

원형수직구 콘크리트라이닝 단면설계도표 개발

신영완^{1*}, 김성수², 김영진³

Development of design charts for concrete lining in a circular shaft

Young-Wan Shin, Sung-Soo Kim, Young-Jin Kim

Abstract Recently, requirement of a long subsea tunnel has increased due to political, economical and social demands such as saving of distribution costs, improvement of traffic convenience, and regional development. Road and railroad tunnel need a shaft for construction and ventilation because of increase of tunnel length. Shaft diameter, lining sectional thickness and rebar quantity have to be determined for design of concrete lining in the shaft. A lot of structural analyses are needed for optimal design of concrete lining considering shaft diameter, load conditions and ground conditions. Design charts are proposed by structural analyses for various conditions in this study. A sectional thickness and rebar quantity can be easily determined using the proposed design charts.

Keywords: Shaft, lining, ununiform load ratio, lining design chart, working stress design method, ultimate strength design method

요지 최근에 물류비 절감, 교통 편의성 개선, 지역발전 등 정치, 경제, 사회적 요구에 따라 장대 해저터널 건설의 필요성이 증가하고 있다. 또한, 도심지에 건설되는 도로 및 철도터널에서도 터널의 장대화에 따라 공사용 및 환기용 수직구의 설치가 필수적이다. 수직구 굴착 후 설치되는 콘크리트 라이닝의 설계시 결정해야할 요소는 직경, 단면두께, 소요철근량 등이다. 이러한 수직구 직경, 하중조건, 지반조건을 고려하여 최적의 라이닝 단면설계를 위해서는 많은 구조검토가 필요하다. 본 연구에서는 이러한 다양한 조건에 대하여 구조해석을 수행하여 라이닝 단면설계도표를 제시하였다. 제안된 도표를 이용하여 간편하게 규모 및 하중조건에 따른 라이닝 단면두께 및 소요철근량 산정이 가능하다.

주요어: 수직구, 라이닝, 편하중비, 단면설계도표, 허용응력설계법, 강도설계법

1. 서 론

최근 물류비 절감, 교통 편의성 개선, 지역발전 등 정치, 경제, 사회적 요구에 따라 장대 해저터널 건설의 필요성이 증가하고 있다. 또한, 이러한 해저터널 뿐만 아니라 도심지에 건설되는 도로나 지하철 터널에서도 터널의 장대화에 따라 공사용 및 환기용 수직구의 설치 필수적이다. 수직구는 일반적으로 원형단면으로 계획되나 원형단면에 대한 설계개념이 설계자에 따라 다양한 것이 현실이다. 원형단면으로 굴착함에 따라 기대되는 아칭효과와 지반조건 및 지형조건에 따라 작용이 예상되는 편하중에 대한 고려의 기준정립이 필요하다. 또한, 상세설계 전 단계에서 수직구의 직경, 작용하중 및 편하중을 고려하여 개략적인 콘크리트라이닝의 두께와 보강

철근량을 계산할 수 있는 도표의 필요성도 크다.

기존에 수직구의 콘크리트라이닝 단면설계를 위해 제안된 방법 들은 대부분 무근콘크리트에 대한 단면두께 산정식이며 일부 도표를 제안했지만 이 역시 무근콘크리트에 대한 것이다. Ostrowski(1972)는 삼축응력상태에서의 수직구 직경, 콘크리트 강도에 따른 콘크리트라이닝 단면두께 산정도표를 제안하였다. Roesner 등(1983)은 작용하중, 콘크리트 강도, 수직구 직경을 고려하여 무근콘크리트 라이닝의 단면두께 산정도표를 제안하였다. 이 외에도 콘크리트라이닝을 탄성 또는 탄소성 재료로 고려하여 무근조건에서의 단면두께 산정식 들이 다수 제안되었지만 모두 편하중의 영향은 고려하지 않았다.

본 연구에서는 수직구의 직경, 작용하중 및 편하중을 다양하게 고려하여 무근콘크리트 두께 및 철근콘크리트 라이닝의 두께와 보강철근량을 계산할 수 있는 도표를 제안하였다.

¹정회원 (주)하경엔지니어링 터널지반부 상무

²정회원 (주)하경엔지니어링 터널지반부 과장

³정회원 (주)하경엔지니어링 터널지반부 사원

*교신저자: 신영완 (E-mail: ywshin@hakyong.net)

2. 원형수직구 라이닝 단면두께 산정방법

서론에서 언급한 바와 같이 지금까지 제안된 다양한 무근콘크리트 라이닝의 단면두께 산정방법이 있다. 수식에 의한 방법을 여러 사람이 제안하였고, Ostrowski (1972)는 표를 제시하였으며, Roesner 등(1983)은 수식과 도표를 제안하였다.

2.1 이론식에 의한 방법

지금까지 이론식에 의하여 무근콘크리트라이닝의 단면두께를 산정하는 다양한 방법이 제안되었다. 그 중에서도 가장 대표적인 방법에는 후벽원통이론(thick wall cylindrical theory)에 기초한 Lamé(1852)식과 Huber 식(Mcintosh engineering, 2003)이 있다.

