

주방식 지하구조물의 설계 방법 고찰 Part II: 지보 설계 필요 단면 검토

이철호¹ · 허진석² · 현영환³ · 장수호^{4*}

¹정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 전임연구원

²정회원, ㈜에스코컨설턴트, 부장

³정회원, ㈜에스코컨설턴트, 차장

⁴정회원, 한국건설기술연구원 SOC성능연구소 Geo-인프라연구실 연구위원

Consideration on design procedure of room-and-pillar underground structure part II: selection of shape to design supports

Chulho Lee¹, Jinsuk Hur², Younghwan Hyun³, Soo-Ho Chang^{4*}

¹Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Researcher

²ESCO Consultant & Engineers Co., Ltd

³ESCO Consultant & Engineers Co., Ltd

⁴Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Research Fellow

ABSTRACT: In this study, analysis results described in the companion paper was used to determine shapes of room-and-pillar underground structure. To select optimized shapes, structural stability, space applicability and vehicle applicability were considered. In the structural stability step, ratio between strength and stress of the pillar and the critical strain at the roof span were adopted. The space applicability was used to retain the sufficient space of underground structure as its purpose is for human activity. The vehicle applicability was used to consider a radius for rotation of construction equipments in the room-and-pillar underground structure. From the given procedure in this study, proper shapes of rock pillar and room can be selected to design supports at the pillar and roof.

Keywords: Room-and-pillar method, Design, Stability, Support

초 록: 본 연구에서는 동반논문에서 수행한 해석 결과를 이용하여 주방식 지하구조물의 안정성, 공간 활용성, 시공장비 적용성을 검토하였다. 지하구조물 안정성은 강도응력비와 한계변형률 개념을 도입하여 적용하였으며 공간 활용성은 주어진 단면에 대한 공간의 비율로 활용률을 판단하였고 시공장비 적용성은 굴착공사에서 사용되는 대표 장비를 선정하고 장비의 회전반경을 고려하였다. 제안된 일련의 과정을 통해 모두 조건을 만족하는 지하구조물 형상을 선정할 수 있었으며 선정된 단면에 대한 지보재 설계가 가능할 것으로 나타났다.

주요어: 주방식 공법, 설계, 안정성, 지보재

1. 서 론

주방식 지하구조물에서 구조물의 안정성을 고려한 설계법은 채광효율과 관련한 자원개발 분야에서의

설계법과는 성격이 다르다. 공간확보 차원의 주방식 공법에서는 전체 주방식 구조물이 상재하중을 증장기 적으로 지지할 수 있어야 하고 암주 사이에 형성된 공간의 천장부(roof)와 각각의 암주가 안정성을 유지하여 공간 활용에 문제가 없어야 한다(Lee et al., 2013b). 또한, 지하공간은 시공 목적에 맞도록 활용면적을 고려해야하며 요구되는 활용면적에 따라 암주와 룸(room)의 형상은 구조적으로도 안정성을 확보해야 한다.

*Corresponding author: Soo-Ho Chang
E-mail: sooho@kict.re.kr

Received September 2, 2014; Revised September 19, 2014;
Accepted September 22, 2014

기존 채광분야에서 주방식 지하구조의 안정성을 평가하는 방법은 주로 암주의 강도에 기반한 안전율 검토를 기본으로 하고 있다. 비록 지반에 존재하는 균열이나 단층을 계수로 도입한 사례도 있으나(Esterhuizen et al., 2011) 암주의 강도를 산정하는 방법상의 차이이며 상재하중에 대한 암주의 안전율을 산정하는 점은 같다. 그리고 지보재의 경우 필요에 따라 부분적인 슛크리트나 천장부 록볼트를 기존 사례를 통해 경험적으로 사용하고 있다.

주방식 지하구조물 건설시 사용공간의 장기적인 안정성을 확보하기 위해 암주부와 함께 림의 천장부가 연계된 하나의 통합 구조물로서 설계가 이루어져야 한다(Lee et al., 2013a). 따라서, 상재하중과 지하공간 굴착에 따라 전이된 하중에 대해 암주가 충분한 안전율을 가지고 지지하여야 하고, 장기적인 사용공간으로서 림은 낙반, 붕락 등과 같은 파괴거동 뿐만 아니라 과도한 변형에 대해서도 충분히 안정성을 확보하여야 한다. 이처럼 림의 안정성 확보는 암주의 안정성 확보와 함께 매우 중요한 요소로서 설계단계에서부터 시공 중, 사용 중 단계까지 철저히 관리하여 사용자가 안전하게 지하공간을 사용할 수 있게 건설해야 한다.

본 연구에서는 동반논문에서 제시한 지하구조 형상에 대해 지하구조의 안정성을 응력강도비와 한계변형률로 평가하고 허용된 형상에 대해 지하공간 활용성, 구조적 안정성, 시공장비 적용성을 감안하여 지보재 패턴 설계를 위한 검토 방법을 제시하였다. 지하공간의 활용성은 형상과 활용 목적에 따른 활용면적으로 검토하였으며 시공장비 적용성은 기본 장비제원을 사용하여 진출입이 가능한 형상을 검토하였다.

