



# 地下空洞の力学的安定性評価

黒木 繁盛 谷口 航

東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部

資料番号 : 5 - 6

Assessment of the Mechanical Stability of Underground Excavations

Shigemori KUROKI Wataru TANIGUCHI

Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center Waste, Tokai Works

地層処分場の地下施設を構成する各種坑道は、建設段階から操業・閉鎖段階に至るまで、作業安全性を確保するため、空洞が力学的に安定していることが求められる。ここでは、処分場建設の技術的信頼性を示すため、我が国の幅広い地質環境を考慮し、理論解析、有限要素法解析を用いて坑道の力学的安定性を評価した。この結果、適切な坑道離間距離や処分孔間隔を確保し、適切な支保工を施工することにより、地下空洞の力学的安定性は確保されることが示された。なお、本報告は、第2次取りまとめに用いた空洞の力学的安定性の評価手法とその結果を要約したものである。

Each tunnel in the underground high level radioactive waste repository must be mechanically stable to maintain safety throughout the construction, emplacement operations and closure phase. The mechanical stability of underground excavations were assessed using a theoretical analysis and a finite element method taking a wide range of geological environment in Japan into consideration to establish confidence in the construction of disposal facilities. The results show that it is possible to maintain the mechanical stability with adequate tunnel spacing and disposal pit pitch and proper mechanical support. The procedure used for the analysis of the mechanical stability in the H12 report and the results are described in this report.

## キーワード

地層処分、岡の理論解、有限要素法解析、局所安全率、限界ひずみ、支保工応力度、坑道離間距離、処分孔間隔、応答震度法、重複反射理論解析

Geological Disposal, Theoretical Analysis, Finite Element Method, Local Safety Factor, Critical Strain, Support Stress intensity, Tunnel Spacing, Disposal Pit Pitch, Seismic Response Coefficient Method, Multiple Reflection Theory Analysis

## 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分場は、主にガラス固化体を受入れてオーバーバックに封入する地上施設と、廃棄体の搬送から定置・埋設を行う地下施設の2つに分けることができる。

このうち、処分場の地下施設はアクセス坑道、主要坑道、連絡坑道、処分坑道などから構成され、図1に示すように数多くのトンネルが掘削される。地下施設の主要な構造物となるこれらの各坑道には、建設・操業・閉鎖の期間を通して安全な物流経路を提供することが求められる。具体的には、表1に示すように、廃棄体の搬入路、人員の



図1 地下施設レイアウト例

表1 処分場の地下施設における坑道の役割

坑道の役割		アクセス坑道	主要坑道 連絡坑道	処分坑道
項目	内容			
廃棄体搬入路	廃棄体、緩衝材の搬入が可能であること 処分坑道においては廃棄体の定置が可能であること			
人員の連絡路	人員の移動が可能であること			
資材の運搬路	建設・操業・埋め戻しが必要となる資材の運搬が可能であること 建設時の掘削ずりの搬出が可能であること			
換気路	ダクト等、換気設備の設置が可能であること 換気に十分な面積を有していること			
給水路	給水のための設備の設置が可能であること			
排水路	排水路及び排水のための設備の設置が可能であること			
給電・通信路	給電・通信のための設備の設置が可能であること			( )
緊急時避難	避難路の確保が可能であること			

注：( )は設置きの場合を示す

運搬路、資材の運搬路、換気路、給水路、排水路、給電路、通信路、緊急時避難路等を確保することが各坑道に求められる。坑道としてのこれらの役割を果たすためには、各坑道が所要の内空断面（形状、寸法、断面積）を有し、建設・操業・埋め戻しの各作業段階を通じて空洞の力学的安定性が確保されるように設計を行う必要がある。

ここでは、処分場建設の技術的信頼性を示すため、合理的な設計法として以下の手順に従い、検討を行った。

坑道がその用途に適した内空断面を有し、トンネルの安定性、施工性を考慮したうえで、合理的な形状・寸法を決定する。

で求められた坑道仕様に対して理論解析を行い、力学的安定性上必要となる概略の支保工仕様を算定する。

有限要素法解析を用いて、で求められた支保工仕様の妥当性を検証するとともに、坑道の力学的安定性を確保できる合理的な処分坑道離間距離及び処分孔間隔を設定する。

力学的安定性上厳しくなると考えられる坑道の交差部や地震時について検討を行う。

なお、第2次取りまとめ<sup>1)</sup>における処分坑道離間距離及び処分孔間隔に関しては、別途、ニアフィールドの温度制限より求められたものと比較し、最終的な処分坑道離間距離及び処分孔間隔を設定した。

以下にこれらの検討の条件と方法、その結果を示す。

## 2. 検討の条件

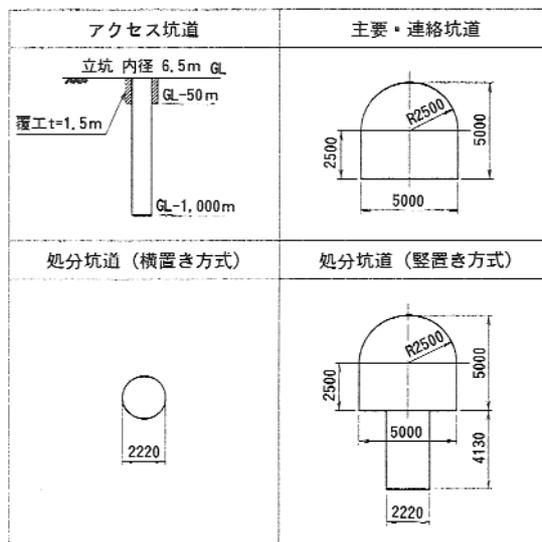
### 2.1 坑道仕様

坑道断面を決定する上で必要となる設定項目として、断面寸法（断面積）、断面形状の2つがあ

げられる。このうち、断面寸法を決定する因子としては必要断面積があり、各坑道の役割（表1参照）を果たすために必要な面積として求められる。また、断面形状を決定する因子としては、力学的安定性、作業性、経済性があげられ、

