

고강도 콘크리트에 대한 간이 인발시험법 적용

고훈범^{1*}, 전두진², 이민재³

The Application of a Simplified Pullout Test for High-Strength Concrete

Hune-Bum Ko^{1*}, Doo-Jin Jeon², Min-Jae Lee³

Abstract: In the seventies, a number of researchers carried out experiments on pullout tests with prototype equipment, and the pullout test was certified as a reliable nondestructive testing(NDT) method for determining the strength of concrete. To estimate the strength of high-strength concrete, we propose a simplified pullout test that uses as a break-off bolt a standard 10mm bolt with a groove on the shaft, an insert nut, and a pullout instrument that includes a hydraulic oil pump without a load cell. To verify the advantages of the simplified pullout test(low cost, simplicity, and convenience), four wall specimens were tested with two levels of concrete strength, 30 MPa and 50 MPa, using a simplified pullout tester with a load cell. The pullout load and concrete compressive strength were measured every day until day 7, day 14, day 21 and day 28. It was found that the pullout load was very similar to the compressive strength. Therefore, we have verified that a simplified pullout test can be used to evaluate the in-place strength of high-strength concrete in structures. The prediction equation of the groove diameter of the break-off bolt(y) with the concrete strength(x) was derived as $y=0.05x+3.79$, with a coefficient of determination of 0.88 found through regression analysis.

Keywords: Break-off bolt, Concrete compressive strength, Nondestructive test, Simplified pullout test, Pullout load

1. 서 론

인발시험법은 일반적으로 콘크리트 강도를 비파괴적으로 평가하고자 하는 시험법으로 미국이나 캐나다에서 보편적으로 사용되는 시험법이며, 유럽에서는 LoK test라는 형태로 상용화된 제품이 현장에서 사용되고 있다(ASTM, 2006; ACI Committee 228, 2004; Claus et al., 1992). 이러한 인발시험법은 외국에서 프리스트레스트 공법의 적용이나 거푸집 탈형으로 인한 초기 하중에 충분히 대응할 수 있는 콘크리트 강도 확보 여부, 양생의 종료나 완성된 구조체에서 철근에 대한 한계 피복 층에 대한 품질 확인에도 사용되고 있다(Komatu et al., 1986; Latte Bovio et al., 2014). 최근 고강도 콘크리트를 사용한 고층 콘크리트 빌딩이 국내뿐만 아니라 전 세계적으로 건설되고 있는데, 콘크리트 강도가 100MPa인 건축물도 가능하게 되었으며 이러한 건축물에 인발시험을 적용한 사례도 보고되어 있다(Kim et al., 2007).

외국에서는 인발법을 제안하고 규격화 하여 상용화 시켰으나 기초 연구가 대부분으로 1980년대 이후에는 연구결과가 거의 보고되어 있지 않다. 최근 현장적용 결과와 후매입 인발법에 대해 보고되고 있으나 관련 연구도 미흡하고 실험자료도 부족한 실정이며(Brencich, 2015), 특히 고강도 콘크리트와 관련된 인발법 연구결과는 전무한 실정이다. 국내에서도 다양한 분야에서 인발시험에 관한 연구가 이루어지고 있으나 거의 대부분이 앵커에 대한 인발연구로 콘크리트 강도를 평가하는 연구는 극히 제한적으로 이루어져 왔다(Ko et al., 2011). 국내에서 인발법에 대한 연구가 제한적인 몇가지 이유를 살펴보면 첫 번째가 인발시험법에 필요한 상용화된 기자재가 매우 고가라는 점이다. 두 번째는 인발시험법에 대한 국내 기준이 미비하다는 점이며, 세 번째는 인발법에 대한 연구나 소개가 거의 이루어지지 않아 현장에서 인발법에 대한 지식이 전무하다는 점이다.

이러한 인발법에 대한 여러 가지 불편한 점을 고려하여 Fig. 1과 같은 파단형 인발볼트를 사용한 간이 인발법을 제시하였다. 기존의 인발법이 Photo 1과 같은 고가의 장비를 통하여 콘크리트 강도(인발하중과 상관관계)를 정량적으로 측정하는데 반하여 간이 인발법은 목표강도 도달여부를 파단형 인발볼트의 파단 여부로 판정하는 방법이다(Ko et al., 2017; Lee et al., 2013; Petersen, 1997). 보통 콘크리트 강도용 간이 인발법

¹정회원, 인하공업전문대학 건축과 교수, 교신저자

²정회원, 인하대학교 건축공학과 박사과정

³학생회원, 인하대학교 건축공학과 석사과정

*Corresponding author: hbko@inhac.ac.kr

Department of Architecture, Inha Technical College, Incheon, 22212, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2017년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 11월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

