

지하공간을 이용한 지하 보안시설 설계 시공 고려사항



허중석
서영엔지니어링
지반터널연구팀 상무



박치면
에스코컨설턴트
특수사업본부 전무



정상준
에스코컨설턴트
특수사업본부 이사

1. 개요

한국은 지형학적으로 대립 관계에 있는 강대국들의 사이에 있으며, 세계적으로 유일한 휴전 상태의 전시 대응 국가이다. 이러한 역학적 관계를 고려할 때, 향후 발생 가능한 대 테러, 전쟁발발 및 자연재해 등에 대해서 비상체제를 강화하고 주요자원을 보호하기 위한 지하 보안시설의 설치가 요구된다. 이러한 보안시설은 기존의 토목 구조물에 비해서 중요도가 매우 높은 만큼 설계 및 시공에 있어서도 일반적으로 엄격한 기준이 요구된다. 최근 우리나라에서도 지하공간을 이용한 보안시설에 대한 관심이 증대되고 있으며 현재추진중이거나 기존에 시공된 사례가 있는 것으로 알려져 있다.

본 기술기사를 통해 지하보안시설 개요 및 사례를 소개함으로써 관련 전문기술자들이 지하공간을 이용한 지하 보안시설 설계 시공에 도움이 되고자 한다.

2. 지하 보안시설 설치목적 및 요건

2.1 지하 보안시설 설치요건 및 위치선정 기준

보안시설은 전쟁발발 등 가능한 거의 모든 재해에 대한 경우의 수를 대비하고 최후까지 시설 유지가 가능하도록 설계 되어야 하므로, 다음과 같이 매우 까다로운 설치 기준이 요구 되어 진다.

- 피폭 시를 대비한 방폭 시설
- 전시 및 전후 독자 운영이 가능한 인프라 시설 구축
- 생화학전에 대비한 제독시설
- 필수 인력의 생존을 위한 생명유지 장치
- 이중화된 인프라 구축 (백업 기능 수행)
- 장비 안전을 위한 충분한 내진 설계 (충격 대비 설계)
- EMP(Electro Magnetic Pulse)로부터 내부 전자 장비 보호를 위한 특수 구조물 설계

지하 보안시설의 위치는 소재지에 대한 철저한 보안유지가 가능하도록 항공관찰에 대비한 구조물 위장이 충분하고, 인근지역의 접근통제로 일반인 노출을 최소화할 수 있는 지역으로 선정한다. 또한 군사 주요 시설물로부터 충분한 이격거리 유지하고, 이중 수전 및 이중 통신 회선 확보, 기술지원이 용이한가를 고려하여 위치를 결정한다.

2.2 지하 보안시설의 안정성

지하 보안시설의 안정성은 가용성, 보안성 및 생존성 세 가지 요소를 통해 확보될 수 있다. 첫째, 가용성(Availability)은 보안시설의 고유목적을 충족시키기 위한 기능의 중단 없는 제공 및 24시간 365일 무장애 운영, 비상시를 대비한 상시 백업유지를 의미한다. 둘째, 보안성(Security)은 보안시설의 고유기능과 이를 제공하는 구성요소에 대한 배타적, 단계적 접근 및 통제, 홍수나 지진 등의 자연적 위협으로부터의 보호, 테러나 전쟁과 같은 인재로부터 보호를 말한다. 셋째, 생존성(Survivable)은 보안시설 구성요소의 위해 요소로부터의 보호 및 위해 요소의 배제, 보안 자원 보호 및 가용 인원의 생존성 확보를 의미한다.

3. 해외 지하 보안시설 사례 소개

3.1 Strata Space(www.strataspace.com)

미국 켄터키주 루이즈빌에서 32km 외곽에 위치한 Strata Space는 민간 데이터센터로서 지하면적 약 20,500m²의 규모로 설치되어 있으며, 2개의 출입구와 추가로 3개의 비상구가 설계되어 있다. 지진 및 홍수 등의 자연재해로부터 안전하도록 설계되어 있으며 비상시 24,000kw의 비상 발전기가 가동되도록 설계되어 있다.