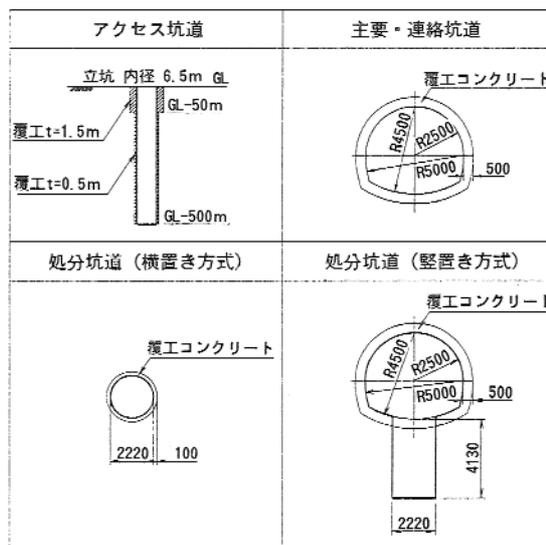
- ・力学的安定性：空洞が力学的に安定でその変形量が小さいこと
- ・作業性：建設・操業・埋め戻しの作業を円滑に行うことができること
- ・経済性：必要断面積を有し、かつ極力小さな断面とすること

が必要であると考えられる。ここでは、これまでの研究成果を踏まえ、これらの要件を満足するものとして図2～3に示す断面を設定した（解析で



単位：mm

図2 坑道仕様（軟岩系岩盤）



単位：mm

図3 坑道仕様（軟岩系岩盤）

表2 軟岩系岩盤 (HR) データセットにおける静的力学物性 (深度依存性あり)

深度	(m)	0	50	100	150	200	250	300	350~	
岩石 (コア)	弾性波速度	Vp(km s <sup>-1</sup> )	5.0							
岩盤 (地山)	弾性波速度	vp(km s <sup>-1</sup> )	2.10	3.98	4.64	4.88	4.96	4.98	4.99	5.00
岩盤	良好度 (低減率)	D=(vp/Vp) <sup>2</sup>	0.18	0.64	0.86	0.95	0.98	0.99	1.00	1.00
岩石 (コア)	一軸圧縮強度	qu(MPa)	115							
岩石 (コア)	引張強度	t(MPa)	8							
岩石 (コア)	弾性係数	E(MPa)	37,000							
岩石 (コア)	粘着力	C(MPa)	15							
岩盤 (地山)	一軸圧縮強度	qu(MPa)	20	73	99	109	113	114	115	115
岩盤 (地山)	引張強度	t(MPa)	1	5	7	8	8	8	8	8
岩盤 (地山)	弾性係数	E(MPa)	6,527	23496	31,923	35,180	36,357	36,774	37,000	37,000
岩盤 (地山)	粘着力	C(MPa)	3	10	13	14	15	15	15	15
	内部摩擦角	(deg)	45							
	ポアソン比		0.25							

確認された覆工の仕様を合わせて示した。

表3 軟岩系岩盤における静的力学物性 (深度依存性なし)

	SR-A	SR-B	SR-C	SR-D	SR-E	
一軸圧縮強度	qu(MPa)	25	20	15	10	5
引張強度	t(MPa)	3.5	2.8	2.1	1.4	0.7
弾性係数	E(MPa)	5,000	4,000	3,500	2,500	1,500
粘着力	C(MPa)	5.0	4.0	3.0	2.0	1.0
内部摩擦角	(deg)	30	29	28	27	25
ポアソン比		0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
有効間隙率	ne(%)	15	20	30	45	60
飽和単位体積重量	(Mg m <sup>-3</sup> )	2.45	2.35	2.20	1.95	1.70

2.2 解析に用いた物性値

表2 ~ 7 に解析に用いた岩盤及び支保工の物性値を示す。

ここに、岩盤物性値の設定にあたっては、これまでの公開文献に基づくデータに東濃・釜石鉱山

表4 軟岩系岩盤 (HR) の動的力学物性

深度 (m)	層No.	モデル化層厚 (m)	岩種	単位体積重量 (Mg m <sup>-3</sup> )	弾性波速度 Vp(km s <sup>-1</sup> )	弾性波速度 Vs(km s <sup>-1</sup> )	動せん断剛性 Gd(MPa)	動弾性係数 Ed(MPa)	動ポアソン比 d	減衰定数 h (%)
10	1	2	結晶質岩	2.67	2.219	0.298	240	717	0.491	2.0
	2	2			2.333	0.392	416	1237	0.485	
	3	2			2.443	0.483	630	1864	0.480	
	4	2			2.548	0.569	876	2583	0.474	
	5	2			2.649	0.652	1151	3377	0.468	
	6	2			2.746	0.732	1449	4236	0.462	
	7	2			2.838	0.808	1767	5145	0.456	
	8	2			2.927	0.882	2102	6096	0.450	
	9	2			3.012	0.952	2450	7080	0.445	
	10	2			3.094	1.019	2810	8087	0.439	
	11	10			3.455	1.317	4692	13278	0.415	
	12	10			3.747	1.559	6572	18341	0.395	
	13	20			4.177	1.914	9910	27095	0.367	
	14	20			4.459	2.148	12482	33671	0.349	
	15	20			4.644	2.303	14337	38339	0.337	
	16	25			4.790	2.424	15883	42182	0.328	
	17	25			4.875	2.495	16837	44536	0.323	
	18	25			4.926	2.538	17417	45958	0.319	
	19	25			4.956	2.563	17765	46810	0.317	
	20	25			4.974	2.578	17973	47319	0.316	
	21	25			4.985	2.587	18098	47621	0.316	
	22	25			4.991	2.592	18172	47801	0.315	
	23	25			4.995	2.595	18215	47908	0.315	
	24	25			4.997	2.597	18242	47972	0.315	
	25	25			4.998	2.598	18257	48009	0.315	
	26	25			4.999	2.599	18266	48032	0.315	
	27	25			4.999	2.599	18272	48045	0.315	
	28	25			5.000	2.600	18275	48053	0.315	
	29	25			5.000	2.600	18277	48057	0.315	
	30	25			5.000	2.600	18278	48060	0.315	
	31	25			5.000	2.600	18279	48062	0.315	
	32	25			5.000	2.600	18279	48063	0.315	
	33	25			5.000	2.600	18279	48063	0.315	
	34	25			5.000	2.600	18279	48064	0.315	
	35	25			5.000	2.600	18279	48064	0.315	
	36	25			5.000	2.600	18280	48064	0.315	
	37	25			5.000	2.600	18280	48064	0.315	
	38	25			5.000	2.600	18280	48064	0.315	
	39	25			5.000	2.600	18280	48064	0.315	
	40	25			5.000	2.600	18280	48064	0.315	
	41	25			5.000	2.600	18280	48064	0.315	
	42	25			5.000	2.600	18280	48064	0.315	
	43	25			5.000	2.600	18280	48064	0.315	
	44	25			5.000	2.600	18280	48064	0.315	
	45	25			5.000	2.600	18280	48064	0.315	
	46	25			5.000	2.600	18280	48064	0.315	
	47	25			5.000	2.600	18280	48064	0.315	
	48	25			5.000	2.600	18280	48064	0.315	
	49	25			5.000	2.600	18280	48064	0.315	
	50	25			5.000	2.600	18280	48064	0.315	
	51	25	5.000	2.600	18280	48064	0.315			
	52	25	5.000	2.600	18280	48064	0.315			
	53	25	5.000	2.600	18280	48064	0.315			
	54	25	5.000	2.600	18280	48064	0.315			
	55	25	5.000	2.600	18280	48064	0.315			
	56	25	5.000	2.600	18280	48064	0.315			
	57	25	5.000	2.600	18280	48064	0.315			
	58	25	5.000	2.600	18280	48064	0.315			
1200	59	25	5.000	2.600	18280	48064	0.315			