2. 주방식 지하구조 지보 설계 검토 방법

2.1 암주 안정성 평가

본 연구에서는 암주의 안정성을 평가하는 방법으로

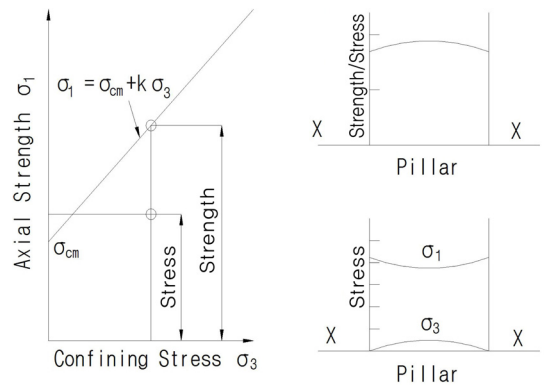


Fig. 1. Relationship between strength and stress of pillar

응력강도비 개념을 사용하였다. Fig. 1은 암주의 강도에 따른 응력상태를 표현한 그림이다. 암주의 응력강도비가 암주 전체의 안전율을 대표하지는 않으나, 진행성 파괴(progressive failure)나 응력 전이(stress transfer progress)를 고려하여 암주 중앙 단면에서의 평균 응력강도비가 1.0 이하일 때 암주 전체가 불안해지는 것이라고 판단할 수 있다(Hoek and Brown, 1980).

응력강도비는 다양한 구속압력(σ_3)에 대하여 소성 파괴의 시작을 다음 Eq.(1)과 같이 표현할 수 있는 Mohr-Coulomb 파괴기준에 의해 규명된다고 가정하면 다음과 같다.

$$\sigma_1 = \sigma_{cm} + k\sigma_3 \quad (1)$$

암반의 일축압축강도 σ_{cm} 은 다음 Eq.(2)와 같이 정의된다.

$$\sigma_{cm} = \frac{2c \cos\phi}{1 - \sin\phi} \quad (2)$$

또한, σ_3 에 대한 σ_1 의 선의 기울기 k 는 다음 Eq.(3)과 같다.

$$k = \frac{1 + \sin\phi}{1 - \sin\phi} \quad (3)$$

여기서, σ_1 은 파괴시의 축방향 응력, σ_3 는 구속응력, c 는 암반의 점착강도, ϕ 는 암반의 마찰각이다.

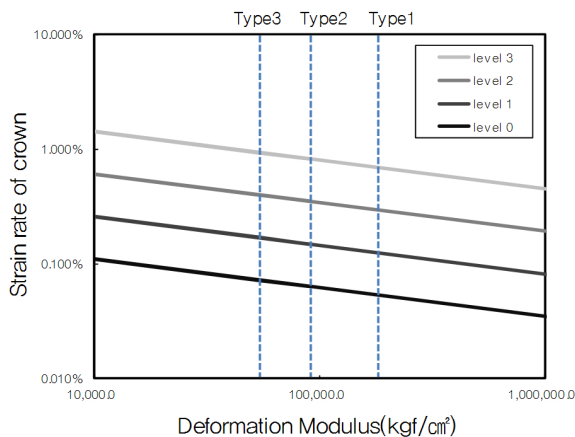
2.2 한계변형률

주방식 공법을 통해 지하공간 굴착시 림 천장부의 응력은 인접한 암주로 전이되고 림 천장부에서는 이완대가 형성된다. 림의 천장부 안정성은 림의 폭과 천장부 지반의 강성, 질리 등의 영향을 받게 된다. 주방식 광산에서는 광산의 붕괴 사례를 통해 천장부 상부의 불연속면 등을 고려하여 연약대와 구분되어 일체거동을 보이는 두께로 천장부 두께를 제시하고 있는데, 천장부의 두께가 1.2 m 이하인 경우에는 대체적으로 보강이 필요했고, 2 m 이상인 경우 안정하게 유지되었다고 보고하였다(Esterhuizen et al., 2011).

본 연구에서는 불연속 연약대를 구분하여 적용하기 곤란하므로 터널현장에서 적용되고 있는 한계변형률 (critical strain) 개념을 도입하여 림의 천장부 안정성을 검토하였다. Sakurai (1982)에 의해 처음 제안된 한계변형률을 적용한 검토 방법은 시공중 터널 굴착에 따른 천단 및 내공 변위와 터널 크기(직경 또는 반경)를 통해 변형률을 산정하고 지반의 한계변형률로 구한 기준치와 비교하여 안정성을 평가하게 된다. 한계변형률은 토질 및 암석 시편에 대한 실내시험의

결과를 토대로 정립된 개념으로 일축압축강도시험 결과인 응력-변형률 관계로부터 산정되며 초기 탄성 영역의 거동특성과 파괴시의 일축압축강도를 이용하여 정의되고, 일반적으로 파괴변형률(ϵ_f)보다는 작은 값을 나타낸다. 여기서 림의 변형률은 림의 천단변위와 림 높이의 비로 표현된다.