3.2 Iron Mountain(www.ironmountain.com)

미국 펜실베이니아주 피츠버그에서 약 90km 외곽에 위치한 Iron Mountain은 원래 석회암 광산이었던 폐광을 개조하여 1954년 국립 저장시설로 활용하다가 1998년 민간에 인수되어 민간 보안시설로 활용하고 있으며, 현재 민간시설들 외에 3개의 정부시설이 상주해 있다. 지하 67미터에 위치하고 있으며 5,570m²의 시설규모를 확보하고 있다. 석회암 광산을 이용했음에도 그림 2와 같이 별다른 인테리어 없이 석회암 벽체를 그대로 구조물 외벽으로 활용하고 있으며, 비교적 쾌적한 집무공간으로 활용하고 있다.



(a) 시설 입구



(b) 시설 내부

〈그림 1〉 Strata Space 내외부 전경



(a) 시설 입구



(b) 내부 집무실



(c) 내부 상황실



(d) 내부 데이터 서버

〈그림 2〉 Iron Mountain 내외부 전경

3.3 Pionen Center

스웨덴 스톡홀름 인근에 위치한 Pionen Center는 냉전시대 핵 피난처로 사용되던 곳을 데이터센터로 사용하도록 전환한 곳이다. 설치 공간은 1,110m²에 이르며 기반암으로부터 30미터 지하에 위치해 있어 수소폭탄 피폭에도 견딜 수 있도록 설계되어 있다. 2007~2008년 리모델링하여 현재에 이르고 있으며, 그림 3에 보인 바와 같이 지하공간임에도 불구하고 자연식재를 이용한 실내조경으로 쾌적한 분위기를 연출하고 있다. 현재 15명의 풀타임 상주인원이 근무하고 있으며, 비상시 전원으로 2개의 Maybach

MTU 디젤엔진(잠수함 엔진)을 채택하고 있다. 또한 1.5MW의 서버 냉각 시스템을 적용하고 있다.

3.4 기타 보안센터 사례

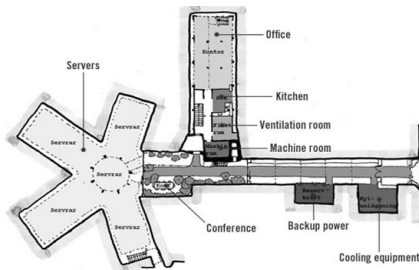
앞 절에서 소개된 사례 이외에도 지하보안시설물 설치 사례는 매우 많으며, 주요 사례를 표 1에 정리하여 나타내었다. 대부분의 지하보안시설물은 높은 보안성 및 방호목적상 지하심도 15m이상에 설치되어 있으며, 지하공간의 높이는 단일 층 고려 시 5.0m 내외로 되어 있다.



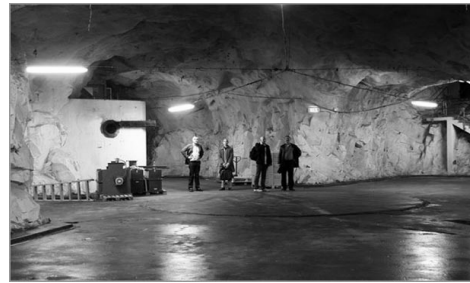
(a) 지하사무실 전경



(b) 집무공간



(c) Pionen Center 평면계획



(d) 지하통로

〈그림 3〉 Pionen Center 내외부 전경

〈표 1〉 보안센터 해외 사례

이름	Info Bunker, LLC	The Bunker	Montgomery Westland	Cavern Technologies
구축 형태				
	지하 벙커형	지하 벙커형	외곽 위장형	지상 터널형
위치	Des Moines, Iowa	Dover, UK	Montgomery, Tex.	Lenexa, Kansas
공용 연도	2006	1999	2007	2007
지심도	15m	30m	18m	38m
내부 면적	3,160m ²	4,650m ²	2,600m ²	3,700m ²
공간 높이	4.9m	3.7~15.2m	3.0m	4.9~5.5m
초기 용도	군사용 통신벙커	공군 방호벙커	민간벙커(핵공격대비)	석회석 광산
현재 용도	민간 데이터 백업센터	민간 데이터센터	민간 데이터 백업센터	민간 데이터센터