表5 軟岩系岩盤 (SR-C) の動的力学物性

深度 (m)	層No.	モデル化層厚 (m)	岩種	単位体積重量 (Mg m <sup>-3</sup> )	弾性波速度 Vp(km s <sup>-1</sup> )	弾性波速度 Vs(km s <sup>-1</sup> )	動せん断剛性 Gd(MPa)	動弾性係数 Ed(MPa)	動ポアソン比 d	減衰定数 h (%)
1	1	15	砂	2.2	3.050	1.445	4690	12712	0.355	2.0
2	2	15			3.099	1.489	4977	13437	0.350	
3	3	15			3.146	1.531	5260	14147	0.345	
4	4	15			3.190	1.571	5538	14843	0.340	
5	5	15			3.234	1.609	5812	15524	0.335	
6	6	15			3.275	1.646	6081	16188	0.331	
7	7	15			3.315	1.681	6344	16836	0.327	
8	8	15			3.353	1.715	6602	17467	0.323	
9	9	20			3.402	1.758	6937	18283	0.318	
10	10	20			3.448	1.798	7260	19068	0.313	
11	11	20			3.492	1.837	7573	19823	0.309	
12	12	20			3.533	1.873	7875	20548	0.305	
13	13	20			3.573	1.907	8166	21244	0.301	
14	14	20			3.610	1.940	8446	21910	0.297	
15	15	20			3.646	1.970	8715	22548	0.294	
16	16	20			3.679	1.999	8973	23159	0.291	
17	17	20			3.711	2.027	9220	23743	0.288	
18	18	10	泥	2.2	2.252	0.963	2082	5780	0.388	2.0
19	19	10			2.264	0.972	2122	5885	0.387	
20	20	10			2.276	0.981	2161	5991	0.386	
21	21	10			2.288	0.990	2201	6095	0.385	
22	22	10			2.299	0.999	2240	6199	0.384	
23	23	10			2.310	1.008	2279	6303	0.383	
24	24	10			2.321	1.016	2318	6405	0.381	
25	25	10			2.332	1.025	2357	6507	0.380	
26	26	10			2.343	1.033	2395	6608	0.379	
27	27	10			2.354	1.041	2433	6708	0.378	
28	28	10			2.365	1.049	2471	6808	0.377	
29	29	10			2.375	1.057	2509	6907	0.376	
30	30	10			2.385	1.065	2546	7005	0.376	
31	31	10			2.395	1.073	2583	7102	0.375	
32	32	10			2.406	1.080	2620	7198	0.374	
33	33	10			2.415	1.088	2657	7294	0.373	
34	34	12			2.427	1.097	2700	7408	0.372	
35	35	12			2.439	1.105	2743	7520	0.371	
36	36	12			2.450	1.114	2786	7632	0.370	
37	37	12			2.462	1.122	2828	7742	0.369	
38	38	12			2.473	1.131	2870	7851	0.368	
39	39	12			2.483	1.139	2911	7958	0.367	
40	40	12			2.494	1.147	2952	8065	0.366	
41	41	12			2.505	1.155	2993	8171	0.365	
42	42	12			2.515	1.162	3033	8275	0.364	
43	43	12			2.526	1.170	3072	8378	0.363	
44	44	12			2.536	1.177	3112	8480	0.363	
45	45	12			2.546	1.185	3150	8580	0.362	
46	46	12			2.555	1.192	3189	8680	0.361	
47	47	12			2.565	1.199	3227	8778	0.360	
48	48	12			2.575	1.206	3264	8875	0.360	
49	49	12			2.584	1.213	3301	8971	0.359	
50	50	12			2.593	1.219	3338	9066	0.358	
51	51	12			2.602	1.226	3374	9159	0.357	
52	52	12	2.611	1.232	3410	9252	0.357			
53	53	12	2.620	1.239	3445	9343	0.356			
54	54	25	砂	2.2	4.108	2.357	12467	31288	0.255	2.0
55	55	25			4.121	2.366	12571	31526	0.254	
56	56	25			4.132	2.375	12667	31748	0.253	
57	57	25			4.143	2.384	12757	31957	0.252	
58	58	25			4.153	2.392	12842	32152	0.252	
59	59	25			4.162	2.399	12921	32334	0.251	
60	60	25			4.171	2.406	12995	32504	0.251	
61	61	25			4.179	2.412	13064	32664	0.250	
62	62	25			4.187	2.418	13128	32813	0.250	
63	63	25			4.194	2.424	13189	32952	0.249	
64	64	25			4.201	2.429	13245	33083	0.249	
65	65	25			4.207	2.434	13297	33204	0.249	
66	66	25			4.213	2.438	13347	33318	0.248	
67	67	25			4.219	2.442	13392	33425	0.248	
68	68	25			4.224	2.446	13435	33524	0.248	
69	69	25			4.229	2.450	13475	33617	0.247	
70	70	25			4.233	2.453	13513	33704	0.247	
71	71	25			4.238	2.457	13547	33785	0.247	
72	72	25			4.242	2.460	13580	33861	0.247	
73	73	25			4.245	2.462	13610	33931	0.247	

