

## 철도 터널 공사용 록볼트 인발 시험의 문제점과 개선방안에 관한 연구

### A Study on the Problem and Improvement Plan of Rock Bolt Pull Test for Railroad Tunnel Construction

장석재\* · 곽수정\* · 김두준\*\*

Seog-Jae Jang · Su-Jeong Gwak · Doo-Jun Kim

#### Abstract

We, presently, don't have clear diagram methods and analysis criteria in rock bolt pull test usable for tunnel reinforcement. So this paper has suggested that; first, 'scheme of apposite diagram method at hard rock and the different application method of rock bolt pull test at weathered and hard rock', and second, 'the pullout capacity specification criteria for design and construction of rock bolt', based on foreign criteria and field test.

**Keywords :** Railroad Tunnel(철도 터널), Rock Bolt(록 볼트), Pull Test(인발 시험), Diagram Method(도해법), Specification Criteria(시방 규정)

## 1. 서론

철도 터널의 록볼트 인발시험은 본 시공에 앞서 갱구 또는 갱구 사면 부위와 유사한 굴착 패턴에 맞는 지반에서 사전 시험인발을 실시하여, 록볼트의 인발내력에 의한 정착효과 등 해석상 설계에 적용시키기 어려운 것을 시험결과를 통해 과다 설계 또는 불안전 설계를 확인하는 등 기존설계의 유효성을 파악하고, 기존설계를 변경하기 위해서 실시하는 매우 중요한 원위치 시험 중의 하나이다.

철도 터널 현장에서 주로 많이 사용하는 정착형 록볼트에서 발생하는 록볼트 인발에 따른 파괴 유형은 크게 록볼트 강재와 그라우트체 접촉면에서 발생하는 부착력에 따른 슬라이딩에 의한 전단파괴와 그라우트체와 지반과의 접촉면의 발생하는 주면마찰저항에 의한 전단파괴로 구분할 수 있다(Fig. 1. 록볼트 해석 모델 참조)[1].

록볼트는 지반에 정착되어 주로 인장 부재로서 역할을 하기 때문에 인발시험에 의한 내력확인도 가장 기본이면서 충분한 검토 또한 필요하고, 특히, 풍화암 이하 록볼트의 인발내력이 크게 기대되지 않는 지반에는 더욱더 중요한

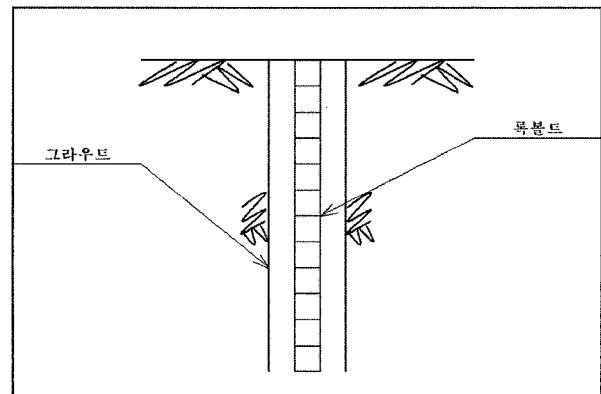


Fig. 1. 록볼트 해석 모델

시험이 된다. 그러나 현재 적용되고 있는 철도에 관한 문헌과 관련 시방서 등에는 록볼트에 관련된 정확한 해석법이나 시방규정이 없으며, 국내의 관련 문헌에도 시방, 시험, 설계가 서로 상충되는 면이 많이 있는 실정이다.

그러므로 철도 터널 현장에서는 록볼트 인발시험을 실시하거나 이에 따른 결과를 판정할 때 많은 어려움을 겪고 있는 게 현실이다.

본 연구는 다음과 같이 철도 터널 공사용 록볼트의 인발 시험법 및 시험 결과 판정시의 문제점과 그에 따른 개선 방안을 제시하고자 한다.