균등한 반경방향 하중을 받는 콘크리트 라이닝은 접선방향의 내부 압축응력을 받게 되는데, Lamé 식은 수직구 심도가 얇아 하중이 작거나 빠른 속도로 가해지면 콘크리트는 탄성거동을 하는 것으로 간주하여 라이닝 내면에 가까운 응력은 가장 크고 점차 외면으로 갈수록 감소하는 것으로 고려하였다.

$$t = r \left[\left(\frac{\frac{\sigma_{ck}}{F}}{\frac{\sigma_{ck}}{F} - 2P} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (1)$$

여기서, t : 라이닝 두께(cm)

P : 라이닝 작용하중(MPa)

F : 안전율(2~3)

σ_{ck} : 콘크리트 설계기준강도(MPa)

$\frac{\sigma_{ck}}{F}$: 콘크리트 허용응력(MPa)

Huber는 수직구 심도가 깊어 하중이 크거나 천천히 작용한다면, 콘크리트는 소성거동을 하고 응력은 콘크리트 두께 전체적으로 재분배된다고 간주하였다. 이러한 소성 또는 점탄성을 고려하기 위한 Roesner 등(1983)의 여러 공식이 제안되었지만 Huber 식(Mcintosh engineering, 2003)이 가장 잘 알려져 있다.

$$t = r \left[\left(\frac{\frac{\sigma_{ck}}{F}}{\frac{\sigma_{ck}}{F} - \sqrt{3} \cdot P} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (2)$$

위의 두 식 중 탄성거동에 근거한 Lamé의 식이 안전측이다(Mcintosh Engineering, 2003). 이러한 수식에 의한 방법은 복잡하지는 않지만 직접 일일이 계산을 수행해야 하므로 계획단계에서 간단히 적용하기에는 다소 불편한 점이 있다.

2.2 Ostrowski 방법

Ostrowski(1972)는 수직구 건설의 경험과 암반발파에서 변형에너지가 일정하다는 원리를 기초로하여 암반 내의 응력상태에 따라 산축응력조건과 일축응력조건에 대하여 안전율 3을 도입하여 무근콘크리트 라이닝 단면

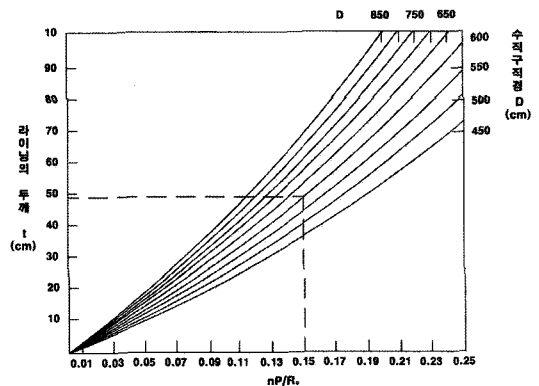


그림 1. 콘크리트라이닝 단면두께 산정도표(Roesner 등, 1983)

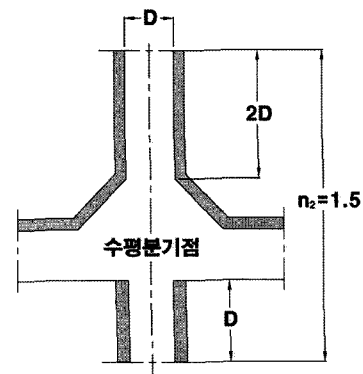


그림 2. 수평분기점 개요도(Roesner 등, 1983)

표 1. 일축응력조건에서의 콘크리트 라이닝의 두께

작용하중(MPa)		0.7	1.4	2.1	2.8	3.5	4.2
직경(m)	콘크리트강도(MPa)	라이닝 두께(cm) 안전율 : 3					
4.27	35.2	15	31	50	72	99	130
	42.2	15	25	40	57	76	99
	49.2	15	21	34	47	62	79
	21.1	29	65	113	177		
	28.1	22	47	79	118	168	
4.88	35.2	17	35	57	83	113	149
	42.2	17	29	46	65	87	113
	49.2	17	24	38	53	71	90
	21.1	32	73	126	199		
	28.1	24	54	89	133	189	
5.49	35.2	19	40	64	93	127	167
	42.2	18	32	52	73	98	126
	49.2	18	27	43	60	80	102
	21.1	36	81	141			
	28.1	27	59	99	148		
6.10	35.2	21	44	71	99	141	
	42.2	21	36	57	81	109	
	49.2	21	30	48	67	89	
	21.1	39	89	155			
	28.1	30	65	109	162		
6.71	35.2	23	49	78	113	155	
	42.2	23	39	63	89	120	
	49.2	23	33	53	74	98	

표 2. 허용응력계수 n의 결정

기호	응력계수의 종류 및 내용	크 기	적용조건
n_0	지중응력의 영향 고려시	현지응력의 계측치로 함	$\sigma_h/\sigma_v > 1$ 이면 적용
n_1	수직구 직경 D의 영향을 고려시	$n_1 = \frac{1}{2} \sqrt[3]{D+1}$	그림 2 참조
n_2	수직구의 교차점(Station)의 영향	$n_2 = 1.5$	그림 2 참조
n_3	지층의 경사 x° 의 영향을 고려시	$x < 30^\circ$ 면 $n_3 = 1$ $x > 30^\circ$ 면 $n_3 = 1.25$	용수없는 암반 및 점성토 지반에 적용함
n_4	두께 h인 연약지층의 영향을 고려시	$h > 1.3m$ 면 $n_4 = 1$ $0.8 < h < 1.3m$ 면 $n_4 = 0.7$ $h < 0.8m$ 면 $n_4 = 0.3$	암반내 임계심도 $H_{critical}$ 계산시 적용함
n_5	라이닝 내로 용수 침투의 영향 고려	방수라이닝 이면 $n_5 = 1$ 그라우팅 하면 $n_5 = 0.1$ 배수 하면 $n_5 = 0.1 \sim 0.2$ 1차라이닝 하면 $n_5 = 0$	용수압(湧水壓) 계산시 적용 *여러 경우에 해당되면 해당계수를 상호 곱함

두께 산정도표를 제시하였다. 일축응력조건이 삼축응력 조건에 비해 단면두께가 크게 산정되며 표 1은 일축응력 조건에서의 도표이다. Ostrowski의 도표는 현재 가장 많이 적용되는 직경 10 m 내외의 두께산정이 곤란하며 편하중의 영향과 철근보강을 고려하지 않았다.