4. 보안시설 방호성능

보안시설 또는 방호구조물 설계에 있어서 가장 중요한 쟁점 중의 하나는 전쟁 및 테러와 같은 돌발상황 발생시에 대한 방호성능이다. 구조물에 대한 방호성능의 범위는 피폭무기의 제원 및 그 영향정도에 따라 현저한 차이를 보인다. 예를 들어 핵폭발의 경우에 대한 방호성능이 요구될시 그 범위는 사용된 핵폭탄의 규모에 따라 지하구조물의 안정성이 요구되는 심도가 수십에서 수백미터에 이를 정도로 다양하며, 이는 공사비를 기하급수적으로 증가시킬 수 있는 결정적 요인이 되므로, 방호구조물 설계시 명확한 방호기준의 설정이 우선되어야 할 것이다.

미국 공병단 매뉴얼(U.S. Army Corps of Engineers, Technical Manual)에는 재래식 무기에 대한 방호성능 분석을 위한 계산식이 제시되어있다. 장약량(W)과 폭발심도(z), 지반조건에 따라 식 4.1 ~ 식 4.3을 이용하여 지반의 영향 반경 및 심도를 산출할 수 있다(그림 4 참조).

$$\left\{ \begin{array}{l} R_a = \alpha' W^{1/3} + \beta' z + \gamma' z^3 W^{-2/3} \\ D_a = \alpha W^{1/3} + \beta z + \gamma z^3 W^{-2/3} \end{array} \right\},$$

$$\left| \frac{z}{W^{1/3}} \right| < 16.4 \quad (\text{식 4.1})$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R_a = A' W^{1/3} + B' z + C' z^3 W^{-2/3} \\ D_a = A W^{1/3} + B z + C z^3 W^{-2/3} \end{array} \right\},$$

$$16.4 < \left| \frac{z}{W^{1/3}} \right| < 100 \quad (\text{식 4.2})$$

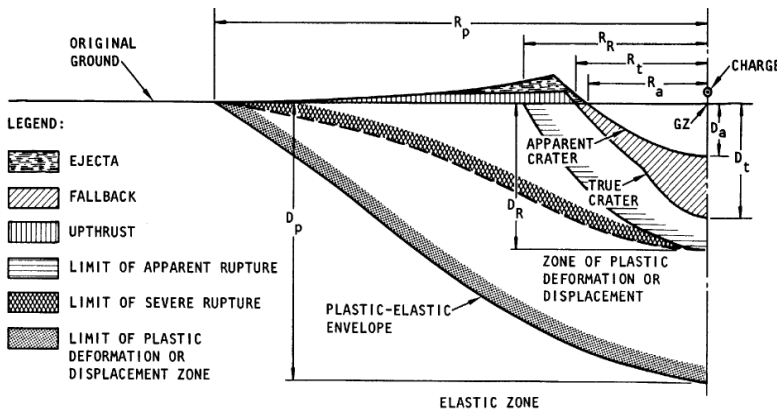
$$\begin{array}{lll} R_t = \phi R_a & R_R = \theta \phi R_a & R_P = \Gamma \phi R_a \\ D_t = \phi D_a & D_R = \theta' \phi D_a & D_P = \Gamma' \phi D_a \end{array} \quad (\text{식 4.3})$$

5. 지하 보안시설 설계 고려사항

5.1 지하공간 단면계획

지하 보안시설의 구조물 단면계획은 내부시설물 설치에 요구되는 공간 및 접근로 및 비상탈출로 확보계획, 방호 차단문 설치계획 등에 따라 다양한 계획이 요구되어진다. 일반적으로 주요 시설물 설치에 소요되는 공간을 확보하기 위해서는 상당한 대단면이 요구되며, 이러한 대단면 굴착에 대한 설계는 지반조건, 시공성, 안정성 및 경제성뿐만 아니라 보안성과 방호성능 등 여러가지 요인을 다각도로 검토한 후 결정하는 것이 바람직하다.