한계변형률을 적용하여 림 천장부 안정성을 검토하기 위해서 림 주변지반의 한계변형률 평가가 필요하다. Sakurai (1995, 1997)는 한계변형률-지반변형계수와 한계변형률-일축압축강도에 대해 제안하였는데, 본 연구에서는 지반변형계수에 따른 한계변형률 기준 (Sakurai, 1995)을 이용하여 림 천장부 안정성을 평가하였다. 한계변형률 기준에서 Level I은 지반이 안정 상태에 있지만 이완영역의 발생한계에 달하기 때문에 굴착에 주의를 요하는 단계이고, Level II는 이완영역이 발생하여 추가 지보시공이 이루어져야 하는 단계이며, Level III은 안전의 문제와 시공의 곤란이 예상되어 굴착을 정지하고 굴착방법 혹은 지보공법의 변경을 요하는 단계이다(Korean Tunnelling and Underground Space Association, 2004). 그러나 Level I은 이완영역의 발생한계 도달로 굴착에 주의를 요하는 단계이며 지속적으로 사용자가 생활, 주거, 사무, 창고 등으로 사용해야 하는 주방식 지하공간은 장기적인 안전을 확보가 필요하므로 Level I보다 보수적으로 Level 0을



· Critical strain at each step

-Level 0 : $\log \epsilon_c = -0.25 \log E - 1.96$

-Level I : $\log \epsilon_c = -0.25 \log E - 1.59$

-Level II : $\log \epsilon_c = -0.25 \log E - 1.22$

-Level III : $\log \epsilon_c = -0.25 \log E - 0.85$

※ Level 0 is evaluated from the difference between Level I and Level II (0.37).

Fig. 2. Relationship between critical strain and deformation coefficient (Sakurai, 1995)

제한하고 룸의 변형률이 Level 0 이하가 되는 압주 및 룸 형상비를 검토하였다. Level 0은 하한값(Level I)과 중간값(Level II)의 변형률 차(0.37)를 준용하여 적용하였다. 압주 및 룸 형상비, 지반 조건에 따른 천단부 변형률은 동반논문에서 수행한 수치해석 결과를 이용하였다.

2.3 지하공간 활용성

주방식 지하공간의 적용 위치는 지상공간의 이용한계를 나타내어 3차원적 공간 개발의 필요성이 확대되고 있는 대도시 중심으로 발전할 가능성이 크다. 도심지의 한정된 공간에서 개발되는 지하구조물은 공간 활용이 최적화 되는 구조물 형상비를 고려해야만 한다. 따라서 부지면적에 따른 압주 및 룸 형상비를 고려한 공간 활용면적을 검토하여 최적의 공간 활용이 가능한 압주 및 룸 형상비 검토가 필요하다. 주방식 지하구조의 공간 활용성은 부지면적, 압주 높이, 압주 형상비, 룸 형상비를 고려하여 산정하였으며 지하공간의 활용률은 다음 Fig. 3과 Eq. (4)에서와 같이 정의한다. 여기서 n은 주어진 단면에 대한 압주의 개수이다.

$$\text{Space applicability } (S_a) = \frac{(A \times A) - n(W \times W)}{A \times A} \quad (4)$$

지하공간 활용률 기준 산정을 위해 기존 구조물에 대하여 공간 활용률을 검토한 결과 지상 주거/사무공간에서는 대부분 95%이상의 활용률이 확보 되었으

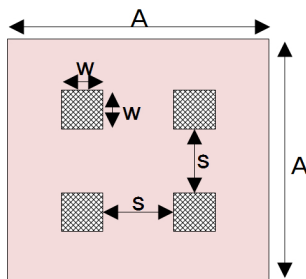


Fig. 3. Schematics of room-and-pillar underground structure

며, 지하구조물(지하철 정거장 등)의 공간 활용률은 90% 정도 확보되는 것으로 나타났다. 본 연구에서는 주방식 지하공간이 장기적으로 사용되며 토피고가 높은 점과 룸의 높이가 높은 공간임을 감안하여 공간 활용률 평가기준을 안전측으로 룸 면적비가 85%이상 확보되는 압주 및 룸 형상비로 검토하였다.

2.4 시공장비의 적용성

주방식 지하구조는 압주 및 룸 형상비에 따라 시공 장비가 매우 다양하게 검토 될 수 있다. 룸 형상비가 클 경우 공사용 차량의 교행성 및 회전반경 등에 영향을 많이 받지 않겠지만 룸 형상비가 작을 경우는 장비 적용에 대한 제약이 많이 따른다. 주방식 지하구조의 형상비에 따른 장비조합 검토가 필요하지만 본 절에서는 지보패턴 검토대상 선정을 위한 검토이므로 여러 시공 장비 중 대표적으로 덤프트럭을 적용하여

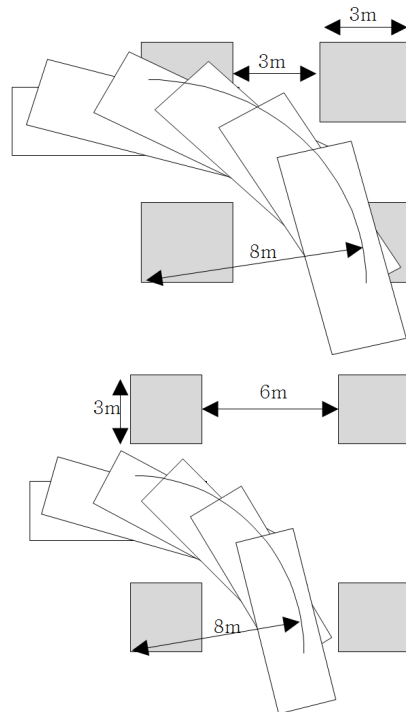


Fig. 4. Concept of vehicle radius for rotating

최소 굴착폭을 검토하였다. 연구에 적용한 덤프트럭은 15ton 트럭을 기준으로 하였으며 전장, 전폭, 전고는 각각 7.7×2.5×3.0 m이고 최소 회전반경은 7.8 m이다. 따라서, 회전반경이 8 m 이상 확보되지 않는 암주와 름 형상비는 설계검토에서 제외하였다. 회전반경 검토에 사용된 덤프트럭의 방향전환 반경 검토 개념은 Fig. 4와 같다.

