

대형 콘크리트 앵커시스템의 전단성능 및 거동특성에 관한 연구

A Study on Shear Capacity and Behavior of Large Sized Concrete Anchorage System

김 강 식^{1)*} 신 성 우²⁾ 이 광 수³⁾
Kim, Kang Sik Shin, Sung Woo Lee, Kwang Soo

Abstract

In this study, 24 prototype specimens were tested to find out the shear behavior and strength of large anchorage system exceeding 50mm(2") in anchor bolt diameter(d_0) and 635mm(25") in effective embedment depth(h_{ef}) not addressed by ACI349-06 Appendix B. Test variables are anchor bolt diameter($d_0 = 63.5, 76.2, 88.9\text{mm}$), effective embedment depth($h_{ef} = 635, 762\text{mm}$), and edge distance($c_1 = 381, 508, 762\text{mm}$). Concrete compressive strength is constant($f_{ck} = 38\text{MPa}$).

Test results (V_{test}) were overestimated by V_{aci06} (shear strength by ACI 349-06) and V_{ccd} (shear strength by CCD method). In large anchorage system exceeding 50mm(2") of anchor bolt diameter(d_0) and 635mm(25") of anchor bolt effective embedment depth(h_{ef}), the bolt diameter variation and effective embedment depth(h_{ef}) has no influence on the shear strength. But, according to the analysis results of the feature ratio on edge distance(c_1) and anchor bolt diameter, the feature ratio become smaller, which means anchor bolt diameter is bigger, predicted ratio of test results and predicted equation is larger. It was found that anchor bolt diameter is immediate cause of deterioration in the shear capacity of large anchorage system.

To improve and extend the validity of current design recommendations further theoretical and numerical work is needed.

Keywords : Large sized anchorage system, Behavior, Shear strength, CCD method

1. 서론

콘크리트 앵커시스템은 기기, 구조물 및 배관 등을 철근콘크리트 구조물에 정착시키기 위하여 사용하는 가장 보편적인 방법으로 콘크리트에 매입된 앵커볼트를 이용하여 요구하중에 대하여 강제앵커볼트의 강도(전단, 인장)와 콘크리트의 파열(전단, 인장) 파괴강도를 고려하도록 하고 있다.

구조물의 연결 및 고정에 사용하는 콘크리트 앵커시스템의 기준은 ACI 349-06(ACI 349, 2006)에 따르고 있으나 직경 50mm(2") 이상이며, 유효매입길이(h_{ef}) 635mm(25") 이상의 대형 매입앵커의 설계를 위해서는 설계기준의 적합성을 평가하여 설계하도록 요구하고 있다.

본 연구에서는 대형구조물에 사용하는 대형 앵커시스템에 대한 현행 설계기준 적용시 적합성 평가를 위하여 24개의 대형 전단 앵커시스템 성능평가 시험을 수행하고

거동특성을 분석하였다.

2. 콘크리트 앵커시스템의 전단강도 예측식

본 논문에서는 시험결과에 대한 예측식으로 ACI 349-06 설계식(V_{aci06})과 CCD Method(Fuchs 등, 1995)에 의한 예측식(V_{ccd})을 나타내었다.

ACI 349-06 은 전단 앵커의 콘크리트 파열파괴 강도에 대하여 균열 콘크리트에서의 파열파괴강도로 제시하고 있기 때문에 무균열 콘크리트에 적용하는 강도 증감계수 $\Psi_4 = 1.4$ 를 적용하여 식 (1)의 계수를 9.8 ($1.4 (\Psi_4) \times 7$)로 나타내었다.

$$V_{aci06} = 9.8 \left(\frac{l}{d_0} \right) \sqrt{d_0} \sqrt{f'_c} c_1^{1.5} \quad (lb) \quad (1)$$

1) 정회원, 한전전력연구원 선임연구원

2) 정회원, 한양대학교 건축공학과 교수

3) 정회원, 여주대학 건축공학과 교수

* Corresponding author : kimks@kepri.re.kr 042-865-5222

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 10월 31일까지 학회로 보내주시면 2011년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

$$V_{ccd} = 13 \left(\frac{l}{d_o} \right) \sqrt{d_o} \sqrt{f'_c} c_1^{1.5} \quad (lb) \quad (2)$$

여기서,

V_b = 콘크리트 파열파괴 강도(lb)

h_{ef} = 앵커볼트의 유효매입깊이(in)

c_1 = 하중방향 연단거리(in)

d_o = 앵커직경(in)

f_{ck} = 콘크리트 설계기준강도(psi)

l = 앵커의 하중-지압길이($\leq 8d_o$)

3. 시험

3.1 시험체 계획

본 시험에서는 콘크리트강도를 연구대상 대형 구조물의 콘크리트강도인 $f_{ck} = 38\text{MPa}$ 로 고정하고 시험변수로 앵커볼트의 직경(d_o)을 세가지로 하였으며(63.5mm, 76.2mm, 88.9mm), 또한 전단파괴 면에 영향을 크게 미치는 앵커볼트의 매입깊이($h_{ef} = 635, 762\text{mm}$)와 연단거리($c_1 = 381, 508, 762\text{mm}$), 그리고 콘크리트 압축강도($f_{ck} = 38\text{MPa}$)로 고정하여 시험변수당 3~5개의 동일 시험체를 제작하였다.

시험체의 크기는 ASTM E 488-98(ASTM E 488, 1998)에 규정에 따라 전단시험체의 폭은 $3h_{ef}$, 시험체의 두께는 $1.5h_{ef}$ 로 제작하여 인접 앵커볼트의 시험에 영향을 주지 않도록 고려하였고 콘크리트의 파괴상황을 확인 할 수 있도록 하였다.