2.3 Roesner 방법

Roesner 등(1983)은 암반분류법인 RMR법이나 Q 분류법을 이용하여 암반등급을 분류한 후 주동응력조건에 대한 지반하중산정방법을 제안하였고 더불어 허용응력 보정계수를 도입하여 콘크리트 라이닝 단면두께 산정식 및 도표를 다음과 같이 제안하였다.

$$t = r \left[\left(\frac{\frac{\sigma_{ck}}{F}}{\frac{\sigma_{ck}}{F} - \sqrt{3} \cdot n \cdot p} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad (1)$$

- 여기서, t : 라이닝 두께(cm)
n : 라이닝 허용응력계수(표 2참조)
P : 라이닝 작용하중(MPa)
F : 안전율(2~3)
 σ_{ck} : 콘크리트 설계기준강도(MPa)
 $\frac{\sigma_{ck}}{F}$: 콘크리트 허용응력(=R_c, MPa)

Roesner의 도표 역시 Ostrowski 표와 마찬가지로 현재 가장 많이 적용되는 직경 10 m 내외의 두께산정이 곤란하다. 또한, 철근보강을 고려하지 않아 과도한 단면 두께를 산정하는 문제가 있다.

따라서, 본 연구에서는 지반의 불균질성 및 지형의 비대칭에 따라 작용이 예상되는 편하중과 다양한 수직구의 직경 및 지반조건을 고려하여 구조계산을 수행함으로써, 개략적인 콘크리트라이닝의 두께와 보강철근량을 계산할 수 있는 도표를 제안하였다.

3. 구조 검토

그림 3은 수직구 콘크리트라이닝의 단면설계 흐름도이다. 수직구 굴착을 위한 반입기자재의 크기, 설치될 설비의 배치 및 작업공간, 소요환기단면적, 지반조건 등

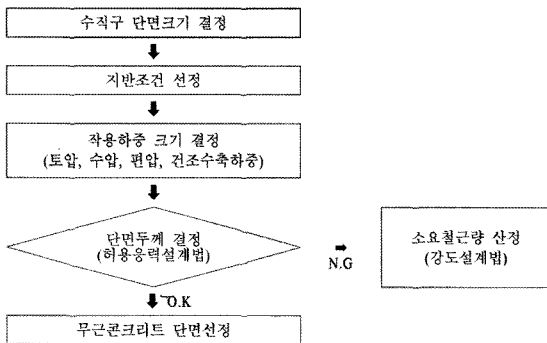


그림 3. 수직구 콘크리트라이닝 설계 흐름도

을 종합적으로 고려하여 먼저 크기를 결정한다. 다음에 지반 및 지하수 조건에 따른 작용하중을 결정하고 이론식 또는 구조계산을 통하여 무근콘크리트에 대한 단면 두께를 산정한다. 이 때 과도한 두께가 산정되면 적정 철근보강을 계획하여 단면두께를 축소 조정하게 된다.

본 연구에서는 그림 3의 절차에 따라 직경 6~14 m인 수직구의 다양한 조건에 대한 구조계산을 통하여 콘크리트라이닝 설계도표를 작성하였다. 수직구 크기는 5가지, 단면두께는 4가지, 지반조건은 토사, 연암, 경암의 3가지, 편하중비 3가지, 기타 하중조건은 깊이에 따른 하중 크기를 달리하여 토사지반 5가지와 암반지반 6가지를 고려하였다. 토사지반은 총 300가지 경우, 암반지반은 총 360가지 경우에 대하여 현재 가장 일반적으로 적용되는 범-스프링 모델을 이용한 구조검토를 수행하였다. 구조계산에는 범용구조해석프로그램인 MIDAS/CIVIL을 사용하였다.

3.1 규모 및 지반 조건

원형수직구 콘크리트라이닝 단면설계도표 작성을 위한 구조검토시 원형수직구 직경은 6, 8, 10, 12, 14 m의 5가지와 라이닝 단면두께는 30, 50, 70, 90 cm의 4가지 경우를 선정하였다.

수직구가 설치되는 지반조건은 지반 특성상 상층부는 토사지반 하층부는 연암 및 경암의 암반지반에 설치되는 경우가 일반적이므로 토사, 연암, 경암의 3가지 경우를 고려하였다. 구조검토에 사용된 지반특성값은 표 3과 같이 국내에서 일반적으로 적용하고 있는 대표적인 값을 선정하였다.

3.2 콘크리트 재료특성 및 하중조건

라이닝은 무근 및 철근콘크리트를 고려하였으며 콘크리트 및 철근의 재료특성값은 콘크리트구조설계기준(2007)에서 제시한 값을 표 4와 같이 적용하였다.