\* 책임저자 : 정회원, 한국철도기술공사 부설연구소 과장, 토목품질시험기술사

E-mail : sjhan4@hanmail.net

TEL : (02)3489-2823 FAX : (02)3489-2828

\* 정회원, 한미기초개발주식회사 대표이사, 공학박사

\*\* 정회원, 인덕대학 건설정보시스템과 교수, 공학박사

## 2. 철도 터널의 록볼트 인발 시험법 및 시험 결과 판정시의 문제점과 개선방안

### 2.1 록볼트 인발 시험법 및 시험 결과 판정시의 문제점

#### 2.1.1 록볼트 인발 시험법의 문제점

Fig. 2 는 전형적인 록볼트 인발 시험법의 형태를 도시하고 있다. 그러나 이 시험의 도해법은 몇 가지 문제점을 가지고 있다. 첫째, Fig. 3과 같이 A, C 영역 직선부의 접선 도해시 시험자 개인에 따라 편차가 심하게 발생하여, 항복하중 결정의 신뢰성 저하가 우려되며 둘째, 풍화암 이하의 약한 암을 제외하고는 Fig. 2와 같이 전형적인 형태의 인발시험 곡선 도사가 어렵다는 점이다.

Fig. 4는 지반강성에 따른 전단 응력-변형 관계 곡선으로, 조밀한 지반과 느슨한 지반과의 전단파괴 선형과, 록볼트

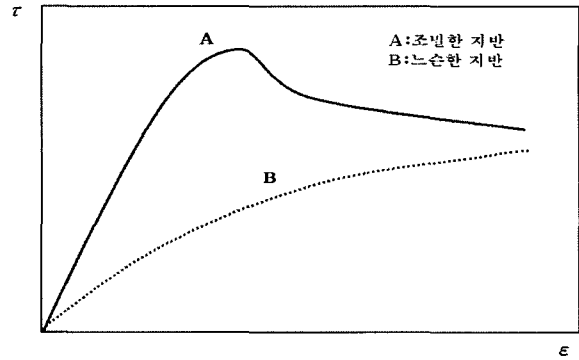


Fig. 4. 조밀한 지반과 느슨한 지반의 전단응력-변형 관계 곡선(일반적인 예)

인발시험에 의한 주변마찰저항에 의한 전단파괴의 선형에서 유사점을 찾을 수 있다.

Table 1. 터널의 록볼트 인발 시험 관련 국내 시방 내용

구분	내용
시험 방법	<p>Fig. 2. 일반적인 록볼트 인발 시험도 해도</p> <p>Fig. 3. 일반적인 록볼트 인발 시험 도해시 문제점</p>
판정 기준	<ol style="list-style-type: none"> <li>1) 시험순서 : ① 베어링플레이트와 록볼트의 축과 일치시킴 ② 플레임과 인장볼트 설치 ③ 플레임 뒤 센터홀잭을 설치한 후 너트로 연결 ④ 펌프와 센터홀잭을 연결하는 호스 연결 ⑤ 게이지(1/100 mm)를 플레임에 부착하고 반침쇠를 인장볼트에 체결 ⑥ 인발하중의 평균속도는 1톤/1분으로 서서히 작동 ⑦ 변위와 하중의 관계 곡선을 그림(Fig. 2. 참조)</li> <li>2) 직선부를 A영역, 곡선부를 B영역, 마지막 직선부가 C영역, C영역은 볼트의 정착효과를 기대할 수 없으며, 기대할 수 있는 영역의 인발내력은 D점까지임. D점은 A영역의 직선부의 접선과 C영역의 접선과의 교점임(Fig. 2. 참조), 시공된 록볼트에 대한 실제 시험시에는 인발내력의 80%에 달하면 합격으로 봄(터널표준시방서, 철도공사전문시방서, ○○일반철도 공사시방서)</li> <li>3) Φ25mm볼트의 경우 인발하중 12ton 이상에 도달하면 합격으로 함(○고속철도 공사시방서)</li> <li>4) Φ25mm볼트의 경우 인발하중 10ton 이상을 표준으로 함(도로공사의 경우)</li> <li>5) 인발시험은 하중 단계별로 변위를 측정하여 하중-변위 곡선을 작성하고, 판정시의 변위가 설계에서 고려한 록볼트의 효과를 발휘할 수 있는 범위 이내인지를 확인하여, 합격여부를 판정함(터널표준시방서, 철도공사전문시방서, ○○일반철도공사시방서)</li> <li>6) 현장여건에 따라 볼트의 종류, 시공방법 및 정착방식이 변경될 경우 설계에서 필요한 축력 이상이라고 판단되면, 감리원의 검토에 따라 변경 가능(○고속철도공사시방서)</li> </ol>