Table 1 Test Variables

Test Group	Specimen No.	Con'c Strength f_{ck} MPa(psi)	Anchor Diameter d_o mm(inch)	Embed. Depth h_{ef} mm(inch)	Edge Distance c_1 mm(inch)
VD	S1	38(5500)	63.5(2.5)	635(25)	508(20)
	S2	38(5500)	76.2(3.0)	635(25)	508(20)
	S3	38(5500)	88.9(3.5)	635(25)	508(20)
VH	S2	38(5500)	76.2(3.0)	635(25)	508(20)
	S4	38(5500)	88.9(3.0)	762(30)	508(20)
VE	S6	38(5500)	63.5(2.5)	635(25)	381(15)
	S1	38(5500)	63.5(2.5)	635(25)	508(20)
	S7	38(5500)	63.5(2.5)	635(25)	762(30)

VD : Variation of Anchor Bolt Diameter(d_o)

VH : Variation of Effective Embedment Depth(h_{ef})

VE : Variation of Edge Distance(c_1)

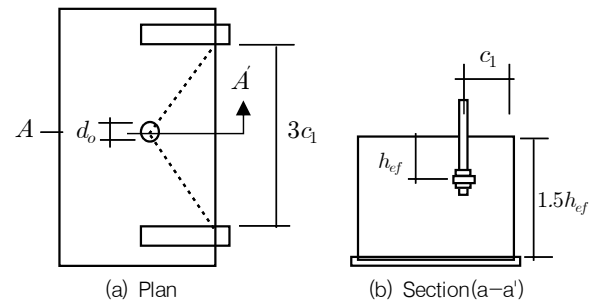


Fig. 1 Details of Specimen

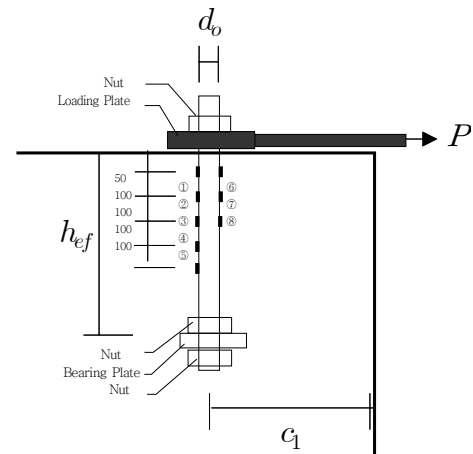


Fig. 2 Location of Guages(Section)

앵커볼트에는 하중가력중 위치별 휨변형 상황을 파악하기 위하여 Fig. 2와 같이 앵커볼트 길이방향으로 스트레인게이지를 설치하였다.

3.2 사용재료

3.2.1 콘크리트

본 시험에 사용된 콘크리트는 품질의 균일성을 기하기 위하여 레미콘을 사용하였다. 콘크리트의 압축강도는 $f_{ck} = 38\text{MPa}$ 로 제작하였으며 콘크리트의 압축강도 시험용 공시체는 $\Phi 100 \times 200\text{mm}$ 의 실린더형 몰드를 사용하여 KS F 2404에 따라 콘크리트 타설 회수마다 현장양생 36개, 표준양생 36개씩 제작하였다. 콘크리트 압축강도 측정은 KS F2405에 따라 실시하였으며 콘크리트 압축강도는 측정된 3개 이상의 평균값으로 하였다. 시험체별 압축강도는 Table 2와 같다.

3.2.2 앵커볼트

앵커볼트(강재)는 ASTM A 540 Class B의 고강도 앵

Table 2 Compressive Strength of Concrete

Specimen No.	Mixture Proportion								f_{ck} (MPa)
	W/B (%)	S/A (%)	kg/m^3						
			W	C	F	S	G	Ad.	
S1	42.4	44.0	171	302	101	740	986	2.82	37.5
S2	42.4	44.0	171	302	101	740	986	2.82	37.5
S3	42.4	44.0	171	302	101	740	986	2.82	38.3
S4	42.4	44.0	171	302	101	740	986	2.82	38.3
S6	36.7	41.8	184	426	75	658	959	3.01	35.3
S7	36.7	41.8	184	426	75	658	959	3.01	35.3

Table 3 Material Property of Anchor Bolt

Classification	f_y (MPa)	f_u (MPa)	E_s (MPa)
ASTM A540 B23	960.4	1063.3	2058.8

커볼트를 사용하였으며, 앵커볼트의 하부에는 콘크리트와 일체거동 할 수 있도록 고려한 Bearing Plate와 이를 고정하기 위한 이중 너트를 설치하였다. 콘크리트에 매입되는 앵커볼트의 재료적 특성은 Table 3과 같다.

3.3 시험 및 계측

본 연구에서 시험은 ASTM E 488-98 (ASTM E 488, 1998)에서 정하고 있는 시험방법에 따라 수행하였다. ASTM E-488는 콘크리트에 매입된 Post-installed 또는 매입형 앵커볼트의 정적, 지진, 피로, 충격, 인장, 전단 강도를 시험하는 방법을 규정하고 있다. Fig. 3은 본 시험에서 적용한 전단시험장치 개념도와 전단시험장치 설치 전경이다.

시험간 전단파열과 하중 및 하중가력 중 앵커볼트 전단방향 변위와 앵커볼트에 길이 방향으로 설치한 스트레

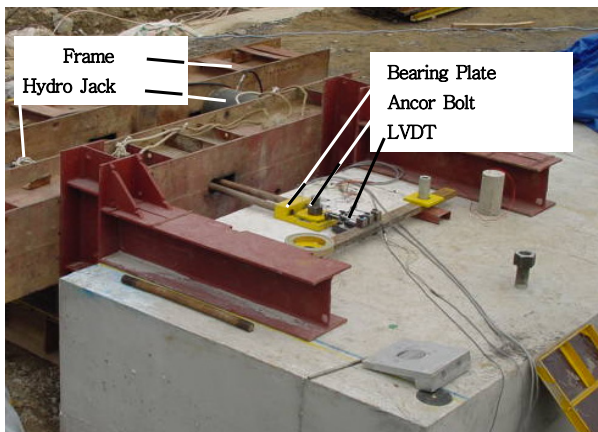


Fig. 3 Test Setup

인게이지 값을 계측하였다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 균열 및 파괴상황

유압잭과 유압실린더를 이용하여 전단하중을 가하면서 가력방향 앵커볼트 헤드의 변위와 크랙진전 상황을 기록하였다. 하중도입 후 앵커볼트 헤드의 전단 변위가 증가하면서 Fig. 4와 같이 앵커볼트 주위로 크랙이 연단면의 약 30° 방향으로 진전되다가 연단면에 이르러 급작스런 콘파괴와 함께 시험이 종료되었다. Fig. 4에 시험체별 파괴형상을 나타내었다.