3. 검토 결과

3.1 암주와 름의 안정성 평가

Fig. 5와 6은 대표적으로 S/H=2.0인 경우와 W/H=1.0인 경우에 지반 조건에 따른 암주의 응력강도비를 나타낸다. Fig. 5에서 나타나듯이 암반의 강도가 증가할수록 응력강도비가 증가한다. 또한 암주의 폭이 증

가할수록 암주가 분담해야 하는 단위면적당 상재하중이 감소하기 때문에 응력강도비는 증가하는 것으로 나타났다. 하지만 암주의 폭이 넓어짐에 따라 응력강도비의 증가폭은 감소하여 수렴하는 경향을 보인다. 름의 폭이 증가함에 따라 암주가 분담해야 하는 단위면적당 상재하중이 증가하기 때문에 응력강도비가 감소하는 것으로 나타났다. 암주의 형상의 경우에서와 유사하게 름의 폭이 증가함에 따라 응력강도비는 감소하지만 일정 수준 이상에서는 감소폭이 수렴하는 경향을 보인다. 따라서, 본 연구에서는 암주 형상비(W/H)가 2.0 이상일 때는 암주의 폭이 지나치게 커지기 때문에 공간 활용성이 불량해지는 형상으로 간주하여 검토 조건에서 제외하였다.

광산분야에서 채광 구조물에서의 암주의 안전율 범위는 1.8~2.0 범위에 있을 때 안전한 것으로 판단한다(Esterhuizen et al., 2011). 하지만 도심지 주방식

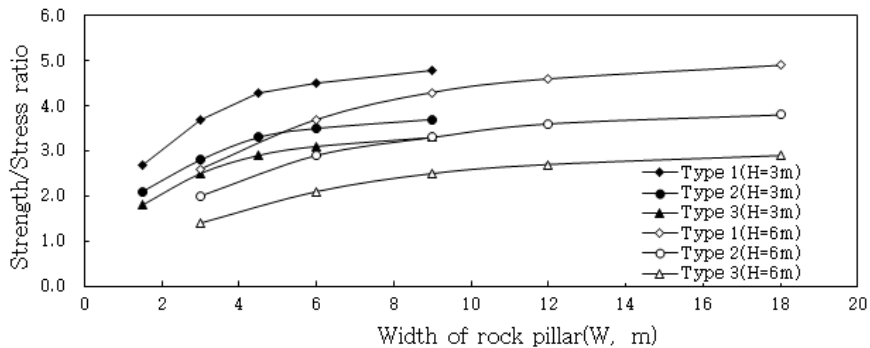


Fig. 5. Safety factors depends on width of rock pillar at S/H=2.0

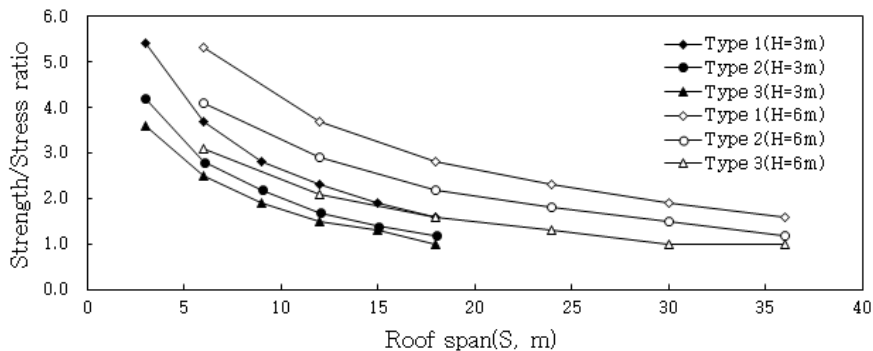


Fig. 6. Safety factors depends on roof span at W/H=1.0

지하구조는 장기적인 안정성을 확보해야하는 지하공간 구조물이기 때문에 채광분야의 안전을 보다 높은 것이 합리적이다. 따라서, 본 연구에서는 압주의 최소 안정율을 2.0을 산정하고 압주의 응력강도비가 2.0 이상이 가능한 압주 및 룸 형상비를 검토 대상으로 산정하였다.

Fig. 7은 룸의 높이가 3.0 m 일 때 변형계수(지반조건)에 따른 변형을 산정 결과를 나타낸다. 주거/사무공간에 대한 한계변형률 검토결과 지반 Type I (E=18,000 MPa)에서는 모든 압주 및 룸 형상비에 대해서 Level 0을 만족하였으며 지반 Type 2 (E=9,000 MPa), 지반 Type 3 (E=5,400 MPa)의 경우 일부 압주 및 룸 형상비에서 Level 0을 초과하는 것으로 나타났다. 검토기준

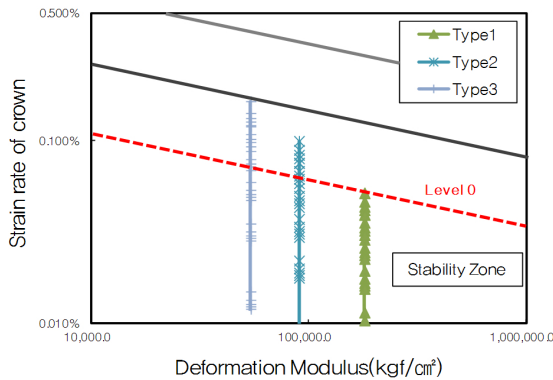


Fig. 7. Strain rate depends on ground conditions and shape of structure at H=3.0 m