表6 覆工コンクリート物性値

設計基準強度 f <sub>ck</sub>		[MPa]	吹付け	セグメント
弾性係数 E <sub>c</sub>	長期(掘削時)	[MPa]	4,000	32,000
	短期(地震時)	[MPa]	31,000	-
許容応力度 c	長期(掘削時)	[MPa]	14	
	短期(地震時)	[MPa]	28	-
単位体積重量 t		[Mg m <sup>-3</sup> ]	2.3	-
ポアソン比		[-]	0.2	

注) - は検討に使用していないものである

表7 H型鋼物性値

規格		H-200
許容引張応力度 s' 許容圧縮応力度 s	[MPa]	160
	弾性係数 E <sub>s</sub>	[MPa]
断面積 A	[m <sup>2</sup> ]	6.35 × 10 <sup>-3</sup>

での実測値を追加して岩盤物性データベースを作成し、我が国の幅広い地質環境の特徴を考慮して、坑道の掘削解析に用いる静的力学物性に関しては、硬岩系岩盤で1ケース(HR)、軟岩系岩盤で5ケースの物性(SR-A~SR-E)を設定した<sup>1),2)</sup>。また、坑道の耐震安定性解析に用いる動的力学物性に関しては、その深度依存性も考慮し、硬岩系岩盤で1ケース、軟岩系岩盤では表3中静的力学物性SR-Cに相当する1ケースの物性を設定した<sup>1),2)</sup>。

支保工の物性値は、文献等<sup>3)~7)</sup>を参考に決定した。なお、覆工コンクリートは横置き方式の処分坑道においてTBM(Tunnel Boring Machine)掘削を採用するものとしてコンクリートセグメントの物性値で、その他の坑道については自由断面掘削機やNATM(New Austrian Tunneling Method)などを採用するものとして吹付けコンクリートの物性値で計算を行った。

### 2.3 処分深度

処分深度は、地層処分の目的である長期安全性の確保を前提として、地質環境の長期安定性や母岩の広がり、地下水の地球化学特性、地下水流動などの地質環境の特性、建設技術や調査技術の適用範囲、空洞安定性や熱的安定性といった面から把握される深度の影響、さらに経済性などを勘案して設定される。ここでは、一例として、硬岩系岩盤で1,000m、軟岩系岩盤で500mとした。

### 2.4 解析に用いた評価指標

坑道や処分坑道の掘削による影響を調べるためには、坑道周辺の地山について評価する必要がある。その評価方法としては、変形性に着目した評価方法及び応力状態に着目した評価方法が考えられる。また、坑道が長期にわたって安定性に保つためには、支保工が破壊せず健全な状態を保つことが必要である。ここでは、放射性廃棄物を取り扱う重要性を鑑み、これらをすべて満足するものとして、表8に示す評価指標を用いた。なお、各指標においては、以下の点を条件とした。

#### 支保工の応力度

表6~7に示す許容応力度の値を超えないこと。

表8 解析に用いた判定の指標

理論解析	有限要素法解析
支保工応力度	支保工応力度
-	岩盤の局所安全率
岩盤の直ひずみ	最大せん断ひずみ

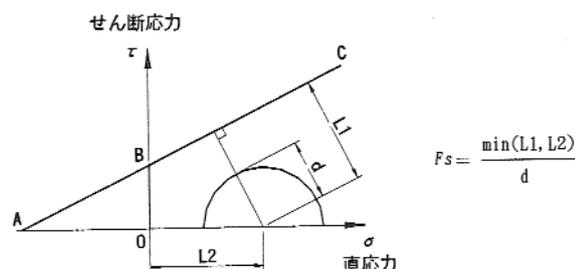


図4 局所安全率の定義

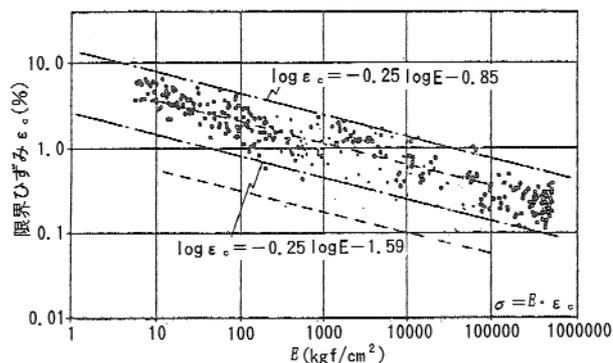


図5 限界ひずみと弾性係数の関係<sup>10)</sup>

### 局所安全率 (Fs)

局所安全率は、図4に示す破壊接近度にて示すこととし、単一空洞においてを下回る領域が大きく分布しないこと、あるいはを下回る領域が対策工により改良できる範囲にあること、双設空洞においては、空洞間に健全な岩盤を確保するという考え方にに基づき、単一空洞と同様の条件を満足すること、坑道間あるいは処分孔間に、局所安全率を上回る領域が確保されていること。

#### 岩盤の直ひずみ・最大せん断ひずみ

桜井の提案する限界ひずみ<sup>9)</sup>の考え方を適用し、理論解析では、岩盤の直ひずみが図5<sup>10)</sup>に示す2式の平均値を超えないこととした。FEM解析では、限界ひずみと同様、限界せん断ひずみ<sup>11)</sup>の対数平均値を目標値として用い、その分布領域に着目した。具体的には、単一空洞では周辺地山に大きな変形が生じないこと、双設空洞では坑道離間距離あるいは処分孔間隔を小さくすることにより、最大せん断ひずみの大きさや分布領域が大きく変化しないこととした。

### 3. 検討の方法と結果

検討は、最初に各坑道に対して、理論解析を用いて概略の支保工仕様を算定した。次に有限要素法解析を用いて、アクセス坑道を単一空洞、その

他の坑道を双設空洞として、理論解析で求めた支保工仕様の妥当性を検証するとともに、力学的安定性の面から必要となる坑道離間距離、処分孔間隔を設定した。また、坑道の力学的安定性に問題が生じると考えられる坑道の交差部分と地震時についても別途検討を行い、坑道の交差部においては、補強が必要となる範囲を求めることとした。