시험체 파괴형상은 모두가 콘파괴로 나타났으며 대형 앵커 시스템의 경우에는 소형앵커시스템의 파괴형상인 앵커볼트 지압부위에서 45°로 균열진전 후 35° 콘파괴되는 형상과는 다르게 나타났다.

4.2 대형 앵커시스템의 하중-지압길이(l)

시험이 종료된 후 내부에서의 균열진전 및 하중-지압 길이(l)를 확인하였다. Fig. 5는 S3($d_o=88.9mm$, c_1

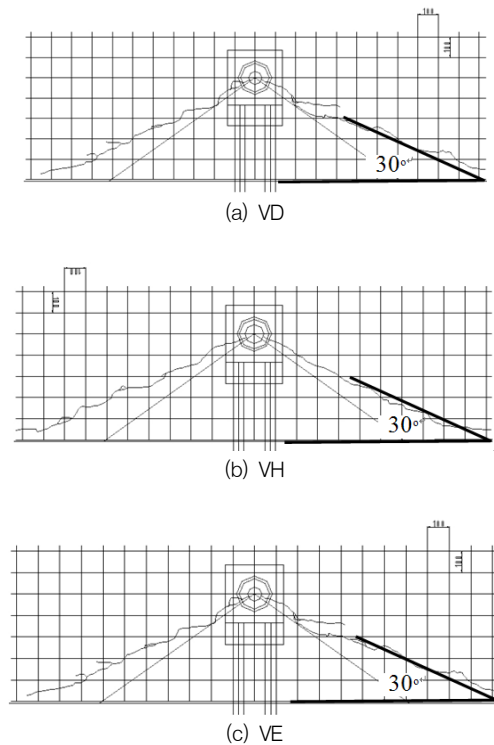


Fig. 4 Crack Mapping

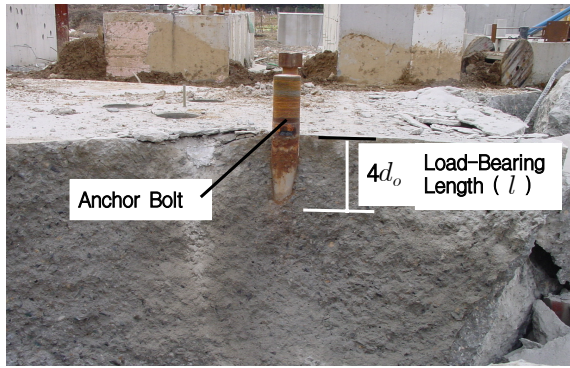


Fig. 5 Failure Shape of Front Side(S3)

=508mm, h_{ef} =635mm) 전단 시험체의 내부 파괴상황으로 사진에서 확인된 바로는 앵커의 하중-지압길이(l)가 약 $4.0d_o$ (356mm) 정도로 확인되었다. 이는 ACI 349-06에서 고려한 설계-지압길이(l) $7d_o$ (635mm)에 비하여 40% 정도 작게 나타났다.

앵커볼트에 전단하중이 전달되면 콘크리트 표면 상단의 앵커볼트주위 양단과 앵커볼트 깊이방향으로 균열이 진전되다가 $4.0d_o$ (356mm) 위치에서 연단방향으로 약 30° 콘파괴 균열이 시작되었으며 연단방향 콘파괴 균열이 시작된 이후에는 파괴하중까지 $4.0d_o$ (356mm)의 하중-지압길이에 전단하중이 지속적으로 전달되면서 균열 진전 및 파괴에 이른 것으로 나타났다.

4.3 대형 콘크리트 앵커시스템의 전단성능

4.3.1 앵커직경변화(VD) 시험결과

시험값(V_{test})은 시험구간에서 ACI 349-06(V_{aci06})

의 60~72%정도로 나타났으며, CCD 시험식(V_{ccd})의 50~60% 정도로 나타났다.

시험값(V_{test})은 본 연구의 시험구간에서는 변화가 거의 없는 것으로 나타났으며 이는 ACI 349-06(V_{aci06})과 CCD 시험식(V_{ccd})의 관계식에서 앵커직경(d_o)에 관한 항이 시험값(V_{test})을 예측하는데 적절하지 못한 것으로 판단된다. 앵커볼트 직경(d_o)에 따른 시험결과와 예측식과의 관계 그래프를 Fig. 6의 (a)에 나타내었다.

4.3.2 연단거리변화(VE) 시험결과

시험값(V_{test})은 시험구간에서 ACI 349-06(V_{aci06})의 61~82%정도로 나타났으며, CCD 시험식(V_{ccd})의 51~68%정도로 작게 나타났다.

연단거리(c_1)의 변화에 따라 콘크리트 전단 파열 파괴강도(V_b)는 현저하게 변화하였으며, Table 4에서 시험체 S6, S1, S7의 시험값(V_{test})과 ACI 349-06(V_{aci06})의 비율을 보면 연단거리(c_1)가 커질수록 V_{test} 는 V_{ccd} 값에 접근하는 것으로 나타났다. 앵커시스템의 연단거리(c_1)에 따른 시험결과와 예측식과의 관계 그래프를 Fig. 6의 (a)에 나타내었다.

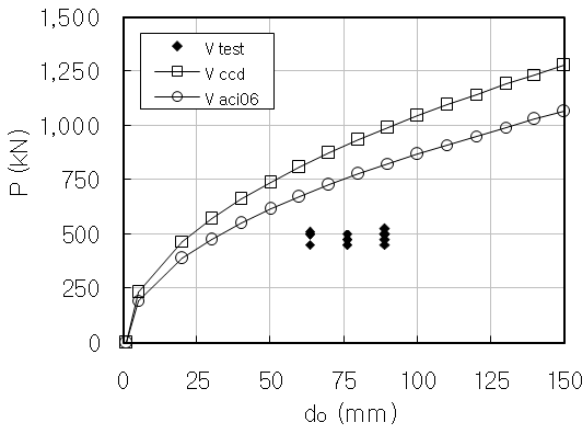
4.3.3 유효매입깊이변화(VH) 시험결과

시험체의 내부파괴 형상에 나타난 하중-지압길이(l)는 예측식에서 고려한 최대 $8d_o$ 와 다르게 $4d_o$ 정도로 대형 앵커에서 앵커볼트의 직경(d_o) 증가에 의한 영향이 있는 것으로 판단된다.

