

## 압축성 간격재를 설치한 전면접착식 볼트의 인발저항 거동

황용섭<sup>1)</sup>, 이상덕<sup>2)\*</sup>

### Resisting Behavior of Fully-Grouted Rock Bolts with Compressible Spacers

Yong-Sub Hwang, Sang-Duk Lee

**Abstract** In order to prove the applicability of rock bolts with compressible spacers, laboratory model tests and large scale model tests were conducted. Laboratory model tests were performed in various distance of compressible spacers to determine the optimal distance of compressible spacers. The optimal distance of compressible spacers was found that is 1/4 of rock bolts unit length. Large scale model tests that the size was 0.6 m (diameter) × 4.45 m (length) were conducted. Test results showed that pull out resistance could be increased up to 15% larger than that of unused case by using compressible spacers.

**Key words** Fully-grouted rock bolt, Compressible spacers, Pull-out resistance

**초 록** 본 연구는 록볼트가 크게 인장되더라도 주입재의 인장파괴를 최소화하여 전면접착식 볼트의 지보효과를 극대화 할 수 있는 새로운 개념의 록볼트를 개발하기 위해 수행하였다. 전면접착식 볼트의 거동 메커니즘을 분석하기 위하여 실내모형시험을 실시하였다. 압축성 간격재를 설치한 록볼트를 고안하고, 실내인발시험을 실시하여 간격재의 최적설치간격을 결정하였으며, 실내형 인발시험을 통하여 압축성 간격재를 설치한 볼트의 인발저항력을 측정하였다. 그 결과 압축성 간격재를 설치한 볼트가 기존의 전면 접착식 볼트보다 약 15% 증가된 인발 저항력을 나타내었다.

**핵심어** 전면접착식 볼트, 압축성 간격재, 인발저항력

#### 1. 서 론

일반적으로 지하공간 구조물 건설에 사용되고 있는 대표적인 지보재로는 강지보공, 슛크리트, 록볼트 등이 있다. 그 중에서도 록볼트는 오래전부터 사용해 온 지보재로서, 경암지반 뿐만 아니라 연약 지반에서도 뛰어난 지보 효과가 있다는 것이 경험적으로 증명되어, 현재는 광범위한 지반조건에서 지하공간의 지보재로 사용되고 있다(이석원, 2000).

록볼트는 균열 등 역학적 불연속면의 상태가 지하공동의 거동을 지배하는 경암에서 개개의 암반 블록을 지지하여 암반의 일체성을 높이는 효과가 있고, 연암에서

는 지하공동 주변의 암반이 소성화하는 단계에서 내공 변위를 구속하여 암반을 삼축응력상태로 유지하고, 굴착면 주변 암반의 내하능력을 높이는 작용을 한다(이상덕, 1994).

최근 대부분의 터널에 적용되고 있는 전면접착식 볼트에 축력이 작용하면 연신율이 큰 록볼트는( $\epsilon \approx 0.002$ ) 변형이 크게 발생되지만, 록볼트와 지반을 정착시켜주는 주입재(정착재)는 연신율이 작아( $\epsilon \approx 0.0005$ ) 인장에 취약하고 파손되기 쉬워 지반과 록볼트의 부착이 끊어지는 문제가 발생할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 전면접착식 록볼트의 그라우트와 록볼트의 재료적 성질차이에 기인한 파괴거동에 주목하고, 록볼트에 압축성 간격재를 설치하여 록볼트가 크게 인장되더라도 주입재의 인장파괴가 최소화됨으로써 록볼트의 인발저항이 증대되는 효과에 대하여 연구하였다.

<sup>1)</sup> 삼성중공업(주) 건설사업부 부장

<sup>2)</sup> 아주대학교 환경건설교통공학부 교수

\* 교신저자 : lsangduk@ajou.ac.kr

접수일 : 2011년 10월 6일

심사 완료일 : 2011년 10월 25일

게재 확정일 : 2011년 10월 26일

2. 실내모형시험

2.1 실험개요

실내모형시험에서는 전면접착식 볼트의 거동 메커니즘과 압축성 간격재를 설치한 록볼트의 인발저항 특성을 파악하기 위하여 부착강도시험, 실내인발시험 등 2가지의 실내모형시험을 수행하였다.