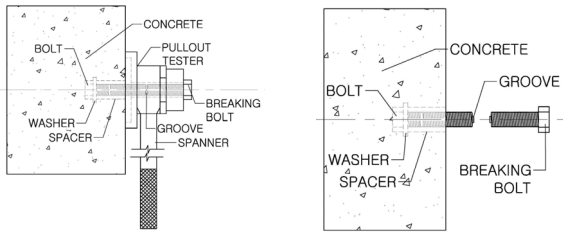


Fig. 1 Simplified pullout test for normal strength concrete

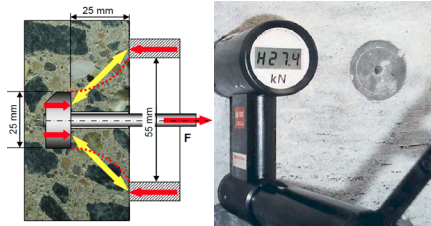


Photo 1 Lok test



Photo 2 Break-off bolt and Simplified pullout test for high strength concrete

은 Fig. 1과 같이 수동으로 스패너 회전력을 통하여 파단형 볼트의 파단여부를 확인할 수 있으나, 고강도 콘크리트인 경우 수동으로는 힘이 많이 필요하여 유압으로 간단히 인발하중을 가할 수 있도록 제안하였다(Photo 2). 물론 보통강도 콘크리트에도 사용가능하지만 유압장치의 필요로 인하여 보통 콘크리트 강도용 인발장치보다 고가의 장치가 된다.

본 연구에서는 이렇게 개발된 고강도 콘크리트용 간이인발장치를 적용한 모의벽체 시험을 통하여 고강도 콘크리트 강도와 인발하중과의 관계를 정립하고자 하였으며, 인발법이 우수한 비파괴 시험법이라는 것을 검증하고, 파단형 인발볼트를 사용한 간이 인발법이 고강도 콘크리트 강도를 현장에서 쉽게 확인할 수 있는 간편하고 경제적이며 정밀도가 높은 시험법이라는 것을 증명하고자 하였다.

2. 실험개요

2.1 파단형 인발볼트

간이 인발시험에 사용되는 파단형 인발볼트는 시중에서 구

Table 1 Tension test results of break-off bolt

Diameter (mm)	First		Second		Third		Ave. kN
	kN	%	kN	%	kN	%	
2	3.8	100	3.8	100	3.8	100	3.8
2.5	6.0	100	6.0	100	6.0	100	6.0
3	8.7	98	8.9	101	8.9	101	8.83
3.25	10.3	99	10.3	99	10.5	101	10.4
3.5	12.1	101	11.6	97	12.1	101	11.9
3.75	13.8	100	13.7	100	13.8	100	13.8
4	16.0	101	15.7	99	15.9	100	15.9
4.25	17.8	98	18.3	101	18.3	101	18.1
4.5	20.5	100	20.7	101	20.3	99	20.5
4.75	23.2	99	23.7	101	23.2	99	23.4
5	26.2	100	26.4	101	26.2	100	26.3
5.25	28.8	99	29.4	101	29.1	100	29.1
5.5	33.6	102	32.6	99	32.8	99	33.0
5.75	34.9	99	35.6	101	35.3	100	35.3
6	39.0	100	39.0	100	39.5	101	39.2
6.25	44.7	102	43.3	98	44.1	100	44.0
6.5	49.5	100	49.7	100	49.2	99	49.5
6.75	53.5	100	52.7	99	54.0	101	53.4
7	58.1	99	59.2	101	58.9	100	58.7
7.25	63.4	101	62.4	100	61.8	99	62.5
7.5	66.4	101	65.1	99	66.2	100	65.9
7.75	67.2	100	67.2	100	-	-	67.2
8	68.8	100	-	-	-	-	68.8

할 수 있는 볼트로서 직경 10 mm인 고력볼트를 선택하였다. 보통강도 콘크리트(~30 MPa)인 경우 인발시험시 10 mm 일반볼트로 인발하중이 30kN까지 실험이 가능하지만 고강도 콘크리트(~60 MPa)인 경우 일반적으로 인발하중이 30 kN을 초과하므로 본 실험에서는 고력볼트만을 사용하여 인발시험을 실시하였다. 파단형 인발볼트는 23가지의 종류의 직경에 따라 홈을 파서 제작하였으며 각각의 직경에 대하여 최대 30 본을 준비하였다. 인발시험 전에 각각의 직경을 가진 파단형 인발볼트는 3본의 인장시험을 실시하였으며 Table 1에 인장시험결과를 나타내었다. 직경 7.75와 8.0에서 실험값이 없는 이유는 파단이 제작된 홈에서 발생된다고 예상하였지만 홈의 크기가 볼트 나사선의 크기와 비슷하여 볼트 나사선에서 파단되어 실험값으로 사용하지 않았기 때문이다.

파단형 인발볼트는 원하는 직경으로 홈을 제작하는 과정에서 제작 오차가 존재할 수 있으나 인장시험 결과 각각의 볼트의 인장하중값을 3본의 평균값과 비교해 보면 최소 97%에서 최대 102%으로 거의 대부분이 ±1%의 범위에 인장하중값이

존재한다. 이를 통하여 볼트 직경의 정밀도를 확인할 수 있으며 콘크리트 강도를 평가할 수 있는 지표로 충분하다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 각각의 직경을 갖는 파단형 인발볼트는 모의벽체 시험에서 콘크리트 강도를 추정하는 데 사용되었다.