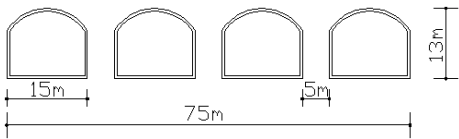
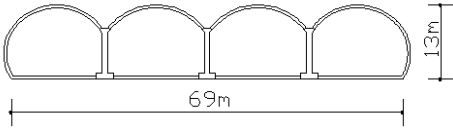
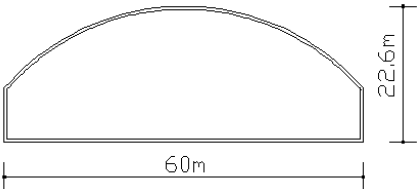
표 2과 3은 대단면 형태 및 실제 설계 시공 사례들을




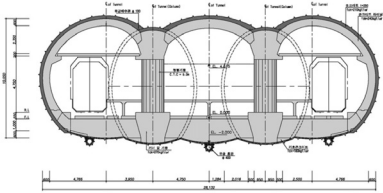
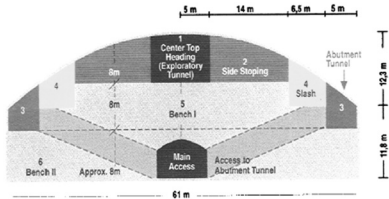
R_a	: 겉보기 폭파반경
D_a	: 겉보기 폭파심도
R_t	: 실 폭파반경
D_t	: 실 폭파심도
R_r	: 파쇄반경
D_r	: 파쇄심도
R_p	: 소성반경
D_p	: 소성심도

(그림 4) 재래식 무기에 의한 지중 폭파 영향권(U.S. Army Corps of Engineers, Technical Manual)

〈표 2〉 대단면 형태에 따른 특징

단면형태	개 념 도	특 징
자연필라형 단 면		<ul style="list-style-type: none"> • 양호한 지반에 적용 가능 • 원지반 필라 지지로 가장 안정적 • 정밀제어 발파가 요구됨 • 일정한 필라 폭이 요구되므로 지하 부지면적 증가 • 국내적용 사례 미비
4아치형 단 면		<ul style="list-style-type: none"> • 콘크리트 기둥 설치로 시공단계 복잡 • 종 방향 콘크리트 필라 폭이 좁아 공간확보에 불리 • 공법 특허권으로 추가 라이선스 비용 발생 예상 • 국내 대단면 터널사례 다수
대 공동 단 면		<ul style="list-style-type: none"> • 대공동 굴착으로 안정성 불리 • 상부 사공간 발생으로 비효율적 • 기둥이 없으므로 공간확보 유리 • 대단면 굴착으로 공사비 증가 • 지하 수영장, 경기장 등 주로 노르웨이 등지에서 적용

〈표 3〉 대단면 설계시공 사례

Iron Mountain	대전 지하철 1호선	Gjovik Olympic Hall
		
<ul style="list-style-type: none"> • Mine and pillar method • 자연 필라형 	<ul style="list-style-type: none"> • 104 정거장 구간 30치 터널 • 연장 55m 	<ul style="list-style-type: none"> • 동계올림픽 아이스하키 경기장 • 폭 61m, 연장 91m, 높이 24.1m

나타낸 것이다.

5.2 암반 필라(Pillar) 계획

암반 필라 폭이 작아 인접 터널의 굴착 영향이 증폭되는 경우 필라의 안정성 확보가 매우 중요하다. 필라의 안

정성 확보를 위해서는 필라의 적정 폭을 산정하여야 하며, 굴착시 필라 손상을 방지하기 위한 제어발파 등의 방안을 수립하여야 한다.

