

터널 유지관리계측의 응력 관리기준치 설정에 관한 연구

우종태

정회원, 경북대학교 건설환경디자인과 교수

A study on the establishment of stress limit values of management monitoring in tunnel

Jong-Tae Woo

Dept. of Construction and Environmental Design, Kyungbuk University, Professor

ABSTRACT: This study analyzed a monitoring data, based on the initial limit values of monitoring in subway, of concrete lining stress and reinforcement stress. The data is obtained from 7 sections of the Seoul metropolitan subway line No 6, 7, and 9 in about 5 years. Also, a research is performed to set up the limit values of management monitoring, which will be applied to management monitoring in tunnel, through comparing the limit values of overseas management monitoring data and that of domestic management monitoring data. And the result obtained from comparison shows that the safety phase is 60% of allowable stress, the attention phase is 80% of allowable stress and the precision analysis phase is 100% of allowable stress. Also, we presented a method of management monitoring by the absolute value which can be easily applied in practical affairs.

Keywords: Management monitoring in tunnel, Stress limit values, Concrete lining stress, Concrete lining reinforcement stress

초 록: 본 논문은 터널 유지관리계측의 응력 관리기준치 설정에 대한 연구로 계측 초기에 설정된 지하철계측 초기 관리기준치를 토대로 서울지하철 6,7,9호선 7개 대표단면의 콘크리트라이닝 응력, 콘크리트라이닝 철근응력, 콘크리트라이닝 내공변위에 대하여 약 5년에 걸친 계측 실적을 분석하고, 국외 계측관리기준을 비교하여 향후 터널 유지관리계측에 적용할 응력 계측관리기준치 설정에 대한 연구를 수행하였다. 연구결과 향후에 터널에 적용할 유지관리계측의 응력 관리기준치는 국내적용 계측관리기준치와 국외적용 계측관리기준치 분석결과를 비교하여 안전단계는 허용응력의 60%, 주의단계는 허용응력의 80%, 정밀분석단계는 허용응력의 100%로 실무에서 쉽게 적용할 수 있는 절대치에 의한 계측관리방법을 제안하였다.

주요어: 터널 유지관리계측, 응력 관리기준치, 콘크리트라이닝 응력, 콘크리트라이닝 철근응력

1. 서론

최근 들어 건설계측기술은 IT산업 및 정보통신기술의 급격한 발달로 거의 모든 건설현장에서 적용이 일반화 되고 있다. 또한 사회기반시설의 효율적인 안전감시 및 유지관리를 위해 지하철, 도시철도, 일반 및 고속철도, 도로, 전력구, 통신구, 공동구 등의 터널

구조물에 유지관리 계측시스템의 도입과 적용이 증가되고 있다((Lee et. al., 2000; Woo, 2009).

일반적으로 건설공사에서의 계측은 공사계측과 유지관리계측으로 구분하고 있다. 공사계측은 주로 설계의 불확정성 요소 등을 보완하고 설계의 타당성을 규명함으로써 시공의 안전성을 확인하고 경제성을 확보할 목적으로 수행된다.

유지관리계측은 공사계측 단계에서 계측치가 대부분 수렴된 상태를 확인하고, 목적물인 철근 콘크리트 구조물이 시공되므로 이미 완공된 구조물에 대하여

*Corresponding author: Jong-Tae Woo
E-mail: jtwoo@kbu.ac.kr

Received December 3, 2014; Revised December 29, 2014;
Accepted January 12, 2015

공용 중에 지속적으로 구조물의 안전성 확인과 최적의 유지관리가 되도록 객관적이고 연속적인 공학적 판단자료를 제공하여 효율적이고 경제적인 구조물 유지관리에 기여하는 것을 목적으로 수행되고 있다 (Woo, 2013; 2014).

본 논문에서는 NATM터널에 적용할 유지관리계측의 응력 관리기준치 설정 제안에 대한 연구로 계측 초기에 설정된 지하철 계측관리기준치를 토대로 유지관리계측이 체계적으로 수행된 서울지하철 6, 7, 9호선의 7개 대표단면의 콘크리트라이닝 응력, 콘크리트라이닝 철근응력, 콘크리트라이닝 내공변위에 대하여 약 5년에 걸친 계측 실적을 분석한 결과와 국외에서 시행된 계측결과를 종합적으로 분석하여 향후에 적용할 터널 유지관리계측의 응력 관리기준치 설정 제안에 대한 연구로 터널 유지관리계측 기술발전에 기여하고자 한다.

