

초고강도 콘크리트의 인발하중과 압축강도와의 관계

The Relation between Pullout Load and Compressive Strength of Ultra-High-Strength Concrete

고 훈 범^{1*}김 기 태²Ko, Hune-Beom^{1*} Kim, Ki-Tae²*Department of Architecture, Inha Technical College, Nam-Gu, Incheon, 22212, Korea¹**Department of Architectural Engineering, Inha University, Nam-Gu, Incheon, 22212, Korea²*

Abstract

The pullout test, a nondestructive testing(NDT), for pre-installed inserts is perhaps the most widely used technique to estimate the in-situ compressive strength of concrete. It measures the force needed to pullout a standardized metal insert embedded into concrete members. The pullout test was certified by the American Society for Testing and Materials(ASTM) and Canadian Standards Association(CSA) as a reliable method for determining the strength of concrete in concrete structures under construction. To easily estimate the strength of ultra-high-strength concrete, a simplified pullout tester, primarily composed of a standard 12mm bolt with a groove on the shaft as a break-off bolt, an insert nut, and a hydraulic oil pump without a load cell, was proposed. Four wall and two slab specimens were tested for two levels of concrete strength, 80MPa and 100MPa, using a simplified pullout tester with a load cell to verify the advantages of the pullout test and simplified pullout test. The compressive strength of concrete, pullout load, and the rupture of the break-off bolt were measured 11 times, day 1 to 7, 14, 21, 28, and 90. The correlation of the pullout load and the compressive strength of each specimen show a higher degree of reliability. Therefore, a simplified pullout test can be used to evaluate the in-place strength of ultra-high-strength concrete in structures. The prediction equation for the groove diameter of the break-off bolt(y) with the concrete strength(x) was proposed as $y=0.0184x+5.4$. The results described in this research confirm the simplified pullout's utility and potential for low cost, simplicity, and convenience.

Keywords : break-off bolt, nondestructive test, pullout load, simplified pullout test, ultra-high-strength concrete

1. 서 론

인발시험은 콘크리트 타설 전에 특별히 계획된 형태의 철재 봉을 설치하여 콘크리트가 굳은 다음 그 봉을 인발하여 그때의 하중을 측정하여 콘크리트 강도를 평가하는 방법으로 미국과 캐나다에서는 각각 ASTM C 900과 CSA A23.2에 규격화되어 시험법으로 사용되고 있다[1,2]. 그리고 유럽에서는

Lok test라는 시제품이 판매되고 있으며 일본에서도 관련 연구에 대한 보고가 있다[3,4]. 그러나 이러한 연구의 대부분이 90년대 초까지 이루어진 연구로 일반적으로 보통강도 콘크리트에 한정되고 있다. 그런데 최근 콘크리트를 사용한 고층 빌딩이 국내뿐만 아니라 전 세계적으로 건설되고 있으며, 국내에서는 가장 높은 건축물의 수직부재에서 압축강도 80MPa 인 콘크리트를 사용한 사례도 보고되어 있다[5,6]. 그리고 인발법에 대한 기존의 연구는 대부분 수직부재를 대상으로 하는 경우가 많고 인발법 적용에 여러 가지 어려움이 많은 수평부재에 대한 연구보고는 거의 없는 실정이다[7,8,9,10].

본 연구에서는 80MPa를 초과하는 초고강도 콘크리트에 대하여 인발법을 적용하고자 한다. 또한 기 개발된 간이인발 시험법도 동시에 적용하여 기존 인발법과의 차이도 검토해

Received : June 29, 2017

Revision received : July 25, 2017

Accepted : December 20, 2017

* Corresponding author : Ko, Hune-Bum

[Tel: 82-32-870-2257, E-mail: hbko@inhac.ac.kr]

©2018 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

보고자 한다. 모의시험벽체와 슬래브를 대상으로 기존 인발법을 통하여 초고강도 콘크리트 강도와 인발하중과의 관계를 정립하여 인발법이 정밀도가 높은 비파괴시험법이라는 것을 증명하고, 파단형 인발볼트를 사용한 간이 인발법도 동시에 적용하여 간이인발법이 현장에서 초고강도 콘크리트 강도를 간편하고 경제적으로 쉽게 평가할 수 있는 시험법이라는 것을 확인하고자 한다.

2. 실험개요

2.1 파단형 인발볼트

파단형 인발볼트는 간이 인발시험에 사용되는 볼트로, 기존실험에는 일반적으로 직경10mm인 볼트를 사용하였으나 본 실험에서는 초고강도 콘크리트(압축강도 80MPa이상)를 대상으로 시험해야 하므로, 시판중인 직경 12mm인 고력볼트를 선정하였다. 다양한 콘크리트 강도에 대응하기 위하여 파단형 인발볼트는 직경의 크기에 따라 홈을 파서 제작하였는데 총 17종류를 준비하였으며 각각의 직경에 대하여 최대 30분을 준비하였다. 파단형 인발볼트의 인장시험은 각각의 직경에 따라 3분을 실시하였으며, 인장시험결과는 Table 1 과 같다. Table 1의 직경 9mm인 경우 홈의 직경이 볼트 나사선의 직경과 차이가 거의 없어 볼트 나사선에서 파단되어 실험값으로 사용하지 않았다.