### 3.1 理論解における支保工厚の概略検討

#### 検討方法

支保工厚の概略検討は、岡の方法<sup>11)</sup>により行った。岡の方法は、検討対象のトンネル形状として円形を仮定しているため、ここでは仕上がり内径に各坑道の最大幅（アクセス坑道： $\phi = 6.5\text{m}$ 、主要・連絡坑道： $\phi = 5.0\text{m}$ 、横置き方式処分坑道： $\phi = 2.22\text{m}$ ）を考えた円形トンネルで概略検討を行った。

なお、理論解析では初期地圧応力 $P_0$ に等方圧を考えていることから、鉛直応力 $\sigma_v$ と水平応力 $\sigma_h$ のうち大きい方を $P_0$ とした。

#### 検討ケース

検討は、軟岩のアクセス坑道、主要・連絡坑道については、覆工コンクリートのみのほかに、覆工コンクリートにH鋼を1.5mに1本加えた解析を行い、硬岩のアクセス坑道、軟岩の処分坑道については、覆工コンクリートのみの解析を行った。

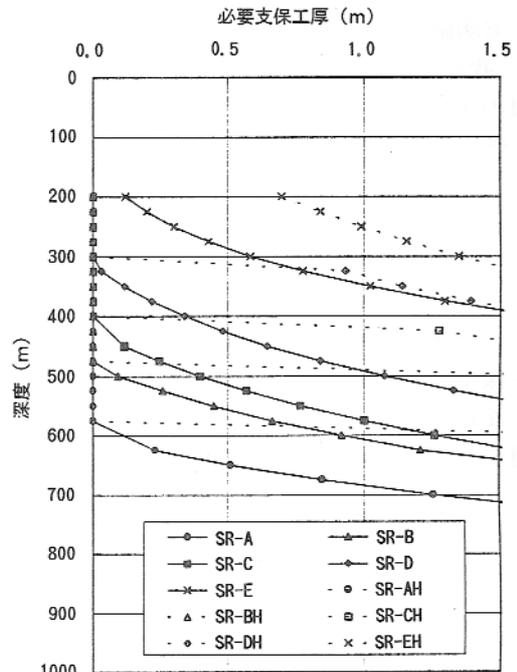
#### 解析結果

硬岩系岩盤は、最も坑道径の大きいアクセス坑道において、理論解析上は深度1,500m程度まで岩盤自身の支持力で空洞が安定することが示された。また、他の主要・連絡坑道、処分坑道では、坑道径がアクセス坑道より小さいため、これらの坑道についても解析上岩盤自身の支持力で空洞が安定すると考えることができる。ただし、実際の施工上は岩盤の割れ目の状態や初期地圧の大きさに応じて支保工の設置が必要になる。

一方、軟岩系岩盤では、岩盤の力学物性により岩盤自身の支持力で空洞が安定する深度は異なり、相対的に堅硬なSR-Aから軟弱なSR-Eに移行

表9 必要支保工厚

	硬岩系岩盤	軟岩系岩盤
アクセス坑道	0cm	45cm
主要・連絡坑道	-	41cm
処分坑道	横置き	9cm
	縦置き	41cm



表中の物性値にHを添えたものは、H鋼を1.5mに1本加えた結果である。

図6 理論解析結果（軟岩系岩盤、主要・連絡坑道）

するにつれ岩盤自身で安定する深度は浅くなる。同じ深度で必要となる支保工厚は、SR-AからSR-Eに移行するにつれ大きくなっており、検討深度を500mとすると、SR-D及びSR-Eは必要支保工厚が1m以上にも達し、施工上相当な対策が必要となる。現実的な支保工が成立する範囲で、合理的に掘削可能と考えられる岩盤は解析上SR-A～SR-Cとなり、有限要素法解析の検討においては、これらのうち最も物性値の低いSR-Cの値を用いて検討を行うこととした。

図6に解析結果の一例を、表9に解析結果の一例を示す。なお、各支保工厚は、検討深度を硬岩系岩盤で1,000m、軟岩系岩盤（物性値：SR-C）で500mに設定したときの値を示した。

### 3.2 有限要素法による支保工厚の確認

ここでは、前述した各坑道における理論解析の結果を検証し、支保工厚が妥当であることを確認すること、及び空洞の力学的安定性上必要となる隣接坑道離間距離を求めることを目的に弾塑性有限要素法解析を行った。解析は、Mohr-Coulombの破壊基準に従う完全弾塑性モデルを採用し、アクセス坑道、主要・連絡坑道、横置き方式の処分坑道においては2次元解析（一般化平面ひずみ条件）にて、縦置き方式の処分坑道においては3次元解析にて検討を行った。

### 硬岩系岩盤

#### 1) 検討方法

岩盤の物性値には、表2に示すHRの値を用い、検討深度は1,000mとした。坑道形状、及び寸法は、これまでの検討結果及び解析結果より図2のように設定した。なお、実際の施工にあたっては肌落ち防止など安全性の観点から吹付けコンクリートが必要となるが、構造部材として考えないこととし、解析においては考慮しない(解析は無支保とする)こととした。また、1サイクルの掘進長はすべての断面において1.5mとした。

#### 2) 解析手順

以下に解析手順を示す。

STEP 1 : 自重計算

STEP 2 : 坑道を一括掘削し、掘削解放応力を全て作用させる。

STEP 3 ( 竖置き方式の処分坑道のみ ) : 処分孔を一括掘削し、掘削解放応力をすべて作用させる。

#### 3) 検討ケース

アクセス坑道は、坑道中心から境界までの距離として、一般にトンネル掘削の影響がないと考えられている $5D^8)$  ( $D$  : 坑道仕上がり径、以下同様)を採用し、単一空洞として2次元弾塑性解析を行った。

一方、主要・連絡坑道及び処分坑道は、隣接坑道あるいは処分孔の掘削が空洞安定性に影響を及ぼすと考えられることから、処分坑道の離間距離、処分孔間隔をパラメータに解析を行った。なお、主要・連絡坑道及び横置き方式の処分坑道は、坑道離間距離のみがパラメータとなることから2次元弾塑性解析にて、竖置き方式の処分坑道は、坑道離間距離と処分孔間隔の2つの要素がパラメータとなることから3次元弾塑性解析にて検討を行った。

