.

$$P_{all} = P_{nom} RC_p \quad lb \quad (2.8)$$

여기서, P_{all} 은 Allowable concrete breakout strength 이며, P_{nom} 은 Nominal concrete breakout strength 이다. 또한, RC_p 는 균열이 발생한 콘크리트 부재에 설치된 앵커기초의 성능감소계수를 나타내며, 식 (2.9) 와 같다.

$$RC_p = 1.0, \quad \text{무균열조건 또는 } CS < 0.01in. \quad (2.9.1)$$

$$RC_p = 1.08 - 8CS, \quad 0.01in. \leq CS \leq 0.06in. \quad (2.9.2)$$

$$RC_p = \text{예외기기, } CS > 0.06in. \quad (2.9.3)$$

여기서, CS 는 육안조사에 의한 균열폭을 나타낸다.

3. 실증시험

본 연구의 목적은 국내 원전에서 기기 정착을 위하여 가장 널리 적용되는 직매형 앵커기초를 대상으로 대규모 실증시험을 통하여 앵커기초에서 발생할 수 있는 다양한 균열의 영향을 정확히 평가할 수 있는 모델을 개발하기 위함이다. 본 실증시험을 위하여 23 경우의 균열이 발생한 무근 콘크리트 조건에서 115 개의 직매형 단일 앵커기초시험체가 ASTM E488 에 근거하여 제작되어 시험이 수행되었다.

본 연구의 세부적인 실증시험계획은 다음과 같다.

3.1 시험변수

본 시험은 콘크리트 부재에 발생한 균열이 앵커기초의 성능에 미치는 영향평가가 주 목적이므로 콘크리트의 취성과파괴, 즉 Concrete breakout failure 를 전제로 하기 때문에 앵커볼트의 Nominal strength 가 Nominal concrete breakout strength 를 초과하도록 모든 시험변수를 선정하였다. 또한 본 시험은 그 목적상 콘크리트 연단과 앵커볼트 사이의 거리에 의한 영향을 고려치 않으며, 다중 앵커기초는 단일 앵커기초의 성능평가결과를 선형조합하여 평가가 가능하기 때문에 본 연구에서는 단일 앵커기초를 시험대상으로 하였다.

[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] 균열

균열과 관련된 시험변수들은 원전내 앵커기초에서 발생할 수 있는 다양한 균열의 형태를 고려하여 크게 4 가지로 분류된다. 첫째, 균열폭으로서 그 크기는 0.3, 0.8, 1.5 mm 이다. 둘째, 균열깊이로서 표면균열을 의미하는 1 cm, 앵커볼트 유효매입깊이의 절반인 5 cm, 앵커볼트 유효매입깊이 전체에 걸쳐 균열이 발생한 10 cm 이다. 셋째, 균열과 앵커볼트사이의 거리로서 균열이 앵커볼트를 관통하는 경우와 균열이 앵커볼트로부터 $0.75h_{ef}$ (7.5 cm) 만큼 떨어진 경우이다. 넷째, 균열개수로서 두개의 균열이 앵커볼트를 직교하면서 관통하는 경우와 앵커볼트로부터 $0.75h_{ef}$ 만큼 떨어져 두개의 균열이 반대편에서 평행하게 발생한 경우이다.

[3] 앵커볼트의 직경

앵커볼트의 직경은 앵커볼트의 Nominal strength 가 Nominal concrete breakout strength 를 초과하고, 동일한 균열조건하에서 앵커볼트의 직경 변화에 따른 Concrete breakout strength 의 영향을 파악하기 위하여 3 개의 앵커볼트 직경이 선정되었다. 선정된 앵커볼트 직경은 1.91, 2.54, 3.18 cm 이며, 재질은 ASTM A193 Gr B7 이다.

기타 시험변수로서 앵커볼트의 유효매입깊이는 10 cm 이며, 콘크리트의 설계기준 압축강도는 $280kgf/cm^2$ 이다. 표 3.1 은 본 연구에서 수행된 시험경우의 수를 나타낸다.

3.2 앵커기초시험체

본 실증시험을 위하여 제작된 앵커기초시험체는 ASTM E 488 에 따라 지지부 사이의 경간은 $8.0h_{ef}$ 로, 두께는 $4.0h_{ef}$ 로 하였다. 따라서, 제작된 앵커기초시험체의 제원은 $1.0 \times 1.0 \times 0.4$ m (가로 \times 세로 \times 두께) 으로, 그림 3.1 은 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 $73,000 tonf/m^2$ 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.