파단형 인발볼트는 계획된 직경에 따라 홈을 가공하는 과정에서 제작오차가 발생할 수 있으나 인장시험 3분의 평균값과 각 볼트의 인장하중값과 비교해 보면 최소 96%에서 최대 105%의 값을 나타내며 거의 대부분이 ±3%의 범위에 인장하중값이 존재하여 콘크리트 강도를 평가할 수 있는 지표로 볼트 직경의 정밀도는 충분히 높다고 할 수 있다.

2.2 인발시험 개요

인발시험을 위해서 1200×600×200mm크기인 Figure 1과 같은 모의시험벽체와 1200×600×100mm크기인 Figure 2와 같은 모의시험슬래브를 제작하였다. 시험벽체인 경우에는 콘크리트 강도에 따라 각각 2개씩 총 4개의 시험체를 Figure 3과 같이 제작하였으며 시험슬래브는 콘크리트 강도에 따라 각각 1개로 총 2개의 시험체를 Figure 4와 같이 제작하였다. Figure 5는 인발시험에 사용되는 인발볼트를 거푸집에 설치한 사진으로 규격에 맞게 미리 제작되어 콘크리트 타설전에 거푸집에 설치하였다.

Table 1. Tension test results of high-strength break-off bolt

Diameter (mm)	First		Second		Third		Ave. kN
	kN	%	kN	%	kN	%	
3	9.8	97	9.8	97	10.6	101	10.1
3.5	13.5	101	13	97	13.8	103	13.4
4	17.8	105	16.5	97	16.5	97	16.9
4.5	23.2	101	22.7	99	22.9	100	22.9
5	27.8	100	26.7	96	29.1	104	27.9
5.5	35	100	34.9	100	35.3	101	35.1
6	41.2	99	41.9	101	41.2	99	41.4
6.25	46	101	45.8	100	45.3	99	45.7
6.5	49.5	99	49.7	100	50.5	101	49.9
6.75	53.8	102	52.5	99	52.4	99	52.9
7	55.7	97	58.1	101	59.1	103	57.6
7.25	61.5	99	62.9	101	61.8	100	62.1
7.5	67.5	101	65.4	98	67.2	101	66.7
7.75	72.9	102	72.1	101	70.1	98	71.7
8	77.2	100	77.4	100	77.6	100	77.4
8.5	87.8	99	88.2	100	89	101	88.3
9	97.3	100	-	-	-	-	97.3

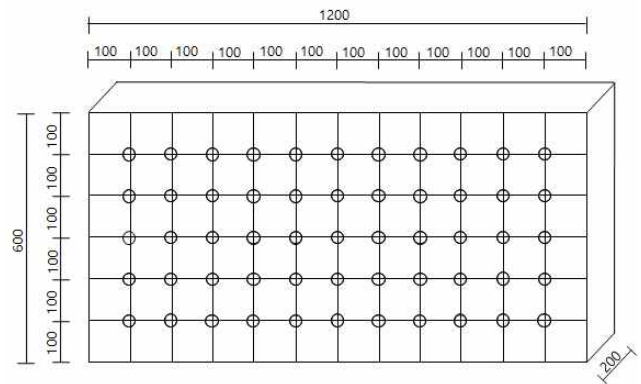


Figure 1. Wall specimen

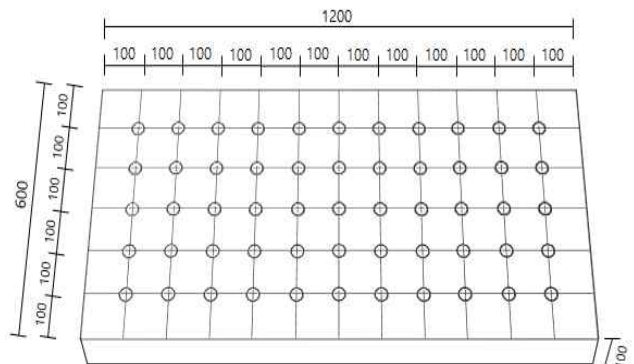


Figure 2. Slab specimen

시험벽체와 슬래브에는 Table 2와 같이 80MPa과 100 MPa급의 고강도 콘크리트의 배합을 사용하였으며 품질확보를 위하여 PC제작업체에 의뢰하여 현장에서 제작하였다.



Figure 3. Wall specimens



Figure 6. Pullout test for wall specimen



Figure 4. Slab specimens

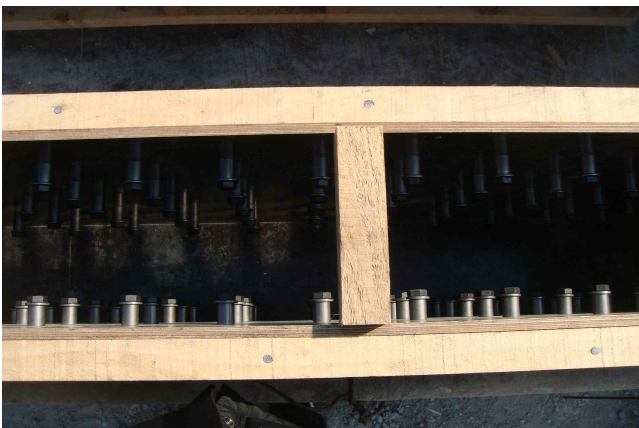


Figure 5. Inside of wall specimens

Table 2. Mixing proportions

Concrete strength (MPa)	Unit weight((kg/m ³)					W/C (%)	S/A (%)	Ad (%)
	W	C	S	G	Silica fume			
80	165	742	588	885	83	20	40	1.5
100	165	837	513	840	93	17.1	38	1.7

양생은 외기에서 시트보온으로 이루어 졌으며 콘크리트 타설 후 24시간이 경과한 시점에서 거푸집을 탈형하였다. 이후 실내 실험실로 운반하여 실온 양생을 실시하였는데 습도는 40~60%, 온도는 10~20℃이었으며 온습도조절은 불가능한 실내였다.