일반적으로, RMR IV~V 등급의 약한 암반의 경우에는 Fig. 2와 같은 완만한 형태의 곡선이 나오지만, RMR II~III 등급의 강한 암반의 경우에는 Fig. 2와 같은 형태의 곡선이 나오기가 어렵다.

Fig. 5는 RMR II~III 등급의 강한 암반과 Fig. 6은 RMR

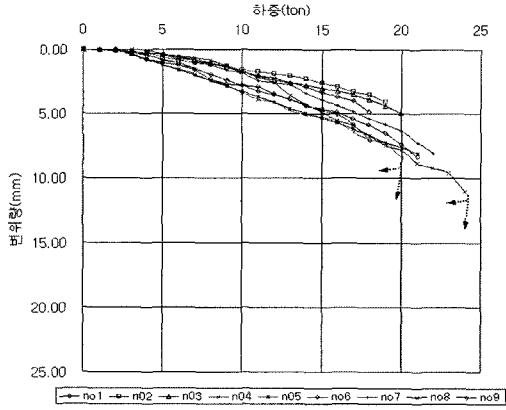


Fig. 5. 록볼트 인발 시험 결과(철도 터널 RMR II~III, 사전시험 예)

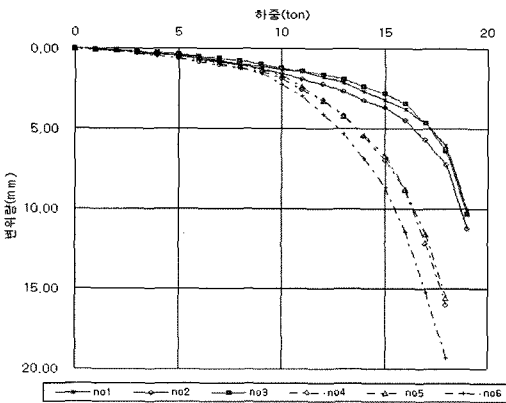


Fig. 6. 록볼트 인발 시험 결과(철도 터널 RMR IV, 사전시험 예)

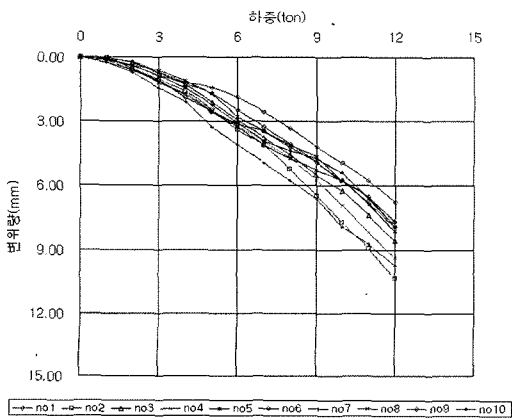


Fig. 7. 록볼트 인발 시험 결과(철도 터널 RMR II~III, 본시험 예)

IV 등급에서의 약한 암반에서 사전 시험 인발시 곡선 형태를 보인 것으로, 현장에서는 록볼트 인발 시험 시 암반의 강성에 크기에 따라 허용응력해석법이 필요하고, 또한, 위 두 시험 결과로부터 변위에 따른 제한 규정의 추가가 필요함을 알 수 있다.

Fig. 7은 철도 터널 현장의 RMR II~III 정도 보통이상의 양호한 암반에서 본 시험을 실시한 예로, 일부 시방에서 제시한 12ton 까지 만을 적용하고 있어, 사전 시험 인발의 결과와 설계축력 등이 미 고려되어 있으며, 허용 인발내력의 과소평가로 과잉설계가 되고 있는 실정이다[10].