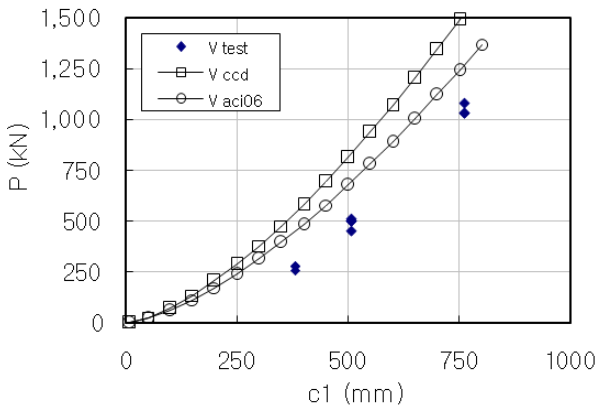
시험값(V_{test})은 시험구간에서 거의 변화가 없는 것으

Table 4 Test Results

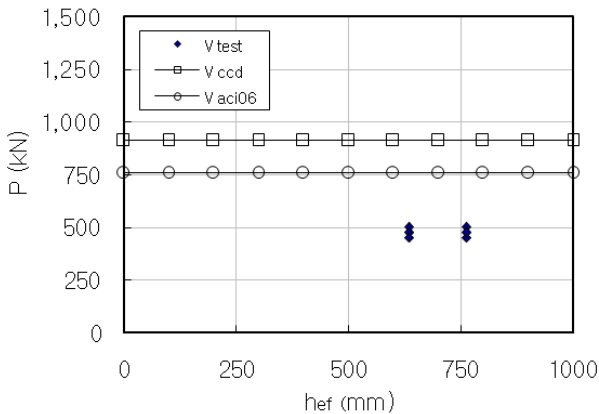
Test Group	Specimen No.	f_{ck} Mpa	d_o mm	h_{ef} mm	c_1 mm	l mm	F (Feature Ratio)		Test Results kN	V_{test} mean kN (a)	V_{aci06} kN (b)	V_{ccd} kN (c)	Ratio	
							$\frac{c_1}{d_o}$	$\frac{h_{ef}}{d_o}$					(a/b)	(a/c)
VD	S1	38.0	63.5	635	508	508	508	510.1, 451.3, 500.3, 500.3, 500.3	496.4	693.2	832.1	0.72	0.60	
	S2	38.0	76.2	635	508	610	610	451.3, 500.3, 475.8, 475.8, 451.3	470.9	759.4	911.6	0.62	0.52	
	S3	38.0	88.9	635	508	711	711	475.8, 500.3, 524.8, 451.3, 500.3	489.5	820.2	984.6	0.60	0.50	
VH	S2	38.0	76.2	635	508	610	610	451.3, 500.3, 475.8, 475.8, 451.3	496.4	759.4	911.6	0.65	0.54	
	S4	38.0	76.2	762	508	610	610	451.3, 500.3, 475.8, 451.3, 475.8	470.9	759.4	911.6	0.62	0.52	
VE	S6	38.0	63.5	635	381	508	508	258.0, 279.6, 279.6, 279.6, -	274.2	450.3	540.5	0.61	0.81	
	S1	38.0	63.5	635	508	508	508	510.1, 451.3, 500.3, 500.3, 500.3	496.4	693.2	832.1	0.72	0.60	
	S7	38.0	63.5	635	762	508	762	1030.1, 1079.1, 1030.1, -, -	1046.4	1273.5	1528.7	0.82	0.68	



(a) Analysis by Anchor Bolt Diameter(d_o)



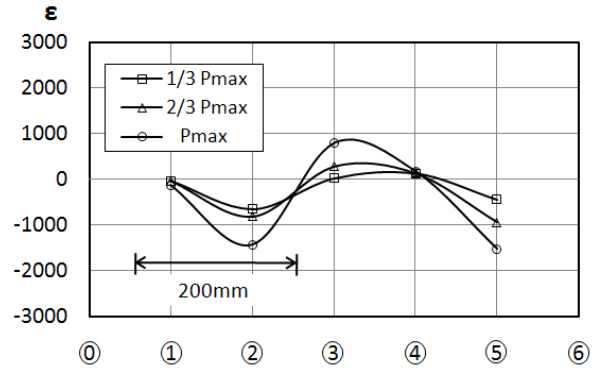
(b) Analysis by Edge Distance(c_1)



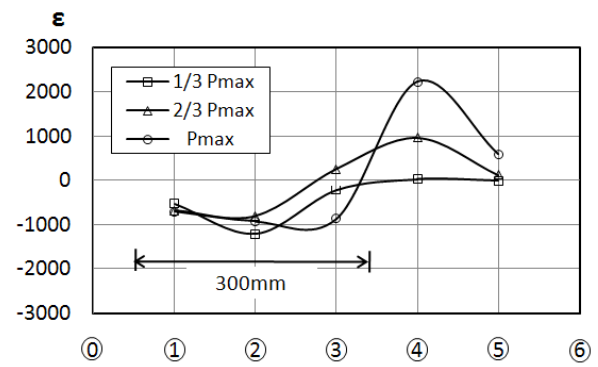
(c) Analysis for Embedment(h_{ef})

Fig. 6 Comparison of Shear Capacity

로 나타났으며 ACI 349-06(V_{aci06})의 87%정도, CCD 시험식(V_{ccd})의 52%정도로 작게 나타났다. 앵커볼트의 유효매입깊이(h_{ef})에 따른 시험결과와 예측식과의 관계 그래프를 Fig. 6의 (c)에 나타내었다.



(a) S6 ($c_1 = 381\text{mm}$)



(b) S7 ($c_1 = 762\text{mm}$)

Fig. 7 Tensile Strain of Anchor Bolt

4.4 앵커볼트의 거동

4.4.1 앵커볼트의 휨거동

가력판(Loading Plate)과 유압 가력기를 이용하여 전단 하중을 가하면서 시험을 진행하였다. 최대하중 P_{max} 을 기준으로하여 3단계($1/3P_{max}$, $2/3P_{max}$ 그리고 P_{max})로 나누어 앵커볼트에 길이방향으로 부착한 스트레인게이지에 나타난 인장, 압축 변형률과의 관계를 Fig. 7에 나타내었다.