공시체 크기는 $\varnothing 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ 로 KS F2403을 준수하여 제작하였으며 콘크리트 압축강도시험은 콘크리트 타설 후 1일부터 1주일 동안은 매일, 그 후 재령 14일, 21일, 28일, 90일에 실시하여 결과적으로 총 11번의 시험이 이루어졌다. 공시체는 압축강도 시험 전에 연마하였으며 각각의 재령에서 최소 3개 이상이 시험에 사용되었다. 정확한 압축강도 값을 얻기 위해 평균값과 비교하여 10% 이상의 오차가 생겼을 경우에는 추가의 공시체를 대상으로 압축강도시험을 진행하였다.

인발시험은 로드셀과 유압잭으로 구성된 인발시험장치를 사용하여 시험벽체와 슬래브를 대상으로 Figure 6과 같이 실시하였다. 한쪽면만 인발너트가 설치된 시험벽체와 슬래브를 대상으로 정량적인 인발하중값을 측정하기 위하여 흠이 없는 고력볼트를 사용하여 각각의 재령에 대하여 5곳에 대하여 인발시험을 실시하였다. 양면으로 인발너트가 설치되어있는 벽체를 대상으로는 간이인발시험을 위한 최종 볼트 직경을 결정하기 위하여 흠이 제작된 파단형 인발볼트를 사용하여 인발시험을 실시하였다. 시험방법은 각 재령에서 계획된 직경의 파단형 인발볼트를 매입하여 3개의 볼트가 먼저 파단되면 직경이 큰 인발볼트를 사용하여 다시 인발시험을 실시하고 만약에 볼트의 파단 없이 콘크리트가 콘 모양으로 뿔쳐 나오면 시험을 중단하고 그 때의 볼트 직경을 해당 재령일의 콘크리트 강도에 대응하는 최종 볼트 직경으로 결

Table 3. Compressive strength of cylinder

Concrete type	Age (day)	Value of compressive strength test(MPa)			
		1	2	3	Ave
80MPa	1	24.37	25.43	29.06	26.28
	2	47.56	46.40	48.00	47.32
	3	56.89	55.11	60.91	57.64
	4	63.46	56.68	59.28	59.81
	5	58.96	55.51	58.05	57.51
	6	64.52	57.74	58.37	60.21
	7	61.15	-	-	61.15
	14	69.88	64.20	73.29	69.12
	21	76.47	69.54	72.07	72.69
	28	71.35	70.56	69.61	70.51
90	83.98	82.66	81.16	82.60	
100MPa	1	44.86	36.53	42.21	41.20
	2	58.74	53.93	59.30	57.32
	3	55.53	57.56	68.10	60.40
	4	61.20	-	62.02	61.61
	5	61.64	65.06	59.96	62.22
	6	72.00	70.08	71.14	71.07
	7	65.13	-	69.20	67.16
	14	73.54	74.56	69.43	72.51
	21	72.75	78.79	76.71	76.08
	28	73.95	72.19	70.74	72.29
90	89.29	80.99	83.33	84.54	

Table 4. Pullout test results (80MPa, 100MPa)