부착강도시험에서는 모형시편을 제작하여 록볼트의 길이에 따른 록볼트-그라우트, 그라우트-콘크리트(지반)의 부착강도를 측정하여 전면접착식 록볼트의 거동을 분석하였다.

인발시험에서는 록볼트에 압축성 간격재를 설치하고, 압축성 간격재의 설치간격에 따른 록볼트의 인발저항 거동 특성을 분석하였다.

각 시험에 사용된 록볼트 및 압축성 간격재의 특징은 다음 표 1, 표 2와 같다.

2.2 부착강도시험

(1) 시험장치

모형시험장치는 크기 45 cm × 45 cm × 45 cm의 보강된 H형강으로 제작된 재하대 2개와  $\phi 27$  mm의 볼트 봉 4개를 이용하여 프레임을 제작하고 상부에 최대용량 500 kN의 복동식 유압 실린더를 설치하였다. 그림 1은 재하장치가 놓혀진 상태이다.

(2) 시험변수

록볼트와 그라우트, 그라우트와 모형지반 사이의 부착강도시험은 시편길이(50 mm, 100 mm, 150 mm, 200

표 1. 압축성 간격재의 강도특성

단위중량( $\gamma$ )	탄성계수(E)	포아송비( $\nu$ )	항복강도( $\sigma_y$ )	열팽창계수( $\alpha$ )
9 kN/m <sup>3</sup>	0.8 MPa	0.5	1 MPa	165 × 10 <sup>-6</sup> /°C

표 2. 록볼트의 강도특성

직경(d)	단위무게(m)	탄성계수(E)	항복강도( $\sigma_y$ )	연신율( $\delta$ )
25 mm	39.8 N/m	200,000 MPa	350 MPa	18%

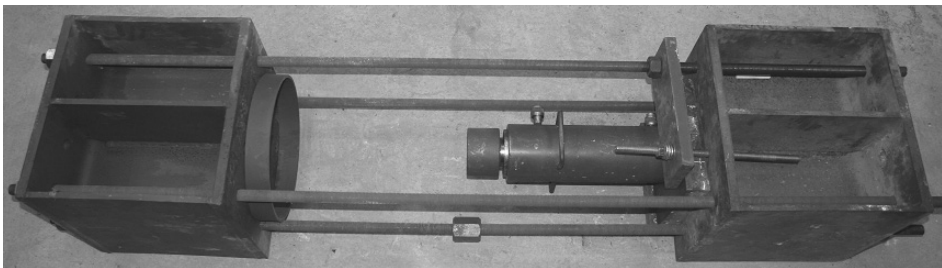
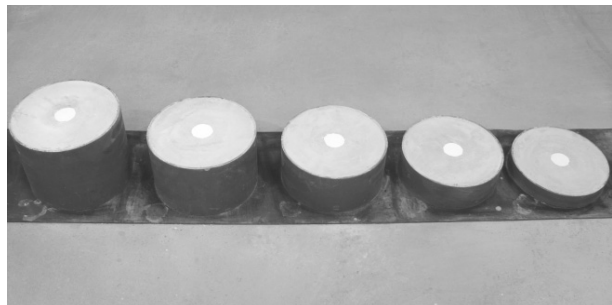


그림 1. 부착강도시험 재하장치



(a) 록볼트-그라우트



(b) 그라우트-콘크리트

그림 2. 모형시험변수 사진

mm, 250 mm)를 변수로 하여 그림 2와 표 3과 같은 모형시편을 제작하고, 총 10가지 실험변수에 대하여 모형시편을 수행하였다(표 4).

**(3) 시험방법**

록볼트와 그라우트의 부착강도 시험을 위하여 내경 50 mm의 강관의 중심에 록볼트를 설치한 상태에서 물-시멘트비(w/c)가 50%인 시멘트 밀크를 주입하여 록볼트-그라우트 시험시편을 제작하고, 그라우트 강도가 10 MPa~12 MPa이 되었을 때 부착강도 시험을 수행하였다(그림 3의 (a)).