2. 국내 터널 유지관리계측의 응력 관리 기준치

2.1 응력 관리기준치 설정 일반사항

터널의 유지관리계측 관리기준치는 지반의 거동상태, 인접구조물의 안전한계 및 지반의 역학적인 조건에 의하여 결정되므로 기준적인 수치를 명확히 제시하기 어려우며, 따라서 현장여건을 고려하여 결정하여야 한다(Woo and Lee, 2012).

응력계측기인 경우 계측기 설치 시점의 하중상태를

고려한 구조해석 및 실내시험을 수행하여 초기치를 산정하고, 이를 근거로 한 합리적인 관리기준치 설정이 필요하다. 부재의 응력 산출을 위한 변형률계의 경우에는 초기치 확인 후 관리기준치를 설정하며, 초기치 설정방법을 구체적으로 제시하여야 한다. 따라서 터널 유지관리계측의 응력 관리기준치를 설정할 경우 실내시험, 이론 및 수치해석, 초기 시공실적 및 유사한 조건을 갖는 터널의 계측결과 등을 종합적으로 고려해서 설정하여야 한다.

2.2 응력 관리기준치 설정방법

터널 유지관리계측의 응력 관리기준치 설정방법으로는 완공 전에 설정된 관리기준치와 현장계측치를 비교 검토하여 그 시점에서의 안전성을 확인하는 방법으로 이 방법의 장점은 계측결과에 대해서 즉시 대응할 수 있다는 점에서 일반적인 안전관리 방법으로 사용되고 있으며, 단점으로는 설계치에 대한 관리기준의 결정방법과 현장 계측치가 관리기준치를 초과했을 때의 대응방법이다(Woo and Lee, 2008a). 또 하나의 절대치 관리방법은 안전율의 개념을 도입한 것으로 사전에 각 계측 항목별로 안전율을 설정하고 설계시에 사용한 추정치 및 계측 결과치의 비와 안전율을 비교하여 안전성을 예측하는 방법이다. 절대치에 의한 관리방법은 계측결과에 신속하게 대처할 수 있어 현장에서 안전관리를 위해 많이 사용되고 있으며, 경험이 적은 기술자라도 안전성 판단이 어느 정도 가능하다는 장점이 있다(Woo and Lee, 2008b).

서울지하철 2기 1단계 5, 7, 8호선 NATM터널 유지

Table 1. Limit values of management monitoring on Seoul subway 2nd 1-Step 5,7,8 line

Item	Limit values of management monitoring
Concrete lining stress	<ul style="list-style-type: none"> allowable bending compressive stress = 6.7 Mpa ($0.4f_{ck} \times 80\% = 0.4 \times 21 \times 0.8$) bending tensile stress = 2.9 Mpa ($0.63\sqrt{f_{ck}} = 0.63 \times \sqrt{21}$)
Concrete lining reinforcement stress	<ul style="list-style-type: none"> allowable stress=120 Mpa ($0.5f_y \times 80\% = 0.5 \times 300 \times 0.8$)

Table 2. Management operating guidelines of management monitoring on Seoul subway 2nd 2-Step 6,7 line

Table 2.1 Concrete lining stress

Management criteria	Safety judgment	Countermeasures
0 ~ 15% changed for limit value + allowable stress	Safety	-
15 ~ 30% changed for limit value + allowable stress	Caution	administrator should be carefully observed and checking the measurement monitoring in related site.
over 30% changed for limit value + allowable stress	Precision analysis	administrator should be require a qualified technician to precisely analyze corresponding cross-section

Table 2.2 Concrete lining reinforcement stress

Management criteria	Safety judgment	Countermeasures
0 ~ 15% changed for limit value + allowable stress	Safety	-
15 ~ 30% changed for limit value + allowable stress	Caution	administrator should be carefully observed and checking the measurement monitoring in related site.
over 30% changed for limit value + allowable stress	Precision analysis	administrator should be require a qualified technician to precisely analyze corresponding cross-section

관리계측에 1997년부터 적용하고 있는 절대치에 의한 관리기준은 Table 1과 같으며, 2000년 서울지하철 2기 2단계 6, 7호선 유지관리계측 매립식 계측기 초기치 3회 측정결과를 유지관리 통합운영 프로그램에 적용시키기 위해 각 계측기에 대한 분석업무를 수행하여 관리자가 상황실 컴퓨터에 실시간으로 입력된 계측값을 모니터링하는 과정에서 이상현상 발생시 이에 대해 대응 할 수 있도록 한 각 계측기별 관리운용 지침은 Table 2와 같다.