Type	Pull-out Load (kN)	Age(day)										
		1	2	3	4	5	6	7	14	21	28	90
80 MPa (Wall)	No.1	41.8	43.6	49.4	49.6	47.7	45.3	45.7	53.2	48.1	55.4	61.1
	No.2	44.4	47.0	48.3	50.8	51.4	54.4	54.7	55.2	55.3	56.7	51.5
	No.3	48.8	50.5	54.6	50.5	48.5	51.3	52.7	51.0	55.3	54.0	59.6
	No.4	41.4	53.3	52.2	53.2	53.0	50.5	49.4	55.5	56.6	56.7	59.3
	No.5	46.5	52.7	44.3	49.0	52.7	54.7	51.7	53.7	55.4	53.4	57.8
	Ave	44.6	49.4	49.8	50.6	50.6	51.2	50.8	53.7	54.1	55.2	57.8
80 MPa (Slab)	No.1	37.3	37.1	-	43.5	48.8	50.8	-	55.4	44.9	47.2	49.4
	No.2	35.3	39.6	45.0	53.9	46.6	50.4	48.9	49.7	56.9	58.5	45.0
	No.3	37.2	43.9	44.0	49.4	49.0	45.0	-	50.4	60.3	59.1	57.4
	No.4	35.9	39.3	37.9	48.2	47.6	50.6	48.8	54.6	57.3	67.4	58.4
	No.5	32.2	39.8	41.5	45.8	50.6	48.1	46.5	-	55.4	58.5	68.4
	Ave	35.6	39.9	42.1	48.2	48.5	49.0	48.1	52.5	55.0	58.1	55.7
Ave(80MPa)		40.1	44.7	45.9	49.4	49.6	50.1	47.8	51.6	54.5	56.7	56.8
100 MPa (Wall)	No.1	49.3	53.0	52.5	60.5	59.7	58.9	54.4	56.4	57.9	59.0	58.2
	No.2	51.5	55.8	63.3	57.8	57.9	62.8	61.1	61.5	62.6	59.7	64.6
	No.3	50.0	55.4	60.0	60.4	53.3	64.1	59.4	63.1	-	57.9	57.3
	No.4	54.3	53.9	61.6	61.8	59.5	61.8	58.1	60.2	63.7	60.2	57.0
	No.5	51.1	56.6	57.0	55.1	54.3	58.2	57.8	61.0	56.4	-	60.5
	Ave	51.2	54.9	58.9	59.1	56.9	61.2	58.2	60.4	60.1	59.2	59.5
100 MPa (Slab)	No.1	47.7	52.2	52.6	56.9	61.2	58.3	57.2	60.0	56.6	57.3	75.6
	No.2	48.5	44.0	52.8	56.2	50.3	55.4	54.2	58.6	45.1	57.7	70.7
	No.3	39.3	53.2	53.9	58.4	48.5	57.7	55.5	55.9	58.6	55.9	73.5
	No.4	41.5	49.8	49.8	53.0	55.4	59.7	52.7	58.3	52.6	60.0	66.7
	No.5	49.8	51.0	51.3	51.6	45.2	51.7	51.9	58.8	45.7	56.3	67.6
	Ave	45.3	50.0	52.1	55.2	52.1	56.5	54.3	58.3	51.7	57.4	70.8
Ave(100MPa)		48.3	52.5	55.5	57.2	54.5	58.9	56.2	59.4	54.3	54.1	65.1

정한다. 간이인발시험인 경우 인발하중을 구할 필요는 없으나 정량적인 값을 얻어 다른 시험값과 비교하기 위하여 로드 셀을 사용하여 인발하중을 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축강도와 인발하중 측정결과

콘크리트 재령 28일 목표 강도는 80MPa와 100MPa이었으며 콘크리트 공시체에 대한 압축강도 Table 3와 같다. 80MPa급은 70.5MPa, 100MPa급은 72.3MPa를 보여주고 있으며 재령 90일인 경우 80MPa급은 82.6MPa로 목표 강도에 근사한 반면 100MPa급은 84.5로 80MPa급과 비슷한 결과를 나타내고 있다. 이렇게 목표강도보다 낮은 값을 보여준 것은 타설시 겨울철 외기 양생과 낮은 실내양생온도가 원인으로 추측되지만, 타설전에 온도가 배합에 미치는 영향에 대한 검증실험을 통하여 배합표 조정을 하지 못한 것이 주 원인이다.

Table 4는 시험벽체와 슬래브에 대한 인발시험결과를 나타내고 있다. 인발하중 값이 없는 부분은 콘크리트 표면상태가 불량이거나 콘크리트를 제작하는 도중 이물질이 들어간 부분으로써 정확한 결과값을 기대할 수 없기 때문에 시험에 사용하지 않았다. 인발하중값을 살펴보면 80MPa급 콘크리트에서는 시험 벽체에서 44.6kN~57.8kN의 값을 보여주고, 시험슬래브에서는 35.6kN~55.7kN의 값을 나타낸다. 100MPa급 콘크리트에서는 시험벽체와 슬래브에서 각각 51.2kN~59.5kN과 45.3kN~70.8kN의 인발하중을 나타내었다. 몇몇 값을 제외하고 슬래브가 낮은 값을 보여 주고 있는데 벽체인 경우가 인발너트의 고정상태가 견고하며 블리딩의 영향도 많지 않기 때문이라 판단된다.

인장하중값과 파단볼트 직경에 대한 인장시험 결과값과 비교해보면, 80MPa급 콘크리트의 시험벽체와 슬래브에서는 각각 직경 6.25mm~7.25mm볼트와 직경 5.5mm~7.75mm 볼트의 인장내력에 해당하며, 100MPa급 콘크리트의 시험벽체와 슬래브에서는 각각 직경 6.5mm~7.25mm볼트와 직경6.0mm~7.75mm볼트의 인장내력에 상응한다.

3.2 인발하중과 압축강도와의 관계

해당 인발하중과 콘크리트 압축강도의 관계는 Figure 7과 Figure 8에 나타내었는데 각각의 값은 28일의 인발하중과 콘크리트 압축강도를 100%로 가정하고 환산한 값을 의미

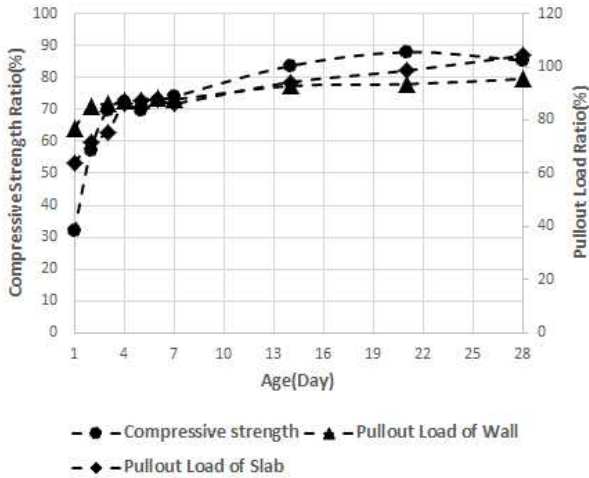


Figure 7. Compressive strength versus pullout load(80MPa)

