

익스팬션 앵커의 콘크리트 콘 파괴강도 평가

Evaluation of Concrete Cone Breakout Strength of Expansion Anchors

김성용¹⁾ · 김규석²⁾
Kim, Sung Yong · Kim, Kyu Suk

요약 : 본 논문은 비균열 무근콘크리트에 매입된 익스팬션 앵커의 인발내력을 평가하기 위한 실험적 연구이다. 앵커의 인발실험은 익스팬션 앵커에 해당하는 고하중 앵커와 웨지 앵커를 대상으로 삽입깊이, 콘크리트 강도 및 연단거리를 변수로 하여 실험을 수행하였다. 후시공 앵커의 설계식은 EOTA와 ACI 318-02 기준의 근거가 되는 CCD 방법이 제안되어 있다. 본 연구에서는 비균열 무근콘크리트에 매입된 익스팬션 앵커의 콘크리트 콘 파괴강도에 관한 설계식을 분석하였으며, 고하중 앵커와 웨지 앵커의 실험값을 CCD 방법의 예측값과 비교 평가하였다. 실험 결과, 비균열 무근콘크리트에 매입된 웨지 앵커의 콘크리트 콘 파괴 시 공칭강도의 계수는 CCD 방법에 근거하여 9.94임을 알 수 있었다. 고하중 앵커의 콘크리트 콘 파괴 시 공칭강도의 계수는 CCD 방법에 근거하여 11.50임을 알 수 있었다.

ABSTRACT : The paper presents an evaluation of the tensile strength of the expansion anchor that can cause failure in the concrete based on the design of the anchorage. Tests of the heavy-duty anchor and the wedge anchor that are domestically manufactured and installed in plain concrete members are conducted to probe the effects of the embedded depth, concrete strength, and anchors spacing. The design of post-installed steel anchors is presented using the Concrete Capacity Design (CCD) approach. The CCD method is applied to predict the concrete failure load of the expansion anchor in plain concrete under monotonic loading for important applications. The concrete tension capacity of the fastenings with heavy-duty anchors and wedge anchors in plain concrete predicted using the CCD method is compared with the test results. For the CCD method, a normalization coefficient of 9.94 is appropriate for the nominal concrete breakout strength of an anchor or a group of wedge anchors in tension. On the other hand, a normalization coefficient of 11.50 is appropriate for the nominal concrete breakout strength of an anchor or a group of heavy-duty anchors in tension.

핵심용어 : 고하중 앵커, 웨지 앵커, 콘크리트 콘 파괴강도, 삽입깊이, 콘크리트 강도

KEYWORDS : Heavy-duty Anchor, Wedge Anchor, Concrete cone breakout Strength, Embedment Depth, Concrete Strength

1. 서론

최근에 건축물의 신축보다는 구조물의 보수·보강을 통하여 건축물을 재사용하는 리모델링 건축이 활성화되고 있다. 리모델링 건축 시 익스팬션 앵커(Expansion Anchor)는 기존의 철근콘크리트 구조물에 철골 부재를 접합하는 경우와 구조물에 중량물을 고정하거나 부착하는데 사용한다. 그러나 현재 국내에서는 익스팬션 앵커의 설계기준이나 자료가 전무한 상태이다. 따라서 국내에서 생산되는 익스팬션 앵커에 대한 기술 자료의 필요성이 시급한 상태이다. 또한 기존의 외국에서 제안되고 있는 익스팬션 앵커의 설계식은 앵커의 특성을 고려하지 않고 일괄적으로 설계식을 적용하고 실정이다.

본 연구에서는 익스팬션 앵커(Expansion anchor)에 해당하는 국내산 고하중 앵커(Heavy-duty Anchor)와 웨지 앵커(Wedge Anchor)에 대상으로 삽입깊이, 콘크리트 강도 및 앵커간격을 변수로 한 인발실험을 통하여 앵커의 거동을 살펴보고, ACI 318-02와 EOTA(European Organization for Technical Approval) 기준의 근거인 CCD(Concrete Capacity Design) 방법에 의한 예측값과 실험값을 비교 평가하여, 콘크리트에 매입되는 앵커의 품질확보를 위해 필요한 기초 자료를 제시하는데 목적이 있다.

1) 정희원, 동국대학교 대학원 박사과정
(Tel:031-370-9591, Fax:031-370-9599, E-mail:kimks@dongguk.edu)
2) 정희원, 동국대학교 건축공학과 교수, 공학박사(kimks@dongguk.edu)

본 논문에 대한 토의를 2004년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

2. 기존 콘크리트 콘 파괴강도 설계식(Concrete cone breakout)

콘크리트 콘 파괴 시 공칭강도를 산정하는 방법은 45-Degree Cone Method과 Concrete Capacity Design (CCD) Method가 제안되었다. 45-Degree Cone Method는 ACI 349-90 Appendix B와 PCI Design Handbook(1992)에 적용되었다. CCD Method는 ACI 318-02 Appendix D와 EOTA Annex C에 적용되었다. 기존의 45-Degree Cone Method는 CCD Method보다 비합리적인 점이 많은 연구를 통하여 증명이 되었으며, 본 연구에서는 45-Degree Cone Method에 대해서는 제외한다. (Fuchs, 1995) 그림 1은 본 연구에서 사용된 고탄중 앵커와 웨지 앵커를 나타낸 것이다.

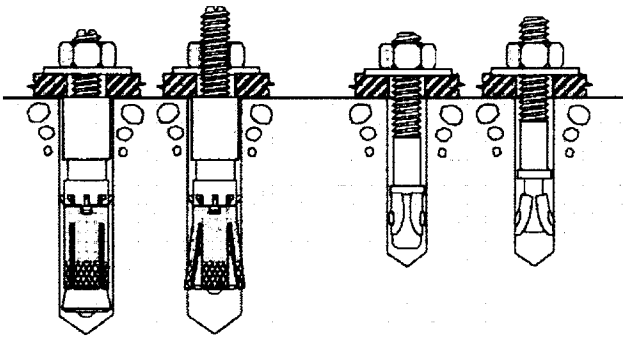


그림 1. 토크 조절용 익스팬션 앵커

2.1 Concrete Capacity Design(CCD) Method

CCD Method은 파괴면과 콘크리트면의 사이가 35° 기울어져 있으며, 파괴 콘 모양은 피라미드 형태로 가정하고 있다 (그림 2 참조). 인발하중 작용 시 연단거리의 영향을 받지 않고, 주위 앵커의 피라미드 파괴 콘과 겹치는 부분이 없는 단일앵커의 경우, 비균열 콘크리트에 매입된 앵커의 콘크리트 콘 파괴 시 공칭강도는 식 (1)과 같다.

$$N_{no} = k_{nc} \sqrt{f'_c} h_{ef}^{1.5} \quad (N) \quad (1)$$

여기서, k_{nc} = 15.5 (US 단위 : 35, post-installed anchors)

k_{nc} = 17.5 (US 단위 : 40, cast-in anchors)

f'_c = 원주형 공시체의 압축강도

h_{ef} = 앵커의 삽입깊이

연단거리 영향 또는 인접한 파괴 콘에 영향을 받는 경우, 콘크리트 콘 파괴강도는 식 (2)와 같다. 그림 3~5는 식(2)의 수평투영면적을 나타낸 것이다. (Fuchs, 1995)