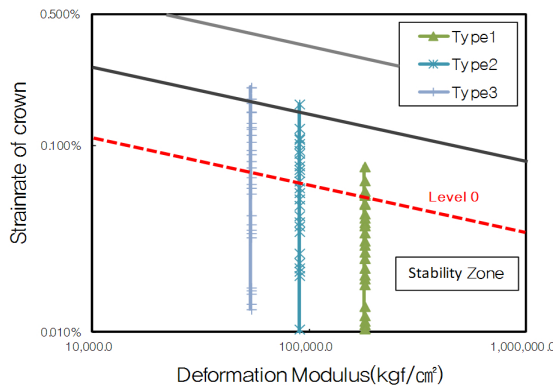


Fig. 8. Strain rate depends on ground conditions and shape of structure at H=6.0 m

으로 사용된 Level 0의 지반 조건에 따른 한계변형률은 지반 Type 1~3에서 각각 0.053, 0.063, 0.072%이며 Sakurai (1995)가 제시한 연구와의 비교를 위해 변형계수의 단위는 kg/cm^2 으로 표기하였다.

Fig. 8은 룸의 높이가 6.0 m 일 때 변형계수(지반조건)에 따른 변형률 산정 결과를 나타낸다. 창고형 공간에 대한 한계변형률 검토결과 모든 지반조건에서 일부 압주 및 룸 형상비에 대해서 Level 0을 초과하는 것으로 나타났다.

압주 및 룸의 형상비에 따른 안전성과 한계변형률 검토조건을 적용한 결과를 대표적으로 주거/사무공간에 대해 Fig. 9에 나타냈다. 여기서 은 압주 응력강도비 2.0 이상으로 양호한 구간이고 은 룸 변형률이 한계변형률 이하인 구간으로 응력강도비와 한계 변형률 범위를 모두 만족하는 압주 및 룸의 형상비를 로 표시하였다. 따라서 안정성을 모두 만족하는 구간만이 설계대상에 포함된다.

	S/H=1.0	S/H=2.0	S/H=3.0	S/H=4.0	S/H=5.0	S/H=6.0
W/H=3.0	6.8/0.004	4.8/0.009	3.8/0.015	3.2/0.022	2.7/0.030	2.4/0.039
W/H=2.0	6.5/0.004	4.5/0.009	3.6/0.016	2.9/0.024	2.5/0.032	2.1/0.042
W/H=1.5	6.1/0.004	4.3/0.010	3.3/0.017	2.7/0.024	2.3/0.033	1.9/0.043
W/H=1.0	5.4/0.004	3.7/0.010	2.8/0.017	2.3/0.026	1.9/0.036	1.6/0.046
W/H=0.5	4.2/0.005	2.7/0.011	2.0/0.019	1.5/0.029	1.2/0.039	1.0/0.052

(a) Type 1 (E=18,000 MPa)

	S/H=1.0	S/H=2.0	S/H=3.0	S/H=4.0	S/H=5.0	S/H=6.0
W/H=3.0	5.2/0.007	3.7/0.018	2.9/0.030	2.4/0.043	2.1/0.058	1.8/0.075
W/H=2.0	5.0/0.008	3.5/0.018	2.7/0.031	2.2/0.045	1.9/0.062	1.6/0.080
W/H=1.5	4.7/0.008	3.3/0.019	2.5/0.032	2.1/0.047	1.7/0.064	1.5/0.083
W/H=1.0	4.2/0.008	2.8/0.020	2.2/0.034	1.7/0.050	1.4/0.068	1.2/0.089
W/H=0.5	3.2/0.009	2.1/0.022	1.5/0.037	1.2/0.055	1.0/0.076	1.0/0.099

(b) Type 2 (E=9,000 MPa)

	S/H=1.0	S/H=2.0	S/H=3.0	S/H=4.0	S/H=5.0	S/H=6.0
W/H=3.0	4.5/0.012	3.3/0.028	2.6/0.047	2.2/0.069	1.8/0.093	1.6/0.120
W/H=2.0	4.3/0.012	3.1/0.029	2.4/0.049	2.0/0.072	1.7/0.098	1.4/0.127
W/H=1.5	4.1/0.013	2.9/0.030	2.2/0.051	1.8/0.075	1.5/0.102	1.3/0.133
W/H=1.0	3.6/0.013	2.4/0.032	1.9/0.054	1.5/0.079	1.3/0.108	1.0/0.142
W/H=0.5	2.9/0.015	1.8/0.035	1.3/0.059	1.0/0.087	1.0/0.121	1.0/0.164

(c) Type 3 (E=5,400 MPa)

Fig. 9. Structural stability at different shape of room and pillar and ground conditions

3.2 지하공간 활용성 및 시공장비 적용성

Fig. 10은 대표적으로 사무/주거공간에서 공사 부지 면적과 압주 및 림 형상비에 따른 공간 활용성을

나타낸다. 부지면적이 100×100 m 이하로 좁은 경우 일부 형상비에서만 85% 공간 활용률을 만족하였다. 부지면적이 200×200 m 이상일 경우 압주 형상비가 낮을수록, 림 형상비가 높을수록 공간 활용률이 증가