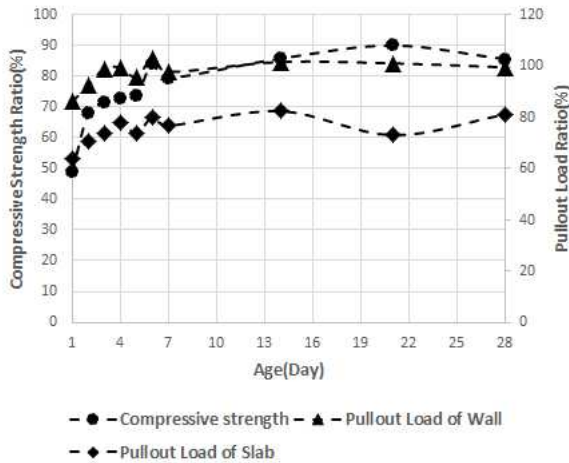


Figure 8. Compressive strength versus pullout load(100MPa)

한다. 100MPa급 콘크리트인 경우 시험벽체의 값과 비교하여 시험슬래브가 조금 낮은 값을 보이고 있으나 80MPa급인 경우 시험벽체와 슬래브의 그래프는 거의 동일한 경향을 보인다. 전체적으로 콘크리트 압축강도와 인발하중은 비슷한 경향을 가진 충분한 상관관계가 있다고 판단 할 수 있다. 이러한 경향은 다른 기존의 연구결과와도 일치한다[4,7,8,9,10].

Figure 9 및 Figure 10은 이러한 상관관계를 정량적으로 검증하기 위하여 각 시험부재와 콘크리트 강도별로 인발하중과 콘크리트 압축강도와의 상관관계를 살펴보았다. 우선 시험벽체의 경우 80MPa급 콘크리트의 결정계수(R^2)는 0.96를 나타내고 있으며, 100MPa급인 경우는 0.83을 보여주고 있다. 그리고 80MPa과 100MPa급의 실험값 전체에 대해서는 0.92를 보여주고 있다. 또한 시험슬래브의 경우

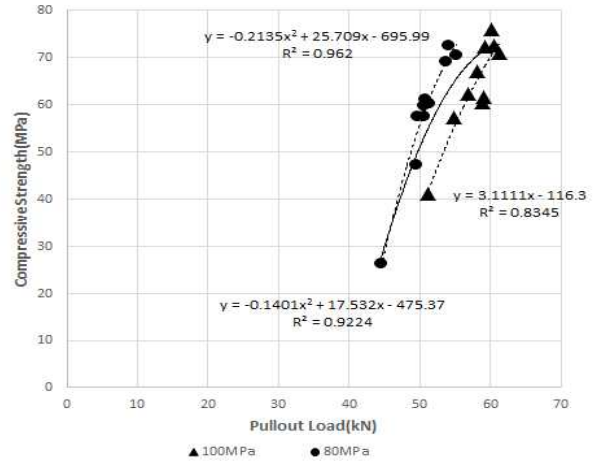


Figure 9. Correlation between pullout load and compressive strength(Wall)

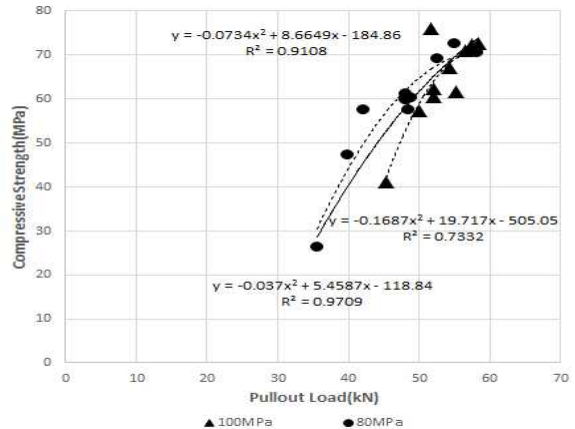


Figure 10. Correlation between pullout load and compressive strength(Slab)

80MPa급 콘크리트의 결정계수(R^2)는 0.91을, 100MPa급인 경우는 0.73을 나타내고 있으며 80MPa과 100MPa급의 실험값 전체에 대해서는 0.97을 보여주고 있다. 전체적으로 콘크리트강도와 인발하중과의 상관관계는 매우 높다고 판단 할 수 있으며 결과적으로 인발하중으로 고강도 콘크리트 강도도 정확히 평가할 수 있다는 의미한다.