원형수직구 라이닝에 작용하는 하중은 표 5와 같이 자중, 지반하중, 수압, 편하중, 콘크리트 건조수축하중 등을 고려하였다. 해석조건의 일반화를 위하여 계절적 영향에 의한 내외면 온도차는 고려하지 않았다.

철근콘크리트라이닝으로 계획할 때 보강철근량 산정을 위한 강도설계법 적용시의 하중조합은 표 6과 같이 선정하였다. 철근량 검토시 2가지 조건과 인장철근의 설

표 3. 지반조건

구 분	단위중량(kN/m ³)	점착력(kPa)	내부마찰각(°)	변형계수(MPa)	포아송비(ν)
토 사	19	5	30	30	0.35
연 압(암반등급 IV)	24	200	35	2,000	0.25
경 압(암반등급 II)	25	1,500	37	10,000	0.23

표 4. 콘크리트 재료특성

구 분	단위중량(kN/m ³)	재료강도(MPa)	탄성계수(MPa)
무근콘크리트 라이닝	23.5	24	27,000
철근콘크리트 라이닝	25.0		
철 근	78.5	300	200,000

표 5. 작용하중 및 경계 조건

구 분	적용하중	비 고
자 중	•무근(철근)콘크리트 자중 적용	•무근:23.5kN/m ³ , 철근:25.0kN/m ³
지반하중 및 수압	•토사구간(0~50m) •암반구간(0~150m)	• $P_h = P_i + P_w$ ∴ P_i = 지반압, P_w = 수압
편하중	• $\Delta P_h = \text{편하중비} \times P_h$	•편하중비 = 0%, 10%, 20%
건조수축하중	•콘크리트 건조수축변형에 의해 발생하는 변위하중 적용	•-15℃의 온도하중
경계조건	•지반스프링 $K_s = E_s/R \times L$ (Duddeck & Erdmann, 1982)	• E_s =주변지반의 탄성계수 • R =콘크리트 라이닝 반경 • L =부재길이

표 6. 하중조합

구 분		자 중	수평하중	편도압	건조수축하중
철근량 검토	U1	1.20	1.60	1.60	-
	U2	1.20	1.60	1.60	1.20
사용성 검토	W1	1.00	1.00	1.00	-
	W2	1.00	1.00	1.00	1.00

치간격 산정을 위한 사용성 검토 시 2가지 조건을 고려하였다.

3.3 해석 모델

원형단면 구조부재의 구조해석은 다각형 라멘구조로 모델링하여 수행하며 균등하중과 편하중을 동시에 적용하여 해석을 실시한다. 균등하중과 편하중을 각각 고려하여 구조해석을 수행한 후 계산된 단면력을 합해서 설계를 하는 경우도 있다.

라이닝 단면을 계산하는 방법은 관용계산법, 빔-스프링 모델, 수치해석법이 있는데 주로 빔-스프링 모델이 사용된다. 빔-스프링 모델의 경우에도 전주지반스프링 모델, 전 축압해석용 부분지반스프링 모델, 축압분리해석용 부분지반스프링 모델, 수평지반스프링 모델, 전 축압해석용 비인장 지반스프링 모델, 축압분리해석용 비인장 지반스프링 모델 등 다양한 방법이 있다(Motoi Iwanami, 2003).

본 연구에서는 원형수직구의 실제거동을 가장 잘 표

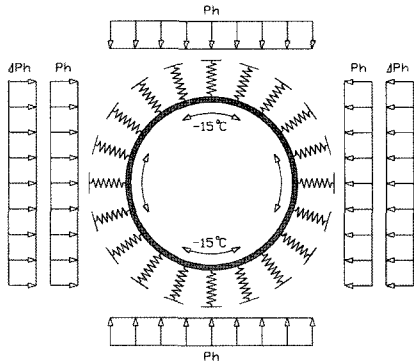


그림 4. 전 축압해석용 비인장 지반스프링 모델의 개요도

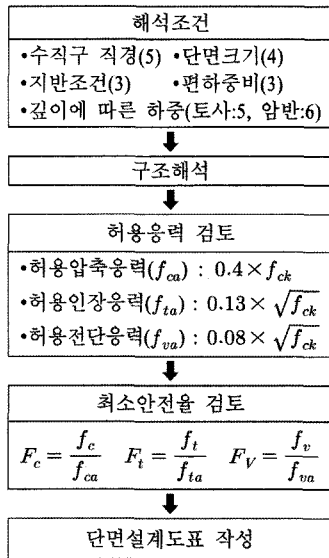
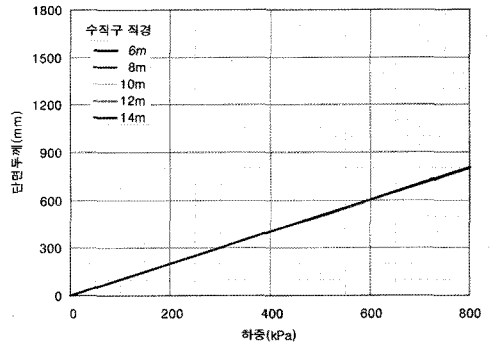


그림 5. 무근콘크리트 라이닝 단면설계도표 작성 순서도

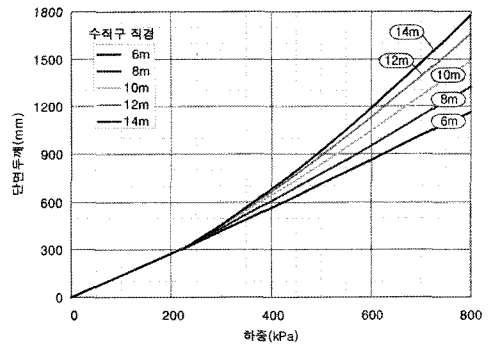
현하는 그림 4와 같은 전 축압해석용 비인장 지반스프링 모델을 적용하였다. 전 축압해석용 비인장 지반스프링 모델은 주변지반을 반경방향으로 변형하는 탄성스프링으로 모델링하는 것은 전주지반스프링 모델과 같으나 스프링에 인장력이 발생하는 경우에는 저항하지 않는 것으로 고려하는 차이점이 있다.