그라우트와 지반의 부착강도 시험을 위하여 외경 400 mm의 강관을 이용하여 28일 강도가 21 MPa인 콘크리트 지반을 제작하고, 중심에는 외경 50 mm의 PVC관

을 설치하여 그라우트 타설을 위한 천공홀을 모사하였다. PVC관을 제거한 후 물-시멘트비(w/c)가 50%인 시멘트 밀크를 주입하여 그라우트를 형성하였으며, 그라우트 강도가 10 MPa~12 MPa이 되었을 때 그라우트와 지반의 부착강도 시험을 수행하였다(그림 3의 (b)).

**(4) 시험결과**

록볼트-그라우트 간의 부착강도는 50 mm 시편에서 27 kN, 250 mm 시편에서 80kN으로 록볼트와 그라우트의 접촉길이가 길어질수록 부착강도가 증가하였다(표 5).

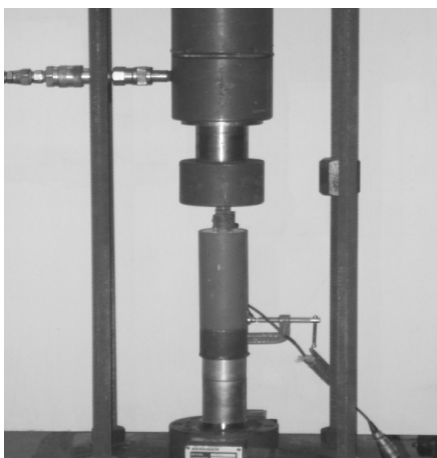
그라우트-콘크리트지반 간의 부착강도는 50 mm 시편에서 10 kN, 250 mm 시편에서 57 kN으로 록볼트-그라우트간의 부착강도와 마찬가지로 접촉길이가 길어

**표 3.** 그라우트 및 콘크리트 지반의 제원

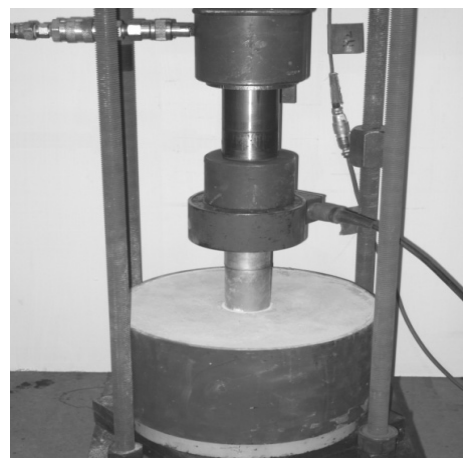
그 라 우 트		콘크리트 지반	
직경	강도	직경	강도
50 mm	10~12 MPa	400 mm	21 MPa

**표 4.** 모형시험변수

No.	파괴면	시편길이	시험명	No.	파괴면	시편길이	시험명
1	록볼트-그라우트 (Rockbolt-Grout)	50 mm	RG5	6	그라우트-콘크리트 (Grout-Concrete)	50 mm	GC5
2		100 mm	RG10	7		100 mm	GC10
3		150 mm	RG15	8		150 mm	GC15
4		200 mm	RG20	9		200 mm	GC20
5		250 mm	RG25	10		250 mm	GC25



(a) 록볼트-그라우트 부착강도



(b) 그라우트-콘크리트 부착강도

**그림 3.** 부착강도시험

질수록 부착강도가 비례하여 증가하였다(표 6).

부착강도 시험결과 축방향 하중에 의하여 항복변위 이상의 변위가 발생한 후에도 록볼트와 그라우트, 그라우트와 콘크리트지반 경계면에서 부착력이 완전히 소멸하지 않고 잔류부착강도가 나타나는 것을 확인하였다.

