

(62) 岩盤空洞を利用した地下式展示館の地震時安定性評価

飛鳥建設(株) 技術研究所 正会員 近久 博志、小林 薫
飛鳥建設(株) 技術研究所 正会員 ○松元 和伸、筒井 雅行
神戸大学 工 学 部 正会員 櫻井 春輔

Estimation of Stability of Rock Masses Surrounding the Underground Exhibition Hall at the Time of Earthquake

Hiroshi CHIKAHISA, Kaoru KOBAYASHI, Kazunobu MATSUMOTO, Masayuki TSUTSU I,
Tobishima Corporation
and Shunsuke SAKURAI. Kobe University

ABSTRACT

In Japan, there is the first plan of art museum using underground opening, Takayama Festival Yatai (Float Art) Museum, which has cupola ceiling over exhibition hall of 40.5m wide built in the shallow overburden of 30m and tunnel shape art gallery of excavation section 100m² and 70m length.

It was not anxious keenly about the stability or the safety of rock masses surrounding underground openings, for example, underground power stations, rock storages for petroleum and subsurface utilities and so on because a lot of the openings was build in deep overburden and good rock masses surrounding has excellent characteristics reducing vibration to seismic activity.

In this project, the dynamic seismic response analysis was executed to examine the stability of underground opening completed because of large scale opening excavated and shallow overburden. This paper describes the analysis and results for the design of underground opening which was executed to examine the stability of rock masses surrounding at the time of earthquake.

1. はじめに

地下発電所や岩盤貯油タンクなどの岩盤空洞を利用した地下施設に関しては、各方面からの調査や研究がなされ、数々の実構造物や貴重な技術資料に結び付けられている。こうした構造物の多くは、比較的深い震度の良好な地質を選んで計画されており、完成後の利用も特定の関係者に限定されることが多かった。しかし、近年の建設構造物のニーズの多様化や複合化にともなって、比較的浅いところに地下の大空間を構築し、完成後には不特定多数の一般客が利用されるような計画も少しずつ見られるようになってきた¹²⁾。例えば、高山祭屋台美術館は、直径 40.5 m のドーム状の展示館と長さ 70 m のトンネル式の展示館から成っており、岩盤空洞を利用した地下

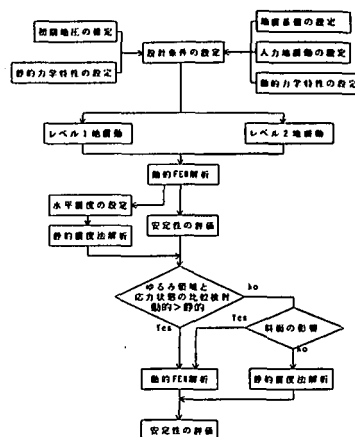


図-1 耐震検討フロー図

式的美術館として国内で始めて日本建築技術センターの構造評定と防災評定を取得した最初の建築構造物となった。本文は、構造評定において実施した構造設計²³⁾の中から、岩盤空洞の耐震設計について説明する。

2. 地震時の安定性評価

従来、土被りが深く良好な地盤内に施工された空洞は、地震動の影響は少ないとされていた。これに対し、本地下空洞は、次のような理由から図-1に示すようなフローで岩盤空洞の地震時の安定性を検討した。

- ① 建設予定位置付近で過去に大きな地震が発生している
- ② 跡津川断層や阿寺断層などの活断層が付近に存在する
- ③ 大空洞となる展示ドームは、土被りが 30 m と比較的浅いところに建設される

この時、設計方法や支保部材の許容応力などは、建築学会や日本建築技術センターの基準類^{3), 4)}を、設計解析理論に関しては、地下発電所や地下備蓄タンクなどの設計に実績の多い電力中央研究所の破壊接近度法を用いることとした。