표 3.1 시험 경우의 수

구분	하중 조건	유효 매입 깊이 (cm)	앵커 볼트 직경 (cm)	균 열					수량 (개)	
				폭 (mm)	깊이 (cm)	거리 (cm)	길이 (cm)	방향, (갯수)		
1	인장	10	2.54	NA	NA	NA	NA	NA	5	
2				0.3	1	0	70	-(1)	5	
3						7.5		-(1)	5	
4					5	0		-(1)	5	
5						7.5		-(1)	5	
6					10	0		-(1)	5	
7						7.5		-(1)	5	
8						0		+(2)	5	
9						7.5		=(2)	5	
10						1		0	-(1)	5
11								7.5	-(1)	5
12				5	0			-(1)	5	
13					7.5			-(1)	5	
14				10	0	-(1)		5		
15					7.5	-(1)		5		
16				1.5	1	0		-(1)	5	
17						7.5		-(1)	5	
18					5	0		-(1)	5	
19						7.5		-(1)	5	
20					10	0		-(1)	5	
21						7.5		-(1)	5	
22				1.91	0.3	10		0	-(1)	5
23				3.18					-(1)	5
합 계									115	



(a)



(b)

그림 3.1 앵커기초시험체

그림 3.2 는 본 실증시험을 수행하기 위하여 설치된 100 tonf 용량의 Actuator, 가력프레임, 시험체 고정장비 및 하중전달장치 등을 보여준다.



그림 3.2 시험설비

3.3 시험결과

115 개의 직매형 앵커기초시험체에 대한 인장성능평가 시험결과, 모든 앵커기초시험체에서 그림 3.3 과 같이 본 시험에서 예상한 전형적인 콘크리트 부재의 취성과파괴를 나타내는 하중-변위 이력곡선을 보였으며, 그림 3.4 는 앵커기초시험체의 콘크리트 콘 파괴형상을 보여주고 있다.

그림 3.5 는 무균열 및 균열 앵커기초시험체의 하중 - 변위 이력곡선을 도시한 것으로 두 곡선의 기울기가 상이하게 나타났다. 즉, 무균열 앵커기초시험체는 최대 인장파괴하중에 도달한 후 완만한 기울기를 보이면서 감소하는 반면에 균열 앵커기초시험체는 그 반대로서 최대 인장파괴하중에 도달한 후 급한 기울기를 보이는 경향을 나타냈다. 이는 균열이 발생한 앵커기초가 최대 인장파괴하중에 도달한 후 기존에 형성된 균열로 인하여 급격히 파괴영역이 확산됨으로서 나타난 것으로 판단된다.

그림 3.6 은 표 3.1 의 시험경우에 대한 인장성능평가 시험결과를 도시한 것으로, 시험경우 1 인 무균열 앵커기초시험체의 최대 인장파괴하중은 모두 거의 동일한 인장파괴하중을 나타내는 반면에, 시험경우 2 ~ 23 까지 균열 앵커기초시험체는 동일한 시험경우에 대해서도 분산도가 큰 인장파괴하중을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나, 균열이 발생한 앵커기초시험체라 하더라도 모두 앵커기초 설계기준인 ACI 349 와 CEB-FIP

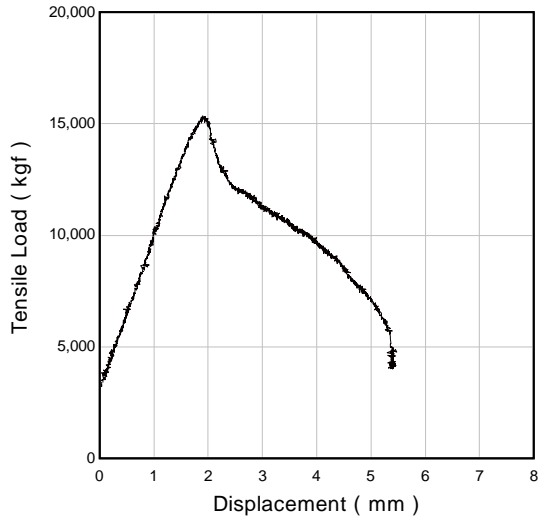
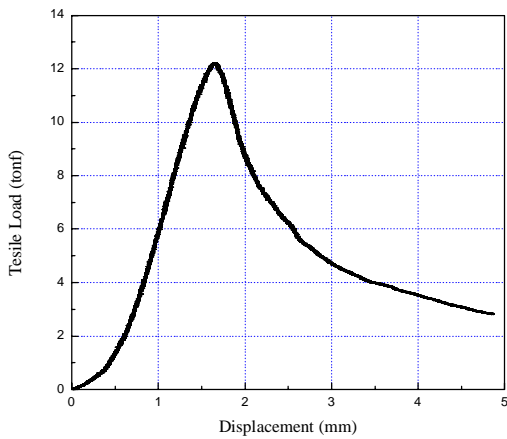