2.2 모의벽체시험 개요

인발시험을 위해서 Fig. 2와 같은 모의 시험벽체를 제작하였다. 시험벽체는 1200×600×120 mm 크기로 콘크리트 강도에 따라 각각 2개의 총 4개의 시험체를 Photo 3과 같이 제작하였다. 간이 인발시험에 사용되는 파단형 인발볼트 용 인발너트는 표준인발시험(ASTM C 900-06) 규격에 맞도록 제작하여 콘크리트 타설 전에 Photo 4와 같이 거푸집에 설치하였다.

본 실험에 사용된 콘크리트는 고강도로서 40 MPa와 60 MPa급 배합을 사용하였으며 고강도 콘크리트인 관계로 일정한 품질을 확보하기 위하여 레미콘을 주문하여 사용하였다. 모의시험벽체는 붕 진동기를 사용하여 다짐한 후 충분한 수분공급과 함께 양생포를 사용하여 보양하고 콘크리트 타설 24시간 후에 탈형하여 실내에서 양생시켰다.

재령일에 따른 콘크리트 강도와 인발하중을 비교하기 위하여 각각의 강도조건에 따라 3개씩 총 60개의 공시체를 KS F 2403을 준수하여 제작하였다. 공시체 크기는 $\varnothing 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ 로 시험벽체와 동일한 시점에서 탈형하고 동일한 환경조건에서 실내 양생을 실시하였으며 압축강도시험 전에 연마하였다. 공시체에 대한 압축강도 시험과 인발시험은 콘크리트 타설 후 1일부터 1주일 동안은 매일, 그 후 1주일 간격으로 재령 14일, 21일, 28일에 실시하여 결과적으로 총 10번의 시험이 이루어졌다. 인발시험은 모의벽체를 대상으로 실시하였는데 간이인발시험인 경우 Photo 2와 같이 유압잭으로만 구성된 장치로 시험이 가능하나 인발하중을 구하기 위하여 Photo 5와 같이 로드셀과 유압잭으로 구성된 인발시험장치를 사용

하여 실시하였다. 첫 번째 벽체를 대상으로는 흠이 없는 고풍력 볼트를 사용하여 전후면 각각 5곳에서 인발시험을 실시하고 인발하중을 측정하였다.

두 번째 벽체를 대상으로는 직경이 작은 파단형 인발볼트를 매입하여 3개의 볼트가 먼저 파단되면 직경이 큰 인발볼트를 사용하여 다시 인발시험을 실시한다. 그리고 콘크리트가 큰 모양으로 뿔혀 나오면 시험을 중단하고 그때의 볼트 직경을 해당 재령일의 최종 볼트 직경으로 결정한다. 그 다음 재령일에는 그 전 재령일의 최종 볼트 직경을 사용하여 인발시험을 실시하고 동일한 방법으로 반복하여 최종 볼트 직경을 결정하였다. 두 번째 벽체에서는 콘크리트 강도와 인발볼트 직경과의 관계를 구하는 것이 주 목적이어서 인발하중을 측정할 필요가 없었으나 첫 번째 벽체 시험체에서 구한 인발하중 값과 비교하기 위하여 두 번째 벽체 시험체에서도 인발하중을 구하였다.



Photo 3 Outside of wall specimens



Photo 4 Inside of wall specimen

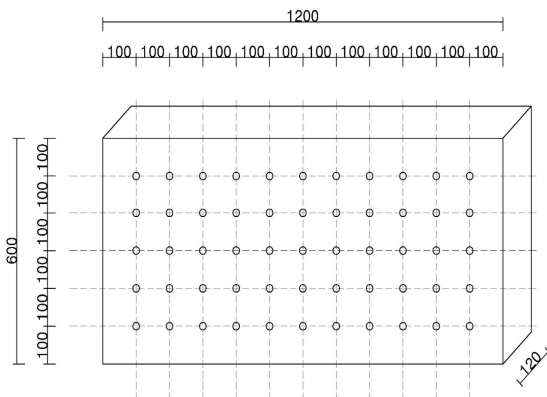


Fig. 2 Wall specimen



Photo 5 Simplified pullout test including load cell

3. 실험결과 및 고찰

3.1 콘크리트 압축강도 실험결과

Table 2는 각 재령에 따른 콘크리트 공시체에 대한 압축강도 결과값을 보여주고 있다. 목표강도는 고강도 콘크리트로 40 MPa와 60 MPa급 레미콘을 주문하였으나 겨울철 실온에서 연구목적상 모의벽체와 동일한 양생을 실시하게 되어 예상강도보다 적은 값을 보여주고 있다. 결과적으로 40 MPa급은 28일 강도가 32.2 MPa(이하 30 MPa급으로 표기), 60 MPa급은 48.9 MPa(이하 50 MPa급으로 표기)를 보여주었다. 하지만 콘크리트 강도와 인발하중, 그리고 인발볼트 직경과의 관계를 살펴보는 데는 목표강도가 조금 낮은 값을 보여주어도 연구결과를 도출하는데 거의 영향이 없다고 판단된다.