Table 3에 나타난 고강도 앵커볼트의 재료적 특성으로부터 항복변형률은 약 $4,700\mu\epsilon$ 로 계산되었다. 앵커볼트에 측정된 변형률은 약 $2,000\mu\epsilon$ 이내로 측정되어 탄성상태에 있었던 것으로 나타났다.

Fig. 7의 (a) S6 ($c_1=381\text{mm}$)와 (b) S7 ($c_1=762\text{mm}$)를 비교해 보면 (a) S6의 인장 변형률은 ②~③게이지 부근에서 크게 나타났고 ④게이지 부근에서는 인장 변형률이 거의 나타나지 않았으며 ⑤게이지 부근에서는 압축

변형률로 전환되어 나타났다.

(b) S7의 인장 변형률은 ③~④게이지 부근에서 크게 나타났고 ⑤게이지 부근에서는 인장변형이 거의 나타나지 않았다.

앵커볼트에서 계측된 변형률에서 앵커볼트 깊이방향의 최하단에 나타난 변형률이 $0\mu\epsilon$ 인 지점 BP(Bending Point)로 정의하고 길이를 산정하였다. S6시험체에서는 약 200mm, S7 시험체에서는 약 300mm 정도로 분석되었다. 이는 Fig. 5의 콘크리트파괴형상에서 조사된 하중-지압길이 $4.0d_o$ (365mm)와 유사하게 나타나 앵커볼트의 휨거동을 통하여 콘크리트 내부 거동을 분석할 수 있는 것으로 판단된다.

전단하중 단계별 앵커볼트의 굽힘 위치 변화를 보면 하중방향 연단거리(c_1)가 커질수록 앵커볼트의 굽힘 위치가 깊이 방향으로 이동하는 특성을 보이고 있다. 이는 연단거리(c_1)가 커질수록 콘크리트의 콘파괴 강도가 커지는 경우 앵커볼트의 전단가력 방향 변위도 증가하게 되면서 앵커볼트와 콘크리트의 지지점 및 하중-지압길이(l)가 앵커볼트 깊이방향으로 증가하는 기하학적인 특성에 기인한 것으로 판단된다.

4.4.2 앵커볼트와 콘크리트 상호 작용

Fig. 7에 나타난 앵커볼트 깊이방향으로의 인장변형률의 변화를 파악하고 앵커볼트와 콘크리트대형 콘크리트 앵커시스템의 내부 하중전달 상황을 분석하였다.

앵커볼트에 전단하중(P)이 연단거리(c_1) 방향으로 작용하면 콘크리트에 매입되어있는 앵커볼트에 인장 및 압축변형률이 Fig. 7과 같이 나타난다. 인장변형률이 최대가 되는 지점은 앵커볼트의 휨이 최대가 되는 부분으로 이 위치를 BP(Bending Point)라 하고 Fig. 7의 앵커볼트 인장변형률과 Fig. 5의 콘크리트 내부 파괴 상황을 이용하여 앵커볼트-콘크리트의 내부 하중상황을 개념화 하면 Fig. 8과 같다.

앵커볼트에 전단하중 P가 작용하면 콘크리트 상부면에서 BP까지의 사이에 콘크리트에 의한 반력 P_{top} 이 야기되고 BP보다 더 아래 부분에 P_{top} 에 상응하는 반대방향의 P_{bottom} 가 나타나는 내부 거동을 개념화 할 수 있다. 여기서 P_{top} 와 P_{bottom} 은 앵커볼트와 콘크리트 접촉부에 발생하는 지압응력의 중심을 화살표로 나타낸 것이다. BP의 위치는 Fig. 5에 나타난 앵커볼트 하중-지압길

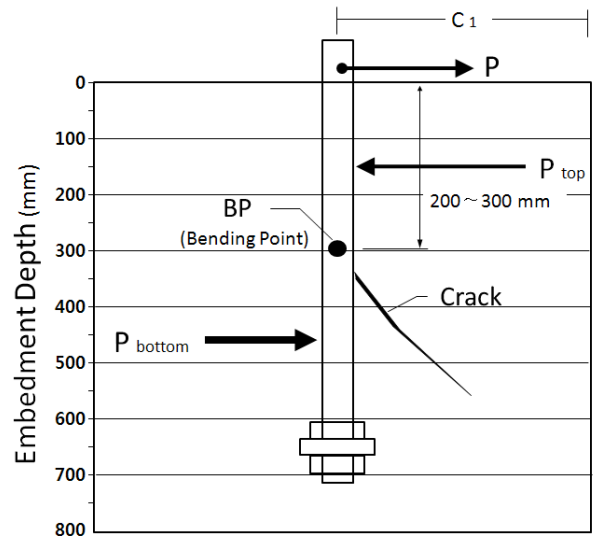


Fig. 8 Interaction Concept of Anchor Bolt-Concrete

이(l) $4d_o$ (365mm)에서부터 연단거리(c_1)방향으로 진행된 콘파괴 초기균열의 위치와 유사한 것으로 보아 BP는 콘크리트 내부의 콘파괴 초기 균열의 위치와 관련된 것으로 판단된다.

P_{top} 와 P_{bottom} 은 BP인근의 지지점을 중심으로 전단하중(P)에 대응하는 힘으로 나타나며 서로 반대방향의 힘이다. P_{top} , P_{bottom} 부위에는 앵커볼트의 변형저항능력 즉, 휨강도에 따라 콘크리트 지압면적이 따라 다르게 나타나며 이는 또한 콘크리트의 반력인 P_{top} 의 크기에 따라 콘크리트 지압면적이 다르게 나타남을 알 수 있다.

4.5 앵커볼트 크기의 영향

4.5.1 형상비 정의

본 연구를 통하여 앵커볼트와 콘크리트의 상호작용에 의하여 P_{top} , P_{bottom} 부위에는 앵커볼트의 변형저항능력 즉, 앵커볼트의 휨강도에 따라 콘크리트 지압면적이 따라 다르게 나타나며 이는 또한 콘크리트의 반력인 P_{top} 의 크기에 따라 콘크리트 지압면적이 다르게 나타남을 알게 되었다.

본 절에서는 앵커볼트의 크기의 영향이 어떤 인자와 관련성이 있는지 파악하기 위하여 식 (1), (2)에 포함되어 있는 연단거리(c_1)와 유효매입깊이(h_{ef})를 앵커볼트직경(d_o)과 관련하여 구분하여 비교하고자 형상비를 식 (3), (4)로 정의하였다.