$$N_n = \frac{A_N}{A_{No}} \psi_2 N_{no} \quad (N) \quad (2)$$

여기서, $\psi_2 = 1 \quad (c_1 \geq 1.5h_{ef})$

$$= 0.7 + 0.3 \frac{c_1}{1.5h_{ef}} \quad (c_1 \leq 1.5h_{ef})$$

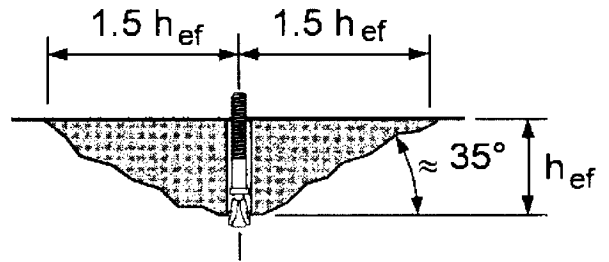


그림 2. CCD Method에서 인발하중을 받는 단일앵커의 이상화한 콘크리트 파괴 콘 모양

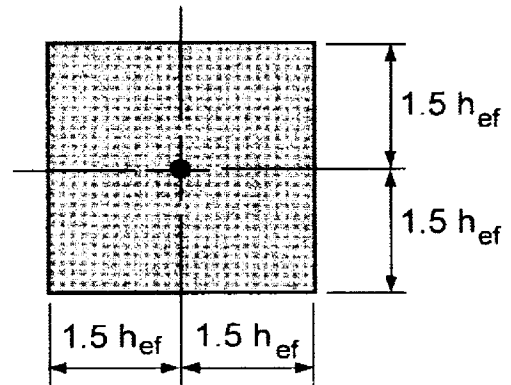


그림 3. 단일앵커의 수평투영면적

$$A_{No} = 2(1.5h_{ef}) \times 2(1.5h_{ef}) = 9h_{ef}^2$$

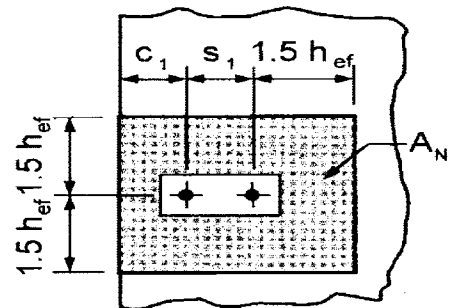


그림 4. 연단거리에 따른 단일앵커의 수평투영면적

$$A_N = (c_1 + 1.5h_{ef})(2 \times 1.5h_{ef}) \quad (c_1 \leq 1.5h_{ef} \text{ 인 경우})$$

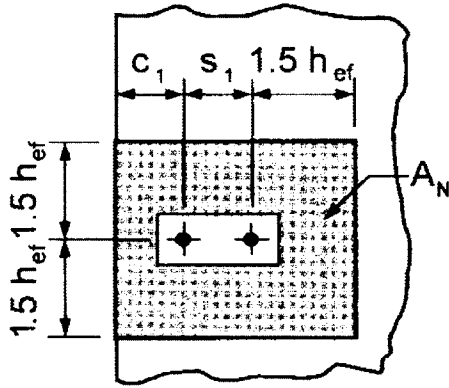


그림 5. 앵커군의 수평투영면적

$$A_N = (s_1 + c_1 + 1.5h_{ef}) \times (2 \times 1.5h_{ef})$$

($c_1 \leq 1.5h_{ef}$, $s_1 \leq 3h_{ef}$ 인 경우)

2.2 ACI 318-02 Appendix D

균열콘크리트에 대한 단일앵커의 콘크리트 콘 파괴강도는 CCD Method을 기초로 5% 파괴확률을 적용하여 식 (3)과 같이 제시하고 있다.

$$N_b = k\sqrt{f_c'} h_{ef}^{1.5} \quad (1b) \quad (3)$$

여기서, $k = 17$ (post-installed anchors)
 $k = 24$ (cast-in anchors)

사용하중(service load)하에서 비균열콘크리트($\epsilon_t < \epsilon_c$)에 위치한 단일 앵커의 콘크리트 콘 파괴강도는 식(3)에 계수 ψ_3 을 곱하여 산정한다. 계수 ψ_3 는 식 (4)와 같이 제시하고 있다.(ACI 318, 2002)

$$\psi_3 = 1.4(\text{post-installed anchors}) \quad (4a)$$

$$\psi_3 = 1.25(\text{cast-in anchors}) \quad (4b)$$

2.3 EOTA Annex C

EOTA(2001)에서는 CCD Method에 기초하여 균열콘크리트의 콘크리트 콘 파괴강도를 식 (5)와 같이 제시하고 있다. 또한 비균열콘크리트에 위치한 앵커의 콘크리트 콘 파괴강도는 계수 ψ_3 을 이용하여 ACI 318-02와 동일하게 산정한다.

$$N_b = 7.2\sqrt{f_{cc}'} h_{ef}^{1.5} \quad (N) \quad (5)$$

여기서, $f_{cc}' =$ 입방체형 공시체의 압축강도, N/mm^2

2.4 ACI 355.2-00

ACI 355(2000)에서는 콘크리트 콘 파괴 시, 실험값으로부터 유효계수 k 값을 표 1과 같이 제시하고 있으며, 계산식은 식 (6)과 같다.

$$k = \frac{N_b}{\sqrt{f_{c, test, i}} h_{ef}^{1.5}} \quad (6)$$

여기서, $N_b =$ 앵커의 인발강도(5% 파괴확률 강도)

$\sqrt{f_{c, test, i}} =$ 콘크리트 공시체의 압축강도(N/mm^2)

표 1. k 값의 최대, 최소

실험단면	최소허용 k 값		최대허용 k 값	
	US (Inch-pound)	SI (mm-N)	US (Inch-pound)	SI (mm-N)
균열 콘크리트	17	7	21	9
비균열 콘크리트	24	10	30	13

또한 후시공 앵커에 의하여 콘크리트 파괴나 슬립파괴가 일어난 실험값의 평균파괴강도와 변동계수를 이용하여 $F_{5\%}$ (Characteristic capacity) 계산 방법을 식(7)과 같이 제시하고 있다.(ACI 214, 2002 : ACI 355, 2000)

$$F_{5\%} = F_m (1 - K^{\omega}) \quad (N, lb) \quad (7)$$

여기서, $F_m =$ 평균 파괴강도(mean failure capacity)

$K =$ 정규분포상에서 90%의 신뢰한계를 가지며
 결여분은 5%가 넘지 않는 편측허용한계
 (one-sided tolerance limits)에 관한 계
 수

$\omega =$ 변동계수(coefficient of variation)

표 2. 90%의 신뢰한계를 갖는 K 값

실험 수	K
4	3.957
10	2.568
50	1.965
∞	1.645

3. 실험 계획

3.1 실험 계획

단일앵커의 콘크리트 콘 파괴강도 산정 시, CCD 방법에서는 삽입깊이와 콘크리트강도를 고려하고 있다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트 콘 파괴강도와 삽입깊이 및 앵커직경의 관계를 규명하기 위하여, 익스팬션 앵커인 고하중 앵커와 웨지 앵커를 대상으로 각 직경별로 기준실험체(실험체명 : H1) 삽입깊이(h_{ef})의 0.75~1.5배까지 변화시켰다.

콘크리트 강도와 콘크리트 콘 파괴강도의 관계를 규명하기 위해 설계기준강도가 210, 300, 500kgf/cm²의 실험체를 계획하였다.

앵커군(그룹앵커)의 평균앵커강도와 앵커군과 유사한 기하학적 조건을 가진 단일앵커강도를 비교하면, 앵커군의 평균앵커강도는 파괴 콘의 영향으로 강도저감 현상이 발생한다. 앵커 간격에 따른 인발내력을 규명하고자 앵커 간격(s_a)을 삽입깊이(h_{ef})의 0.8배~3.8배까지 변화시켰다. 또한 ACI 318-02에서는 연단효과(Edge effect)를 고려하여 α_2 계수를 제시하고 있다. 따라서 연단효과를 평가하기 위해 연단거리(c_a)를 삽입깊이의 0.6배~2.8배까지 변화시켰다.

앵커 실험을 위한 비균열·무근콘크리트 실험체는 ASTM E 488-96(1996)에서 제시하는 연단거리($2.0 h_{ef}$) 및 실험체의 두께($1.5 h_{ef}$)를 확보하기 위해, 유효삽입깊이(h_{ef})에 따라 각각 $1.6 \times 1.6 \times 0.3m$ 와 $1.5 \times 1.5 \times 0.3m$ 로 직육면체 실험체를 계획하였다.

실험체에 대한 명명법은 다음과 같다.