4. 단면설계도표 작성

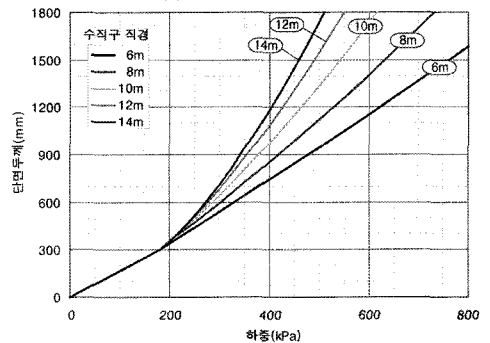
본 연구에서는 앞에서 기술한 바와 같이 다양한 조건



(a) 편하중비 0%



(b) 편하중비 10%



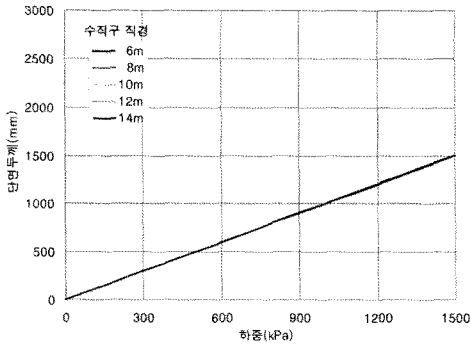
(c) 편하중비 20%

그림 6. 무근콘크리트 라이닝 단면설계도표(토사)

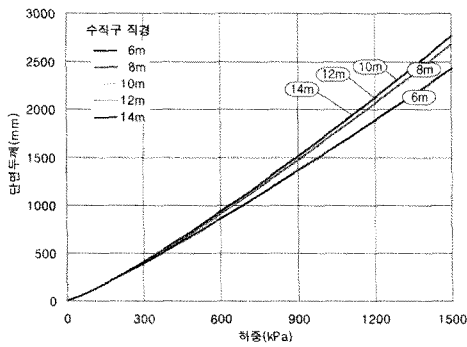
에 대하여 수행한 구조검토를 통하여 간단하게 원형수직구 콘크리트라이닝의 단면두께 및 보강철근량 산정을 위한 도표를 무근콘크리트와 철근콘크리트로 구분하여 제안하였다.

4.1 무근콘크리트 라이닝

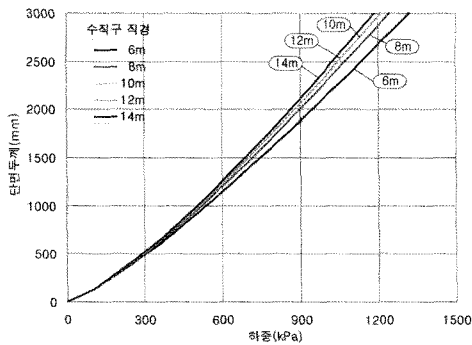
무근콘크리트 라이닝에 대한 단면설계도표 작성절차는 그림 5와 같고, 이러한 절차에 따라 작성된 도표는



(a) 편하중비 0%



(b) 편하중비 10%

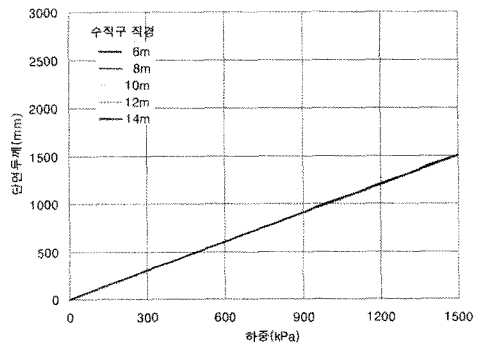


(c) 편하중비 20%

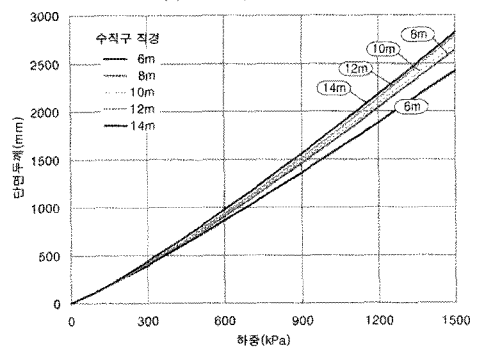
그림 7. 무근콘크리트 라이닝 단면설계도표(연암)

그림 6~8과 같다. 결과적으로 지반변형계수의 차이에 따라 지반조건 별로 도표가 작성되었다. 최소안전율을 검토하는 허용압축응력, 허용인장응력, 허용전단응력에 대한 안전율이 모두 1을 상회하는 경우를 검토하였다. 검토 결과 전단응력이 소요단면두께를 좌우하는 것으로 판단된다.