3.2 인발시험결과

Table 3은 인발시험결과를 보여주고 있는데 모의 벽체에 대하여 전후면 5개소, 각 재령에 10개소의 인발시험 결과값을 보여주고 있다. 인발하중값이 없는 부분은 인발너트가 불량으로 파단형 볼트가 삽입되지 않아서 시험이 불가능한 경우이다. 30 MPa급 콘크리트에서는 16.4 kN~32.9 kN의 인발하

중을 보여주었으며 50 MPa급 콘크리트에서는 21.6 kN~41.2 kN의 인발하중을 나타내었다. 파단볼트 직경에 대한 인장시험 결과값과 연관해서 비교해보면 30 MPa급 콘크리트에서는 직경 4 mm~5.5 mm볼트의 인장내력에 해당하며, 50 MPa급 콘크리트에서는 직경 4.5 mm~6.25 mm볼트의 인장내력에 상응한다.

3.3 인발하중과 콘크리트 압축강도 관계

Fig. 3과 Fig. 4는 인발하중과 콘크리트 압축강도 관계를 보여주고 있는데 28일의 인발하중과 콘크리트 압축강도를 100%로 가정하고 환산한 값을 나타내었다. 30 MPa급이나 50 MPa급 모두 재령 21일에서 콘크리트 강도가 약간 높게 나타나지만 인발하중이 초기 재령에서 조금 높은 값을 보이면서 전체적으로는 동일한 경향을 보여주고 있다.

Table 2 Compressive strength of cylinder

Concrete type	Age (day)	Value of compressive strength test(MPa)			
		1	2	3	Ave
30 MPa	1	8.5	9.8	10.1	9.5
	2	14.2	12.9	13.0	13.4
	3	19.8	21.4	21.6	20.9
	4	22.8	19.5	24.0	22.1
	5	24.9	24.4	23.9	24.4
	6	21.6	23.3	23.7	22.9
	7	20.3	23.8	26.7	23.6
	14	31.4	30.1	-	30.8
	21	37.3	34.0	28.9	33.4
	28	29.0	34.6	32.9	32.2
50 MPa	1	14.4	15.5	18.2	16.0
	2	26.5	25.5	26.0	26.0
	3	28.3	29.9	30.1	29.5
	4	32.7	35.4	32.2	33.4
	5	37.1	35.3	38.7	37.0
	6	36.3	37.0	34.5	35.9
	7	37.2	36.6	39.4	37.8
	14	42.2	46.1	-	44.2
	21	46.5	51.3	48.5	48.8
	28	48.3	50.9	47.6	48.9

Table 3 Pullout test results(30 MPa, 50 MPa)

Type	Pullout Load (kN)	Age(day)										
		1	2	3	4	5	6	7	14	21	28	
30 MPa Front	No.1	17.8	22.6	20.4	23.9	23.1	23.6	23.5	28.3	28.7	29.7	
	No.2	16.8	21.0	22.7	27.1	21.0	26.7	28.1	27.1	30.1	29.7	
	No.3	14.3	21.9	20.7	28.9	23.3	22.9	25.3	34.8	32.9	29.7	
	No.4	17.7	21.2	23.9	27.5	24.1	28.5	25.5	31.9	30.8	37.1	
	No.5	17.9	22.0	25.0	26.6	28.8	27.0	26.9	34.2	33.6	33.3	
	Ave	16.9	21.7	22.5	26.8	24.1	25.7	25.9	31.3	31.2	31.9	
	No.1	16.0	20.9	21.2	24.3	24.5	24.9	23.9	29.2	31.2	30.4	
	No.2	17.1	19.5	27.0	24.6	32.4	23.7	26.7	29.9	32.9	32.1	
	No.3	16.0	18.6	22.4	22.3	23.4	24.8	23.3	28.7	28.2	33.2	
	Ave	15.9	20.4	24.9	23.7	26.0	24.7	26.8	29.9	29.8	33.9	
Ave(30 MPa)		16.4	21.1	23.7	25.2	25.1	25.2	26.3	30.6	30.5	32.9	
50 MPa Front	No.1	20.0	27.3	27.3	29.6	29.1	35.4	35.5	34.4	36.2	40.0	
	No.2	20.7	33.1	27.6	30.7	28.9	36.4	32.6	38.8	41.4	40.3	
	No.3	18.6	32.0	27.5	36.1	31.0	33.5	31.3	36.3	36.1	41.5	
	No.4	20.4	28.0	34.1	34.8	34.3	35.1	34.5	39.6	40.3	41.0	
	No.5	23.5	30.0	35.0	29.3	28.2	38.6	33.5	39.9	42.4	42.9	
	Ave	20.6	30.1	30.3	32.1	30.3	35.8	33.5	37.8	39.3	41.1	
	No.1	19.8	25.3	28.6	27.0	30.4	31.7	32.1	37.1	36.7	34.5	
	No.2	20.3	26.5	26.0	32.0	34.5	34.3	41.7	45.7	38.4	43.5	
	No.3	25.5	30.0	32.2	33.8	37.7	31.0	34.2	37.4	41.7	43.3	
	Ave	22.5	27.8	29.7	30.9	34.1	33.4	34.9	39.2	39.5	41.2	
Ave(50 MPa)		21.6	29.0	30.0	31.5	32.2	34.6	34.2	38.5	39.4	41.2	
50 MPa Rear	No.1	19.8	25.3	28.6	27.0	30.4	31.7	32.1	37.1	36.7	34.5	
	No.2	20.3	26.5	26.0	32.0	34.5	34.3	41.7	45.7	38.4	43.5	
	No.3	25.5	30.0	32.2	33.8	37.7	31.0	34.2	37.4	41.7	43.3	
	No.4	21.6	29.0	31.5	30.7	32.8	36.8	32.5	39.9	40.1	44.1	
	No.5	25.2	28.4	30.3	-	34.9	33.1	34.0	36.1	40.7	40.7	
	Ave	22.5	27.8	29.7	30.9	34.1	33.4	34.9	39.2	39.5	41.2	
	Ave(50 MPa)		21.6	29.0	30.0	31.5	32.2	34.6	34.2	38.5	39.4	41.2