### 2.1.2 록볼트 인발 시험 결과 판정시의 문제점

록볼트의 인발시험 결과 판정시 문제점은 Table 1의 판정 기준 1)항의 기준을 따르면 록볼트 인발내력의 80 %를 합격 기준으로 정하고 있으며, 2) 3)항의 기준은 동일 록볼트에 대해 발주 기관에 따라 10ton과 12ton(Φ25mm, SD35)으로 상이하게 합격 기준을 시방에 제시하고 있다[5-12].

또한, 4)항의 경우에는 변위를 판정기준으로 적용하고 있으며, 5)항의 경우에는 설계축력 이상을 합격 기준으로 제시하고 있다[6-11, 13].

위 내용과 같이 합부 판정 기준이 동일 록볼트에 대해 발주기관별 시방기준을 상이하게 적용하고 있으며, 인발 하중-변위 관계에서도 변위에 대한 구체적 기준과 해석 방법의 미흡 등 전반적인 설계, 시방, 시험의 기준들이 모호하여, 현장에서의 록볼트 인발시험 결과에 따른 올바른 판정을 기대하기가 현실적으로 어려운 실정이다.

## 2.2 록볼트 인발 시험법 및 허용인발하중 판정의 개선방안

### 2.2.1 록볼트 인발 시험법의 개선방안

위에서 언급한 바와 같이 토질과 암반의 전단특성을 비교하여 보면, Fig. 4의 A 조밀한 지반에서 전단특성과 Fig. 5의 RMR II~III 등급의 강한 암반에서 전단 특성이 유사하여, Fig. 2의 기존 도해법 적용이 사실 어렵다.

한편으로, Fig. 6의 RMR IV 등급의 약한 암반에서 인발 시험 결과는 Fig. 4의 B 느슨한 지반에서 전단특성과 유사하므로, 이 경우에는 기존 도해법 적용이 가능하고, 그 결과에 신뢰성도 크다고 볼 수 있다.

따라서, RMR IV~V 등 약한 암반의 경우에는, Fig. 2의 A, C 영역의 직선부가 나타나서 접선 도사가 가능할 경우, 기존의 시험방법 Fig. 2를 적용하고, RMR II~III 등급의 강한 암반에서 인발시험 결과, 극한인발하중인 더 이상의 하중증가 없이 변위가 급격히 증가하거나 인발되는 현상이 나타나는 경우, C 영역인 직선부의 접선 도사가 불가능하므로

Fig. 8과 Fig. 9의 방법을 적용토록 한다.

즉, 강한 암반과 약한 암반에서의 록볼트 인발 시험법을 구분해야 한다고 판단된다.

**2.2.2 록볼트 인발 허용인발하중 판정의 개선방안**

Fig. 8을 Fig. 5의 시험 결과와 비교하여 설명하면, RMR II~III 등급의 강한 암반의 경우에는 록볼트의 인발하중이 대체로 강재의 항복하중( $f_y$ )보다 크므로, 강재의 항복하중을 시험기준으로 설정하였고, 변위는 ASTM 규정을 따라 볼트 헤드의 이동량과 볼트의 탄성 변형량을 합한 전체 변위량인 12.5mm를 기준으로 설정하였다[15].

따라서, 사전 시험시의 합부 판정 기준은 강재의 항복하중( $f_y$ )과 변위(12.5mm 이내)를 동시에 만족하여야 한다.

록볼트의 항복하중이 설계기준이 되는 것은 볼트의 극한 하중(u 선)이 강재의 기계적 성질을 대표하여 취성재료의 설계 기본 값 또는 재질판정의 기준량이 되듯이, 록볼트 재료의 설계 개념은 연성재료로 항복하중을 설계에서 기본 값

또는 재질판정의 기준량이 되므로, 록볼트 설계시 연성재료로 항복하중을 설계기준으로 적용하고, 록볼트 인발 시험시 항복하중이 합부 판정의 기준이 된다.