H(S)T16-AC1H1(S1)

여기서, H(S) : 고하중 앵커(웨지 앵커)

T : 인발실험

16 : 앵커볼트 직경(M16)

A : 콘크리트 강도(설계강도 A : 210 kgf/cm²,

B : 300kgf/cm², C : 500kgf/cm², 표 6 참조)

C1 : 연단거리(표 5 참조)

H1(S1) : 삽입깊이(앵커간격, 표 7 참조)

3.2 가력 및 측정방법

앵커의 인발실험은 ASTM E 488-96(1996)에 의하여 수행하였다. 하중은 로드셀(사용범위 51tf)을 설치한 후 유압장비로 가력 하였고, 데이터로거를 사용하여 초당 한번씩 데이터를 측정하였다. 또한 앵커의 변위측정을 위하여 200mm 변위계(LVDT)를 설치하여 측정하였다. 인발 실험전경은 그림 6과 같다.

앵커의 설치과정은 적절한 직경의 비트로 구멍을 뚫은 후 구멍내의 먼지나 불순물을 제거한 뒤 앵커를 삽입하였다. 그리고 토크렌치를 사용하여 체결하였다.

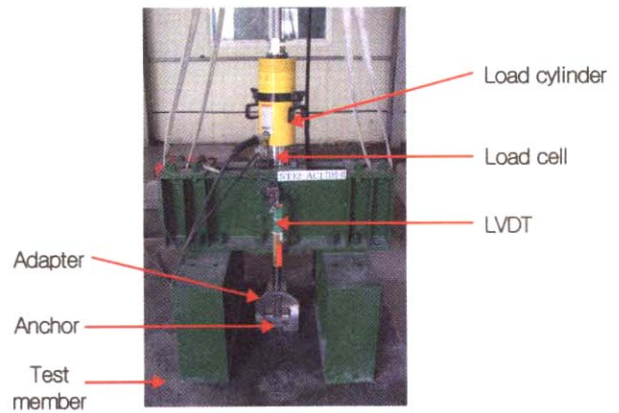


그림 6. 인발실험의 설치 전경

4. 실험결과 및 분석

4.1 소재특성

본 실험에서 사용된 콘크리트의 배합 및 소재특성은 표 3과 같다. 콘크리트 압축강도 실험은 KS F 2403에 따라 제작한 9개의 공시체를 실험체와 동일한 조건에서 28일 양생시킨 후, 콘크리트 압축강도 시험을 실시하였다.

표 3. 콘크리트의 배합 및 소재특성

콘크리트 설계강도 (kgf/cm ²)	슬럼프 (cm)	물시멘트비 (%)	공기량 (%)	굵은골재최대치수 (mm)	평균 압축강도 (kgf/cm ²)
210 ¹⁾	8	55.9	4.5	25	223.3
210 ²⁾	12	55.6	4.5	25	223.3
300 ²⁾	12	43.5	4.5	25	275.3
500 ²⁾	15	31.0	4.5	25	443.1

주) 1) : 삽입깊이 및 연단거리가 변수인 실험체.

2) : 콘크리트 강도 및 앵커간격이 변수인 실험체.

표 5. 삽입깊이 및 연단거리에 따른 인발실험 결과

실험체명	연단거리 (mm)	삽입깊이 (mm)	실험값 (tf)	콘각도 (°)	파괴모드	평가식 (tf)	CCD 방법 (tf)	실험값과 예측값의 비교	
			(1)			(2)		(1)/(2)	(1)/(3)
HT16-AC1H1	400	105	9.11	22.15	CB	8.69	7.96	1.048	1.145
HT16-AC1H2	400	127	12.79	20.58	CB	11.61	10.58	1.101	1.208
HT16-AC1H3	400	162	12.50	26.18	CB	16.82	15.25	0.743	0.820
HT16-AC1H4	400	85	5.65	28.05	CB	6.30	5.80	0.897	0.975
HT16-AC2H1	65	105	5.31	-	CB+CS	3.33 ¹⁾	4.49	1.592	1.181
HT16-AC3H1	105	105	6.91	-	CB+CS	4.29 ¹⁾	5.79	1.608	1.193
HT16-AC4H1	140	105	6.55	30.30	CB	5.23 ¹⁾	7.05	1.310	0.972
HT16-AC5H1	205	105	6.25	23.74	CB	5.73 ¹⁾	7.72	1.091	0.810
HT16-AC6H1	265	105	8.58	23.97	CB	5.73 ¹⁾	7.72	1.497	1.111
HT12-AC1H1	250	80	6.55	20.73	CB	5.75	5.29	1.140	1.238
HT12-AC1H2	250	88	4.94	19.03	CB	6.64	6.10	0.744	0.809
HT12-AC1H4	250	57	2.99	19.54	CB	3.43	3.18	0.872	0.940
HT12-AC2H1	50	80	4.54	31.09	CB	2.23 ¹⁾	3.00	2.040	1.514
HT12-AC3H1	80	80	6.16	20.73	CB	2.86 ¹⁾	3.85	2.157	1.600
HT12-AC4H1	105	80	5.91	29.06	CB	3.44 ¹⁾	4.63	1.718	1.275
HT12-AC5H1	155	80	6.09	24.78	CB	3.81 ¹⁾	5.13	1.599	1.186
HT12-AC6H1	200	80	6.86	25.59	CB	3.81 ¹⁾	5.13	1.081	1.336
ST20-AC1H1	400	110	5.83	-	PTF	-	8.53	-	-
ST20-AC2H1	80	110	3.89	29.43	CB+PF	-	5.19	-	0.749
ST20-AC3H1	130	110	4.21	-	CB+CS	-	6.93	-	0.607
ST20-AC4H1	180	110	4.88	25.44	CB	-	8.28	-	0.590
ST20-AC5H1	230	110	4.25	24.62	CB+PF	-	8.28	-	0.544
ST20-AC6H1	275	110	5.35	-	PTF	-	8.28	-	0.646
ST16-AC1H1	250	80	4.95	21.73	CB	4.84	5.29	1.022	0.935
ST16-AC1H2	250	96	6.90	27.20	CB	6.02	6.96	1.145	0.991
ST16-AC1H3	250	120	7.09	46.28	CB	7.87	9.72	0.900	0.729
ST16-AC1H4	250	60	3.97	23.08	CB	3.43	3.44	1.158	1.155
ST16-AC2H1	65	80	4.54	29.05	CB	2.19 ¹⁾	3.41	2.072	1.329
ST16-AC3H1	105	80	5.35	25.64	CB	2.97 ¹⁾	4.63	1.799	1.154
ST16-AC4H1	145	80	4.78	23.70	CB	3.29 ¹⁾	5.13	1.451	0.930
ST16-AC5H1	185	80	4.54	29.42	CB	3.29 ¹⁾	5.13	1.379	0.884
ST16-AC6H1	225	80	6.03	24.90	CB	3.29 ¹⁾	5.13	1.830	1.174
ST12-AC1H1	200	70	4.39	25.19	CB+PF	4.13	4.33	1.065	1.056
ST12-AC1H2	200	84	5.42	37.58	CB	5.13	5.69	1.055	0.951
ST12-AC1H3	200	105	5.95	-	PTF	-	7.96	-	-
ST12-AC1H4	200	52.5	2.63	25.31	CB	2.92	2.81	0.898	0.933
ST12-AC2H1	55	70	3.19	23.29	CB	1.76 ¹⁾	2.74	1.813	1.163
ST12-AC3H1	90	70	3.31	29.45	CB	2.39 ¹⁾	3.73	1.370	0.878
ST12-AC4H1	130	70	3.63	26.53	CB	2.69 ¹⁾	4.20	1.345	0.863
ST12-AC5H1	165	70	4.18	28.96	CB	2.69 ¹⁾	4.20	1.464	0.939
ST10-AC1H1	200	60	2.81	30.14	CB	2.76	2.61	1.019	1.075

주) 파괴모드에서 CB : concrete cone failure, PF : pullout failure, PTF : pull-through failure, CS : concrete splitting failure를 의미한다.

1) : 연단거리에 따른 안정성 평가 시 제안식 (9)에 연단거리에 따른 CCD 감소계수를 곱한 값임.

표 4. 앵커의 소재특성

앵커의 종류	인장강도 (tf/cm ²)
고하중 앵커	11.02
웨이 앵커	4.52

앵커는 전단 실험용 앵커와 동일한 로트(lot)의 시험성적서에 제시된 값을 사용하였다. 앵커설계 시 앵커의 항복강도는

명확하지 않으므로 설계식에서 인장강도만 사용하고 있다. 본 연구에서도 앵커의 인장강도만 표기하였으며, 앵커의 인장강도는 표 4와 같다.