암반 필라의 안정성은 이론식/경험식 및 수치해석을 이용하여 암반 공동의 필라 및 공동 전체의 안정성을 평가할 수 있다. 또한 절리면 조합으로 인해 발생가능한 키

블록에 대한 지보패턴의 적정성을 검토할 필요도 있다.

암반 필라의 안정성은 현지 지반응력과 강도, 필라 형상에 따라 결정된다. 먼저 암반 필라 강도는 Hoek and Brown의 경험적 파괴기준식을 이용하여 추정할 수 있다.

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3 + s\sigma_c^2} \quad (\text{식 5.1})$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } m &= m_1 \exp\left(\frac{\text{RMR} - 100/28}{28}\right), \\ s &= \exp\left(\frac{\text{RMR} - 100}{9}\right) \end{aligned}$$

암반 필라에서는 $\sigma_3=0$ 이므로

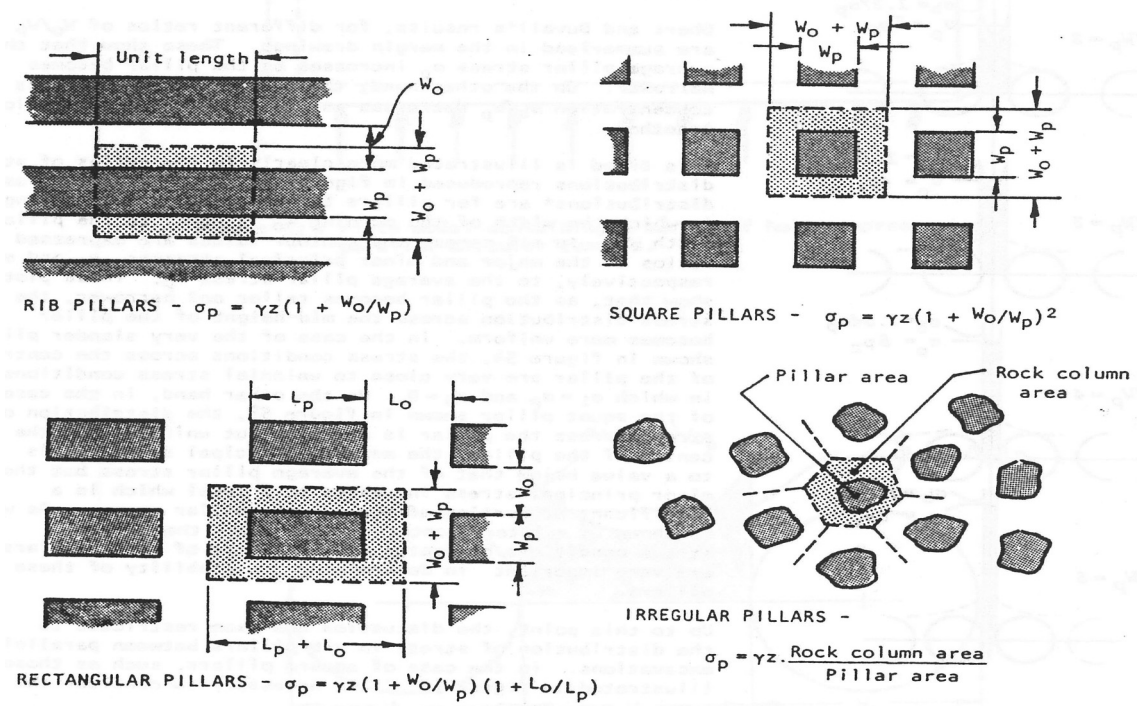
$$\sigma_1 = \sqrt{s\sigma_c^2} \quad (\text{식 5.2})$$

Hedley와 Grant(1972)는 운영중인 광산터널의 필라 붕괴자료 검토 후 필라 형상을 고려한 다음과 같은 상관관계식을 제시하였다.

$$\sigma_p = K_p \frac{W^{0.5}}{H^{0.75}} \quad (\text{식 5.3})$$

여기서 σ_p : 필라 강도, K_p : 암반 강도, W : 필라 폭, H : 필라 높이

암반 필라부에 작용하는 평균응력은 필라 형상에 따라 그림 5와 같이 계산된다. 여기서 γ 는 암반 단위중량, z 는 지표에서부터의 깊이를 나타낸다.