なお、双設トンネルでは、「トンネル相互の掘削による影響は、地山条件や施工法により異なるが、一般に弾性挙動をする地山では中心間隔を掘削径 $D$ の2倍(離隔距離で $1D$ )、軟弱地質の場合では5倍程度とすればほとんど及ばないといわれている<sup>8)</sup>」ため、ここでは検討を行う坑道及び処分孔の離間距離(中心間隔)を $2D \sim 5D$ の範囲で設定した。

#### 4) 解析結果

解析結果の一例を図7に示す(竖置き方式の処分坑道、坑道離間距離 $2.0D$ 、処分孔間隔 $2.0d$ の結果を示す)。

アクセス坑道は、局所安全率が目標値を下回る

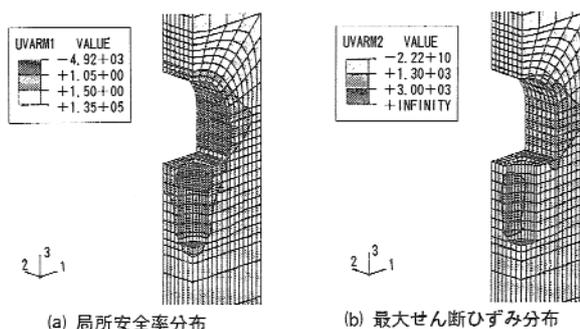


図7 FEM解析結果  
( 軟岩系岩盤、処分坑道 ( 竖置き )  
坑道離間距離 $2.0D$ 、処分孔間隔 $2.0d$  )

表10 離間距離のまとめ ( 硬岩系岩盤 )

	主要・連絡坑道	処分坑道 (横置き方式)	処分坑道 (竖置き方式)
坑道離間距離	2.0D	2.0D	2.0D
処分孔間隔	-	-	2.0d

領域が坑道壁面から70cm程度発生するものの、最大せん断ひずみは目標値0.30%を超える領域は発生していない。また、壁面変位も小さくゆるみ領域も小さいと考えられるため、肌落ち防止程度の吹付けコンクリートで、力学的安定性は確保できるものと考えられる。

また、他の坑道についても同様に、局所安全率や最大せん断ひずみ分布、壁面変位などに着目すると、坑道離間距離、処分孔間隔に表10に示す値をとれば、力学的安定性はおおむね確保できるものと考えられる。なお、局所的に局所安全率の低下が認められる部分や岩盤の割れ目部分については、吹付けコンクリートやロックボルトなどによる対策工を施すものとした。

### 軟岩系岩盤

#### 1) 検討方法

岩盤の物性値には、表3に示すSR-Cの値を用い、検討深度は500mとした。坑道形状、及び寸法は、これまでの検討結果及び解析結果より図3のように設定した。なお、覆工コンクリートは、処分坑道横置き方式においてTBM施工としセグメント厚を10cm、その他の坑道においてはNATMや自由断面掘削機などによる施工を前提に吹付け厚を50cmとして解析を行った。また、1サイクルの掘進長はすべての断面において1.5mとした。

#### 2) 検討手順

以下に解析手順を示す。

STEP 1 : 自重計算

STEP 2 : 坑道を一括掘削し、1 掘進長の掘削相当外力（応力解放率：65%）を解放させる。

STEP 3 : 支保工設置

STEP 4 : 残りの解放応力を作用させる。

STEP 5 ( 縦置き方式の処分坑道のみ ): 処分孔を一括掘削し、掘削解放応力をすべて作用させる。

3) 検討ケース

各坑道における解析ケースは、硬岩と同様、アクセス坑道について 1 ケース、その他の坑道については、坑道離間距離あるいは処分孔間隔をパラメータに解析を行った。

4) 解析結果

アクセス坑道は、局所安全率が目標値  $F_s = 1.5$  を下回る領域が坑道壁面から 190cm 程度発生し、最大せん断ひずみは目標値 0.30% を超える領域は 110cm ほど発生する。支保工の応力度は 11.3MPa と許容値以内にあり、力学的安定性は確保できると考えられるが、局所安全率、最大せん断ひずみにおいて目標値を超える領域の大きさを考えると、地下深部において地圧が大きく不安定となる部分においては、ロックボルトなどの補強工法が必要になると考えられる。

また、他の坑道についても同様に、局所安全率や最大せん断ひずみ分布、支保工応力度などに着目すると、坑道離間距離、処分孔間隔に表 11 に示す値をとれば、力学的安定性はおおむね確保できるものと考えられる。なお、局所安全率や最大せん断ひずみ分布において、目標値を超える部分が大きくなる箇所や岩盤の割れ目部分については、ロックボルトなどによる対策工を施すものとした。

3.3 坑道交差部の検討

大断面トンネルが交差する場合、その構造形状の特殊性により複雑な 3 次元的応力場が形成される。また、交差部周辺の地山の挙動は、その特性や施工方法・交差角度等により影響を受け、各現場の施工条件により異なったものとなる。そのため、3 次元有限要素法等による多くの解析例はあるものの、いまだ的確な設計手法及び施工法を示すに至っていない。

表 11 離間距離のまとめ（軟岩系岩盤）

	主要・連絡坑道	処分坑道 (横置き方式)	処分坑道 (縦置き方式)
坑道離間距離	2.6D	2.5D	2.6D
処分孔間隔	-	-	3.0d

ここでは、3 次元弾性有限要素法解析により、坑道交差部（主要坑道と処分坑道）の掘削が周辺地山に及ぼす影響を検討し、交差部の補強範囲の考察を行う。

解析条件

1) 解析モデル

解析は、坑道交差部のなかでもっとも力学的安定性上厳しくなると考えられる図 8 に示す主要坑道と処分坑道交差部にて行った。坑道の交差角度は  $30^\circ$  とし、解析領域は坑道交差部中心より各側面までの距離を  $5.0D$  とした。