	S/H =1.0	S/H =2.0	S/H =3.0	S/H =4.0	S/H =5.0	S/H =6.0
W/H =3.0	33%	59%	79%	42%	51%	59%
W/H =2.0	51%	59%	79%	92%	51%	59%
W/H =1.5	66%	84%	79%	92%	51%	59%
W/H =1.0	66%	84%	79%	92%	51%	59%
W/H =0.5	88%	84%	79%	92%	99%	59%

(a) 50×50 m

	S/H =1.0	S/H =2.0	S/H =3.0	S/H =4.0	S/H =5.0	S/H =6.0
W/H =3.0	47%	66%	70%	84%	70%	79%
W/H =2.0	55%	66%	86%	84%	94%	79%
W/H =1.5	76%	88%	86%	84%	94%	79%
W/H =1.0	76%	88%	86%	84%	94%	79%
W/H =0.5	86%	95%	96%	97%	94%	99%

(c) 100×100 m

	S/H =1.0	S/H =2.0	S/H =3.0	S/H =4.0	S/H =5.0	S/H =6.0
W/H =3.0	44%	62%	76%	77%	80%	88%
W/H =2.0	55%	75%	82%	90%	88%	88%
W/H =1.5	74%	88%	94%	94%	94%	95%
W/H =1.0	74%	88%	94%	94%	94%	95%
W/H =0.5	89%	95%	96%	97%	98%	99%

(e) 300×300 m

	S/H =1.0	S/H =2.0	S/H =3.0	S/H =4.0	S/H =5.0	S/H =6.0
W/H =3.0	44%	64%	74%	81%	85%	89%
W/H =2.0	56%	75%	84%	88%	91%	93%
W/H =1.5	75%	89%	94%	95%	97%	98%
W/H =1.0	75%	89%	94%	95%	97%	98%
W/H =0.5	89%	96%	98%	98%	99%	99%

(g) 1000×1000 m

	S/H =1.0	S/H =2.0	S/H =3.0	S/H =4.0	S/H =5.0	S/H =6.0
W/H =3.0	46%	61%	56%	70%	81%	89%
W/H =2.0	56%	77%	81%	70%	81%	89%
W/H =1.5	74%	89%	81%	94%	81%	89%
W/H =1.0	74%	89%	81%	94%	81%	89%
W/H =0.5	87%	89%	95%	94%	81%	89%

(b) 80×80 m

	S/H =1.0	S/H =2.0	S/H =3.0	S/H =4.0	S/H =5.0	S/H =6.0
W/H =3.0	44%	63%	74%	79%	77%	86%
W/H =2.0	53%	76%	83%	88%	89%	86%
W/H =1.5	74%	86%	89%	95%	97%	96%
W/H =1.0	74%	86%	89%	95%	97%	96%
W/H =0.5	87%	94%	98%	95%	97%	96%

(d) 200×200 m

	S/H =1.0	S/H =2.0	S/H =3.0	S/H =4.0	S/H =5.0	S/H =6.0
W/H =3.0	43%	64%	74%	80%	86%	85%
W/H =2.0	55%	74%	84%	88%	90%	94%
W/H =1.5	75%	88%	93%	96%	96%	97%
W/H =1.0	75%	88%	93%	96%	96%	97%
W/H =0.5	89%	95%	98%	99%	98%	99%

(f) 500×500 m

	S/H =1.0	S/H =2.0	S/H =3.0	S/H =4.0	S/H =5.0	S/H =6.0
W/H =3.0	43%	64%	75%	80%	85%	89%
W/H =2.0	55%	75%	84%	89%	91%	93%
W/H =1.5	75%	88%	93%	96%	97%	97%
W/H =1.0	75%	88%	93%	96%	97%	97%
W/H =0.5	89%	96%	98%	99%	99%	99%

(h) 1100×1100 m

Fig. 10. Space applicability depends on sizes of construction site at H=3.0 m

	S/H=1.0	S/H=2.0	S/H=3.0	S/H=4.0	S/H=5.0	S/H=6.0
W/H=3.0	W=9.0 S=3.0	W=9.0 S=6.0	W=9.0 S=9.0	W=9.0 S=12.0	W=9.0 S=15.0	W=9.0 S=18.0
W/H=2.0	W=6.0 S=3.0	W=6.0 S=6.0	W=6.0 S=9.0	W=6.0 S=12.0	W=6.0 S=15.0	W=6.0 S=18.0
W/H=1.5	W=4.5 S=3.0	W=4.5 S=6.0	W=4.5 S=9.0	W=4.5 S=12.0	W=4.5 S=15.0	W=4.5 S=18.0
W/H=1.0	W=3.0 S=3.0	W=3.0 S=6.0	W=3.0 S=9.0	W=3.0 S=12.0	W=3.0 S=15.0	W=3.0 S=18.0
W/H=0.5	W=1.5 S=3.0	W=1.5 S=6.0	W=1.5 S=9.0	W=1.5 S=12.0	W=1.5 S=15.0	W=1.5 S=18.0

Fig. 11. Vehicle applicability at different shape of pillar and room (H=3.0 m)

하였으며 85%이상의 공간활용률을 만족하는 형상비는 그림에서 나타나듯이 계단식 형태로 수렴하는 경향을 보인다.