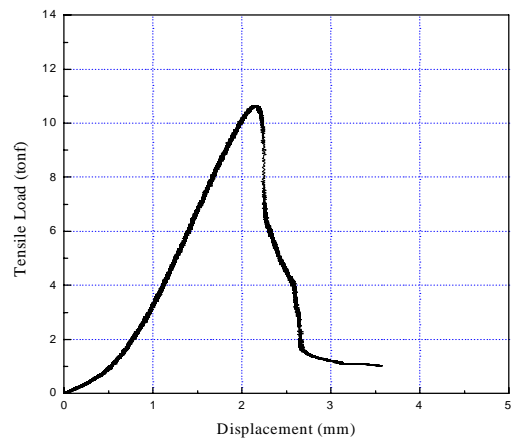
그림 3.3 하중-변위 이력곡선



그림 3.4 콘크리트 콘 파괴형상



(a) 무균열 앵커기초시험체



(b) 균열 앵커기초시험체

그림 3.5 하중 - 변위 이력곡선

Code 의 CCD 방법 및 성능평가기준인 SQUG GIP 에서 제시하는 인장파괴하중보다 높은 시험결과를 나타내었다.

그림 3.7 은 균열이 앵커볼트를 관통하는 중앙부 및 앵커볼트로부터 일정거리 떨어진 측면부에 발생한 경우에 대한 시험결과를 도시한 것으로, 균열이 앵커볼트를 관통하는 중앙부에 발생한 경우 균열깊이가 앵커기초의 인장파괴하중에 미치는 영향은 없는 것으로 나타났으나, 균열이 앵커볼트로부터 일정 간격을 유지하는 측면부에 발생한 경우에는 균열깊이가 증가할수록 앵커기초의 인장파괴하중은 감소하는 것으로 분석되었다. 이러한 결과가 발생한 원인은 국내 원전에 설치되는 직매형 앵커기초가 하부에 강철재료의

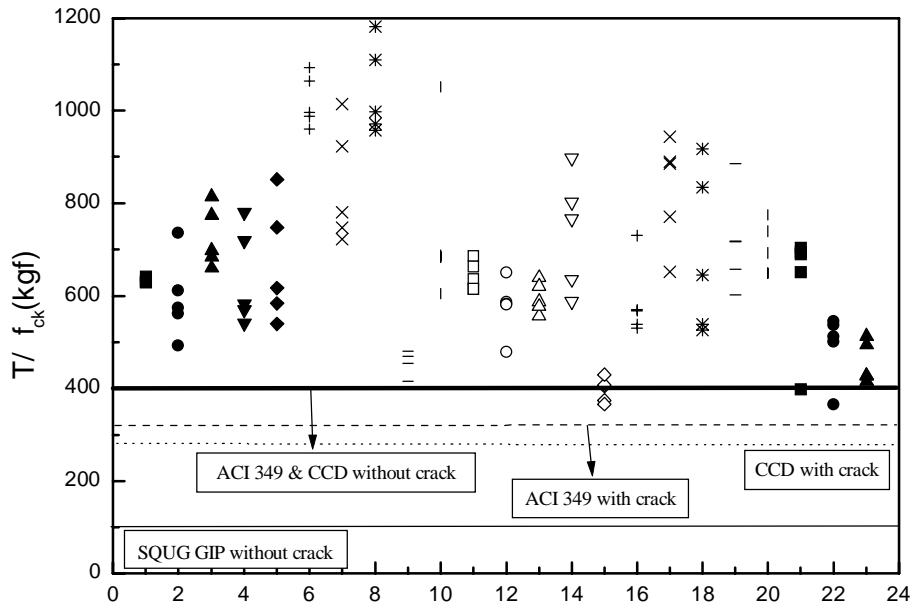
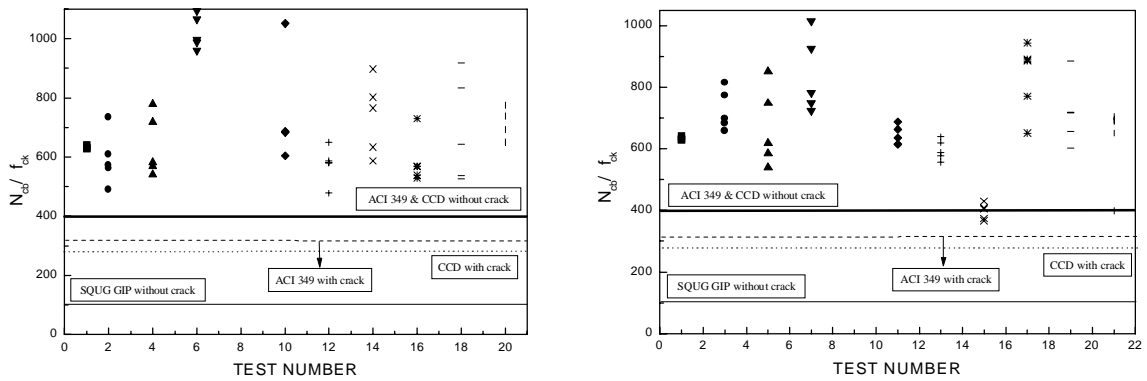