Table 5 Shear Capacity of Small Anchorage System(NUREG/CR-5563, 1999)

Specimen No.	f_{ck} MPa	d_o mm	h_{ef} mm	c_1 mm	F(Feature Ratio)		V_{test} (a)	V_{aci06} (b)	Ratio (a/b)	
					$\frac{h_{ef}}{d_o}$	$\frac{c_1}{d_o}$				
VD	D19	34.2	19.05	203.2	152.4	10.7	8.0	64.5	65.2	0.99
	D25	33.2	25.4	232.2	152.4	9.1	6.0	89.4	64.2	1.39
	D50	34.4	50.8	468.3	152.4	9.2	3.0	117.0	65.4	1.79
VH	D19-H66	34.8	19.1	66.7	203.2	3.5	10.7	96.1	117.0	0.82
	D19-H92	42.9	19.1	92.1	203.2	4.8	10.7	133.4	129.8	1.03
	D19-H203	34.2	19.1	203.2	203.2	10.7	10.7	86.7	115.9	0.75
	D19-H92	42.9	19.1	92.1	152.4	4.8	8.0	84.5	73.0	1.16
	D19-H152	39.5	19.1	152.4	152.4	8.0	8.0	100.6	70.0	1.44
	D19-H203	34.2	19.1	203.2	152.4	10.7	8.0	64.5	65.2	0.99
VE	D25-E101	33.0	25.4	232.2	101.6	9.1	4.0	56.0	28.4	1.97
	D25-E152	33.2	25.4	232.2	152.4	9.1	6.0	89.4	64.2	1.39
	D25-E203	33.0	25.4	232.2	203.2	9.1	8.0	144.1	113.8	1.27
	D50-E152	34.4	50.8	468.3	152.4	9.2	3.0	117.0	65.4	1.79
	D50-E304	34.9	50.8	468.3	304.8	9.2	6.0	245.1	263.5	0.93

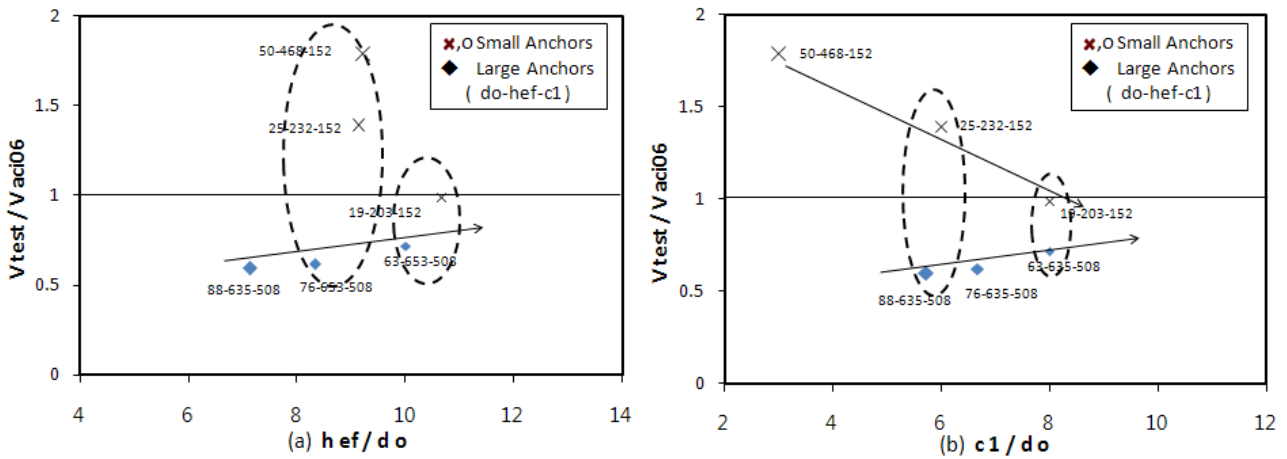


Fig. 9 Predicted Ratio at Anchor Bolt Diameter

$$F_{h_{ef}} = \frac{h_{ef}}{d_o} \quad (3)$$

$$F_{c_1} = \frac{c_1}{d_o} \quad (4)$$

여기서,

c_1 : 전단하중방향 연단거리(mm)

d_o : 앵커볼트직경(mm)

h_{ef} : 유효매입깊이(mm)

4.5.2 형상비의 영향 분석

앞서 정의한 형상비는 앵커볼트의 크기에 따라 변화하

기 때문에 기존에 연구되었던 Table 5의 중소형 앵커리지시스템(NUREG/CR-5563, 1999)과 본 연구의 Table 3에 나타난 대형 앵커리지시스템의 시험결과를 교하여 형상비의 영향을 분석하고자 하였다.

앵커볼트의 직경 변수 시험결과에 대한 예측비를 앵커리지시스템의 형상비에 따라 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9 (a) h_{ef} / d_o 에서 $8d_o$ 영역에서는 중소형 앵커리지시스템과 대형 앵커리지시스템의 예측비의 차이가 1이상으로 크게 나타났으며 $10d_o$ 영역에서는 중소형 앵커리지시스템은 예측비가 1에 가깝게 나타났으나 대형 앵커리지시스템은 예측비가 0.6으로 중소형 앵커리지시스템과 0.4정