암주의 안정성 검토 결과에서 언급하였듯이, 암주 형상비가 상대적으로 큰 경우(2.0~3.0), 암주의 단면적 증가에 비해 안전율 상승효과가 미소하고 단면적 증가에 따른 공간 활용성이 떨어지기 때문에 안전율 상승효과가 크고 암주 단면적이 비교적 작은 암주 형상비인 0.5~1.5 구간을 지하공간 활용성이 양호한 구간으로 판단하였다. 또한, 본 연구에서는 부지면적이 넓어짐에 따라 암주 및 립 형상비에 대해 공간 활용성이 계단형태로 수렴되는 구간으로 1100×1100 m 이상인 부지면적을 대상으로 하였다.

덤프트럭을 대상으로 최소 굴착폭을 검토한 결과 지하공간의 활용목적이 주거/사무공간(H=3.0 m)인 경우 립의 형상비가 S/H=2.0 이상인 구간에서 양호한 것으로 나타났으며 물류창고형 공간(H=6.0 m)인 경우에는 모든 구간에서 시공장비 적용성이 양호한 것으로 나타났다. Fig. 11은 대표적으로 주거/사무형 공간에서 시공장비 적용성을 검토한 결과를 나타낸다.

4. 지보패턴 설계 대상 선정

주방식 지하공간 설계를 위해 검토되어야 할 사항으로 앞서 제시한 지하공간의 구조적 안정성뿐만 아니라 지하공간의 활용성, 시공장비 적용성을 모두 만족

	S/H=1.0	S/H=2.0	S/H=3.0	S/H=4.0	S/H=5.0	S/H=6.0
W/H=3.0	■	■	■	■	■	■
W/H=2.0	■	■	■	■	■	■
W/H=1.5	■	◎	◎	◎	◎	■
W/H=1.0	■	◎	◎	◎	■	■
W/H=0.5	■	◎	◎	■	■	■

(a) Type 1 (E=18,000 MPa)

	S/H=1.0	S/H=2.0	S/H=3.0	S/H=4.0	S/H=5.0	S/H=6.0
W/H=3.0	■	■	■	■	■	■
W/H=2.0	■	■	■	■	■	■
W/H=1.5	■	◎	◎	◎	■	■
W/H=1.0	■	◎	◎	■	■	■
W/H=0.5	■	◎	■	■	■	■

(b) Type 2 (E=9,000 MPa)

	S/H=1.0	S/H=2.0	S/H=3.0	S/H=4.0	S/H=5.0	S/H=6.0
W/H=3.0	■	■	■	■	■	■
W/H=2.0	■	■	■	■	■	■
W/H=1.5	■	◎	◎	■	■	■
W/H=1.0	■	◎	■	■	■	■
W/H=0.5	■	◎	■	■	■	■

(c) Type 3 (E=5,400 MPa)

Fig. 12. Selection of shapes to design supports

하는 단면을 선정하는 것이 중요하다. 검토된 설계요소를 모두 만족하는 설계단면(암주 및 립 형상비)은 대표적으로 주거/사무형 공간에 대해 지반조건에 따라 다음 Fig. 12와 같이 나타났다. 그림에서 ■는 지하공간 활용성을 만족하는 구간, ■는 구조적 안정성을 만족하는 구간, ■는 시공장비 적용성을 만족하는 구간, 그리고 ◎는 모든 설계 검토 조건을 만족하는 구간을 나타낸다. 지반 조건별로 Type 1에서는 W/H=0.5~1.5, S/H=2.0~5.0일 때, Type 2에서는 W/H=0.5~1.5, S/H=2.0~4.0일 때, Type 3에서는 W/H=1.0~1.5, S/H=2.0~4.0일 때 설계에 적합한 형상으로 나타났다.

앞서 기술한 주방식 지하공간에서 지보패턴 설계를 위해 검토된 사항들은 현장 조건에 따라 그 과정을 달리할 수 있을 것이다. 예를들어, 시공 면적과 공간 활용률이 일정수준이상 필요하다면 그에 따른 암주

및 름의 형상도 함께 제한될 것이기 때문이다. 또한, 채광분야에서와 같이 지하공간 굴착에 앞서 현장에서 사용될 장비들을 현장 조건에 맞도록 미리 제작하여 사용할 수 있는 경우 시공장비 적용성에 관한 제한이 상대적으로 유리해질 수 있다. 본 연구에서 제시한 설계 과정을 요약하면 Fig. 13과 같다. 설계자는 정해진 시공 면적하에서 가능한 설계단면들을 설정하고 응력강도비와 한계변형률과 같은 구조적 안정성 검토를 거친뒤 해당되는 형상에 대해 공간 활용성과 시공 장비 적용성을 확인하고 선정된 지하구조 형상에 대해 지보재 설계를 수행해야 할 것이다. 지보재 설계 이후에도 지보재 설치에 따른 구조 안정성 검증을 재수행하여 설계의 타당성을 확보해야 할 것이다.

본 연구에서 제시한 검토 과정은 주방식 지하구조물 공사에 적용될 수 있는 여러 가지 설계 요소 중 일부를 적용한 사례로 볼 수 있다. 지하공간 공사를 수행하면서 고려되는 일반적인 사항으로 환기나 인력의 안전, 장비 운용, 공정 등은 여기에 포함되지 않았