4.2 콘크리트 콘 파괴강도

표 5~7은 앵커의 삽입깊이, 연단거리, 콘크리트 강도 및

표 6. 콘크리트 강도에 따른 인발실험 결과

실험체명	콘크리트강도 (kgf/cm ²)	실험값 (tf)	콘각도 (°)	파괴모드	평가식 (tf)	CCD 방법 (tf)	실험값과 예측값의 비교	
		(1)			(2)	(3)	(1)/(2)	(1)/(3)
HT16-BC1H1	275.3	10.41	19.01	CB	9.60	8.84	1.085	1.178
HT16-CC1H1	443.1	12.96	20.85	CB	12.02	11.21	1.078	1.156
HT12-BC1H1	275.3	6.07	17.60	CB	6.34	5.88	0.956	1.032
HT12-CC1H1	443.1	7.28	18.05	CB	7.94	7.45	0.917	0.977
ST20-BC1H1	275.3	8.36	17.91	CB	7.27	8.44	1.150	0.990
ST20-CC1H1	443.1	9.39	22.16	CB+PF	9.41	10.61	0.994	0.882
ST16-BC1H1	275.3	4.68	22.65	CB	5.06	5.36	0.923	0.871
ST16-CC1H1	443.1	6.70	23.58	CB	6.69	6.92	1.003	0.970
ST12-BC1H1	275.3	3.65	24.53	CB+SS	4.46	4.58	0.817	0.796
ST12-CC1H1	443.1	4.11	-	SS	-	-	-	-

주) 파괴모드에서 SS : steel failure, CB : concrete cone failure, PF : pullout failure를 의미한다.

표 7. 앵커간격에 따른 인발실험 결과

실험체명	앵커간격 (mm)	실험값 (tf)	파괴모드	CCD 감소계수	CCD 방법 (tf)	제안식 (tf)	실험값과 예측값의 비교	
		(1)			(2)	(3)	(1)/(2)	(1)/(3)
HT16-AC1S1	80	10.80	CB	0.627	9.98	7.40	1.082	1.459
HT16-AC1S2	160	12.74	CB	0.754	12.00	8.90	1.062	1.431
HT16-AC1S3	210	13.59	CB	0.833	13.26	9.84	1.025	1.381
HT16-AC1S4	270	17.07	CB	0.929	14.78	10.97	1.155	1.557
HT16-AC1S5	320	15.24	CB	1.000	15.92	11.81	0.957	1.290
HT12-AC1S1	80	6.98	CB	0.667	7.06	5.24	0.989	1.333
HT12-AC1S2	120	8.16	CB	0.750	7.94	5.89	1.028	1.385
HT12-AC1S3	160	9.34	CB	0.833	8.82	6.54	1.059	1.427
HT12-AC1S4	210	11.65	CB	0.938	9.92	7.36	1.174	1.582
HT12-AC1S5	240	11.33	CB	1.000	10.59	7.85	1.070	1.443
HT12-AC1S6	270	11.01	CB	1.000	10.59	7.85	1.040	1.402
ST16-AC1S1	80	5.44	CB	0.688	6.06	3.89	0.897	1.399
ST16-AC1S2	120	5.38	CB	0.774	7.13	4.57	0.754	1.175
ST16-AC1S3	160	6.44	CB	0.873	7.80	5.00	0.826	1.288
ST16-AC1S4	210	7.34	CB	0.982	9.00	5.77	0.815	1.271
ST16-AC1S5	240	7.04	CB	1.000	8.80	5.64	0.799	1.247
ST16-AC1S6	270	5.70	CB+PF	1.000	9.08	5.82	0.632	0.985
ST12-AC1H1	80	5.65	CB	0.697	5.73	3.68	0.986	1.537
ST12-AC1S1	120	6.88	CB	0.801	6.42	4.11	1.073	1.673
ST12-AC1S2	160	7.64	CB	0.902	7.21	4.62	1.060	1.653
ST12-AC1S3	210	7.13	CB	1.000	8.16	5.23	0.874	1.363
ST12-AC1S4	240	7.61	CB	1.000	8.06	5.17	0.944	1.472

앵커간격에 따른 실험값과 예측값을 비교한 것이다. 표 5와 표 6에서 삽입깊이와 콘크리트 강도에 따른 CCD 방법의 예측값은 식(1)로 계산하였고, 평가식의 평가값은 식(8)로 계산하였다. 또한 표 5와 표 8에서 앵커간격과 연단거리에 따른, CCD 방법의 예측값과 제안식은 식(2)와 식(9)로 각각 계산하였다. 여기서 모든 값들은 평균값으로 나타내었다. 실험결과 일부 실험체에서 앵커의 슬립파괴가 발생하였다. 앵커의 슬립파괴는 그림 7과 같이 Pullout failure와 Pull-through failure로 나눌 수 있다. 본 연구에서 슬립파괴가 일어난 실험체는 연구대상에서 제외하였다.

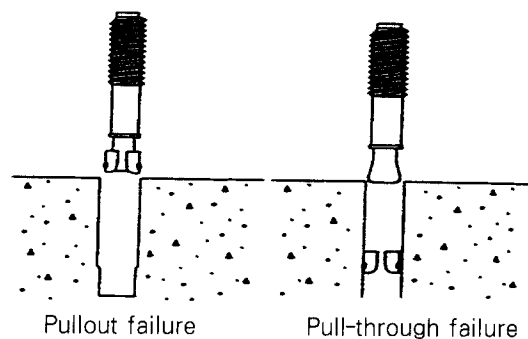


그림 7. 슬립파괴 시 파괴양상

4.2.1 삽입깊이에 따른 콘 파괴강도

표 5에서 앵커직경이 20mm인 웨지 앵커(ST20 시리즈)는 실험값이 비교적 낮게 나타났다. 그 이유는 웨지 앵커는 너트가 조여질 때 클립이 맨드릴 위로 올라오게 되어 맨드릴과 드릴구멍이 밀착되어 내력을 발휘하게 된다. 그러나 ST20-AC1H1 실험체는 맨드릴 치수와 드릴구멍 치수가 다른 앵커보다 약간 작은 것으로 나타났다. 이로 인하여 파괴모드가 대부분 슬립파괴가 일어났고, 인발내력도 저하된 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 삽입깊이 및 연단거리의 실험결과 분석 시 ST20-AC1H1 실험체는 제외하였다.

그림 8은 실험값($N_{u(test)}$)을 식 (1)에 의해 산정한 CCD 방법의 예측값($N_{no(CCD predicted)}$)으로 무차원화하여 삽입깊이에 따른 $N_{u(test)}/N_{no(CCD predicted)}$ 비로 나타낸 것이다. 그림 8에서 점선은 고하중 앵커의 평균값을 나타낸 것이며, 실선은 웨지 앵커의 평균값을 나타낸 것이다. 표 8은 CCD 방법에 의하여 앵커 종류별로 삽입깊이에 따른 콘크리트 콘 파괴강도를 통계 처리하여 나타낸 것이다.

그림 8에서 웨지 앵커는 삽입깊이가 증가함에 따라 $N_{u(test)}/N_{no(CCD predicted)}$ 의 비가 감소함을 알 수 있었다. 반면에 고하중 앵커는 편차는 크지만 삽입깊이가 증가함에 따라 $N_{u(test)}/N_{no(CCD predicted)}$ 의 비가 미소하게 증가함을 알 수 있다. 이로 미루어 CCD 방법에서 제시하고 있는 $k_{ef}^{1.5}$ 는 웨지 앵커는 과대평가하고 있으며, 고하중 앵커는 과소평가 되고 있음을 알 수 있다. 이로 인하여 표 8에서 웨지 앵커의 무차원 평균이 다소 낮게 나타난 것으로 판단된다.