3.3 간이인발시험결과

시험 벽체에 대한 간이인발시험 결과는 Table 5에 나타나 있다. 표에는 각 재령에서 시험한 파단형 인발볼트 직경과 그 직경에 해당하는 파단형 볼트의 파단 유무 그리고 인발하중 값을 보여주고 있다. 인발하중 값은 간이인발시험장치에 로드셀을 부착하여 측정하였다. 파단형 볼트의 파단은 P로,

Table 5. Simplified pullout test results

Type	Age (day)	Dia-meter (mm)	Pullout Result(P or F)					Pullout Load(kN)					Ave	
			1	2	3	4	5	1	2	3	4	5		
80 MPa	1	6.0	P	P	P	-	-	38.6	38.5	38.9	-	-	-	
		6.5	F	F	F	-	-	42.9	43.4	45.2	-	-	43.8	
		6.25	P	P	P	-	-	41.4	41.6	40.8	-	-		
	2	6.5	P	F	P	P	-	46.1	43.3	44.3	44.7	-	-	
		6.75	P	F	F	F	-	49.4	49.0	45.3	44.6	-	46.3	
	3	6.75	P	F	F	F	-	49.5	48.8	48.8	44.2	-	47.3	
		6.75	P	F	P	P	-	49.1	49.8	48.7	49.6	-		
	4	7.0	F	F	F	-	-	50.4	51.7	47.9	-	-	50.0	
		7.0	F	F	F	-	-	50.5	48.9	46.8	-	-	48.7	
	6	7.0	F	F	F	-	-	49.0	51.7	48.3	-	-	49.7	
		7.0	F	F	F	-	-	52.5	46.2	52.6	-	-	50.4	
	14	7.0	F	P	F	P	F	51.8	52.9	53.3	52.4	53.4	52.8	
		7.0	F	F	F	-	-	52.6	53.1	52.5	-	-	52.7	
	28	7.0	P	F	P	P	-	53.7	51.7	53.0	53.0	-		
7.25		F	F	F	-	-	57.2	53.5	52.7	-	-	54.5		
7.25		P	P	P	-	-	58.5	57.2	57.5	-	-			
90	7.5	P	P	P	-	-	62.6	61.2	61.4	-	-			
	7.75	F	F	F	-	-	61.3	57.4	62.3	-	-	60.3		
100 MPa	1	6.5	P	P	P	-	-	46.2	45.4	45.7	-	-		
		7.0	F	F	F	-	-	53.5	47.3	51.5	-	-	50.8	
		6.75	P	P	P	-	-	49.8	49.6	49.5	-	-		
	2	7.0	F	F	P	P	P	51.1	53.6	51.7	52.5	53.0		
		7.25	P	F	F	P	F	57.7	56.5	55.0	57.5	57.9	56.5	
	3	7.25	F	F	P	F	-	55.2	57.5	56.2	56.2	-	56.3	
		7.25	F	F	F	-	-	56.9	57.3	55.7	-	-	56.6	
	5	7.25	P	P	F	F	P	56.6	57.8	58.7	57.6	61.9		
		7.5	F	F	F	-	-	60.7	59.4	61.8	-	-	60.6	
	6	7.5	F	F	F	-	-	54.8	59.5	59.3	-	-	57.9	
		7.5	F	F	F	-	-	59.6	60.0	55.7	-	-	58.4	
	14	7.5	F	F	F	-	-	58.2	59.8	59.6	-	-	58.9	
		7.5	F	F	F	-	-	59.8	60.8	50.5	-	-	57.0	
	28	7.5	F	F	F	-	-	55.2	60.3	50.5	-	-	55.3	
90		7.5	P	F	F	F	62.3	61.0	61.4	62.5	-	61.6		

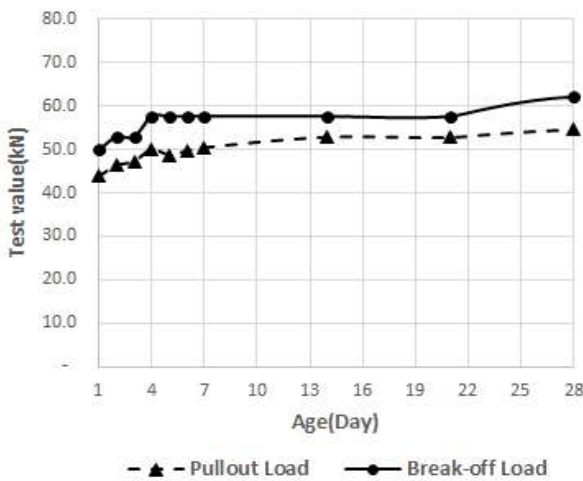


Figure 11. Pullout load versus break-off load(80MPa)

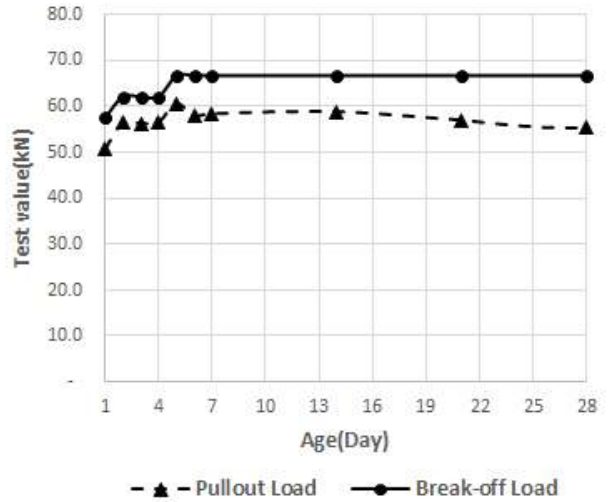


Figure 12. Pullout load versus break-off load(100MPa)