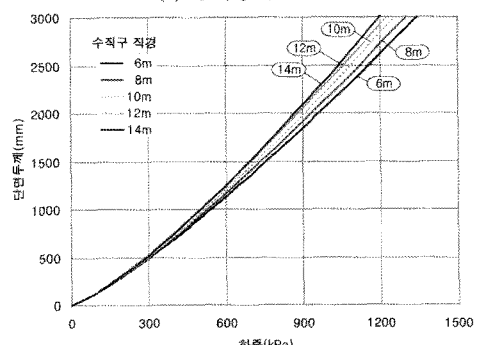
원형수직구 라이닝을 무근콘크리트로 계획할 경우 편하중이 작용하지 않을 때에는 수직구의 직경에 관계없



(a) 편하중비 0%



(b) 편하중비 10%



(c) 편하중비 20%

그림 8. 무근콘크리트 라이닝 단면설계도표(경암)

이 외부하중의 증가에 따른 소요단면두께가 선형적으로 증가하는 한 개의 그래프가 얻어진다. 이는 라이닝 단면이 원형으로 균등하중이 작용할 경우 축대칭 조건이 되어 라이닝에는 압축응력만 작용하기 때문으로 판단된다. 그러나, 편하중이 작용할 경우에는 외부 균등하중 약 200kPa(토사)~300kPa(연·경암)까지는 수직구 직경의 영향은 미소하나, 이보다 큰 균등하중에 대해서는 소요 단면두께가 차이가 발생하였다.

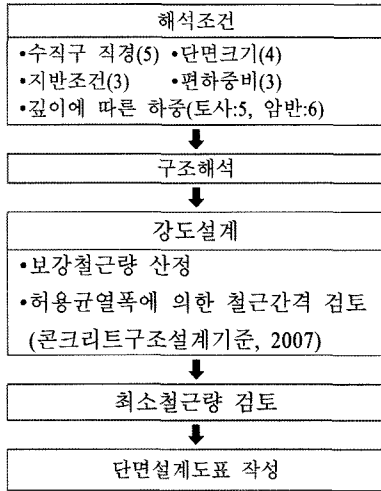


그림 9. 철근콘크리트 라이닝 단면설계도표 작성 순서도

4.2 철근콘크리트 라이닝

철근콘크리트 라이닝에 대한 단면설계도표 작성절차는 그림 9와 같다. 강도설계법을 통한 철근량 산정 후 사용성 검토를 수행하였으며, 콘크리트 설계기준(2007)에서 제시하는 최소철근량을 산정하여 보강철근량은 최소철근량 이상 확보할 수 있도록 검토하였다.

철근콘크리트에 대한 단면설계도표는 지반조건 3가지, 수직구 직경 5가지, 편하중비 3가지에 대하여 총 45개의 도표를 작성하였으나 본 연구에서는 수직구 직경 10 m 인 경우의 9개 도표만 그림 10~12에 수록하였다.

그림 10~12에서 점선부분은 해당단면두께에 대하여 과도한 철근보강이 필요하며 실용적으로 무의미한 구간을 나타내며, 실선구간은 실용적으로 유효한 구간을 나타낸다.

원형수직구 라이닝을 철근콘크리트로 계획할 경우 수직구 직경별로 라이닝 단면두께, 외부 균등하중, 소요철근량의 관계로 도표를 작성할 수 있었다. 제안된 도표를 이용하면 수직구 직경에 대한 라이닝 두께 및 외부 균등하중 별로 소요철근량을 간편하게 산정할 수 있다.

그러나, 본 논문에서는 소요 주철근량에 대한 도표를 제시하였으며 소요 배력철근량 및 소요 전단철근량은 상세구조검토를 통하여 별도로 산정해야 한다.

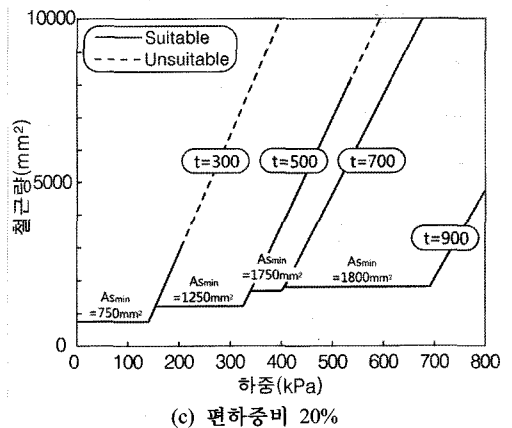
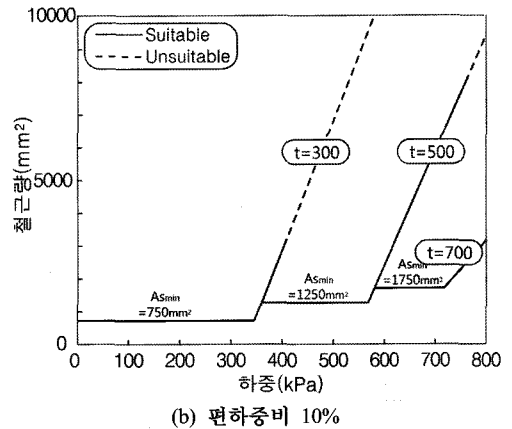
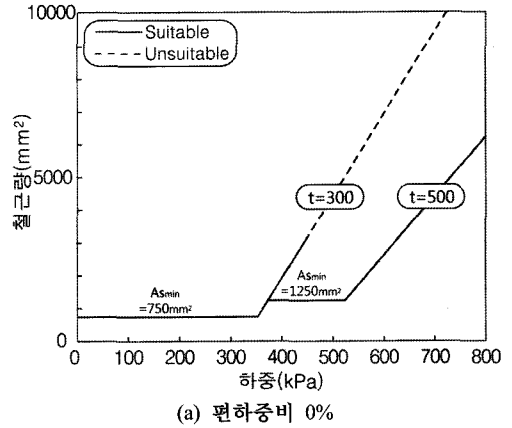
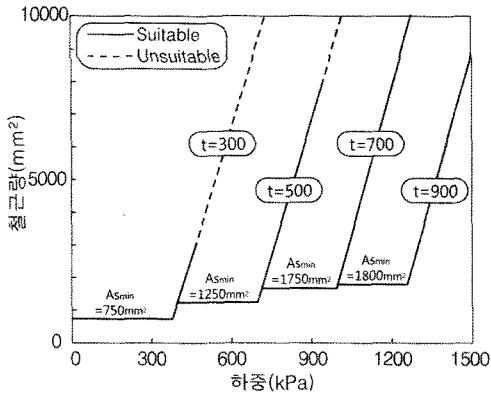