### 2.3 실내인발시험

#### (1) 모형지반조성

모형지반은 직경 600 mm, 높이 1,000 mm의 크기로 28일 양생한 강도 24 MPa의 콘크리트를 타설하여 강성지반을 모사하였다. 모형지반은 ①원형거푸집 내부에

표 5. 부착강도 시험결과

시험명	최대 부착강도
RG5	27 kN
RG10	39 kN
RG15	46 kN
RG20	63 kN
RG25	80 kN

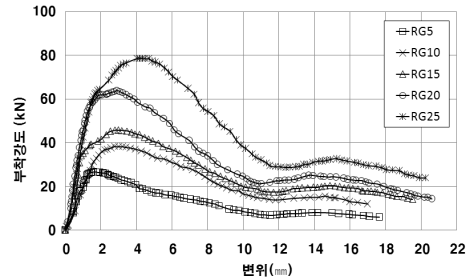
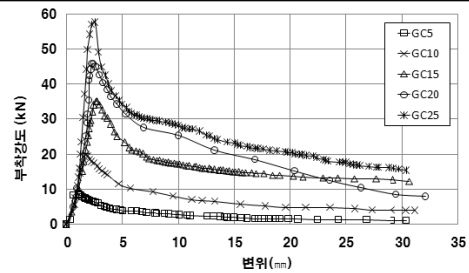


표 6. 그라우트-콘크리트 간의 부착강도

시험명	최대 부착강도
GC5	10 kN
GC10	21 kN
GC15	35 kN
GC20	46 kN
GC25	57 kN



① 거푸집 설치



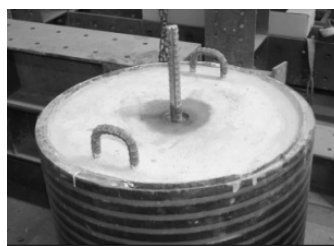
② 콘크리트 타설



③ 내공 PVC관 인발



④ 콘크리트 양생완료



⑤ 록볼트설치 후 그라우팅



⑥ 그라우트 양생완료

그림 4. 모형 지반 조성

콘크리트 타설 전 외경 50 mm의 PVC관을 설치하고, ②콘크리트를 타설한 후 ③콘크리트가 양생된 후 이를 제거하여 천공 홀(hole)을 형성하였다. ④콘크리트 양생 완료 후 ⑤록볼트를 설치하고 그라우팅을 실시하였다. ⑥록볼트 그라우트의 양생이 완료되면 모형지반의 조성이 완료된다(그림 4).

**(2) 시험변수**

압축성 간격재를 단위볼트길이 1 m를 기준하여 1/2 (50 cm), 1/4(25 cm), 1/8(12.5 cm), 1/16(6.25 cm) 간격으로 설치한 4가지 볼트 모델을 제작하고 기존에 사용되고 있는 간격재가 없는 전면접착식 볼트를 대조군으로 포함하였다. 간격재의 설치간격을 달리하여 총 5 가지 모형볼트를 제작하고, 5가지의 실내인발시험을 수행하였다(표 7).

**(3) 시험방법**

완성된 모형지반을 그림 5와 같이 보강된 H형강을 이용하여 수직인발시험기를 제작하였다. 시험장치 상부

에 300 kN 용량의 증공실린더와 증공하중계를 설치한 후 인발변위 측정을 위하여 변위계를 설치하고, 각각의 계측장치는 데이터로거에 연결하여 인발시험중 인발변위와 인발하중을 측정할 수 있도록 하였다. 유압잭을 사용하여 10 kN/min의 속도로 인발저항력이 일정하게 수렴될 때까지 록볼트를 인발하였다.

**(4) 시험결과**

그림 6은 인발변위에 따른 록볼트 인발강도를 압축성 간격재의 설치간격에 따라 도시한 것이다. 록볼트의 인발강도는 압축성 간격재의 설치간격과 무관하게 인발 변위 10 mm를 기점으로 수렴하였으며, 이 때의 최대인발저항력은 볼트 자체의 항복강도보다 더 큰 값을 보이면서 볼트의 파단이 발생되었다.