그러나 터널의 록볼트 시험 인발시 지반강도가 낮아 항복하중인 y선보다 낮은 상태에서 최대점(Peak Point)이 나타나게 되면, 록볼트의 인발내력이 설계축력(설계내력)보다 낮게 되어, 록볼트 길이의 증가 등 내하력을 향상시켜야 할 것이다. 이때 최대하중이 록볼트 인발내력이 된다.

철도 터널의 록볼트 사전 시험 후에 동일 굴착 패턴의 본 시험 시에는 Fig. 9와 같이 록볼트 인발내력을 항복하중(y 선)까지 인발 할 경우, 록볼트 강재의 탄성한도를 벗어나 잔류변형이 일어날 수 있으므로, 이를 감안하여 인발하중(또는 설계축력)의 80%로 인발하며, 인발하중의 80%인 허용인발하중에 대응하는 변위량과 Fig. 8의 사전 시험시 인발하중(또는 설계축력)에 대응하는 변위와 비교하여, 록볼트 정착에 대한 합부를 판정해야 한다.

여기서, Fig. 9의  $f_y/12.5$  구배는 록볼트 본 시험시 합부 판정의 중요한 기준으로,  $f_y/12.5$  기준 구배보다 완만할 경우의 합부 판정은 변위에 의해 결정됨을 알 수 있다.

Fig. 10과 Fig. 11은 철도 터널의 록볼트 인발시험의 사전 시험시와 본 시험시 적용한 예를 나타냈다.

Fig. 10과 Fig. 11의 no1-1의 적용 예에서, 사전 시험시에는 항복하중(17.7ton 이상)과 변위(12.5mm 이내)를 모두 만족하고 있으며, 본 시험시에는 허용인발하중 14.16ton( $0.8 \cdot f_y$ )을 만족하고 있으며, 변위는 3.4mm(본 시험시)  $\leq$  7.5mm(사전 시험시)  $\leq$  12.5mm(한계치)를 동시에 만족하고 있음을 보여주고 있다.

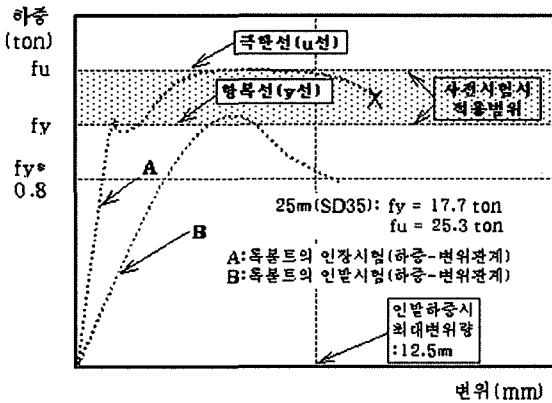


Fig. 8. 철도 터널의 록볼트 인발시험 방법(사전 시험시)

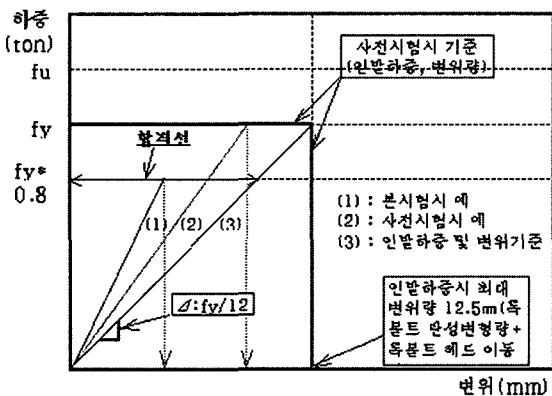


Fig. 9. 철도 터널의 록볼트 인발시험 방법(본 시험시)