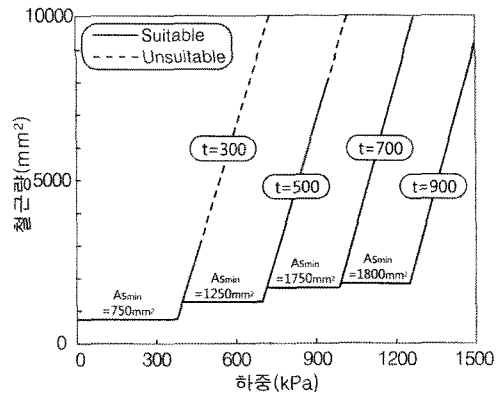
그림 10. 철근콘크리트 라이닝 단면설계도표(토사, 직경 10 m)

4.3 도표이용방법

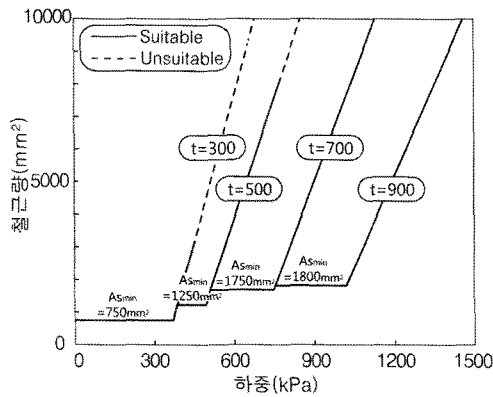
무근콘크리트 라이닝을 외부 균등하중이 300 kPa이고 편하중비는 10%이며, 토사지반에 직경 10 m의 원형 단면으로 계획할 때 필요한 단면두께는 그림 13을 이용



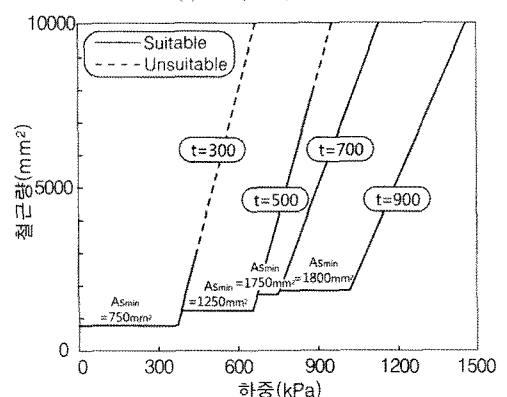
(a) 편하중비 0%



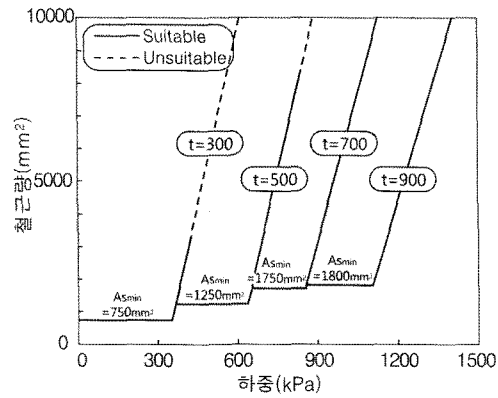
(a) 편하중비 0%



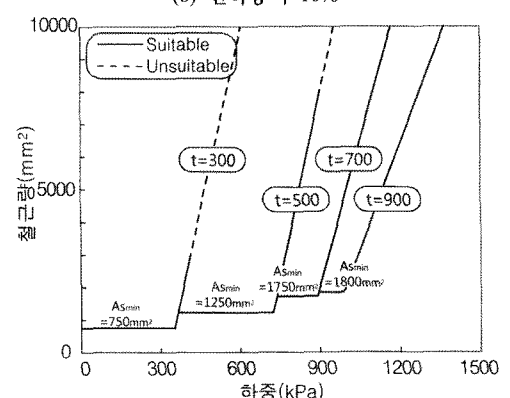
(b) 편하중비 10%



(b) 편하중비 10%



(c) 편하중비 20%



(c) 편하중비 20%

그림 11. 철근콘크리트 라이닝 단면설계도표(연암, 직경 10 m)

그림 12. 철근콘크리트 라이닝 단면설계도표(경암, 직경 10 m)