2.3 국내 터널 유지관리계측의 응력 관리기준치 검토

NATM터널 유지관리계측에 의한 콘크리트라이닝 및 철근 응력 분석결과 콘크리트라이닝 시공 후 약 45개월 이후에 수렴하는 것으로 분석되어 터널 유지관리계측 측정빈도 및 계측 분석 시기를 결정하는데 적용할 수 있으며(Woo and Lee, 2002), 이 결과를 참고하여 계측기간이 5년 이상인 터널을 대상으로 하였다.

서울지하철 6, 7, 9호선 터널 유지관리계측 초기에 설정된 관리기준치인 Table 1을 토대로 5년에 걸친

계측 실적을 분석하여 향후에 적용할 터널 유지관리 계측의 응력 관리기준치 설정에 대한 연구를 위해 계측항목별로 구분하여 분석한 내용은 다음과 같다.

2.3.1 콘크리트라이닝 응력 관리기준치 검토

서울지하철 6, 7, 9호선 7개 단면의 콘크리트라이닝 휨압축응력의 수렴치와 관리기준치 분석결과를 Table 3과 같고, 서울지하철 7, 9호선 3개 단면의 콘크리트라이닝 휨인장응력의 수렴치와 관리기준치 분석 결과는 Table 4와 같다.

콘크리트 휨인장강도인 파괴계수($f_t=0.63\sqrt{f_{ck}}$)는 콘크리트의 균열발생응력이며, 콘크리트가 받을 수 있는 최대인장응력을 의미하고, 압축강도의 10~15%의 크기이다(Shim, 2012).

콘크리트라이닝의 설계기준강도 $f_{ck}=21$ MPa인 경우 휨인장강도는 $f_t=0.63\sqrt{f_{ck}}=0.63\sqrt{21}=2.9$ MPa이며, 압축강도 21 MPa $\times(0.1\sim0.15)=2.10\sim3.15$ MPa로 평균값 2.63 MPa와 큰 차이는 없다. 무근콘크리트의 확대기초와 벽체에서 허용휨인장응력 $f_{ta}=0.13\sqrt{f_{ck}}=0.13\sqrt{21}=0.60$ MPa로 휨인장강도 $f_t=0.63\sqrt{21}=2.9$ MPa의 21%로 작은값을 나타내고 있다.

Table 3. Analysis result of bending compressive stress of concrete lining measured in the average value and limit values (unit: MPa)

Monitoring section location		North bound lane			South bound lane			Concrete lining bending compressive stress
		Left	Crown	Right	Left	Crown	Right	
6-05 construction section (single track tunnel)	15K250	0.59	1.55	1.66	0.00	3.51	0.00	$f_{ca}=0.4f_{ck}=0.4 \times 21=8.4$ Wall max ave= $2.37=0.28f_{ca}$ Crown max ave= $2.36=0.28f_{ca}$
	15K485	4.15	0.45	1.32	0.00	1.22	1.38	
6-05 construction section average		2.37	1.00	1.48	0.00	2.36	0.69	
7-24 construction section (2-arch station tunnel)	41K400	0.84	0.12	-	-	2.57	1.28	$f_{ca}=0.4f_{ck}=0.4 \times 21=8.4$ Wall max ave= $1.77=0.21f_{ca}$ Crown max ave= $3.08=0.37f_{ca}$
	42K230	1.23	1.66	-	-	3.08	1.16	
	42K250	1.97	0.76	-	-	3.61	2.86	
7-24 construction section average		1.35	0.85	-	-	3.08	1.77	
9-03 construction section (double track tunnel)	5K100	-	2.84	2.78	3.50	4.32	-	$f_{ca}=0.4f_{ck}=0.4 \times 24=9.6$ Wall max ave= $4.07=0.42f_{ca}$ Crown max ave= $4.91=0.51f_{ca}$
	5K300	-	3.61	3.57	4.64	5.49	-	
9-03 construction section average		-	3.23	3.27	4.07	4.91	-	
Total average		1.86	1.69	2.38	2.04	3.45	1.23	-