볼트의 파단 없이 콘크리트가 콘 모양으로 뽑혀 나온 경우는 F로 표시하였다. 본 시험은 각 재령에 최소 3본 이상의 파단형 볼트가 사용되어 목표 콘크리트 강도 도달여부를 확인하였는데, 확인 절차는 각 재령에서 예상 직경을 가진 파단형 볼트 3본이 파단 되면 그 다음 직경의 볼트를 시험하고 3본의 볼트에서 콘크리트 콘이 뽑혀 나오면 그 재령에서는 시험을 종료하고, 그 다음 재령에서는 이전 재령에서 콘크리트 콘이 뽑혀 나온 가장 큰 직경의 볼트를 가지고 동일한 방법으로 시험을 실시하였다. 시험이 종료되면 그때의 직경을 그 재령의 콘크리트 강도에 대응하는 값으로 추정할 수 있다. Figure 11과 Figure 12는 인발하중과 파단형 인발볼트의 인장하중 값을 나타낸 것으로 인발하중은 각 재령에서 콘크리트 콘이 뽑혀 나왔을 때의 평균값이며, 인장하중은 그때의 파단형 볼트 직경의 인장하중 값으로 Table 1을 통하여 확인 할 수 있다. 각각의 직경에 대하여 80MPa급이나 100MPa급에서도 파단형 볼트의 인장하중이 항상 인발하중보다는 큰 경향을 보여주고 있다.

3.4 파단형 인발볼트 직경과 콘크리트 강도

결과적으로 간이인발시험결과를 통하여 Figure 11과 Figure 12에서 보여주는 것과 같이 각 재령에서 콘크리트의 뽑힘으로 결정된 직경보다 작은 직경에서 항상 볼트가 파단된다고 추정할 수 있으므로 목표한 콘크리트 강도에 도달하였다고도 판정할 수 있다.

목표 콘크리트 강도를 추정하기 위하여 Figure 13과 같이

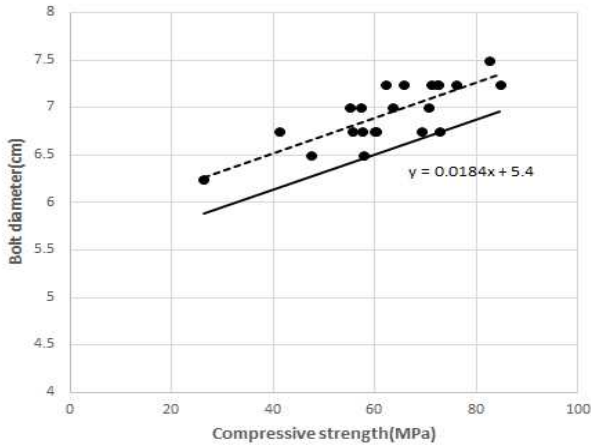


Figure 13. Correlation of bolt diameter with compressive strength

필요한 파단형 인발볼트의 직경과 콘크리트 강도와 상관관계를 조사하였다. 여기에서 파단형 인발볼트의 직경은 각 재령에서 콘크리트의 뽑힘에 해당하는 볼트의 직경보다 한 단계 아래의 직경을 의미한다. 점선은 콘크리트 강도와 볼트 직경과의 상관관계 추세선을 나타내고 있으며 실선은 안전율을 고려하여 콘크리트 목표강도에 도달하면 볼트가 반드시 파단될 수 있는 한계식을 표시하였다.

안전율을 고려한 콘크리트 강도와 파단형 인발볼트의 직경관계를 수식으로 표현하면 Equation (1)과 같다.

$$y=0.0184x+5.4 \text{ ----- (1)}$$

여기서 x는 콘크리트 압축강도(MPa), y는 파단형 볼트의 직경(mm)이다.

예를 들면, 재령 90일의 목표 설계기준강도가 80MPa이라고 결정하여 가정하고 이 식에 따라 계산하면 y는 6.87이라는 값이 도출되는데 6.87에 가장 근접하면서 직경이 큰 7.0mm의 파단형 인발볼트를 선택하여 간이인발시험을 실시하고 3본이 파단 된다면 설계기준 강도를 만족한다고 판단할 수 있다.

결과적으로 각 재령에서 Equation (1)과 같은 수식에 근거하여 목표 콘크리트 강도에 근접한 직경의 파단형 인발볼트를 선택하고 간이인발시험을 통하여 파단유무를 확인하면 간단하게 목표 콘크리트 강도 확보 여부를 확인할 수 있다.

그러나 여기에 제시한 기준은 본 실험결과에 한정된 기준으로 기존의 연구결과에서 제시했던 기준[7,9]과는 차이가

있어 전체 강도에 대한 재검토는 추후 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 80MPa를 초과하는 초고강도 콘크리트를 사용하여 시험벽체와 슬래브를 대상으로 기존 인발법과 개발된 간이인발시험법을 동시에 적용하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 인발하중값을 살펴보면 80MPa급 콘크리트에서는 시험벽체에서 44.6kN~57.8kN의 값을 보여주며, 시험슬래브에서는 35.6kN~55.7kN의 값을 나타낸다. 100MPa급 콘크리트에서는 시험벽체와 슬래브에서 각각 51.2kN~59.5kN과 45.3kN~70.8kN의 인발하중을 나타내었다.
- 2) 인발하중과 콘크리트 압축강도와의 상관관계를 살펴보면, 100MPa급에서 일부 낮은 상관관계를 보여주지만 시험벽체인 경우 80MPa과 100MPa급의 실험값 전체의 결정계수는 0.92를 보여주고 있으며 시험슬래브인 경우에도 전체적으로 0.97을 나타내고 있어 전체적인 콘크리트강도와 인발하중과의 상관관계는 매우 높다고 판단할 수 있으며 결과적으로 인발하중으로 고강도 콘크리트 강도도 정확히 평가할 수 있다는 것을 의미한다.
- 3) 재령에서 Equation (2)과 같은 수식에 근거하여 목표 콘크리트 강도에 근접한 직경의 파단형 인발볼트를 선택하고 간이인발시험을 통하여 파단유무를 확인하면 간단하게 목표 콘크리트 강도 확보 여부를 확인할 수 있다.