그림 9는 앵커 종류별로 삽입깊이에 대한 영향을 평가하기 위하여, 삽입깊이에 따라 고하중 앵커의 회귀곡선식을 나타낸 것이다. 그림 10은 웨지 앵커의 삽입깊이에 따른 회귀곡선식을 나타낸 것이다. 그림 9와 그림 10의 회귀분석 결과, 고하중 앵커의 삽입깊이에 대한 지수값은 1.5223으로 CCD 방법에서 제시하고 있는 1.5와 미소한 차이는 있으나 거의 일치함을 알 수 있었다. 그러나 웨지 앵커의 지수값은 1.1982로 다소 떨어짐을 알 수 있었다.

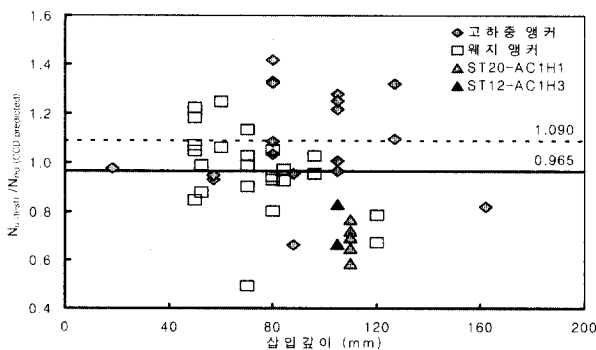


그림 8. 삽입깊이에 따른 CCD 콘 파괴강도 비교

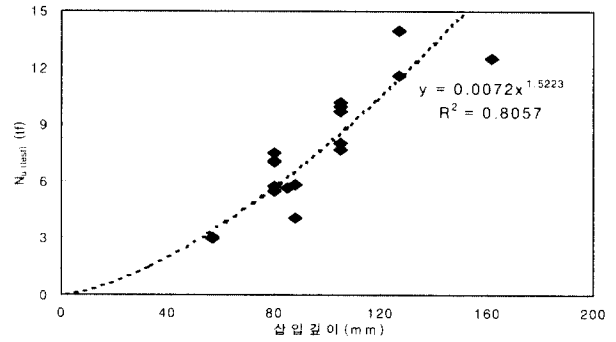


그림 9. 삽입깊이에 따른 고하중 앵커의 회귀분석

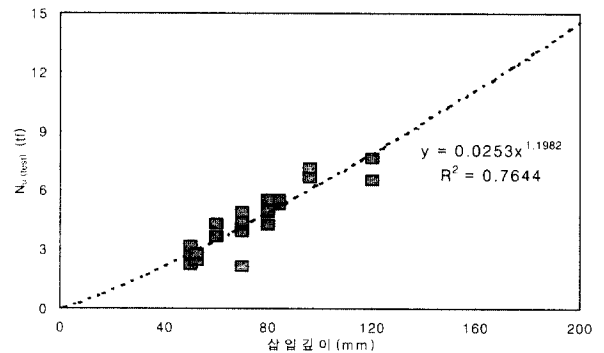


그림 10. 삽입깊이에 따른 웨지 앵커의 회귀분석

표 8. 삽입깊이에 따른 앵커종류별 콘 파괴강도 비교

구 분	무차원평균	표준편차	변동계수
웨지 앵커	0.965	0.166	0.172
고하중 앵커	1.090	0.204	0.187

4.2.2 콘크리트 강도에 따른 콘 파괴강도

표 6에서 ST12 시리즈는 콘크리트 강도가 증가함에 따라 콘크리트 콘 파괴강도가 증가하여 파괴모드가 앵커파괴로 변화하였다. 본 연구에서는 앵커파괴가 일어난 실험체는 연구대상에서 제외하였다.

그림 11은 실험값을 $N_{u(test)}/N_{no(CCD predicted)}$ 으로 무차원화하여 나타낸 것이다. 그림 11에서 점선은 고하중 앵커의 평균값을 나타낸 것이며, 실선은 웨지 앵커의 평균값을 나타낸 것이다. 표 9는 CCD 방법에 의하여 앵커 종류별로 콘크리트강도에 따른 콘크리트 콘 파괴강도를 통계 처리하여 나타낸 것이다.

그림 11에서 콘크리트강도 변화에 따라 고하중 앵커와 웨지 앵커의 CCD 방법 예측값은 편차는 있으나 실험값과 큰 차이는 없는 것으로 나타났다. 보다 정확하게 앵커 종류별로 콘크리트강도에 대한 영향을 평가하기 위하여, 그림 12는 콘크리트강도에 따라 고하중 앵커의 회귀곡선식을 나타낸 것이다. 그림 13은 웨지 앵커의 콘크리트강도에 따른 회귀곡선식을 나

타낸 것이다. 그림 12에서 콘크리트 강도에 대한 회귀분석 시 삽입깊이에 대한 영향을 배제하기 위하여, 삽입깊이에 대한 회귀분석 결과값을 적용하여 고하중 앵커의 실험값에 $(105/h_{ef})^{1.5228}$ 을 곱하여 삽입깊이를 105mm로 무차원화 하였다. 그림 13에서는 웨지 앵커의 실험값에 $(105/h_{ef})^{1.1982}$ 을 곱하여 삽입깊이를 105mm로 무차원화하였다.

그림 12와 그림 13의 회귀분석 결과, 고하중 앵커의 콘크리트 강도에 대한 지수값은 0.4722, 웨지 앵커의 지수값은 0.5591로 나타났다. 이로 미루어 고하중 앵커의 실험값은 콘크리트 강도가 증가함에 따라 CCD 방법의 예측값보다는 다소 떨어짐을 알 수 있었다. 그러나 고하중 앵커와 웨지 앵커의 지수값은 CCD 방법에서 제시하고 있는 0.5와 미소한 차이는 있으나 거의 일치함을 알 수 있었다. 이로 미루어 CCD 방법에서 콘크리트 강도의 영향에 대하여 제시하고 있는 $\sqrt{f_c}$ 는 합리적인 것으로 판단된다.

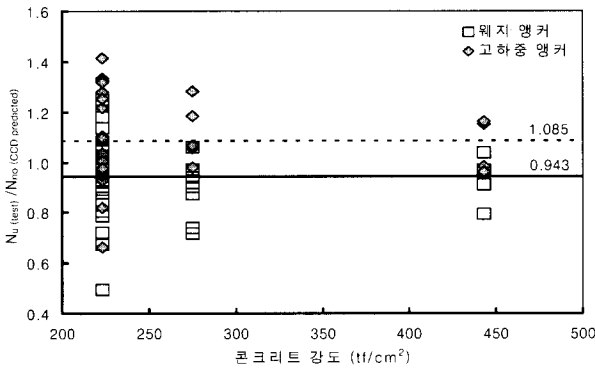


그림 11. 콘크리트 강도에 따른 CCD 콘 파괴강도 비교

표 9. 콘크리트 강도에 따른 앵커종류별 콘 파괴강도 비교

구 분	무차원평균	표준편차	변동계수
웨지 앵커	0.943	0.150	0.159
고하중 앵커	1.085	0.165	0.152

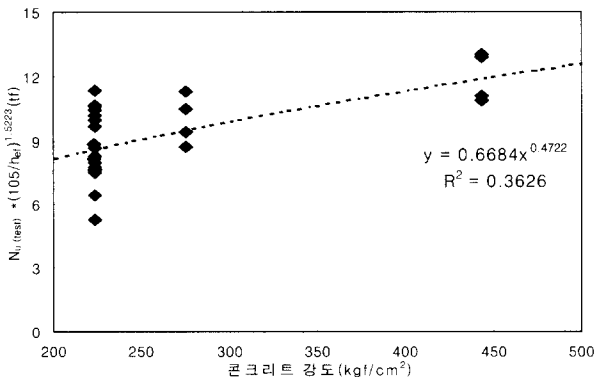


그림 12. 콘크리트 강도에 따른 고하중 앵커의 회귀분석

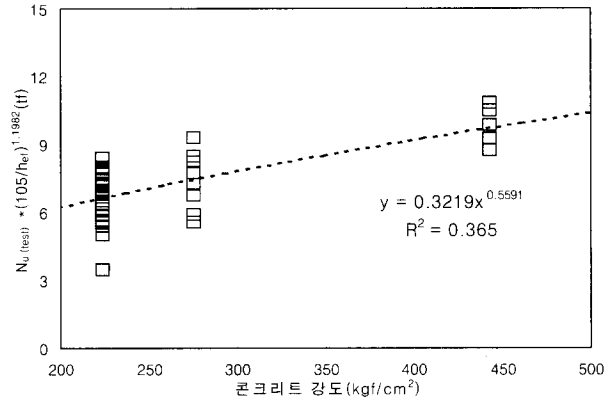


그림 13. 콘크리트 강도에 따른 웨지 앵커의 회귀분석

고하중 앵커의 콘크리트 콘 파괴강도 평가식은 그림 9의 삽입깊이에 대한 회귀분석과 그림 12의 콘크리트 강도에 대한 회귀분석을 정리하여 나타내면 식 (8a)와 같다. 또한 웨지 앵커의 콘크리트 콘 파괴강도 평가식은 그림 10과 그림 13을 정리하여 나타내면 식 (8b)와 같다.