3. 原位置および室内試験

本地区の地質は、白亜紀後期～古第三紀の濃飛流紋岩と呼ばれる火成岩のうち火砕流起源の溶結凝灰岩より構成され、展示ドームはB級～CH級岩盤に位置する。地質調査坑やボーリング孔を利用した現位置における試験調査や採取された岩石を用いて実施した室内試験（表-1）の結果を基にして設定した構造設計にも用いた力学特性を表-2と表-3に示す。また、図-2に動的解析に用いた各岩盤等級別の地震時のせん断剛性と減衰定数のひずみ依存曲線を示すが、CM級とCH級の岩盤に関しては、一次元応答解析による予備検討によると、ひずみレベルは $3.0 \times 10^{-5} \sim 5.0 \times 10^{-5}$ 程度であり、ひずみ依存特性が少ないことが分かったため、せん断剛性を一定値とした。

表-1 調査・試験項目

試 験 名	試 験 要 要
せん断試験	【c, φ】CL級, CM級, CH級, B級
変形試験	【弾性係数, クリープ係数】
（クリープ試験）	CL級, CM級, CH級, B級
坑内弾性波試験	【P波速度】
孔内載荷試験	【弾性係数】CM級, CH級, B級
P-S検層	【P波, S波速度】
温度検層	【温度分布】
密度検層	【密度】表土
スウェーデン・オランダ・ソング	【換算N値, 一軸強度】表土, D級
物理試験	【比重, 吸水率】
一軸圧縮試験	【一軸強度, 静弾性係数, ɛ ₇₇₅ 比】
三軸圧縮試験	【ゆるみ係数】
超音波速度試験	【P波, S波速度】
圧裂引張試験	【引張強度】
一面せん断試験	【c, φ】Protodjakonovの装置
点載荷圧裂試験	【圧裂強度】
AE、DR試験	【初期地圧 (σ _{xyz})】
クリープ試験	【クリープ係数】CL級
振動三軸試験	【動的ひずみ依存特性】CL級
線形振試験	【線形振係数】CH級
熱伝導率試験	【熱伝導率】CH級
熱拡散率試験	【熱拡散率】CH級

表-2 力学特性（静的解析用）

力学特性	岩盤等級	表土	D級	CL級	CM級	CH級
単位体積重量	γ t (gf/cm ³)	1.6	2.0	2.5	2.6	2.6
弾性係数 E	(× 10 ⁴ kgf/cm ²)	0.0084	0.10	1.75	5.27	5.47
ポアソン比	ν	0.40	0.35	0.35	0.29	0.27
粘着力	C (kgf/cm ²)	0.3	2.0	10.0	25.0	47.0
内部摩擦角	φ (°)	20	25	45	51	56
引張強度	σ t (kgf/cm ²)	—	0.5	3.7	12.8	18.1
クリープ	α	—	—	0.042	0.056	0.04
係 数	β (1/day)	—	—	150	147	90
ぜい性度	Br	—	13	13	11	17
包絡線指数	a	—	2			
ゆるみ定数	k	—	36	36	116	101

表-3 力学特性（動的解析用）

岩盤等級	Vs (m/s)	γ t (tf/m ³)	G ₀ (tf/m ²)	ν d	歪依存特性	h ₀ (%)
表土	120	1.6	2350	0.45	図-2	2.0
D	410	2.0	34300	0.40	図-2	1.5
CL	610	2.5	94900	0.40	図-2	1.5
CM	1400	2.6	520000	0.37	—	1.5
CH	2100	2.6	1170000	0.39	—	1.5

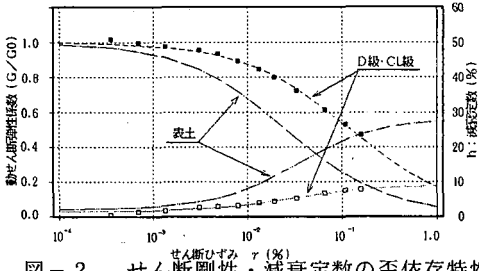


図-2 せん断剛性・減衰定数の歪依存特性

4. 地震時安定性

4. 1 動的有限要素法解析

(1) 解析方法と解析条件

斜面や層構成の影響を考慮できる動的有限要素法解析（解析コード：修正FLUSH）を用いて地震時の地下空洞の安定性を検討した。解析モデルは、2次元平面ひずみを仮定した図-3と図-4に示すようなアプローチトンネルに平行な断面とそれに直交する2つの断面を用いた。解析領域は、地震時の展示ドーム周辺地山のゆるみ状態を調べる目的で、解析時における境界での影響を排除するために、展示ドーム空間から下方に3D（展示ドーム部の掘削径；40.5 m）、左右に7Dの範囲とした。