그림 7은 압축성 간격재의 설치간격에 따른 최대 인발강도를 도시한 것이다. 최대인발강도는 압축성 간격재를 볼트 길이의 1/2(50 cm), 1/4(25 cm) 간격으로 설치하였을 때 간격재를 설치하지 않은 경우보다 더 큰 인발저항력을 나타내었으며, 볼트길이의 1/4(25 cm) 간격으로 설치한 경우에서 최대 인발강도가 가장 크게 나



그림 5. 콘크리트지반 인발시험

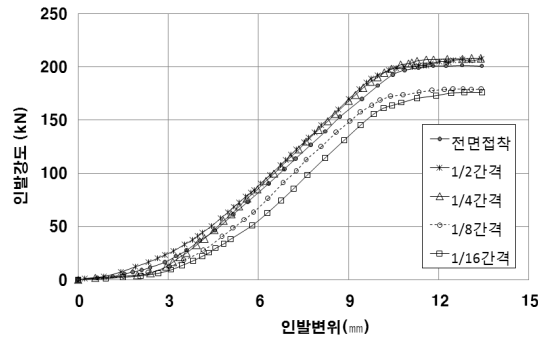


그림 6. 인발변위에 따른 인발강도

표 7. 모형시험변수

실험명	간격재 설치비	간격재 설치간격	간격재 설치 사진
CN	-		
CD2	1/2	50 cm	
CD4	1/4	25 cm	
CD8	1/8	12.5 cm	
CD16	1/16	6.25 cm	

주) 간격재 설치비는 단위볼트길이(100 cm)에 대한 압축성간격재의 설치간격임.

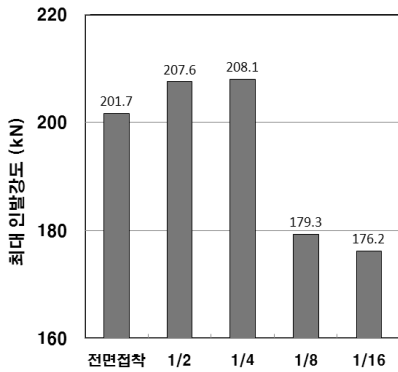


그림 7. 설치간격에 따른 최대인발강도

타났다. 압축성 간격재를 볼트길이의 1/8(12.5 cm), 1/16 (6.25 cm) 간격으로 촘촘히 설치한 경우에는 간격재를 설치하지 않은 경우보다 최대 인발강도가 작게 측정되었다.

인발시험결과 압축성 간격재를 1~3개 설치할 경우 (록볼트 길이의 1/2~1/4 간격) 압축성 간격재에 의한 그라우트 압축효과로 그라우트 인장변형이 감소하고, 연속적인 균열발생을 억제하여 인발강도가 크게 나타났다. 압축성 간격재를 7개(록볼트 길이의 1/8 간격) 이상 설치할 경우 압축성 간격재에 의해 그라우트체의 결속력이 약화되어 전면접착식의 경우보다 작은 인발강도가 나타난 것으로 판단된다.

압축성 간격재를 볼트길이의 1/4(25 cm) 간격으로 설치한 경우 최대 인발강도가 가장 크게 나타나 본 실험 조건에서 록볼트의 보강효과를 높일 수 있는 최적의 압축성 간격재 설치간격으로 나타나 실대형 실험의 간격으로 결정하였다.

### 3. 실대형 시험

#### 3.1 시험개요

실내모형시험의 결과를 바탕으로 압축성 간격재를 설치한 록볼트의 지보 효과를 검증하기 위하여 실대형 모형시험을 수행하였다. 실내모형시험에서 압축성 간격재의 설치간격을 변수로 인발시험을 실시하여 최적설치간격을 결정하였고, 실대형 시험에서는 절리를 포함한 콘크리트 모형지반을 조성하여 인발시험을 수행하여 인발에 따른 변위와 저항력을 측정하였다.

#### 3.2 간격재의 설치간격

실대형 시험에서는 길이 5 m(주입길이 4.45 m)의 록볼트(표준이형철근, SD35,  $\phi$ 25 mm)를 사용하였으며,



그림 8. 록볼트 설치모형

볼트는 실내모형시험에서 사용한 것과 동일한 규격을 사용하였다. 압축성 간격재 설치간격은 재료특성에 따른 식과 실내모형시험 결과를 바탕으로 결정하였다.