解析モデルは、硬岩系岩盤は幌形断面で、軟岩系岩盤は馬蹄形断面とした。なお、軟岩系岩盤における覆工コンクリートは、シェル要素にてモデル化した。

2) 解析手順

以下に解析手順（軟岩系岩盤）を示す。

STEP 1 : 自重計算

STEP 2 : 主要坑道部分を一括掘削する。このとき、1 掘進長（1.5m）の掘削相当外力に相当する応力を解放する。

STEP 3 : 主要坑道部分の支保工を設置する。設置後、残りの解放応力を作用させる。

STEP 4 : 交差する処分坑道を一括掘削する。1 掘進長（1.5m）の掘削相当外力（応力解放率：65%）に相当する応力を解放する。

STEP 5 : 処分坑道部分の支保工を設置する。設置後、残りの解放応力を作用させる。

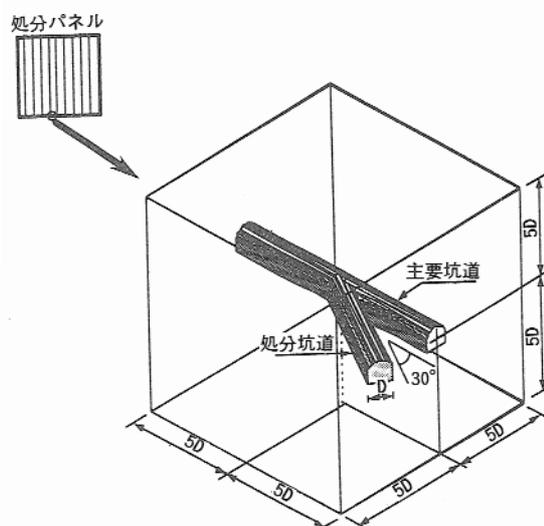


図 8 交差部検討モデル

硬岩系岩盤については、支保工を設置しないため、主要坑道掘削、処分坑道掘削の2ステップとした。

3) 解析ケース

解析ケースは、硬岩系岩盤、軟岩系岩盤で各1ケースの計2ケースとした。

解析結果

図9に検討断面の位置を示し、図10~11に解析

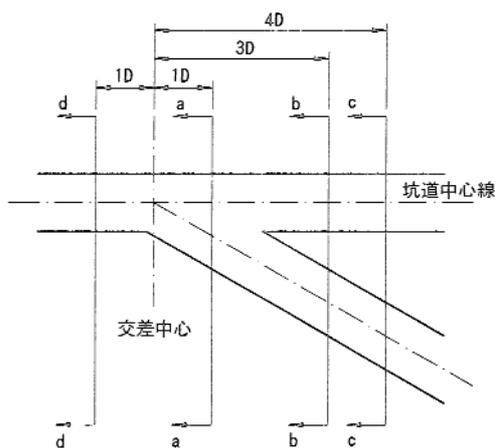


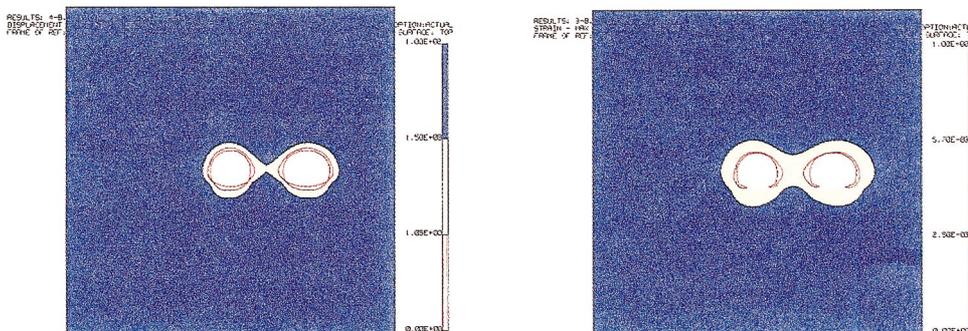
図9 断面位置図

結果の一例を示す(軟岩系岩盤、c-c断面及び支保工応力度の結果を示す)。

硬岩系岩盤では、交差中心より3D離れた断面では、最大せん断ひずみは目標値0.30%以下の領域が坑道間に存在するが、局所安全率 $F_s = 1.5$ を下回る領域が坑道間で連続する。交差中心から4Dまで離れると、坑道間に安全率 $F_s = 1.5$ 以上の領域が確保される。

また、鈍角側では、交差中心から鋭角側1Dの断面で天端部分に発生する引張応力が鈍角側1Dの断面では発生しない。したがって鈍角側については、交差中心から1Dが補強が必要となる範囲と考えられる。

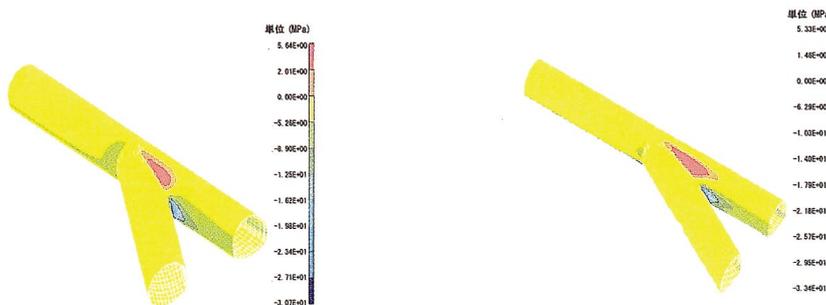
一方、軟岩系岩盤でも同様の傾向を示している。交差中心から3Dの断面では、局所安全率が1.0以下、最大せん断ひずみが目標値0.57%以上の領域が連続するが、4Dの断面では同領域が離隔をもって分布する。また、支保工横断方向縁応力の分布では、交差中心から3.5Dの範囲で引張応力が発生する。また、鈍角側については、鋭角側1Dで岩盤に発生する引張応力が、鈍角側1Dで発生しない。したがって、補強範囲は硬岩系岩盤と



(a) 局所安全率分布

(b) 最大せん断ひずみ分布

図10 解析結果(軟岩系岩盤、坑道交差部c-c断面)



(a) 内側上面

(b) 外側上面

図11 支保工横断方向縁応力(軟岩系岩盤)

表12 交差角度と影響範囲<sup>(12), (13)</sup>

交差角度	影響範囲	
	鋭角側	鈍角側
90°	1D	
60°	2D	1D
30°	4D	1D

同様、鋭角側4D、鈍角側1Dであると考えられる。なお、以上の検討で得られた補強範囲は、従来の施工で参考とされてきた表12<sup>(12), (13)</sup>と一致している。