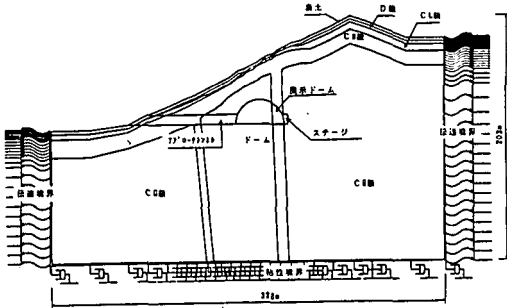


図-3 解析モデル（77°アプローチトンネル平行断面）

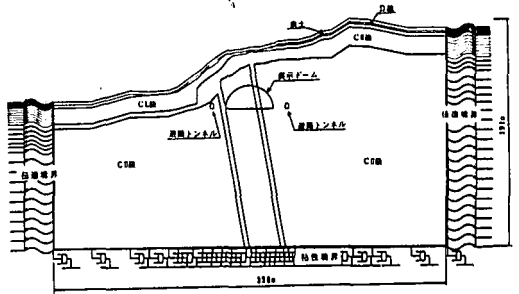


図-4 解析モデル（77°アプローチトンネル直交断面）

動的解析を実施するに際して、入力地震動は、（財）日本建築センターの文献5)に基づいて設定する。この時、表-4に示すような応力状態を考える。

まず、過去に発生した地震データと、近傍にある跡津川断層と阿寺断層の影響を考慮して計画地点における地震基盤速度を設定した。さらに、既往資料を参考にしながら地表付近での増幅率を考慮して地表面における最大速度値を表-5のように設定した。この検討に用いた地震波形は、短周期波形として EL CENTRO-NS 波と TAFT-NS 波、地域特性を考慮した地震波形として GIFU-NS 波（京大防災研上室地核変動観測所）、長周期成分を含む地震波形として HACHINOHE-NS 波の4波である。一次元応答解析の結果（図-5）から最も応答の大きくなる EL CENTRO-NS 波（レベル1；232gal，レベル2；544gal）を設計用入力地震波として用いることとした。鉛直震度は、入力地震動の最大水平加速度の半分の値（レベル1；Kv=0.12，レベル2；0.28）とした。

表-4 応力状態と設計法

応力状態	設計方法
常時	施工後の静的な作用荷重に対して、本美術館が損傷を受けることなく、概ね弾性的な挙動で、抵抗できるように許容応力度法によって支保部材を設計する。
地震時 (レベル1)	耐用年数中に一度以上受ける可能性のある地震動に対して、本美術館は損傷を受けることなく、概ね弾性的な挙動で応答するように、許容応力度法によって支保部材を設計する。
地震時 (レベル2)	本美術館の敷地において過去に受けたことのある地震動のうち最強と考えられ、将来において受けると思われる最強の地震動に対して、本美術館が崩壊や崩落等の人命に損傷を与えるような破壊を生じないように終局強度法によって支保部材を設計する。

表-5 地震基盤と地表面での最大速度

地震 レベル	基礎岩盤 (kine)	増幅率	地表面速度(kine)		備考
			計算値	設定値	
レベル1	10	1.9	19.0	25	中規模中距離地震
レベル2	25		47.5	50	跡津川断層の影響