록볼트에 축력(작용하중)  $P$ 가 작용하면 볼트와 주입재의 접촉면에서 전단력  $T_{max}$ 가 발생하고,  $P$ 가  $T_{max}$ 를 초과하면 볼트에 큰 변형이 발생하며 이 때의 신장량을  $s$ 라 한다.  $T_{max}$ 는 다음 식  $T_{max} = \tau_{max} \cdot \pi \cdot d \cdot l$ 과 같이 계산할 수 있으며 볼트의 신장에 작용하는 유효하중  $P_{act}$ 는  $P - T_{max}$ 로 구할 수 있다. 신장량  $s$ 는 모형시험을 통하여 구할 수 있고, 볼트와 주입재의 접촉면에서의 전단강도  $\tau_{max}$ 는 일축압축강도시험을 통하여 구할 수 있다. 볼트직경  $d$ , 항복강도  $P_y$ , 항복변형률  $\epsilon_y$ 는 표준이형 철근의 재료특성이다(변동균, 2005).

위의 모든 변수를 식  $s = \frac{P_{act}}{P_y} \times \epsilon_y \times l$ 에 대입하여 압축성 간격재의 이론적 설치간격 ( $l=88$  cm)을 계산할 수 있다. 이론값(0.9 m)과 실내모형시험의 최적설치간격(단위볼트 길이의 1/4간격) 및 현장에서의 시공성을 고려하여 실대형 시험의 압축성 간격재의 설치간격을 1 m로 결정하였다.

록볼트의 좌우에는 직경 12 mm의 폴리에틸렌 재질의 그라우트 주입관과 공기 배출관을 설치하였다(그림 8). 간격재는 록볼트와 주입관 및 배출관이 통과할 수 있도록 구멍을 뚫어 제작하였으며(그림 10), 그라우트 주입관과 공기 배출관은 볼트에 부착된 간격재의 좌우 양측 구멍에 두 개의 관을 설치하고, 관의 선단이 록볼트의 두부와 선단부에 위치하도록 길이를 조절하였다(그림 9).