$$N_{no} = 16.632 f_{ck}^{0.4722} h_{ef}^{1.5223} \quad (N) \quad (8a)$$

$$N_{no} = 44.343 f_{ck}^{0.5591} h_{ef}^{1.1982} \quad (N) \quad (8b)$$

그림 14는 CCD 방법 및 고하중 앵커의 평가식 식(8a)와 웨지 앵커에 대한 평가식 식 (8b)을 연단거리에 따라서 나타낸 것이다. 그림 14에서 실선은 CCD 방법의 예측값, 점선은 회귀분석에 의한 고하중 앵커의 평가값, 이점쇄선은 회귀분석에 의한 웨지 앵커의 평가값을 나타낸 것이다. 그림 14에서 CCD 방법은 후시공 앵커에 해당하는 웨지 앵커나 고하중 앵커 이외 다른 종류의 앵커에 대한 실험값을 종합적으로 회귀분석을 하여 제안된 것으로 앵커종류별 특성을 감안하지 못한 것으로 판단된다. 이로 미루어 추후 앵커종류별로 많은 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

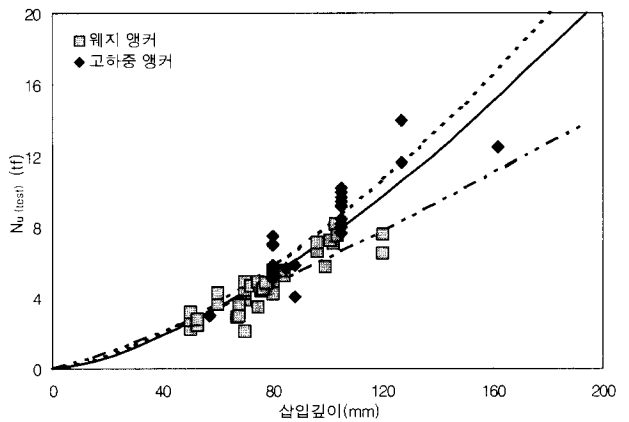


그림 14. 삽입깊이에 따른 CCD 설계식 및 평가식의 비교

4.2.3 CCD 방법에 근거한 콘크리트 콘 파괴강도 평가

그림 15와 그림 16은 각각 고하중 앵커와 웨지 앵커의 실험값을 $N_{u(test)}/N_{no(CCD\ predicted)}$ 으로 무차원화하여 히스토그램 및 확률밀도곡선으로 나타낸 것이다. 비균열콘크리트에 매입된 고하중 앵커의 콘크리트 콘 파괴강도는 CCD 방법에 근거하고 식 (7)의 5% 파괴확률(90% 신뢰한계)을 적용하여 식(9a)와 같이 제시한다. 동일한 방법으로 웨지 앵커의 콘크리트 콘 파괴강도는 식 (9b)와 같이 제시한다.(ACI 214, 2002 : ACI 355, 2000)

$$N_b = 11.50\sqrt{f_{ck}}h_{ef}^{1.5} \quad (N) \quad (9a)$$

$$N_b = 9.94\sqrt{f_{ck}}h_{ef}^{1.5} \quad (N) \quad (9b)$$

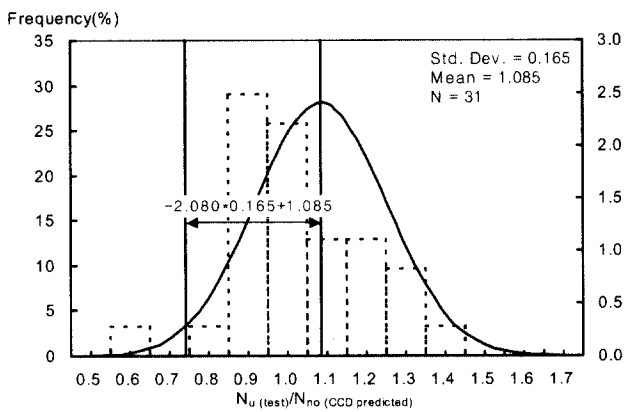


그림 15. 고하중 앵커의 5% 파괴확률

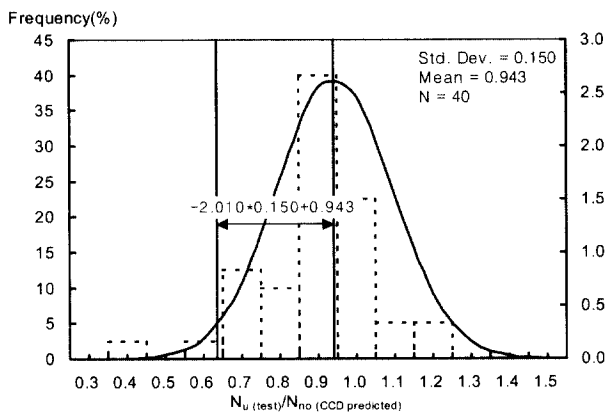


그림 16. 웨지 앵커의 5% 파괴확률

Fuchs(1995)는 균열콘크리트의 콘크리트 콘 파괴강도를 비균열 콘크리트의 콘크리트 콘 파괴강도의 70%로 제안하였다. Gross(2001)는 앵커 종류별로 하중 타입 및 콘크리트 조건에 따라 비균열콘크리트의 콘크리트 콘 파괴강도에 대한 비를 제안하였다. Gross의 제안값은 표 10과 같다.

본 연구에서는 균열콘크리트에 대한 콘크리트 콘 파괴강도는 안전측으로 Fuchs의 제안값을 동하중에 대해서는 Gross의 제안값을 따라 식(10)의 계수 k 을 표 11과 같이 제시한다.

$$N_b = k\sqrt{f_{ck}}h_{ef}^{1.5} \quad (N) \quad (10)$$

표 10. Gross의 제안값

앵커 종류	Static cracked / static uncracked	Dynamic uncracked / static uncracked	Dynamic cracked / static uncracked
웨지 앵커, 19.1mm	0.81	1.03	0.76
고하중 앵커, 10mm	0.80	1.03	0.79
고하중 앵커, 20mm	0.80	1.23	0.89

표 11. 하중타입 및 콘크리트 조건에 따른 계수 k

앵커 종류	Static cracked	Dynamic uncracked	Dynamic cracked
웨지 앵커	6.96	10.24	7.55
고하중 앵커	8.05	11.84	9.08

본 연구 결과와 ACI 318-02 설계식 및 EOTA 설계식을 비교하기 위하여 단위를 SI 단위로 통일하고자 한다. EOTA 설계식은 콘크리트강도가 입방체형 공시체 강도로 표현되어 있다. 설계식을 원주형 공시체 강도로 변환하기 위하여 $f_{cc}' = 1.18f_c'$ 을 이용하여 변환하였다.(Fuchs, 1995) 그 결과 EOTA의 콘크리트 콘 파괴강도 설계식은 식(11)과 같다

$$N_b = 7.82\sqrt{f_c'}h_{ef}^{1.5} \quad (N) \quad (11)$$

ACI 318-02 설계식은 US 단위로 표현되어 있으며, 이를 SI단위로 변환하기 위하여, 1 in.=25.4mm, 1 psi=0.006895N/mm², 1 lb=4.448N을 이용하여 변환하였다.(Fuchs, 1995) 그 결과 ACI 318-02의 콘크리트 콘 파괴강도 설계식은 식(12)와 같다.

$$N_b = 7.11\sqrt{f_c'}h_{ef}^{1.5} \quad (N) \quad (12)$$

표 12는 표 11의 Static cracked의 계수 k 와 식(11) 및 식(12)의 계수 k 비교하여 나타낸 것이다. 표 11에서 고하중 앵커는 EOTA 및 ACI 318-02 설계식의 k 보다 크게 나타났으나, 웨지 앵커의 k 는 2.1~11%정도 떨어짐을 알 수 있었다.