다. 다만, 설계에서 가장 주요하게 다뤄질 수 있고 그로 인해 주방식 지하구조 형상에 제한을 줄 수 있는 요소로서 안정성, 공간 활용성, 시공장비 적용성을 다뤘다. 향후 연구에서는 검토과정을 통해 선정된 단면에 대한 지보재 설계와 이에 대한 재검증 절차도 함께 다뤄져야 할 것이다. 또한, 장비 적용성과 더불어 여러 굴착면에서 한꺼번에 굴착이 진행되는 주방식 공법의 특성상 장비 운용과 공정에 관련한 설계 검토 방안도 모색되어야 할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 동반논문에서 수행한 해석 결과를 바탕으로 주방식 지하구조 형상의 안정성을 평가하고 지하공간의 활용목적에 맞는 공간 활용성, 시공장비 적용성을 검토하였다. 연구 결과는 수치해석 결과에 기반한 내용으로 주방식 지하공간의 검토 과정을 제시하는 연구이다. 연구에서 제시하는 검토과정을 통해 모든 검토항목에 만족하는 설계 형상을 선정할 수 있었으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 응력강도비와 한계변형률 개념을 사용하여 주방식 지하구조에서 형상에 따른 구조 안정성을 검토할 수 있었다. 름의 변형률의 경우, 주어진 단면에 대한 해석 결과를 바탕으로 산정하였으며 암주의 안전율은 가정된 지반 조건을 토대로 산정할 수 있었다. 검토결과 암주의 형상비(W/H)와 름의 형상비(S/H)가 감소할수록 암주 안정성은 증가하였으나 수렴하는 경향을 보였다. 주방식 지하공간은 장기적인 안전을 확보가 필요하므로 본 연구에서는 한계변형률 수준 Level I보다 보수적으로 Level 0을 제안하고 름의 변형률이 Level 0 이하가 되는 암주 및 름 형상비를 검토하였다.
2. 지하공간 활용성은 일반적인 지하공간 활용률을 토대로 공간 활용률 85%이상 확보할 수 있는 형상을 선정하였으며 시공면적이 증가할수록 공간 활

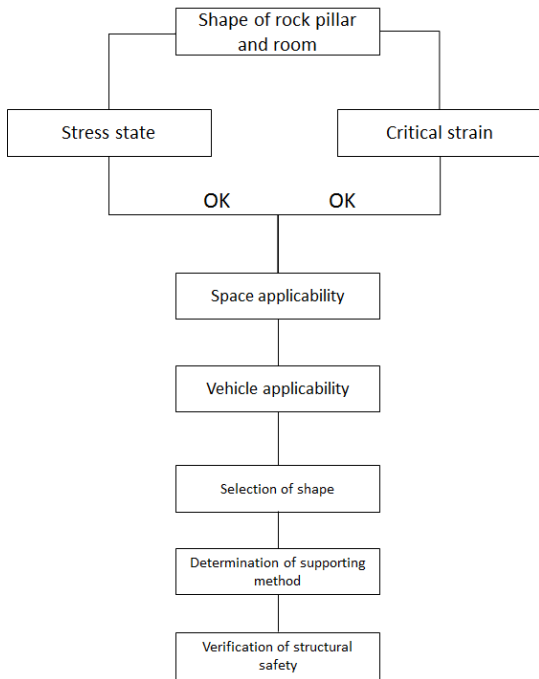


Fig. 13. Suggestion of design procedure for determining supports

- 용률에 만족하는 형상이 계단식으로 배열되었다. 장비 적용성을 검토한 결과 연구에서 주어진 형상에서 주거/사무 공간에 해당하는 조건($H=3.0$ m)에서 림의 형상비(S/H)가 2.0 이상인 부분에서 만족하였으며 창고형 공간에서는 모두 구간에서 조건을 만족하였다.
3. 본 연구에서 검토된 3가지 조건을 모두 충족하는 지하구조의 형상을 제한한 검토과정을 통해 선정할 수 있었으며 선정된 단면에 대해서는 추가적인 지보재 설계를 수행할 수 있을 것으로 판단된다. 지보재 설계 이후에도 지보재 설치에 따른 구조 안정성 검증을 재수행하여 설계의 타당성을 확보해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 주요사업인 “운용 중 공간확장이 가능한 지하 굴착 및 안정화 기술 개발”의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

1. Esterhuizen, G.S., Dolinar, D.R., Ellenberger, J.L., Prosser, L.J. (2011), Pillar and roof span design guidelines for underground stone mines, Department Of Health And Human Services, NIOSH, IC 9526.
2. Lee, C., Chang, S-H, Shin, H-S. (2013a), “A numerical study on evaluation of unsupported pillar strength in the room and pillar method”, J. of Korean Tunn Undergr Sp Assoc, Vol. 15, No. 4, pp. 443-453 (in Korean).
3. Lee, C., Chang, S-H, Shin, H-S. (2013b), “A study on conceptual evaluation of structural stability of room-and-pillar underground space”, J. of Korean Tunn Undergr Sp Assoc, Vol. 15, No. 6, pp. 585-597 (in Korean).
4. Sakurai, S. (1982), “An evaluation technique of displacement measurements in tunnels,” Journal of Geotechnical Engineering, JCSE, Vol. 317, pp. 93-100
5. Sakurai, S., I.Kawashima & T.Otani. (1995), “A criterion for assessing the stability of tunnels.” Eurock'93, Ribeiro e Sousa & Grossmann(eds), pp. 969-973.
6. Sakurai, S. (1997), “Lessons Learned from Field Measurements in Tunnelling,” Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 12, No. 4, pp. 453-460.
7. Hoke, E., Brown E.T. (1980), “Underground Excavation in Rock”, Institution of Mining and metallurgy.
8. Korean Tunnelling and Underground Space Association (2004), tunnel engineering series 1, theory and practice of tunnel, Goomibook Seoul, pp. 345-346 (in Korean)