$$y=0.0184x+5.4 \text{ ----- (2)}$$

여기서 x는 콘크리트 압축강도(MPa), y는 파단형 볼트의 직경(mm)이다.

요 약

비파괴 시험 중 선 매입 인발시험법은 아마도 현장의 콘크리트 압축강도를 평가하기 위해 널리 사용되는 기술이라고 할 수 있다. 인발시험은 콘크리트 타설 전에 특별히 계획된 형태의 철재 봉을 설치하여 콘크리트가 굳은 다음 그 봉을

인발하여 그때의 하중을 측정하여 콘크리트 강도를 평가하는 방법으로 미국과 캐나다에서는 콘크리트 구조물 공사중에 콘크리트 강도를 결정하는 신뢰할 만한 시험법으로 각각 ASTM C 900과 CSA A23.2에 규격화 되어 있다. 직경 12mm볼트에 홈이 파인 파단형 인발 볼트와 인발너트, 그리고 로드셀이 필요 없는 오일유압펌프로 구성된 간이인발시험법을 초고강도 콘크리트 강도를 추정하기 위하여 제안되었다. 인발시험과 간이인발시험의 이점을 검증하기 위하여, 80MPa 및 100MPa 급 두 가지 유형의 콘크리트로 제작된 4개의 시험벽체와 2개의 슬래브를 대상으로 로드셀을 장착한 간이인발시험을 사용하여 인발시험을 실시하였다. 인발 하중과 콘크리트 압축강도, 파단형 인발볼트의 파단 여부를 재령 7일까지는 매일, 그리고 14일, 21일, 28일, 90일에 측정하였다. 인발하중과 콘크리트 압축강도의 상관곡선은 매우 높은 신뢰도를 보여주었으며, 따라서 인발시험이 현장에서 구조물의 초고강도 콘크리트 강도를 평가할 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 파단형 인발볼트 직경과 콘크리트 강도와의 관계식으로 $y=0.0184+5.4(x=\text{콘크리트 압축강도(MPa)}, y=\text{파단형 인발볼트 직경(mm)})$ 를 제안하였다. 본 연구에서 얻은 결과로 간이인발시험은 유용하며 저비용, 간편성 및 편의성에 대한 가능성이 검증되었다.

키워드 : 간이인발법, 비파괴시험, 인발하중, 파단형 볼트, 초고강도 콘크리트

Acknowledgement

This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(Ministry of Science, ICT & Future Planning) (No. NRF-2014R1A1A1038215).

References

1. ASTM C 900-06STM, Standard Test Method for Pullout Strength of Hardened Concrete, 10 ASTM International, West Conshohocken, PA, 2006.
2. Canadian Standards Association(CSA) Standard A23.1, Concrete materials and methods of concrete construction, Canadian Standards Association, 2004.
3. Claus GP, Ervin P. Pull-out testing by LOK-test and CAP-test,

- Dansk Betoninstitut A/S. 1992. p. 31-8.
4. Komatu Y, Kondo G, Morita S. Variability of in-place Concrete Strength Evaluated by Pullout Test, Proceedings of Architectural Institute of Japan; 1986 July 25; Hokkaido, Japan, Tokyo(Japan): Architectural Institute of Japan; 1986. p. 135-6.
 5. Kim GD, Lee SH, Kang SK, Kim JH, Kim KJ. Evaluation of in-situ concrete strength with pull-out testing at the early ages, Proceedings of the Korea Concrete Institute; 2007 May 3-4; Daegu, Koera, Seoul(Korea): Korea Concrete Institute; 2007. p.1087-90.
 6. Lee JH, Kim JD, Jung YK, The structural design of lotte tower, Magazine of the Korea Concrete Institute, 2014 Sep;26(1): 36-41.
 7. Ko HB, Cha EH, Oh KH, Suggestion for the simplified pullout test of normal concrete strength, Journal of the Architectural Institute of Korea, 2017 Apr;33(4):29-36.
 8. Ko HB, Lee G, Won JS. Development of postinstallable pullout bolts and a loading device for evaluating concrete strength, Journal of the Korea Institute of Building Construction, 2011 Jun;11(3):229-37.
 9. Lee G, Ko HB, Won JS. Effectiveness of a simplified pullout test using a post-installable break-off bolt, Research in Nondestructive Evaluation, Taylor & Francis, 2013 Jan;24(1):1-17.
 10. Latte Bovio F, Latte Bovio G, Brencich A, Cassini G, Pera D, and Riotto G. A new pull-out technique for in-place estimation of concrete compressive strength, Advances in Materials Science and Engineering, 2014 Feb;2014(Article ID 984341):1-8.