하여 최소 449 mm 이상을 확보하여야 함을 알 수 있다. 무근콘크리트로 검토한 결과 단면두께가 과다하다고 판단될 경우 그림 14를 이용하여 단면두께에 대한 소요 철근량을 산정할 수 있다. 라이닝 단면두께를 $t=300$ mm로

계획할 경우 소요철근량은 600 mm^2 이상 배근이 필요한 것을 알 수 있다. 그림 14에 의해 산정된 철근량으로 보강시 $D16@250 (A_s=794.4 \text{ mm}^2)$ 또는 $D16@200 (A_s=993.0 \text{ mm}^2)$ 으로 보강을 계획하면 된다. 여기서 산정된 철근량은 주

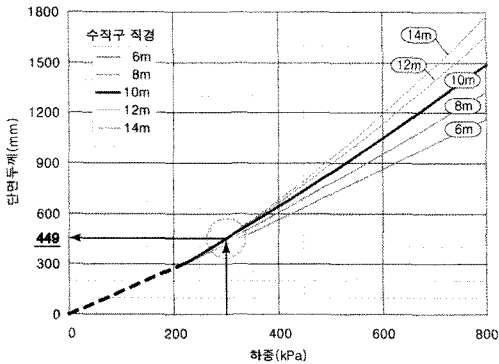


그림 13. 무근콘크리트 단면두께 산정
(토사, 직경 10 m, 편하중비 10%)

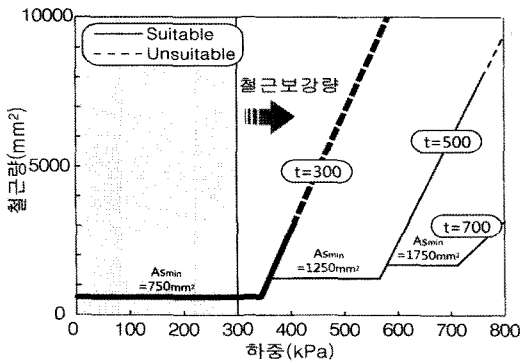


그림 14. 철근콘크리트 단면두께 및 보강철근량 산정
(토사, 직경 10 m, 편하중비 10%)

철근 보강량으로 배력철근 및 전단철근은 별도 상세구조검토를 통하여 산정하여야 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 원형수직구의 직경, 지반조건 및 지하수조건에 따른 작용하중, 지반의 불균질성 또는 지형적 영향에 따른 편하중 등 다양한 조건을 고려한 빔-스프링 모델을 이용한 구조해석을 통하여 무근콘크리트 두께 및 철근콘크리트 라이닝의 두께와 소요철근량을 계산할 수 있는 도표를 제안하였으며 그 결론은 다음과 같다.

1. 원형수직구 라이닝을 무근콘크리트로 계획할 경우 편하중이 작용하지 않을 때에는 수직구의 직경에 관계

없이 외부하중의 증가에 따른 소요단면두께가 선형적으로 증가하는 한 개의 그래프가 얻어진다. 이는 라이닝 단면이 원형으로 균등하중이 작용할 경우 축대칭 조건이 되어 라이닝에는 압축응력만 작용하기 때문으로 판단된다. 그러나, 편하중이 작용할 경우에는 외부 균등하중 약 200kPa(토사)~300kPa(연·경암)까지는 수직구 직경의 영향은 미소하나, 이보다 큰 균등하중에 대해서는 수직구 직경에 따른 소요단면두께가 차이가 발생한다.

2. 원형수직구 라이닝을 철근콘크리트로 계획할 경우 수직구 직경별로 라이닝 단면두께, 외부 균등하중, 소요철근량의 관계로 도표를 작성할 수 있었다. 제안된 도표를 이용하면 수직구 직경에 대한 라이닝 두께 및 외부 균등하중 별로 소요철근량을 간편하게 산정할 수 있다. 그러나, 본 연구에서는 소요 주철근량에 대한 도표를 제시하였으며 소요 배력철근량 및 소요 전단철근량은 상세구조검토를 통하여 별도로 산정해야 한다. 또한, 복잡한 지층조건 및 지진하중의 영향에 대하여는 추가적인 검토가 필요하다.

감사의 글

본 논문은 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2005년도 첨단도시개발사업(과제번호: 05-건설핵심 D10, 과제명: 해저시설물 차폐 기술 개발)에 의하여 연구비가 지원되었습니다.

참고문헌

1. 건설교통부 (2007), “콘크리트구조설계기준”, (사)한국콘크리트학회, pp. 60.
2. Duddeck, H. and Erdmann, J. (1982), “Structural design models for tunnels”, Tunnelling institution of mining and metallurgy, pp. 83-91.
3. Lame, G. (1852), Lecons sur la Theorie Mathematique de l'Elasticite des Corps Solides, Gauthier-Villars, Paris.
4. McIntosh engineering (2003), Hard rock miner's handbook, Canada, pp. 82-91.
5. Motoi Iwanami (2003), Study on retaining wall design for circular deep shaft undergoing lateral pressure during construction, Ph.D. Thesis, Waseda university, Japan, pp.

- 65-83.
6. Ostrowski, W. J. S. (1972), "Design considerations for modern shaft linings", *The Canadian Mining and Metallurgical*, pp. 58-72.
7. Roesner, E. K., Poppen, S. A. G. and Konopka, J. C. (1983),

"Stability during shaft sinking", *1st Int. Conf. on Stability in Underground Mining*, August 16-18, Canada, pp. 182-199.

접수일(2010.2.16), 수정일(2010.3.10), 게재확정일(2010.3.19)