그림 3.6 직매형 앵커기초의 인장성능평가 시험결과



(a) 중앙부 균열

(b) 측면부 균열

그림 3.7 균열 발생위치에 따른 최대 인장파괴하중

사각형 플레이트를 설치함으로써 균열이 중앙부에 발생하더라도 이에 의해 콘크리트 파괴형상이 유지되면서 파괴면적이 감소되지 않으나, 균열이 측면부에 발생한 경우에는 균열과 앵커볼트 사이의 거리에 반비례하여 파괴면적이 감소되기 때문에 인장파괴하중이 감소하는 것으로 분석되었다.

그림 3.8 은 동일한 균열조건을 지닌 앵커기초에 대하여 시험변수로서 앵커볼트의 직

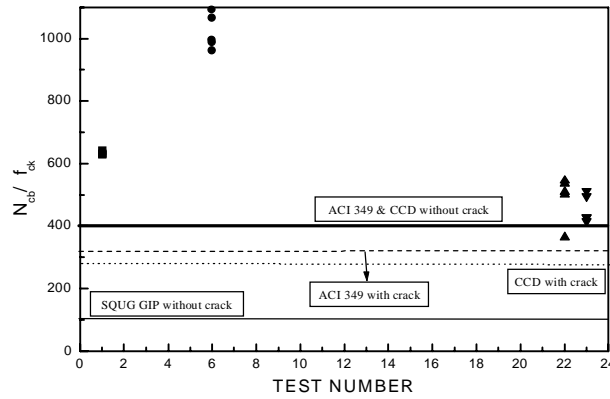


그림 3.8 앵커볼트의 직경에 따른 최대 인장파괴하중

경에 따른 최대 인장파괴하중을 도시하였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 동일한 앵커볼트의 유효매입깊이와 균열조건을 지닌 앵커기초의 경우 앵커볼트의 직경이 앵커기초의 최대 인장파괴하중에 어느 정도 영향을 미치는 것으로 판단되나 시험결과의 부족으로 인하여 명백한 결론을 유도하기는 어려운 것으로 분석되었다. 따라서 이와 관련하여서는 추가적인 시험을 통하여 결론을 유도할 필요가 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 원전에서 기기 정착을 위하여 가장 널리 적용되는 직대형 앵커기초를 대상으로 앵커기초에서 발생할 수 있는 다양한 균열의 영향을 정확히 평가할 수 있는 모델을 개발하기 위하여 실증시험이 수행되었다.

실증시험결과, 균열이 발생한 앵커기초는 급격한 취성파괴거동을 보이면서, 무균열 앵커기초에 비하여 최대 39%의 인장파괴하중이 감소하는 것으로 나타났다. 또한 앵커볼트를 관통하는 균열보다 앵커볼트와 일정 간격을 유지하는 균열이 앵커기초의 성능저하에 큰 영향을 미치는 것으로 분석되어 기존 성능평가기준에서 고려하는 균열폭보다는 균열위치와 균열깊이가 앵커기초의 성능평가지고 고려되어야 함을 확인할 수 있었다.

또한, 기존 앵커기초의 설계기준 및 성능평가기준이 시험결과에 비하여 매우 보수적인 평가결과를 제시함으로써 합리적인 앵커기초의 설계 및 성능평가를 위하여는 이들 기준의 개선이 필요한 것으로 판단된다.

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] ACI 349, *Code Requirements for Nuclear-Safety-Related Concrete Structures*, 2001.
- [3] CEB Task Group, *Fastenings to Concrete and Masonry Structures*, State of the art report, 1994.
- [4] CEB Task Group, *Design of Fastenings in Concrete*, Design guide, 1996.
- [5] SQUG, *Generic Implementation Procedure (GIP) for Seismic Verification of Nuclear Plant Equipment*, 1997.
- [6] ASTM E488, *Standard Test Methods for Strength of Anchors in Concrete and Masonry Elements*, 1996.