- Concrete lining bending compressive stress measurement max average value = $(0.28+0.37+0.51)f_{ca} \div 3=0.39f_{ca}$ (application on limit value)
- Calculated the limit value applying concrete lining bending compressive stress guidelines
 - 1) Safety : 15% for limit value+allowable stress, $0.15f_{ca}+0.39f_{ca}=0.54f_{ca}$
 - 2) Caution : 30% for limit value+allowable stress, $0.30f_{ca}+0.39f_{ca}=0.69f_{ca}$
 - 3) Precision analysis : over 30% for limit value+allowable stress, $0.30f_{ca}+0.39f_{ca}=\text{Over } 0.69f_{ca}$

Table 4. Analysis result of bending tensile stress of concrete lining measured in the average value and limit values (unit: MPa)

Monitoring section location		North bound lane	South bound lane	Concrete lining bending tensile stress
		Crown	Side	
7-24 construction section (2-arch station tunnel)	41K400	1.44	1.27	$f_t=0.63 \sqrt{f_{ck}}=0.63 \sqrt{21}=2.89$ Crown max ave= $1.44=0.50f_t$
	7-24 construction section average		1.44	
9-03 construction section (double track tunnel)	5K100	0.68	1.19	
	5K300	0.60	1.07	
9-03 construction section average		0.64	1.13	
Total average		1.04	1.20	-

- Concrete lining bending tensile stress measurement max average value : = $(0.50+0.37)f_t \div 2=0.44f_t$ (application on limit value)
- Calculated the limit value applying concrete lining bending tensile stress guidelines
 - 1) Safety : 15% for limit value+allowable stress, $0.15f_t+0.44f_t=0.59f_t$
 - 2) Caution : 35% for limit value+allowable stress, $0.30f_t+0.44f_t=0.74f_t$
 - 3) Precision analysis : over 30% for limit value+allowable stress, $0.30f_t+0.44f_t=\text{Over } 0.74f_t$

2.3.2 콘크리트라이닝 철근응력 관리기준치 검토

서울지하철 6, 9호선 4개 단면의 콘크리트라이닝 철근응력의 수렴치와 관리기준치 분석결과는 Table 5와 같다.

2.3.3 터널 유지관리계획의 응력 관리기준치 분석 결과

앞에서 검토된 콘크리트라이닝 응력 및 철근응력의 계획 관리기준치 분석결과를 종합하면 Table 6과 같다.

Table 5. Analysis result of reinforcement stress of concrete lining measured in the average value and limit values (unit: MPa)

Monitoring section location		North bound lane			South bound lane			Reinforcement stress of concrete lining
		Left	Crown	Right	Left	Crown	Right	
6-05 construction section (single line parallel tunnel)	15K250	-	-	83.82	26.10	-15.66	22.44	$f_{sa}=0.5f_y=0.5 \times 300=150$ Wall max ave= $46.45=0.31f_y$ Crown max ave= $25.20=0.17f_y$
	15K485	10.70	-25.20	9.07	15.96	-10.59	30.10	
6-05 construction section average		10.70	-25.20	46.45	21.03	-13.13	26.27	
9-03 construction section (double track tunnel)	5K100	-	36.02	67.26	28.81	13.19	-	$f_{sa}=0.5f_y=0.5 \times 300=150$ Wall max ave= $66.80=0.45f_y$ Crown max ave= $50.50=0.34f_y$
	5K300	-	64.98	66.34	38.28	17.64	-	
9-03 construction section average		-	50.50	66.80	33.55	15.37	-	
Total average		10.70	37.85	56.63	27.29	14.25	26.27	-

(Remark : (-) tensile stress, compressive and tensile stress is equal)