표 12. 균열콘크리트의 콘크리트 콘 파괴강도식의 계수 k 비교

구분	제안값/ ACI 318-02	제안값/ EOTA
웨이 앵커	0.979	0.890
고하중 앵커	1.132	1.029

4.2.4 파괴모드와 k값

표 13은 본 실험에서 앵커 직경별로 기본형 실험체에 대하여 유효계수 k값을 식(6)으로 산정한 결과이다.

표 13에서 콘크리트 콘 파괴가 발생한 실험체의 경우, ACI 355.2-00에서 제시하는 유효계수 k값의 허용범위 10~13을 만족함을 알 수 있었다. ACI 355.2-00에서 10이하일 경우의 파괴모드는 콘 파괴가 아닌 슬립파괴를 의미하는 것으로 ST20-AC1H1 실험체의 경우, 슬립파괴가 발생하였는데, 유효계수 k값이 7.11로 최소값 10보다 작게 나타났다. 따라서 ACI 355.2-00에 만족함을 알 수 있었다. 앞으로 국내산 앵커의 인발내력 평가 시 앵커볼트의 유효계수 k값의 산정으로 앵커볼트 기준의 적용여부를 검토할 수 있을 것으로 판단된다.

표 13. 파괴모드와 k값의 관계

실험체명	CCD (tf)	실험값 (tf)	파괴모드	k값
HT16-CIHI	7.96	9.11	콘 파괴	10.30
HT12-CIHI	5.29	6.55	콘 파괴	10.65
ST20-CIHI	8.53	5.83	슬립파괴	7.11
ST16-CIHI	5.29	4.95	콘 파괴	10.15
ST12-CIHI	4.33	4.39	콘 파괴	10.10
ST10-CIHI	2.61	2.81	콘 파괴	10.35

4.3 앵커간격에 따른 콘 파괴강도

CCD 방법의 앵커간격에 따른 계수 A_N/A_{N_0} 을 평가하기 위하여, 그림 17은 앵커간격(s_1/h_{ef})에 따른 실험값($N_{u(test)}$)을 식(1)의 단일앵커의 공칭강도($N_{no(CCD predicted)}$)로 나누어 무차원화하여 나타낸 것이다. 표 14는 앵커간격별(s_1/h_{ef})로 $N_{u(test)}/N_{n(CCD predicted)}$ 으로 무차원화 한 값을 통계 처리한 것이다(식 (2) 참조).

그림 17에서 고하중 앵커와 웨지 앵커는 s_1/h_{ef} 비의 변화에 따라 $N_{u(test)}/N_{no(CCD predicted)}$ 비가 일정하게 증가하였으며, 표 14에서 계수 A_N/A_{N_0} 적용한 CCD 방법의 예측값은 구간 별로 실험값과 거의 일치하였다. 이로 미루어 CCD 방법에서 제시하고 있는 콘 각도 35°에 따른 앵커간격 $3h_{ef}$ 는 합리적

임을 알 수 있었다.

그림 18과 그림 19는 각각 앵커 간격에 따른 고하중 앵커와 웨지 앵커의 안전성을 평가하기 위하여 본 연구에서 제시한 식(9)의 $N_{b(predicted)}$ 에 앵커간격에 따른 계수 A_N/A_{N_0} 을 곱한 값 $N_{cb(predicted)}$ 을 $N_{u(test)}/N_{cb(predicted)}$ 비로 나타낸 히스토그램 및 확률밀도곡선이다. 그림 18에서 5% 파괴확률(90% 신뢰한계)을 적용한 고하중 앵커의 $N_{u(test)}/N_{cb(predicted)}$ 비는 1.154로 평가되었으며, 그림 19에서 5% 파괴확률(90% 신뢰한계)을 적용한 웨지 앵커의 $N_{u(test)}/N_{cb(predicted)}$ 비는 0.947로 평가되었다.

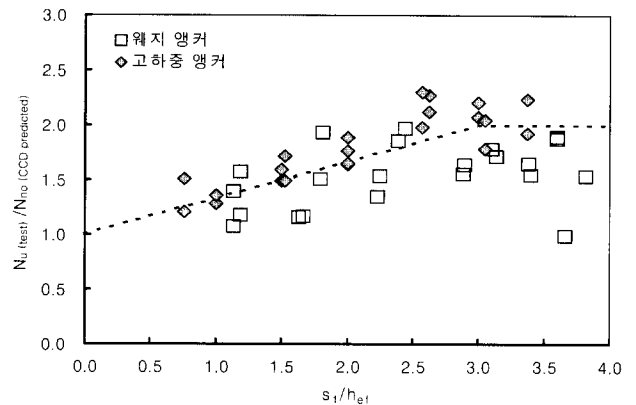


그림 17. 앵커간격에 따른 CCD 콘 파괴강도 비교

표 14. CCD 방법에 의한 앵커간격별 콘 파괴강도 비교

구간	무차원평균	표준편차	변동계수
$s_1/h_{ef} > 1.5$	0.989	0.137	0.139
$1.5 \leq s_1/h_{ef} < 2.0$	0.979	0.162	0.166
$2.0 \leq s_1/h_{ef} < 2.5$	0.992	0.118	0.119
$2.5 \leq s_1/h_{ef} < 3.0$	1.034	0.152	0.147
$3.0 \leq s_1/h_{ef}$	0.858	0.164	0.191

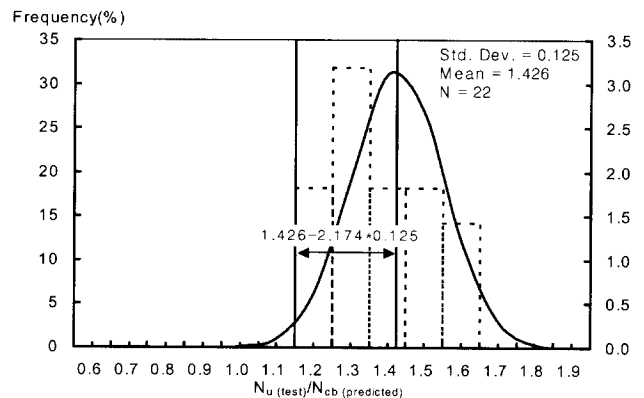


그림 18. 고하중 앵커의 앵커간격에 따른 5% 파괴확률

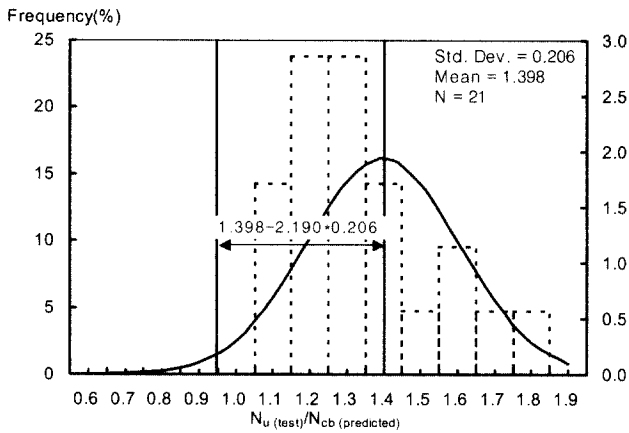


그림 19. 웨지 앵커의 앵커간격에 따른 5% 파괴확률

4.4 연단거리에 따른 콘파괴강도

연단거리에 따른 계수 α_2 을 평가하기 위하여, 그림 20은 연단거리(c_1/h_{ef})에 따른 실험값($N_{u(test)}$)을 식(1)의 단일앵커의 공칭강도($N_{no(CCD predicted)}$)로 나누어 무차원화하여 나타낸 것이다. 표 15는 연단거리별로 c_1/h_{ef} 비에 따라 $N_{u(test)}/N_{n(CCD predicted)}$ 으로 무차원화 한 값을 통계 처리한 것이다(식 (2) 참조).