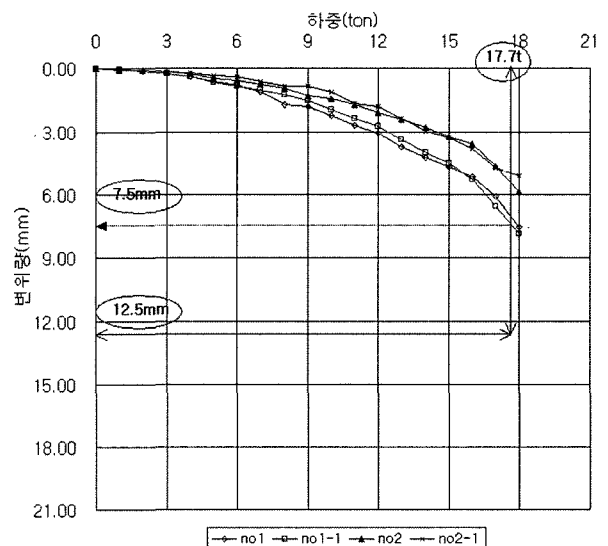


Fig. 10. 철도 터널의 록볼트 인발시험 적용 예(사전 시험시)

따라서, 본 연구 결과에 따른 개선기법에 의한 적용 예에서는 기존의 기준과 달리 록볼트 사전 시험 인발 결과와 본 시험이 연계된 해석이 가능해졌고, 시방에서 제시된 인발하중 기준을 만족한 허용인발하중과 허용변위를 만족하는 해석이 가능하다는 장점을 보여주고 있다.

Table 2는 철도 터널의 록볼트 인발 시험에 관한 기존 방법과 제안 방법의 비교표이다.

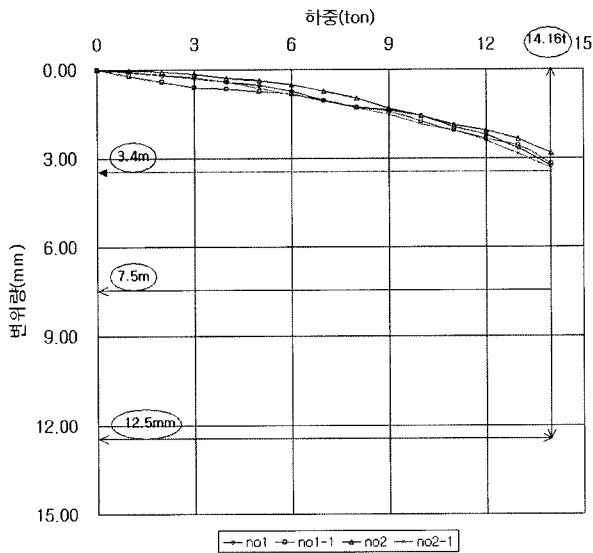


Fig. 11. 철도 터널의 록볼트 인발시험 적용 예(본 시험시)

Table 2. 철도 터널의 록볼트 인발 시험의 기존 방법과 제안 방법의 비교표

기존 방법	제안 방법
A,C 접선 도해시 개인 편차가 심하여, 항복하중의 신뢰성이 떨어진다.	RMR II~III의 단단한 지반에서는 C 접선을 도해할 필요가 없어, 항복하중의 신뢰성 저하가 없다.
RMR II~III의 단단한 지반에서는 C 접선 도해가 사실상 어려워, 과 인발하중으로 안전 사고 우려가 많다.	RMR II~III의 단단한 지반에서는 C 접선의 도해가 불필요하고, 과 인발하중에 의한 사고 발생우려가 적다.
A,C 접선의 도해법은 지반에 따라 사전시험에만 적용 가능하며, 본시험 적용은 정착영역을 벗어났기 때문에 적용이 어렵다.	RMR II~III의 단단한 지반에서는 사전시험과 본시험 적용이 가능하다.
기준에 하중개념 시방서에는 12ton 이상으로 인발하게 되어 있어, 사전시험과 설계축력의 개념이 미포함 되어 있다.	RMR II~III의 단단한 지반에서는 사전시험결과, 설계축력, 시방의 개념을 모두 만족하였다.
변위에 대한 한계를 명확히 구분하지 않았다.	사전시험과 본시험에서 인발하중과 그에 대응하는 변위에 대해 허용범위를 제시하였다.

2.2.2 항에서는 철도 터널의 록볼트 사전 시험시 및 본 시험시 합부 판정의 기준과 적용 실 예, 기존방법과 제안방법의 비교 등에 관해 제시하였다.