- Reinforcement stress of concrete lining measured in the max average value :
 $= (0.31+0.45)f_y \div 2 = 0.38f_y$ (application on limit value)
- Calculated the limit value applying concrete reinforcement stress guidelines (SD300 limit value)
 - 1) Safety : 15% for limit value+allowable stress, $0.15f_y+0.38f_y=0.53f_y$
 - 2) Caution : 30% for limit value+allowable stress, $0.30f_y+0.38f_y=0.68f_y$
 - 3) Precision analysis : over 30% for limit value+allowable stress, $0.30f_y+0.38f_y=$ Over 0.68 f_y
 - 4) Allowable stresses are as follows by steel type
 SD300 : $f_y=300$ MPa, $f_{sa}=0.50f_y=150$ MPa
 SD350 : $f_y=350$ MPa, $f_{sa}=0.50f_y=175$ MPa
 SD400 : $f_y=400$ MPa, $f_{sa}=0.45f_y=180$ MPa

Table 6. Result of limit values on management monitoring

Item	Limit values of monitoring management			Remark
	Safety	Caution	Precision analysis	
Concrete lining bending compressive stress	$0.54f_{ca}$	$0.69f_{ca}$	over $0.69f_{ca}$	• allowable bending compressive stress ($f_{ca}=0.4f_{ck}$)
Concrete lining bending tensile stress	$0.59f_r$	$0.74f_r$	over $0.74f_r$	• bending tensile stress (coefficient of rupture) ($f_r=0.63 \sqrt{f_{ck}}$)
Reinforcement stress of concrete lining	$0.53f_{sa}$	$0.68f_{sa}$	over $0.68f_{sa}$	• allowable stress ($f_{sa}=0.5f_y$)
Total average	0.55	0.70	over 0.70	-

Table 7. Limit values of monitoring management on the construction of retaining earth

Item	Criteria	Decision method			
		Limit values of monitoring management (safety factor)	Danger	Caution	Safety
Wall stress	compressive and tensile stresses	$F = \frac{\text{allowable tensile (compressive) stress}}{\text{measurement by tensile (compressive) stress}}$	$F < 0.8$	$0.8 \leq F \leq 1.2$	$F > 1.2$
	bending stress and allowable shear stress	$F = \frac{\text{allowable bending (shear) stress}}{\text{measurement by bending (shear) stress}}$	$F < 0.8$	$0.8 \leq F \leq 1.2$	$F > 1.2$
Strut axial force	allowable axial force of brace	$F = \frac{\text{allowable axial force of bracing}}{\text{measurement by bending (shear) stress}}$	$F < 0.8$	$0.8 \leq F \leq 1.2$	$F > 1.2$

2.3.4 흙막이 공사의 계측 관리기준치

안전율 개념을 이용한 국내 건설현장에서 흙막이 공사의 벽체 응력 및 버팀보 축력 계측관리기준치는 Table 7과 같고(Lee and Woo, 2003), 본 연구에서는 터널 유지관리계측의 응력관리기준치를 절대치에 의한 관리방법 제안에 참고하였다.

3. 국외 터널 유지관리계측의 응력 관리 기준치 분석

3.1 Channel tunnel (Euro tunnel)

Channel tunnel은 총연장 50.45 km, 해저깊이 평균 45 m, 횡단시간 35분, 단면크기는 주 터널 직경 7.6 m, 서비스 터널 직경 4.8 m, 세그먼트 콘크리트라이닝

의 설계기준강도는 28 MPa, 건설기간은 1987년에서 1994년까지 7년이 소요되었다(Moore et al., 1996).

Channel tunnel 7개 단면의 세그먼트 콘크리트라이닝 휨압축응력의 수렴치를 허용휨압축응력과 비교한 결과는 Table 8과 같고, 천정부 평균은 $0.41f_{ca}$, 인버트부 평균은 $0.75f_{ca}$, 전체 평균은 $0.58f_{ca}$ 로 나타났다(Curtis et al., 1996; Eurotunnel, 1991).

천정부 평균 $0.41f_{ca}$ 는 서울지하철 6, 7, 9호선 7개 단면의 콘크리트라이닝 휨압축응력의 수렴치와 관리기준치 분석결과인 Table 3의 $0.39f_{ca}$ 와 유사하게 나타났다.

또한 Channel tunnel의 전체 평균은 $0.58f_{ca}$ 는 Table 3의 안전단계 $0.54f_{ca}$ 와 유사한 값을 보여 콘크리트라이닝은 안전한 상태로 판단할 수 있다.