이러한 경향을 정량적으로 검증하기 위하여 Fig. 5와 같이 인발하중과 콘크리트 압축강도와와의 상관관계를 살펴보았다.

30 MPa급 콘크리트의 결정계수(R^2)는 0.95를 나타내고 있으며 50 MPa급인 경우는 0.97을 보여주고 있다. 30 MPa와 50 MPa급의 실험값 전체에 대해서는 0.974를 보여주고 있어 매우 높은 상관관계가 있다고 판단할 수 있으며 결과적으로 콘

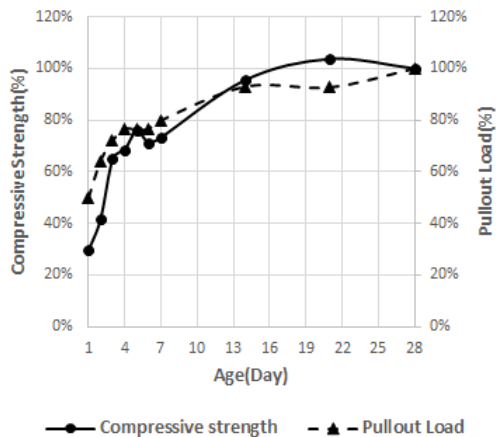


Fig. 3 Compressive strength versus pullout load(30 MPa)

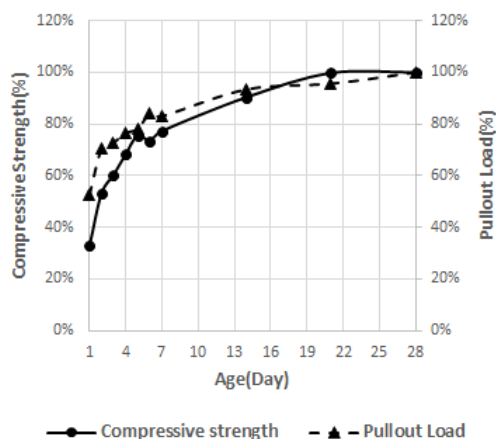


Fig. 4 Compressive strength versus pullout load(50 MPa)

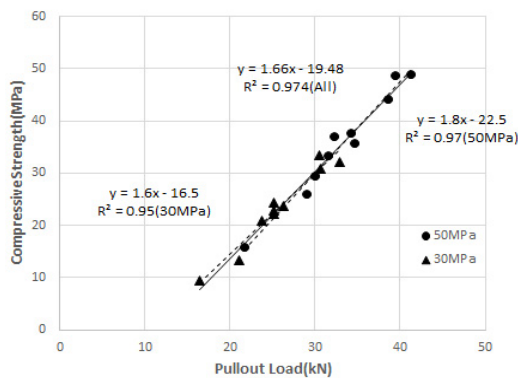


Fig. 5 Correlation between pullout load and compressive strength

크리트 강도를 인발하중으로 정확히 평가할 수 있다고 확신할 수 있다.

3.4 파단형 인발볼트를 사용한 간이 인발시험 결과

간이 인발시험 장치를 활용한 인발시험 결과를 Table 4에 보여주고 있다.