그림 20에서 고하중 앵커와 웨지 앵커는 c_1/h_{ef} 비가 1.5이하에서 c_1/h_{ef} 비가 증가함에 따라 $N_{u(test)}/N_{no(CCD predicted)}$ 비가 미소하게 상승하는 것으로 나타났다. 표 15에서 계수 α_2 적용한 CCD 방법의 예측값은 c_1/h_{ef} 비가 감소함에 따라 $N_{u(test)}/N_{n(CCD predicted)}$ 비가 크게 나타났다. 이로 미루어 CCD 방법에서 연단효과를 고려하여 제시하고 있는 α_2 는 연단거리가 감소함에 따라 콘크리트 콘 파괴강도를 약간 과소평가한다는 것을 알 수 있었다. 앞으로 이에 관한 연구가 더 필요하다.

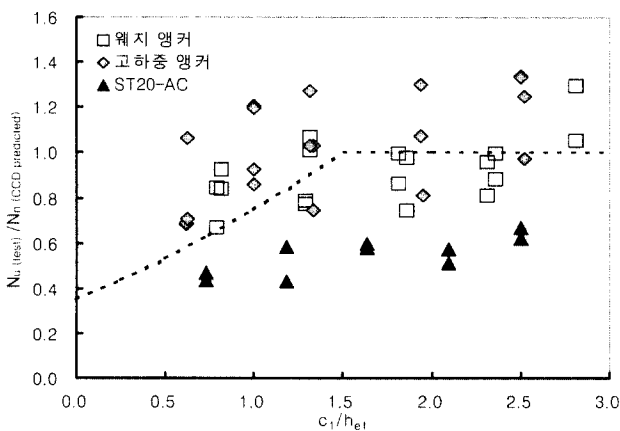


그림 20. 연단거리에 따른 CCD 콘 파괴강도 비교

표 15. CCD 방법에 의한 연단거리별 콘 파괴강도 비교

구간	무차원평균	표준편차	변동계수
$c_1/h_{ef} > 1.0$	1.297	0.235	0.182
$1.0 \leq c_1/h_{ef} < 1.5$	1.179	0.258	0.219
$1.5 \leq c_1/h_{ef} < 2.0$	0.993	0.189	0.190
$2.0 \leq c_1/h_{ef}$	1.064	0.215	0.193

그림 21과 그림 22는 각각 연단거리에 따른 고하중 앵커와 웨지 앵커의 안전성을 평가하기 위하여 본 연구에서 제시한 식(9)의 $N_{b(predicted)}$ 에 연단거리에 따른 계수 $\psi_2 A_N/A_{No}$ 을 곱하여 $N_{cb(predicted)}$ 로 나타낸 히스토그램 및 확률밀도곡선이다. 그림 21에서 5% 파괴확률(90% 신뢰한계)을 적용한 고하중 앵커의 $N_{u(test)}/N_{cb(predicted)}$ 비는 0.912로 평가되었으며, 그림 22에서 5% 파괴확률(90% 신뢰한계)을 적용한 웨지 앵커의 $N_{u(test)}/N_{cb(predicted)}$ 비는 0.957로 평가되었다.

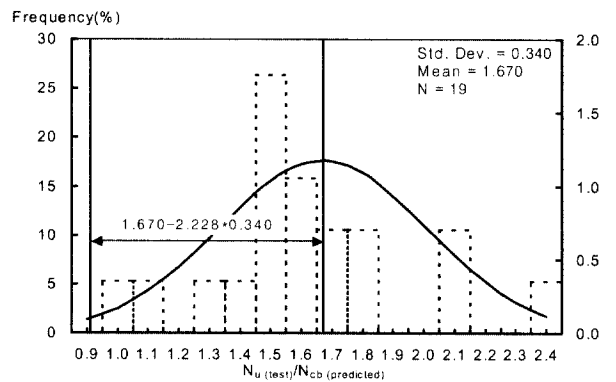


그림 21. 고하중 앵커의 연단거리에 따른 5% 파괴확률

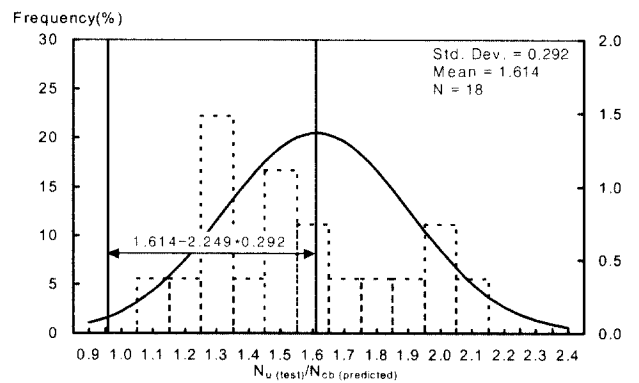


그림 22. 웨지 앵커의 연단거리에 따른 5% 파괴확률

4.5 콘파괴 각도

CCD 설계방법에서는 파괴모드가 콘 파괴면 경우, 콘파괴면을 정사각형으로, 콘 각도를 35°로 가정하고 있다.

표 5와 표 6에서 콘 파괴가 발생한 실험체의 평균 파괴각도는 24.29°, 표준편차는 5.965°, 변동계수는 0.246으로 나타났다. 실험값과 CCD 방법에서 제안하고 있는 파괴각도와 상당한 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. 그러나 표 14의 앵커 간격에 따른 무차원평균이 0.979~1.034로 실험값과 예측값이 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이로 미루어 CCD 설계 방법에서 제안하고 있는 콘 각도는 실험결과와는 상당한 차이가 있으나, 설계의 편의성을 고려한다면 합리적인 가정으로 판단된다.

5. 결 론

국내산 익스팬션 앵커인 고하중 앵커와 웨지 앵커를 대상으로 삽입깊이, 콘크리트 강도, 앵커간격 및 연단거리를 변수로 한 인발실험 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 비균열 콘크리트의 콘크리트 콘 파괴강도는 CCD 방법에 근거하여 5% 파괴확률을 적용한 결과 다음식과 같이 제시한다.
 고하중 앵커 : $N_b = 11.50\sqrt{f_{ck}h_{ef}^{1.5}}$ (N)
 웨지 앵커 : $N_b = 9.94\sqrt{f_{ck}h_{ef}^{1.5}}$ (N)
- (2) CCD 방법에서 앵커간격을 고려하여 제시하고 있는 콘 각도 35°에 따른 앵커간격 $3h_{ef}$ 는 합리적임을 알 수 있었다.
- (3) CCD 방법에서 연단효과를 고려하여 제시하고 있는 a_2 는 연단거리에 감소함에 따라 콘크리트 콘 파괴강도를 약간 과소평가하는 경향이 있는 것을 알 수 있었다.

참고 문헌

ACI Committee 214 (2002), Evaluation of Strength Test Results of Concrete

ACI Committee 318 (2002), Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary. American Concrete Institute. pp. 399~418.

ACI Committee 355 (2000), "Evaluating the Performance of Post-Installed Mechanical Anchors in Concrete(ACI 355.2-00)", American Concrete Institute.

ASTM E488-96 (1996), "Standard Test Methods for Strength of Anchors in Concrete and Masonry Elements", 1996.

EOTA, Annex C (2001), Design Methods for Anchorages, pp.16~22.

M. Rodriguez, D. Lotze, H. Gross (2001), "Dynamic Behavior of Tensile Anchors to Concrete", *ACI Structural Journal*. vol.98, pp. 511~524.

Precast/Prestressed Concrete Institute (1992), PCI design handbook-Precast and Prestressed Concrete, 4rd Edition, Prestressed Concrete Institute, Chicago.

Werner Fuchs, Rolf Eligehausen, and John E. Breen (1995), Concrete Capacity Design(CCD) Approach for Fastening to Concrete, *ACI Structural Journal*. vol.92, No1, pp. 73~94.

(접수일자 : 2003. 9. 17 / 심사일 2003. 9. 24 / 심사완료일 2003. 11. 25)