Table 8. Analysis result of bending compressive stress of precast concrete lining measured in the average value and limit values (unit: MPa)

Monitoring section location/ convergence date		Crown			Invert axis			Remark
		Data	f_{ca}	Ratio(%)	Data	f_{ca}	Ratio(%)	
1	08.05.1993	3.8	11.2	33.9	7.6	11.2	67.9	<ul style="list-style-type: none"> • precast concrete lining $f_{ca}=0.4f_{ck}=0.4 \times 28=11.2$ MPa • Crown max ave.=4.6 MPa=$0.41f_{ca}$ • Invert max ave.=8.4 MPa=$0.75f_{ca}$ • Total max ave.=($0.41+0.75$)$f_{ca} \div 2=0.58f_{ca}$
2	08.05.1993	3.8	11.2	33.9	5.9	11.2	52.7	
3	08.05.1993	3.7	11.2	33.0	8.4	11.2	75.0	
4	08.05.1993	4.5	11.2	40.2	8.0	11.2	71.4	
5	08.05.1993	3.7	11.2	33.0	6.6	11.2	58.9	
13	05.05.1993	6.1	11.2	54.5	10.9	11.2	97.3	
14	05.05.1993	6.7	11.2	59.8	11.2	11.2	100.0	
Total average		4.6	11.2	41.1	8.4	11.2	75.0	

Table 9. Limit value of future applied management monitoring

Item	Limit value of future applied management monitoring			Remark
	Safety	Caution	Precision analysis	
Concrete lining bending compressive stress	$0.60 \times f_{ca}$	$0.80 \times f_{ca}$	$1.0 \times f_{ca}$	allowable bending compressive stress $f_{ca} = 0.4 \times f_{ck}$
Concrete lining bending Tensile stress	$0.6 \times f_r$	$0.80 \times f_r$	$1.0 \times f_r$	bending tensile stress (coefficient of rupture) $f_r = 0.63 \sqrt{f_{ck}}$
Reinforcement stress of concrete lining	$0.60 \times f_{sa}$	$0.80 \times f_{sa}$	$1.0 \times f_{sa}$	allowable stress f_{sa} $f_{sa} = 0.5 \times f_y$

4. 향후 제안할 터널 유지관리계측의 응력 관리기준치

앞에서 검토한 국내적용 계측관리 기준치와 국외적용 계측관리 기준치 분석결과를 비교하여 안전단계는 허용응력의 60%, 주의단계는 허용응력의 80%, 정밀 분석단계는 허용응력의 100%로 향후 제안할 유지관리계측의 응력 관리기준치를 설정하면 Table 9와 같다.

위의 계측관리 기준치 적용시 각각의 계측항목 뿐만 아니라 전체 항목의 변화추이와 상관관계, 그리고 터널의 변상여부 등을 종합적으로 고려하여 터널의 안전성 여부를 판정하여야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 논문은 서울지하철 5, 6, 7호선 유지관리계측 초기에 설정된 계측관리기준치를 토대로 서울지하철 6, 7, 9호선 7개 대표단면의 콘크리트 라이닝응력, 콘크리트 라이닝 철근응력에 대하여 5년에 걸친 계측 실적을 분석하고, 국외 계측관리기준을 비교하여 향후 터널 유지관리계측의 응력 관리기준치에 대한 연구를 수행하였으며, 연구결과는 다음과 같다.

1. 계측관리 기준치 설정방법에서 절대치에 의한 관리방법은 안전율의 개념을 도입한 것으로 사전에 각 계측 항목별로 안전율을 설정하고, 설계시에

사용한 추정치 및 계측 결과치의 비와 안전율을 비교하여 안전성을 예측하는 방법으로 계측결과에 신속하게 대처할 수 있어 현장에서 안전관리를 위해 많이 사용되고 있어 향후 터널 유지관리계측의 응력 관리기준치를 절대치에 의한 관리방법으로 제안하였다.