표에 나타난 값은 각 재령에서 시험한 파단형 인발볼트 직경과 그 직경에 해당하는 파단형 볼트의 파단 유무를 나타냈는데, B는 파단형 볼트가 파단된 경우이며 C는 볼트의 파단 없이 콘크리트가 콘 모양으로 뽑혀 나온 경우를 의미한다. 본

Table 4 Simplified pullout test results

Type	Age (day)	Dia-meter (mm)	Pullout Result(C or B)					Pullout Load(kN)							
			No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	Ave.		
30 MPa	1	2	B	B	B	-	-	3.6	3.8	3.6	-	-	-	-	
	1	2.5	B	B	B	-	-	5.9	5.8	5.8	-	-	-	-	
	1	3	B	-	-	-	-	8.4	-	-	-	-	-	-	
	1	3.25	B	-	-	-	-	9.8	-	-	-	-	-	-	
	1	3.5	B	-	-	-	-	11.7	-	-	-	-	-	-	
	1	3.75	B	-	-	-	-	13.5	-	-	-	-	-	-	
	1	4	B	-	-	-	-	15.5	-	-	-	-	-	-	
	1	4.25	C	B	B	C	C	16.2	17.1	17.8	17.1	14.9	16.1	-	
	1	4.25	B	B	B	-	-	17.4	17.9	17.2	-	-	-	-	
	1	4.5	C	B	B	C	B	19.4	19.7	19.5	19.9	19.4	-	-	
	1	4.75	C	C	C	-	-	19.7	20.8	20.7	-	-	20.4	-	
	1	3	4.75	C	C	B	C	-	22.5	20.9	22.6	21.5	-	21.6	
	1	4	5	C	B	C	C	-	23.8	25.5	23.4	22.9	-	23.4	
	1	4	4.75	C	B	B	B	-	19.7	22.5	22.7	22.5	-	-	
50 MPa	1	5	C	C	B	C	-	22	19.7	25.1	23.3	-	21.7		
	1	5	B	C	C	B	C	25.1	24.6	21.5	24.8	24.9	-	-	
	1	6	5.25	C	C	C	-	24.8	27	25.5	-	-	24.7	-	
	1	7	5.25	C	C	C	-	25.2	24.3	23.4	-	-	24.4	-	
	1	14	5.25	C	C	C	-	27.4	24.7	26.2	-	-	26.1	-	
	1	14	5.25	C	B	B	B	-	24.9	28	27.3	27.4	-	-	
	1	21	5.5	C	B	B	B	-	25.6	31.4	30.2	31.4	-	-	
	1	21	5.75	C	C	C	-	27.3	34	30.7	-	-	30.7	-	
	1	28	5.75	C	C	C	-	31.7	34.8	26.1	-	-	30.9	-	
	50 MPa	1	4.5	C	B	C	B	B	20.1	20.1	19.7	19.2	19.9	-	-
		1	4.75	C	B	B	B	-	21.0	22.3	22.1	22.3	-	-	-
		1	5	B	C	C	C	-	24.8	22.5	24.1	25.1	-	23.9	-
		1	5	B	B	C	B	-	25.5	25.2	23.6	25	-	-	-
		1	2	5.25	B	B	C	C	B	28.2	27.9	26.1	27.3	28.2	-
1		5.5	C	C	C	-	-	28.9	27.7	27.5	-	-	28.0	-	
1		3	5.5	C	B	B	C	B	29.3	31.4	30.7	31.4	3.13	-	-
1		3	5.75	C	C	C	-	-	28.5	28.4	31.5	-	-	29.5	-
1		4	5.75	C	B	C	C	-	30.4	35.1	28.7	31	-	29.9	-
1		5	5.75	C	C	C	-	-	28.7	34.5	32.9	-	-	32.0	-
1		6	5.75	C	C	C	-	-	29.4	32.9	31.9	-	-	31.4	-
1		7	5.75	C	C	C	-	-	26.9	33.7	31.3	-	-	30.6	-
1		14	5.75	B	B	B	-	-	35.1	34.1	34.1	-	-	-	-
1		14	6	C	C	B	C	-	38.3	32.9	38	36.1	-	32.6	-
1	21	6	B	B	C	C	B	38.1	37.3	32.1	33.4	37.9	-	-	
1	21	6.25	C	-	C	C	-	35.5	-	37.4	41.1	-	38.0	-	
1	28	6.25	C	C	C	-	-	35.9	36.5	37.2	-	-	36.5	-	

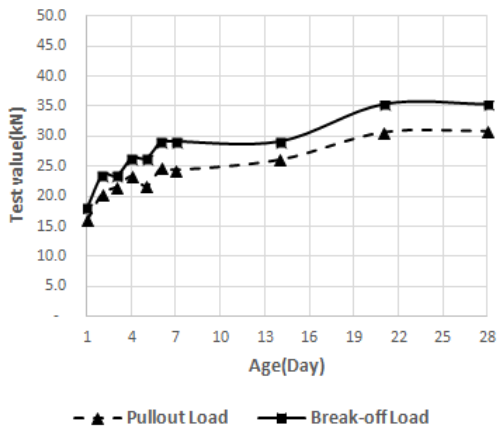


Fig. 6 Pullout load versus break-off load(30 MPa)