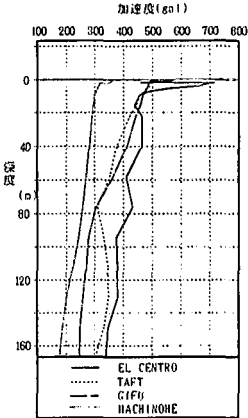


図-5 応答解析結果

(2) 地震時の地盤内応力の算定

図-6に示すような手順で、地震時の地盤内応力（全応力）を求める。

まず、空洞掘削前の地盤内の応力状態として初期地圧試験によって求められた応力を再現する。つぎに、アプローチトンネルや展示ドーム部を掘削したことによる応力状態（常時の応力状態）として、掘削解析を実施する。この応力状態に対して、設定した鉛直震度を静的に作用させたあと、動的解析によって求められた地震時の応力増分を重ね合わせる。

(3) 地盤内の安全率

要素毎に求められる要素安全率（以下、安全率と呼ぶ）を地盤内の安全率として仮定する。この時、引張応力の発生の有無によって、2通りの安全率を考える。

引張応力が発生しない場合は、図-7に示すように要素応力から求められる最大せん断応力（ τ_{max} ）と平均応力一定の状態で破壊崩落線と接するモール円から求められる最大せん断応力（ d_{min} ）との比を安全率（ FS_1 ）として定義する。また、引張応力が発生する場合は、図-8に示すように、最大引張主応力と地盤が有している引張強度との単純比を安全率（ FS_2 ）として定義する。

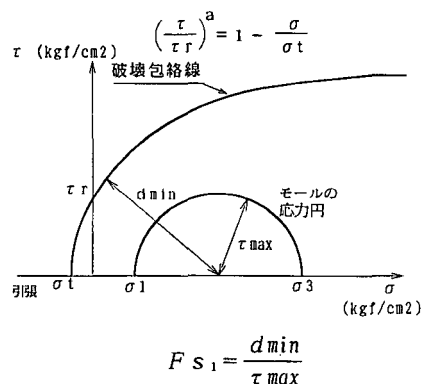


図-7 圧縮応力発生時の安全率

解析ステージの概略図	解析ステージの内容
(STAGE1) 	初期応力場 掘削前の応力状態を表す。 要素作用後に自重計算を実施する。
(STAGE2) 	空洞掘削時 アプローチトンネルとドーム部の掘削にともなう周辺地山の応力状態を表す。
(STAGE3) 	鉛直地震力作用時 掘削後に鉛直の地震慣性力が作用したときの応力状態を表す。
(STAGE4) 	水平地震力作用時 掘削後、鉛直と垂直の地震慣性力が作用したときの応力状態を表す。 但し、動的解析結果に関しては、このステージで水平震度を掛けずに応力の重ね合わせだけを行う。

図-6 解析手順および概要

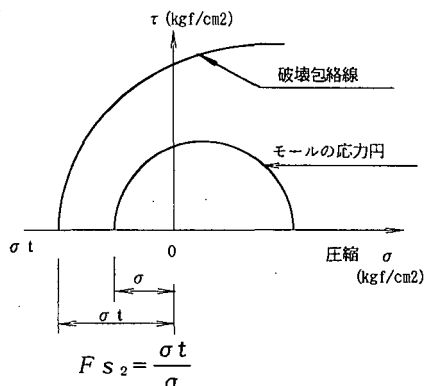


図-8 引張応力発生時の安全率

(4) 解析結果

レベル2地震時の安全率が1.1となる領域を示すと図-9と図-10のようになった。示した安全率は、全時刻歴中に発生する応力の中から要素毎に求めた最小安全率であり、同時性はないが、設計上は安全側を考慮して、この範囲の岩盤が同時に崩落する仮定し、ロックアンカーや吹付コンクリートなどによって保持することを考える。支保部材の設計に影響が大きな地震時のゆりみ領域の発生につながる応力集中について整理するとつぎのようになる。

- ① 展示ドーム周辺には強度を越えるような大きなせん断応力は発生していない。
- ② 周辺岩盤の強度以上の応力が発生するのは、レベル2地震時だけである。

③ このとき、破壊領域は土被りの浅いドーム肩部に発生するが、斜面にほぼ平行な方向の引張応力によるものであり、斜面にほぼ直交する方向の不連続面（割れ目や節理など）が展示ドーム側から開口し伸展する。こうした領域の地山の崩落や滑落に対して設計した支保パターンを図-11に示す。