2. 서울지하철 6, 7, 9호선 7개 대표단면의 콘크리트 라이닝 응력과 콘크리트라이닝 철근응력에 대하여 최근 약 5년에 걸친 유지관리 계측항목의 계측 관리기준치 분석결과를 종합하면 아래 표와 같다.
3. Channel tunnel 7개 단면의 세그먼트 콘크리트라이닝 휨압축응력의 수렴치를 허용휨압축응력과 비교한 결과 천정부 평균은 $0.41f_{ca}$, 인버트부 평균은 $0.75f_{ca}$, 전체 평균은 $0.58f_{ca}$ 로 나타났으며, 천정부 평균 $0.41f_{ca}$ 는 서울지하철 6, 7, 9호선 7개 단면의 콘크리트라이닝 휨압축응력의 수렴치와 관리기준치 분석결과인 $0.39f_{ca}$ 와 유사하게 나타났다.
4. 향후 적용을 제안한 유지관리계측의 응력 관리기준치는 국내적용 계측관리 기준치와 국외적용 계측관리 기준치 분석결과를 비교하여 안전단계는 허용응력의 60%, 주의단계는 허용응력의 80%, 정밀분석단계는 허용응력의 100%로 절대치에 의한 계측관리방법을 도입하였으며, 계측관리 기준치 적용시 각각의 계측항목 뿐만 아니라 전체 항목의 변화추이와 상관관계, 그리고 터널의 변상여부 등

Table 10. Result of limit values on management monitoring

Item	Limit values of monitoring management			Remark
	Safety	Caution	Precision analysis	
Concrete lining bending compressive stress	$0.54f_{ca}$	$0.69f_{ca}$	over $0.69f_{ca}$	• allowable bending compressive stress ($f_{ca}=0.4f_{ck}$)
Concrete lining bending tensile stress	$0.59f_t$	$0.74f_t$	over $0.74f_t$	• bending tensile stress (coefficient of rupture) ($f_t=0.63\sqrt{f_{ck}}$)
Reinforcement stress of concrete lining	$0.53f_{sa}$	$0.68f_{sa}$	over $0.68f_{sa}$	• allowable stress ($f_{sa}=0.5f_y$)
Total average	0.55	0.70	over 0.70	-

을 종합적으로 고려하여 터널의 안전성 여부를 판정하여야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 일반연구자지원사업 기본연구지원사업(유형Ⅱ, 과제번호 2011-0009456)으로 “건설 및 터널 계측 기술의 공학적 응용을 위한 핵심 요소기술 개발”의 2014년 4차년도 연구과제(과제번호 2014010049)인 “터널계측의 응력 관리 기준치 설정 연구”의 일부 내용이며, 이에 감사를 드립니다.

References

1. Curtis, D.J., Spaul, J.A. (1996), “Monitoring of the UK tunnel lining, engineering geology of the channel tunnel”, pp. 277-286.
2. Eurotunnel, Transmanche-Link. (1991), “Monitoring of tunnel lining second annual report”, Gage technique limited.
3. Lee, D.H., Han, I.Y., Kim, G.S., Jin, S.W. (2000), “Case studies on applications of convergence measurement system at the stages of tunnel construction and maintenance”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 2, No. 3, pp. 59-69.
4. Lee, S., Woo, J.T. (2003), “Design and construction of retaining earth structure”, Yeamonsa, pp. 292-295.
5. Moore, D.R., Crease, A. (1996), “Tunnel Instrumentation, Engineering Geology of the Channel Tunnel”, pp. 287-294.
6. Shim, J.S. (2012), “Reinforced concrete structural design”, Goomi Publishing Co., pp. 29-32.
7. Woo, J.T., Lee, S. (2002), “A stress of tunnel lining for maintenance monitoring”, Journal of Korean Concrete Association, Vol. 14, No. 3, pp. 341-348.
8. Woo, J.T., Lee, R.C. (2008a), “Construction monitoring engineering”, Goomi Publishing Co., pp. 760-763.
9. Woo, J.T., Lee, R.C. (2008b), “Construction monitoring engineering”, Goomi Publishing Co.,
10. Woo, J.T. (2009), “A study on comparison of a ground water influx quantity in Seoul subway tunnel”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 11, No. 4, pp. 353-359.
11. Woo, J.T., Lee, K.I. (2012), “A study on establishment of measurement and analysis frequency of maintenance monitoring in tunnel”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 14, No. 2, pp. 117-129.
12. Woo, J.T. (2013), “A study on estimation of the total loss and damage ratio of maintenance monitoring sensor of subway tunnel”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 15, No. 1, pp. 25-31.
13. Woo, J.T. (2014), “A study on the estimation of the optimal number of monitoring points in single-track tunnel lining with the inverse analysis program”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 16, No. 1, pp. 1-11.