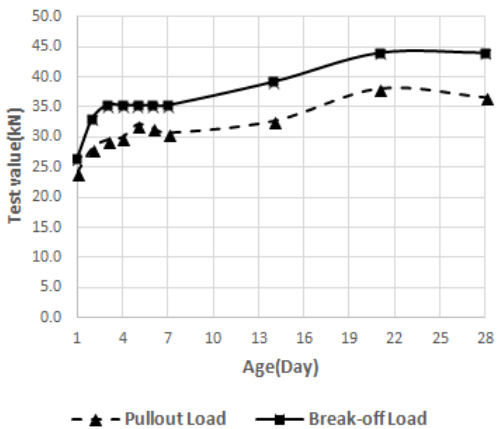


Fig. 7 Pullout load versus break-off load(50 MPa)

시험은 각 재령에 있어서 목표 콘크리트 강도 도달여부를 판정할 수 있도록 각 재령에 최소 3본 이상의 파단형 볼트가 사용된다. 시험 순서는 각 재령에서 일정직경을 가진 파단형 볼트 3본이 파단되면 그 다음 직경의 볼트를 시험하고 3본의 볼트에서 콘크리트 콘이 뽑혀 나오면 그 재령에서는 시험을 종료한다.

그 다음 재령에서는 이전 재령에서 시험이 완료된 직경의 볼트를 가지고 인발시험을 시작하고 3본의 볼트가 콘크리트 콘과 같이 뽑혀 나올 때까지 직경을 높여가면서 시험을 실시한다. 시험이 종료되면 그때의 직경을 그 재령의 콘크리트 강도에 대응하는 값으로 추정할 수 있다.

Fig. 6과 Fig. 7은 간이 인발시험 결과를 나타낸 것으로 인발하중은 각 재령에서 3본의 파단형 볼트가 콘크리트와 같이 뽑혀 나왔을 때 평균값이며, 인장하중은 그 때의 직경이 가지고 있는 인장하중값으로 Table 1에서 확인할 수 있다. 30 MPa급이나 50 MPa급에서도 각각의 직경에 대하여 파단형 볼트의 인장하중이 항상 인발하중보다는 큰 경향을 보여주고 있다.

결과적으로 각 재령에서 콘크리트의 뽑힘으로 결정된 직경

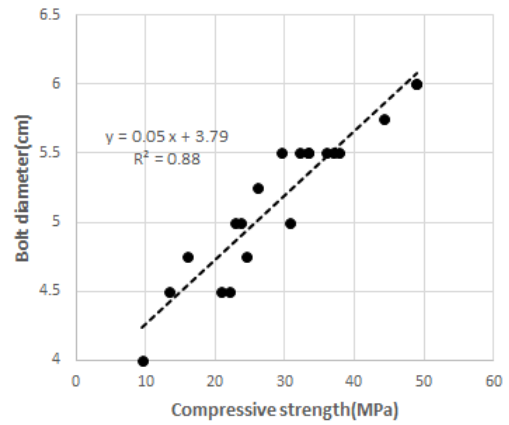


Fig. 8 Correlation of bolt diameter with compressive strength

보다 작은 직경에서 항상 볼트가 파단된다고 추정할 수 있으므로 목표 콘크리트 강도에 도달하였다고도 판정할 수 있다.

Fig. 8은 목표 콘크리트 강도에 도달하기 위해 필요한 파단형 인발볼트의 직경을 구해 보았는데, 즉 각 재령에서 콘크리트의 뽑힘에 해당하는 볼트의 직경보다 한 단계 아래의 직경을 선택하여 콘크리트 강도와 상관관계를 조사하였다. 결과적으로 각 재령에서 목표 콘크리트 강도에 근접한 직경의 파단형 인발볼트를 선택하고 간이인발시험을 통하여 파단유무를 확인하여 목표 콘크리트 강도 확보 여부를 확인할 수 있다. 수식으로 표현하면 Eq.(1)과 같다.

$$y = 0.05x + 3.79 \quad (1)$$

여기서, x 는 콘크리트 압축강도(MPa), y 는 파단형 볼트의 직경(mm)이다.

이 식을 이용하면 재령 28일의 설계기준강도가 30 MPa라고 가정하고 식에 적용해 보면 y 는 5.29값이 나오는데 5.29보다 큰 직경 5.5mm의 파단형 인발볼트를 선택하고 3본이 파단된다면 현장에서 설계기준 강도를 확보하였다고 판단 할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 고강도 콘크리트 강도를 비파괴적으로 평가하고자 인발법에 주목하고 인발법이 가지고 있는 장점을 살려 고안된 파단형 인발볼트를 사용한 간이인발법을 고강도 콘크리트 모의시험벽체에 적용하여 이러한 간이인발법이 현장에서 고강도 콘크리트 강도를 정확히 평가하는데 사용될 수 있는 유용한 시험법이라는 것이 검증되었다.

1) 모의벽체에 대한 인발시험결과를 살펴보면 30 MPa급 콘

크리트에서는 16.4 kN~32.9 kN의 인발하중을 보여주었고 50 MPa급 콘크리트에서는 21.6 kN~41.2 kN의 인발하중을 나타내었다.