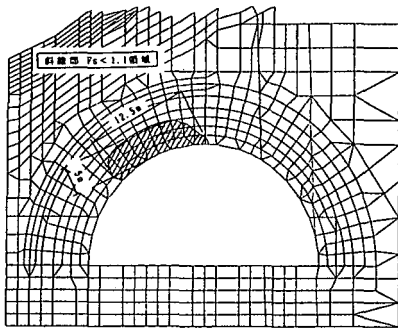


図-9 安全率1.1以下の領域（77°ローチ平行断面）
（レベル2地震時）

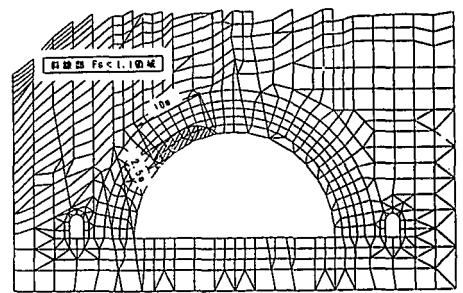


図-10 安全率1.1以下の領域（77°ローチ直交断面）
（レベル2地震時）

5. 考察

比較的深くて地質の良好な場所に施工される岩盤地下空洞は、地震の影響が少ないとされているが、本地下空洞のように地表面に近い位置に大空洞を施工する場合には地震動の影響を大きく受けることになる。このとき、展示ドーム付近の地山の応力状態の把握などの局所的な応力集中などの検討には通常用いられている静的震度を作用させる簡易法の適用も可能であるが、全体的な岩盤空洞の安定性を検討する場合には地表面や地層の傾斜の影響を受けることになるため、動的有限要素法解析の実施が望ましいことが分かった。

しかし、岩盤の耐震設計に関して、

- ① 岩盤の不連続性や動的力学特性
- ② 発生するゆるみ領域の定義
- ③ 地盤や支保部材の永年の空洞の支保効果や能力

など、今後の研究成果に期待するところも残されている。なかでも地下空洞の支保部

材としてのロックアンカー、吹付コンクリート、ロックボルトの永年の支保効果などの設計上のクライテリアを明確していくことが今後の地下空間利用の可能性を広げていく上で重要であると思われる。

土地の有効利用や環境保全の観点から、地下空間の利用は今後ますます増加するものと考えられるが、本報告が地下空間を利用した建築構造物の計画や設計に参考になれば幸せである。

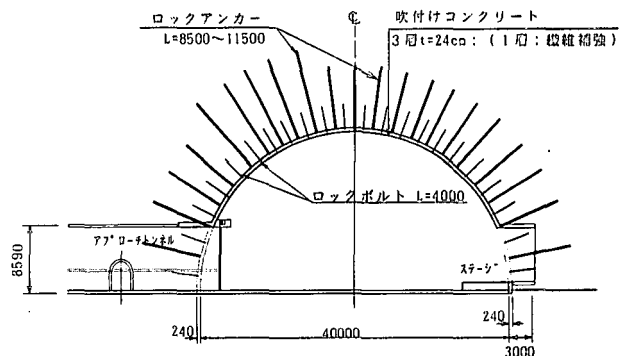


図-11 展示ドーム部の支保パターン

【参考文献】

- 1) Barton, N. et al. : Design studies for Norway's Olympic cavern, Tunnels & tunnelling, pp.23-25, October, 1991.
- 2) 近久、小林、松元、筒井、櫻井：建築構造物としての地下空洞の調査と設計，第2回システム工学シンポジウム，1994.
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算標準・同解説，1988.
- 4) (財)日本建築センター：構造研鑽指針・同解説，1988.
- 5) 高層建築物構造評定委員会：高層建築物の動的解析用入力地震動について，ビルディングレター，1986.
- 6) 駒田広也：地下式原子力発電所の耐震性検討，第22回岩盤力学に関するシンポジウム，pp.91-95，1990.