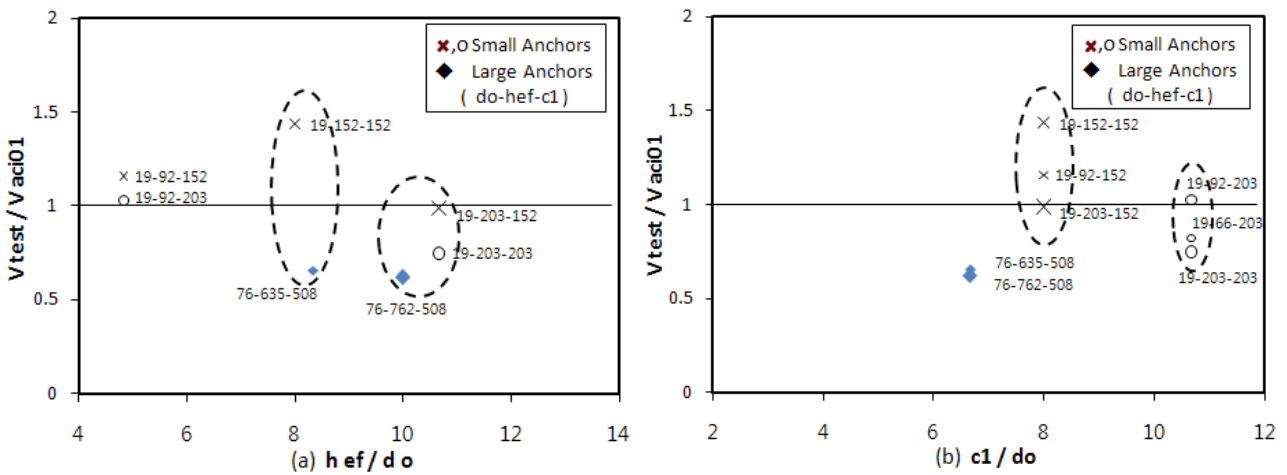


Fig. 10 Predicted Ratio at Effective Embedment Depth

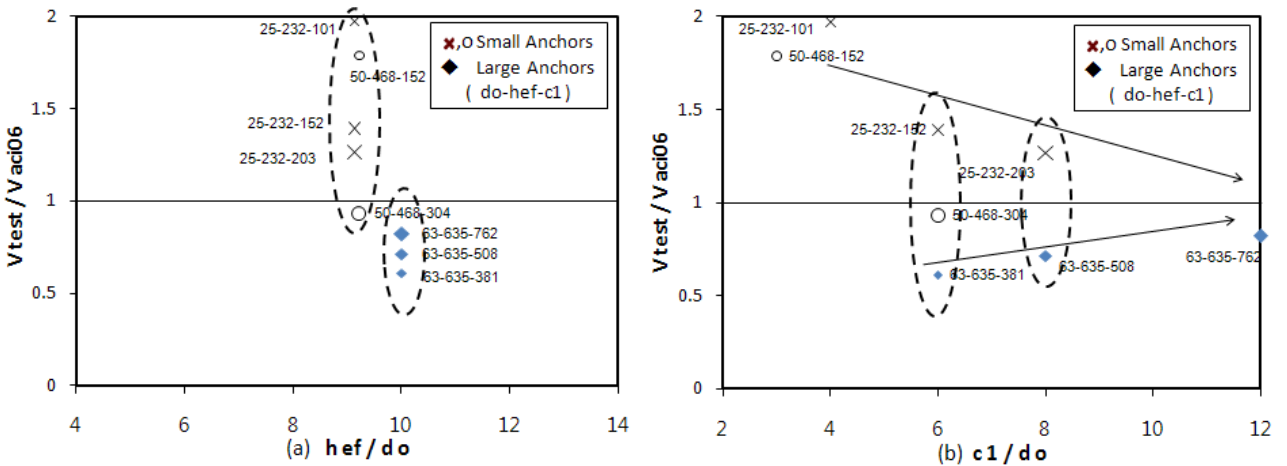


Fig. 11 Predicted Ratio at Edge Distance

도 차이로 줄어들었다. 또한, 중소형 앵커리지시스템은 같은 형상비에서도 예측비의 차이가 큰 것으로 나타났다. Fig. 9 (b) c_1/d_o 에서 $6d_o$ 영역에서는 중소형 앵커리지시스템과 대형 앵커리지시스템의 예측비의 차이가 1이상으로 크게 나타났으며 $8d_o$ 영역에서는 중소형 앵커리지시스템은 예측비가 1에 가깝게 나타났으나 대형 앵커리지시스템은 예측비가 0.6으로 중소형 앵커리지시스템과 0.4정도 차이로 줄어들었다. 또한, 대형 앵커리지시스템은 형상비가 커질수록 예측비 1에 근접하는 경향이 나타났다. 전체적으로는 형상비가 커질수록 예측비의 차이가 작아지는 경향을 보이고 있다.

Fig. 10에는 앵커볼트의 유효매입깊이 변수 시험결과에 대한 예측비를 앵커리지시스템의 형상비에 따라 나타내었다. Fig. 10 (a) h_{ef}/d_o 에서 $8d_o$ 영역에서는 중소형

앵커리지시스템과 대형 앵커리지시스템의 예측비의 차이가 1이상으로 크게 나타났으며 $4d_o$, $10d_o$ 영역에서는 중소형 앵커리지시스템은 예측비가 1에 가깝게 나타났으나 대형 앵커리지시스템은 예측비가 0.6으로 중소형 앵커리지시스템과 0.4정도 차이로 줄어들었다. 또한, 중소형 앵커리지시스템은 같은 형상비에서도 예측비의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. Fig. 10 (b) c_1/d_o 에서 $8d_o$ 영역에서는 중소형 앵커리지시스템과 대형 앵커리지시스템의 예측비의 차이가 0.4정도로 나타났으며 중소형 앵커리지시스템은 $8d_o$ 영역에서 예측비가 1.0~1.5로 나타난 반면 $10d_o$ 영역에서는 0.7~1.1로 나타났다. 형상비가 커질수록 예측비가 작아지는 경향을 보이고 있다.

연단거리 변수 시험결과에 대한 예측비를 앵커리지시스템의 형상비에 따라 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11

(a) h_{ef}/d_o 에서 $9d_o$ 영역에서 중소형 앵커리지시스템은 연단거리가 작은 경우는 예측비가 1을 상회하다가 연단거리가 커지면서 예측비가 1에 근접하는 경향이 나타났다. $10d_o$ 영역에서 대형 앵커리지시스템은 연단거리가 작은 경우 예측비가 0.6정도로 나타났으나 연단거리가 커지면서 예측비가 1에 근접하는 것으로 나타났다. Fig. 11 (b)에서 $6d_o$, $8d_o$ 영역에서는 직경이 커질수록 예측비가 작아지는 경향으로 나타났으며 예측비의 차이도 형상비가 커질수록 작아지는 것으로 나타났다. 전체적으로는 형상비가 커질수록 예측비의 차이가 작아지는 경향이 나타났다.