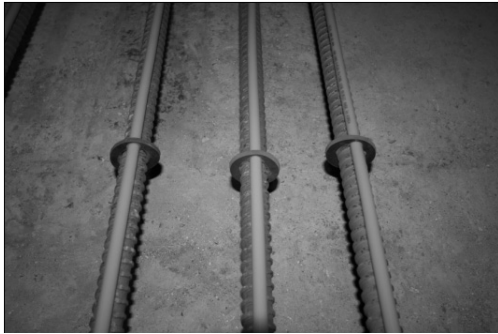


그림 9. 간격재 설치

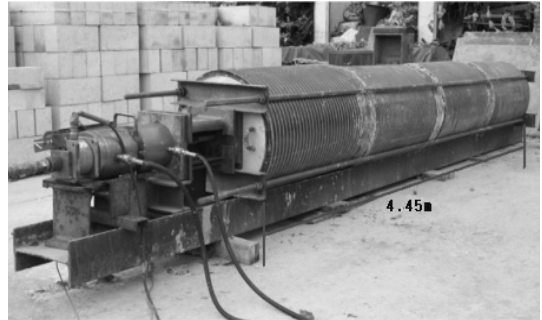


그림 11. 실대형 모형지반

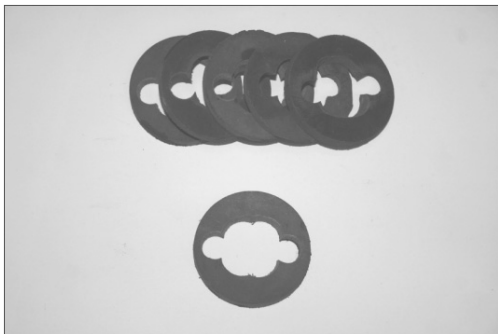


그림 10. 간격재 형상

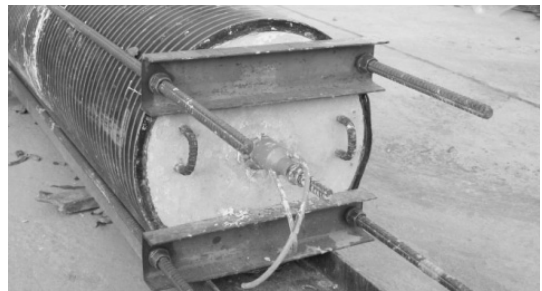


그림 12. 그라우트 주입 완료

### 3.3 실대형 인발시험

#### (1) 모형지반조성

실대형 인발시험을 실시한 모형지반은 실내시험의 콘크리트 지반과 같이 직경 600 mm, 높이 1000 mm의 크기로 28일 강도 24 MPa의 콘크리트를 타설하여 제작하였다. 모형지반의 변형특성을 부여하기 위하여 지반변형길이 1,000 mm의 콘크리트 세그먼트 4개로 제작하고 각 세그먼트의 연결과 분리를 가능하게 해주는 길이 150 mm의 연결블록 3개를 각 세그먼트 사이에 설치하여 전체 길이 4.45 m의 절리를 포함한 모형지반을 제작하였다. 그림 11은 완성된 모형지반에 재하장치를 부착한 전경이다.

#### (2) 시험변수

실대형 인발시험의 시험변수는 압축성 간격재의 설치 유무로 전면접착식 록볼트와 압축성 간격재를 1 m 간

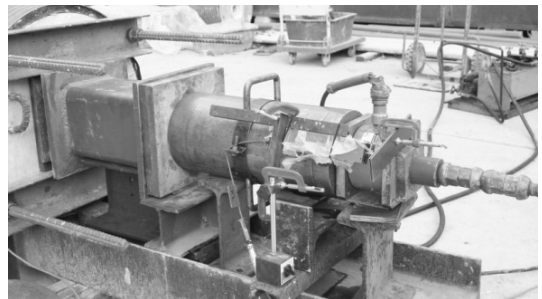


그림 13. 대형인발시험장치 및 계측장치

격으로 설치한 록볼트 두 가지 케이스로 실대형 인발시험을 진행하였다(표 8).

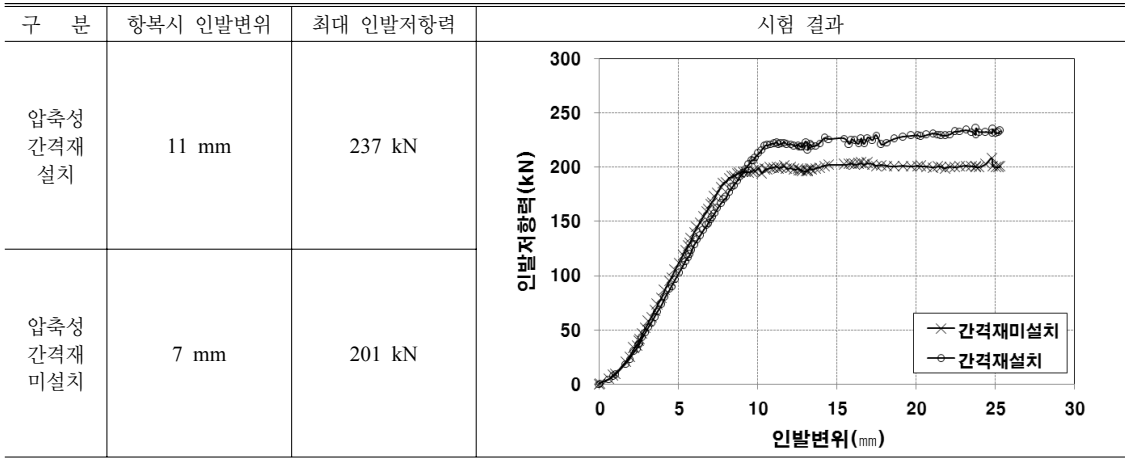
#### (3) 시험방법 및 계측

모형지반에 록볼트를 삽입한 후 공기 압축기와 압력 탱크를 이용하여 0.4 MPa의 주입압으로 물-시멘트비 (w/c) 50%의 시멘트 밀크를 주입하여 록볼트를 정착하

표 8. 실대형 시험 변수

시험명	간격재 설치 유무	설치간격	시험명	간격재 설치 유무	설치간격
Case1	무	-	Case2	유	1 m

표 9. 실대형 인발시험 결과



였다. 실내시험과 동일한 방법으로 증공식 유압실린더를 이용하여 10 kN/min의 속도로 인발하고, 인발저항력과 인발변위는 하중계와 변위계를 사용하여 측정하였다.