〈그림 5〉 필라의 형상에 따른 평균 필라 응력(Hoek & Brown, 1980)

6. 결 론

최근 우리나라에서는 지하공간을 이용한 보안시설 건설에 대한 관심이 증대되고 있으며 현재 추진중이거나 기존에 시공된 사례가 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 지하 보안시설의 구조물 단면계획은 내부시설물 설치에 요구되는 공간 및 접근로 및 비상탈출로 확보계획, 방호 차단문 설치계획 등에 따라 다양한 계획이 요구되며 일반적으로 주요 시설물 설치에 소요되는 공간을 확보하기 위해서는 상당한 대단면이 필요하다. 이러한 대단면 굴착에 대한 설계는 지반조건, 시공성, 안정성 및 경제성뿐만 아니라 보안성과 방호성능 등 여러가지 요인을 다각도로 검토한 후 결정해야 한다. 특히 암반 필라 폭이 작아 인접 터널의 굴착 영향이 중첩되는 경우 필라의 안정성 확보가 매우 중요하므로 필라의 안정성 확보를 위해서는 필라의 적정폭을 산정하여야 한다.

지하공간을 이용한 지하 보안시설의 중요 고려사항은 시공 안정성, 경제성, 유지관리 등 여러 가지가 있을 수 있으나, 특히 전쟁발발 등 가능한 거의 모든 재해에 대한 경우의 수를 대비하고 최후까지 시설 유지가 가능하도록 설계 되어야 하므로 기존의 토목 구조물에 비해서 중요도가 매우 높다고 할 수 있다. 지하 보안시설의 위치는 철저한 보안유지가 가능하도록 항공관찰에 대비한 구조물 위장이 충분하고, 인근지역의 접근통제로 일반인 노출을 최소화할 수 있는 지역에 선정되어야 하므로 관련 제도 검토 및 입지선정에 대한 연구도 필수사항이다.

본 기술기사는 지하공간을 이용한 지하 보안시설의 설계 및 시공 고려사항과 사례를 정리한 것으로 터널 및 지하공간에 관련되어 있는 전문기술자들에게 기술적으로 도움이 되었으면 한다.

참고문헌

- 1) 국방부 육군사관학교 화랑대 연구소(1998), 방호구조물 설계 기준 연구.
- 2) 국방부 육군사관학교 화랑대 연구소(2004), 군사시설물 방호 두께 산출에 관한 연구.
- 3) 육군사관학교 군사시설 연구실(1997), 재래식 무기에 대한 방호설계 기본.
- 4) 육군사관학교 군사시설 연구실(2003), 구조물 방호설계.
- 5) 한국터널공학회(2007), 터널의 이론과 실무-도심지 천층 및 근접터널.
- 6) 한국터널공학회(2009), 지하대공간 구조물 설계 및 시공가이드.
- 7) Boscardin, M. D. & Cording, E. J.(1989). Building response to excavation-induced settlement, ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division, Vol.115, No.GT1, pp.1-21.
- 8) Hoek, E. & Brown, E.T.(1980), Underground Excavation in Rock, Institution of Mining and Metallurgy London.
- 9) Son, M. & Cording, E. J.(2005). Estimation of Building Damage Due to excavation-induced Ground Movements, J. Geotech. Engrg., ASCE, 131(2), pp.162-177.
- 10) U.S Army Corps of Engineers, Technical Manual (TM 5-858-2, TM 5-858-8).