분석한 내용을 종합하면 앵커볼트 직경 19mm 시험체의 경우 예측비가 1에 근접하고 있어 이는 ACI 349-06 식이 소형 앵커리지시스템에 적합한 기준임을 알 수 있다. 또한, Fig. 9와 11에서 알 수 있듯이 앵커시스템의 연단거리와 앵커볼트의 직경에 관한 형상비가 작아질수록 (앵커볼트의 직경이 커질수록) 예측비가 작게 나타나는 경향을 보이고 있어 이는 대형 앵커리지시스템에서 전단강도 저하의 원인으로 판단되며, 설계식의 변경 제안을 위해서는 추가적인 분석이 필요한 것으로 판단된다.

5. 결론

대형 전단 앵커시스템에 대한 실규모 시험을 통하여 나타난 전단성능 및 거동특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 콘크리트 전단 파열 파괴강도 V_{test} (시험값)는 연단거리(c_1)의 증가에 따라 V_{aci06} , V_{ccd} 예측값과 유사한 경향을 보이나 대부분 작게 나타났다.
- (2) 앵커볼트직경(d_o)은 V_{test} (시험값)에 영향이 없는 것으로 나타났으며 이는 V_{aci06} (ACI349-06 예측값)와 V_{ccd} (CCD 시험식에 의한 예측값)에서 앵커 직경(d_o)에 의한 영향을 작게 고려하는 것에 기인한 것으로 판단된다.
- (3) 앵커매입깊이(h_{ef})는 V_{test} (시험값)에 영향이 거의 없는 것으로 나타났으며 V_{aci06} 예측값의 87%정도로 나타났으며, V_{ccd} 시험식에 의한 예측값의 52% 정도로 작게 나타났다.
- (4) 대형 전단 앵커시스템에서 콘파괴 각도는 30° 로 완만하게 나타났으며 소형앵커시스템의 35° 와는 다른

양상을 보였다. 또한 대형 전단 앵커시스템에서 하중-지압길이는 $4d_o$ 로 나타났으며 ACI 349-06에서 고려하는 최대 $8d_o$ 보다 작게 나타났다. 이는 앵커볼트의 직경에 의하여 나타나는 특성으로 판단된다.

- (5) 대형 매입앵커시스템에서 앵커볼트에 전단하중(P)이 작용하면 콘크리트 콘파괴 크랙 위치 부근에서 앵커볼트에 최대 휨(BP; Bending Point)이 발생하며, 콘크리트 상부면에서 BP까지의 사이에 콘크리트에 의한 반력 P_{top} 이 야기되고 BP보다 더 아래 부분에 P_{top} 에 상응하는 반대방향의 반력 P_{bottom} 가 나타난다는 것을 알게 되었다.
- (6) S3시험체에서 나타난 앵커하중-지압길이(l)는 $4d_o$ (356mm) 정도로 콘크리트 전단 파열 파괴강도 산정시 고려한 $7d_o$ (635mm) 보다 40% 정도로 확인되었다. 이는 대형앵커시스템에서 앵커볼트와 콘크리트의 상호작용이 하중-지압길이(l)의 변화에 영향을 주는 것에 기인한 것으로 판단된다.
- (7) 중소형 앵커리지시스템과 대형 앵커리지시스템 시험 결과를 종합하여 분석한 결과 연단거리와 앵커볼트의 직경에 관한 형상비가 작아질수록(앵커볼트의 직경이 커질수록) 예측비가 작아지는 경향이 있어 이는 설계식이 영향인자를 적절히 고려하지 못하는 것에 기인한 것으로 판단된다.

대형 전단 앵커시스템의 거동특성을 설계기준에 반영하기 위해서는 추가적인 분석 및 연구가 필요 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국수력원자력(주)의 연구비 지원에 의한 시험결과를 활용한 추가 분석 연구로서 연구활동 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. ACI 349-06, Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures ; Appendix B Anchoring to Concrete, 2001, pp.81-88.
2. Fuchs, W. and Eligehausen, R. And Breen J. E., "Concrete Capacity Design(CCD) Approach for Fastenings to Concrete", ACI Structural Journal, vol. 92, No. 6, 1995, pp.794-802.

-
3. ASTM E 488-98, Standard Test Methods for Strength of Anchors in Concrete and Masonry Elements, 1998.
 4. KEPRI and KOPEC Internal Report, "Pri-tests for Large-sized Cast-In-Place Anchors", 2003.
 5. Eligehausen, R., "Behavior, Design and Testing of Anchorage in Cracked Concrete", ACI SP-130, 1991, pp.123-175.
 6. NUREG/CR-5563, "A Technical Basis for Revision to Anchorage Criteria", 1999.

(접수일자 : 2011년 3월 6일)
 (수정일자 : 2011년 5월 25일)
 (심사완료일자 : 2011년 8월 18일)

요 지

본 연구에서는 콘크리트 매입앵커시스템 설계코드인 ACI 349-01에 제시되지 않은 직경 50mm(2") 이상 유효매입깊이 (h_{ef}) 635mm(25") 이상의 대형 매입앵커시스템에서 전단 파열파괴 성능과 거동특성을 파악하기 위하여 24개의 실규모 시험을 하였다. 시험변수는 앵커볼트의 직경($d_o=63.5, 76.2, 88.9\text{mm}$), 앵커볼트의 매입깊이($h_{ef}=635, 762\text{mm}$), 연단거리($c_1=381, 508, 762\text{mm}$) 그리고 콘크리트강도($f_{ck}=38\text{MPa}$)로 하였다. 예측식인 V_{aci06} 과 V_{cxi} 는 시험결과(V_{test})를 과대평가하는 것으로 나타났다. 앵커볼트직경(d_o) 50mm(2")이상, 유효매입깊이(h_{ef}) 635mm(25")이상의 대형앵커시스템에서 앵커볼트직경 변화시험과 유효매입깊이 변화시험은 앵커시스템의 전단성능에 영향이 없는 것으로 나타났다. 그러나, 대형 앵커리지시스템의 연단거리와 앵커볼트의 직경에 대한 형상비에 의한 분석결과 형상비가 작아질수록(앵커볼트의 직경이 커질수록) 시험결과에 대한 예측식의 비가 커지는 것으로 분석되었다. 이는 앵커볼트의 직경이 전단강도 저하의 직접적인 원인인 것으로 밝혀졌다.

설계기준에 대한 적절한 개선을 위해서는 더 많은 이론적, 해석적 연구가 필요하다.

핵심 용어 : 대형앵커시스템, 거동특성, 전단성능, CCD 방법