인발변위는 최소 12.5 mm 이상 발생하도록 실시하여 볼트의 인발변위와 인발저항력을 측정하였다(장석재, 2005).

(4) 시험결과

실대형 인발시험 결과, 압축성 간격재를 설치하지 않은 경우 약 201 kN의 인발저항력이 측정되었고, 압축성 간격재를 설치한 경우 237 kN의 인발저항력이 측정되었다. 즉, 압축성 간격재를 1 m 간격으로 설치한 볼트가 전면접착식 볼트보다 약 15% 증가된 인발저항력을 나타냈다.

압축성 간격재가 설치되지 않은 경우에는 인발변위 7 mm에서, 압축성 간격재가 설치된 경우 인발변위 11 mm를 기점으로 인발저항력이 수렴하는 결과가 나타나 압축성 간격재를 설치할 경우 보다 큰 인발변위에 저항할 수 있다는 것을 확인하였다.

4. 결론

압축성 간격재를 설치한 전면접착식 볼트의 적용성을 평가하기 위하여 실내모형시험과 실대형 모형시험을 수행하였다. 실내모형시험에서 압축성 간격재의 설치간격을 변수로 인발시험을 실시하여 압축성 간격재의 효과를 분석하고, 간격재의 최적 설치간격을 확인하였다. 실대형 시험에서는 압축성 간격재를 설치한 경우와

설치하지 않은 경우에 대하여 길이 4.45 m, 직경 0.6 m의 모형지반에 록볼트를 설치하여 인발시험을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 축방향 하중에 의하여 항복변위 이상의 변위가 발생한 후에도 록볼트와 그라우트, 그라우트와 콘크리트 지반 경계면에서 부착력이 완전히 소멸하지 않고 잔류부착강도가 나타나는 것을 부착강도시험을 통해 확인하였다.
2. 인발시험결과 압축성 간격재를 록볼트 길이의 1/4 이상의 간격으로 설치할 경우 간격재를 설치하지 않은 경우보다 록볼트의 인발강도가 증가하는 것으로 나타났으며, 압축성 간격재에 의한 그라우트 압축효과로 그라우트 인장변형이 감소하고, 연속적인 균열 발생이 간격재로 인해 억제되기 때문으로 판단된다.
3. 그러나, 압축성 간격재를 록볼트 길이의 1/8 이하로 촘촘히 설치할 경우에는 간격재가 그라우트 결합력을 방해하여 오히려 인발강도가 감소하는 것으로 나타났다.
4. 압축성 간격재는 록볼트 길이(1 m)의 1/4(25 cm) 간격으로 설치하였을 경우 최대 인발강도가 나타나므로, 본 실내인발시험에서 단위 볼트길이의 1/4 간격으로 설치하는 것이 최적의 설치간격인 것으로 판단된다.
5. 실대형시험결과 압축성 간격재를 설치할 경우 설치하지 않을 경우에 비하여 록볼트 인발저항력이 약 15% 증가하는 것으로 나타났으며, 보다 큰 인발변위에 저항할 수 있다는 것을 확인하였다.



**참고문헌**

1. 변동균 외 2명, 2005, 철근 콘크리트 개정 9판, 동명사.
2. 장석재, 2005, 터널 공사용 록볼트의 인발시험방법 및 시험결과 판정시의 문제점과 개선방안에 관한 연구, 한국구

- 조물진단학회 학회지 제9권 제4호.
3. 이상덕 외 2명, 1994, 안정된 지하구조물의 설계 및 시공, 도서출판 새문.
  4. 이석원, 2000, 도로설계편람 : 터널편, 한국건설기술연구원 건설기술정보 통권 202호.

**황 용 섭**

1989년 서울과학기술대학교 토목공학과 공학사



Tel: 02-3457-7360  
E-mail: yongsub.hwang@samsung.com  
현재 삼성중공업(주) 건설사업부 부장

**이 상 덕**

1980년 서울대학교 토목공학과 공학사  
1982년 서울대학교 토목공학과 공학석사  
1987년 독일 Stuttgart대학교 공학박사



Tel: 031-219-2503  
E-mail: lsangduk@ajou.ac.kr  
현재 아주대학교 환경건설교통공학부 교수