- 2) 인발하중과 콘크리트 압축강도와와의 상관관계를 살펴보았는데 30 MPa급 콘크리트의 결정계수(R^2)는 0.95를 나타내고 있으며 50 MPa급인 경우는 0.97을 보여주고 있다. 30 MPa와 50 MPa급의 실험값 전체에 대해서는 0.974를 보여주고 있어 매우 높은 상관관계가 있다고 판단할 수 있으며 결과적으로 콘크리트 강도를 인발하중으로 정확히 평가할 수 있다고 확신할 수 있다.
- 3) Eq. (1)을 이용하면 각 재령에서 목표한 콘크리트 강도를 확인하기 위하여 필요한 직경의 파단형 인발볼트를 선택하고 강도를 확인할 수 있다.

$$y = 0.05x + 3.79 \quad (1)$$

여기서, x 는 콘크리트 압축강도(MPa), y 는 파단형 볼트의 직경(mm)이다.

감사의 글

이 연구는 2014년도 한국연구재단 연구비 지원에 의한 결과의 일부임. 과제번호: NRF-2014R1A1A1038215

References

ACI Committee 228. (2004), In-place methods to estimate concrete strength, American Concrete Institute, 6-9.
 ASTM. (2006), Standard Test Method for Pullout Strength of Hardened

Concrete (ASTM C 900-06), 10 ASTM International, West Conshohocken, PA.
 Brencich, A. (2015), A Post-installed Insert for Pull-out Tests on Concrete up to 70 MPa, *Construction and Building Materials*, 95, 788-801.
 Claus, G. P. and Ervin P. (1992), Pull-out testing by LOK-test and CAP-test, *Dansk Betoninstitut A/S*, 31-38.
 Kim, G., Lee, S., Kang, S., Kim, J., and Kim, K. (2007), Evaluation of In-situ Concrete Strength with Pull-out Testing at the Early Ages, *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, 1087-1090.
 Ko, H., Cha, E., and Oh, K. (2017), Suggestion for the Simplified Pullout test of Normal Concrete Strength, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, 33(4), 29-36.
 Ko, H., Lee, G., and Won, J. (2011), Development of Post- installable Pullout Bolts and a Loading Device for Evaluating Concrete Strength, *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 11(3), 229-237.
 Komatu, Y., Kondo, G., and Morita, S. (1986), Variability of in-place Concrete Strength Evaluated by Pullout Test, *Proceedings of Architectural Institute of Japan*, No.1068.
 Latte Bovio, F., Latte Bovio, G., Brencich, A., Cassini, G., Pera, D., and Riotto, G. (2014), A New Pull-out Technique for In-Place Estimation of Concrete Compressive Strength, *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-8.
 Lee, G., Ko, H., and Won, J. (2013), Effectiveness of a simplified Pullout Test using a Post-Installable Break-off Bolt, *Research in Nondestructive Evaluation*, Taylor & Francis, 24(1), 1-17.
 Petersen, C. G.(1997), LOK-Test and CAPO-Test: Twenty Years Experience, *Proceedings of Conference on Nondestructive Testing in Civil Engineering*, British Institute of Non-Destructive Testing, Liverpool, U.K., 77-96.

Received : 03/21/2017

Revised : 06/15/2017

Accepted : 06/28/2017

요 지 : 1970년대에 여러 연구자가 시제품 시험장비를 가지고 인발시험을 실시하였으며, 인발시험은 콘크리트 강도를 결정하는 신뢰할 만한 비파괴검사 방법(NDT)으로 입증되었다. 우리는 고강도 콘크리트 강도를 추정하기 위하여 직경 10 mm 볼트에 홈이 파인 파단형 인발 볼트와 인발너트, 그리고 로드셀이 필요 없는 오일 유압펌프를 포함한 간이 인발시험법을 제안하였다. 저비용, 간편성 및 편의성을 갖는 간이인발 시험의 이점을 검증하기 위하여, 30 MPa 및 50 MPa 급 두가지 유형의 콘크리트로 제작된 4개의 모의벽체를 대상으로 로드셀을 장착한 간이인발 시험을 사용하여 인발시험을 실시하였다. 인발하중과 콘크리트 압축강도는 재령 7일까지는 매일, 그리고 14일, 21일, 28일에 측정되었다. 시험결과 인발하중과 콘크리트 압축강도는 매우 밀접한 상관관계를 보여주었으며 따라서 인발하중이 현장에서 구조물의 고강도 콘크리트 강도를 평가할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 파단형 인발볼트 직경과 콘크리트 강도와와의 관계식으로 $y=0.05x+3.79$ (x =콘크리트 압축강도, y =파단형 인발볼트 직경)이 도출되었으며 결정계수는 0.88로 나타났다.

핵심용어 : 파단형 볼트, 콘크리트 압축강도, 비파괴시험, 간이인발법, 인발하중