### 3. 결론

본 연구에서는 철도 터널 현장에서 터널 지보재로 사용되는 전면 정착형 록볼트의 경우, 설계와 시험에서의 개념상 차이점에 의한 결과 해석시 문제점 등 록볼트 인발시험의 합부에 대한 평가기준이 정립되지 않은 현 상황에서, 록볼트 인발에 관한 국내 외 기준 및 현장 시험의 분석을 통해서 합리적인 결과를 도출할 수 있었다.

본 연구를 통하여 얻어진 주요 결과는 다음과 같다.

- (1) 철도 터널의 RMR II~III 등급의 강한 암반의 경우, 전형적인 록볼트 인발 시험 도해법에서 C영역 접선의 도해가 불가능하여, 강한 암반과 약한 암반으로 도해법의 구분 적용이 필요하며, 강한 암반에서의 록볼트 인발시험의 전단파괴 특성과 조밀한 지반에서의 전단파괴 특성이 유사한 것으로 나타났다.
- (2) 터널의 록볼트 인발시험은 하중만이 아닌 변위량도 동시에 고려하여야 하며, 여기서 변위량은 볼트헤드의 이동량과 볼트의 탄성 변형량을 합한 전체 변위량을 적용해야 한다.
- (3) 철도 터널의 굴착 패턴 2, 3정도 보통이상의 강한 암반(RMR 분류 II~III 등급)의 경우, 록볼트 인발의 사전 시험시에는 합부 판정의 기준을 항복하중( $f_y$ ) 이상, 전체 변위량 12.5mm 이내로 하고, 하중과 변위를 동시에 만족하여야 한다.
- (4) (3)과 유사한 지반에서 철도 터널의 록볼트 인발 본 시험시에는 록볼트 강재의 탄성한도를 고려하여 인발하중은 설계축력의 80%로 하며, 이 허용인발하중과 이에 대응하는 변위와 비교하여 합부를 판정하여야 한다.

그러나 지반의 특성과 주입재의 특성 등 여러 가지 변수가 작용할 수 있으며, 보다 합리적인 규정을 위해 암반 강성에 따른 세분, 그에 따른 수치해석법과 도해법의 보완 등의 지속적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

“이 논문에 도움을 주신 한국철도기술공사 지반공학부 김종주 차장님과 부설연구소 황인범 부장님께 감사의 말씀을 드립니다.”

## 참고문헌

1. 정해성, 문현구 (1999), “전면접착형 록볼트의 보강효과에 관한 연구”, 한국암반공학회지, Vol.9, No.3, pp.194-203.
2. 건설교통부 (2000), “도로설계편람(I)”, 한국건설기술연구원
3. 김두준 (2003), “토류벽 설계와 계측”, 도서출판 새론, pp.183-187, pp.346-433.
4. 김용필, 정경환, 송용선 (1997), “지반공학 시험법 및 응용”, 세진사.
5. 대한터널협회 (1999), “건설교통부 제정 터널설계기준”, 구미서관.
6. 대한터널협회 (1999), “건설교통부 제정 터널표준시방서”, 구미서관.
7. 철도청 (1999), “철도공사전문시방서(토목편)”
8. 철도청 (2002), “전라선 성산-신풍 간 철도개량건설공사 공사시방서”
9. 편집부 역 (1994), “최신 터널공법총기술”, 과학기술.
10. 한국고속철도건설공단 (1999), “고속철도 노반공사 공사시방서”
11. 한국고속철도건설공단 (2001), “경부고속철도건설사업 터널공사 품질관리 편람”
12. 한국도로공사 (1992), “공사현장 품질관리 실무”
13. 한국도로공사 (2002), “도로설계요령 제4권 터널”, 한국도로교통협회.
14. 한국콘크리트학회 (2004), “2003년도 개정 콘크리트구조설계기준 해설”, 기문당.
15. ASTM(2002), “Standard test method for rock bolt anchor pull test”, ASTM D 4435-84, pp.662-666.
16. ISRM(1982), “Suggest methods for rock bolt testing”, Pergamon Press, pp.163-168.