### 3.4 地震時の検討

地層処分場の建設・作業が安全かつ円滑に行われるためには、処分場の地下空洞が掘削時に安定であることに加えて、地震時にも安定であることが必要である。ここでは、アクセス坑道及び処分孔縦置き方式における処分坑道を対象に、有限要素法を用いた静的線形解析により、地震荷重に対する力学的安定性を検討した。

#### 検討方法及び手順

構造物の耐震性を検討する場合、動的手法または静的手法が用いられる。前者は、振動方程式あるいは波動方程式を解いて動的応力を求めるもので、外力としては地震波が用いられる。後者は、動的な地震力を静的な力や変位に置き換えて、応力及び変形を静的な釣合い式から求める方法である。岩盤内に設置される地下貯油施設等の技術指針<sup>(14), (15)</sup>では、耐震性の検討は地震時の荷重を静的に作用させる震度法を基準としている。したがって、ここでは、自然地盤（構造物のない地盤）の地震応答解析を行って地盤の応答震度を算出し、全体モデルに物体力として静的に作用させる応答震度法を用いることとした。

検討手順は以下のようにした。

重複反射理論により自然地盤の応答震度を算出する（重複反射理論解析）

坑道掘削前の岩盤に対して自重解析を行い、そのモデルで坑道の掘削解析を行う（坑道の掘削解析）

上記で設定した応答震度を物体力として坑道の掘削解析後のモデルに作用させる（坑道の耐震安定性解析）

#### 1) 重複反射理論解析

応答震度は、重複反射理論解析により求められる自然地盤のせん断応力から、以下の式に従い算出した。

$$K_{Hi} = \frac{\tau_{Li} - \tau_{Ui}}{h_i \cdot \gamma_i}$$

$$\tau_{Ui} = \frac{\tau_{i-1} \cdot h_i + \tau_i \cdot h_{i-1}}{h_{i-1} + h_i}$$

$$\tau_{Li} = \frac{\tau_i \cdot h_{i+1} + \tau_{i+1} \cdot h_i}{h_i + h_{i+1}}$$

$K_{Hi}$  : i層における水平震度

$U_i$  : i層上端のせん断応力

$L_i$  : i層下端のせん断応力

$i$  : i層中心のせん断応力

$h_i$  : i層の層厚

$\gamma_i$  : i層の単位体積重量

評価において、処分坑道では処分深度、立坑では処分深度及び地表面に着目するため、応答震度は、処分深度でのせん断ひずみが最大となる時刻及び地表面でのせん断ひずみが最大となる時刻でのせん断応力分布から算出した2ケースと、時間を考慮しない最大せん断応力分布の絶対値から算出した1ケースの計3ケースを算出した。

入力地震波に関しては、地震工学上しばしば用いられるインペリアル地震〔震源地：米国カリフォルニア州南部、32.7°N、115.5°W、マグニチュード：M=6.7、観測地：南シアラ電力会社エルセントロ発電所（震源断層付近）<sup>(6)</sup>〕を用いることとし、本地震が地表面での水平成分になると仮定した。

図12に重複反射理論解析により求められたせん断応力分布から算出された応答震度を示す。

#### 2) 坑道の掘削解析

解析条件、手順、物性及び境界条件等は前述の3.2「有限要素法による支保工厚の確認」に順じた。ただし、坑道の耐震安定性評価では、掘削による影響と地震荷重による影響を重ね合わせるため弾性解析とした。解析モデルは、処分孔縦置き方式における処分坑道（水平坑道）の場合、2次元モデルとし、水平方向には隣接する処分坑道との中間地点までの距離、鉛直方向には境界の影響がないよう坑道中心レベルから上下に坑道径の5倍の距離をその範囲とした。立坑の場合、立坑中心部鉛直方向を軸とした3次元モデルとし、モデル化範囲に関しては、鉛直方向を地表面から処分深度+200m、水平方向を中心から約40mとした。掘削解放率に関しては、一律65%とし、支保工設置後残りの解放力を作用させた。ただし、硬岩系岩盤で無支保の所（処分坑道及び立坑50m以深）では掘削時に全解放力を作用させた。

#### 3) 坑道の耐震安定性解析

解析モデルは坑道の掘削解析と同様とし、手法

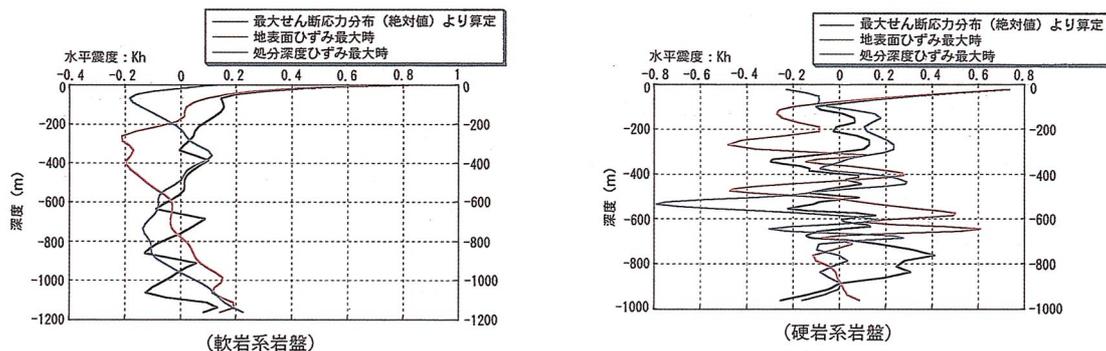


図12 重複反射理論解析から求められたせん断応力分布により算出された応答震度（水平成分）

も同様に弾性解析とした。境界条件に関しては、側方を水平ローラ境界とし、モデル上下端の境界は掘削解析と同様とした。ただし、処分坑道（水平坑道）の検討における上端では、上部地層の影響を考慮し、重複反射理論解析から求まる解析モデル上端レベルにおけるせん断応力を入力した。

処分坑道の評価で用いた応答震度は、図12で示した応答震度より、処分深度でのひずみが最大となる時刻での自然地盤応答せん断応力から算出したものを用いた。図13に解析モデル及び解析領域内に載荷した応答震度を示す。

一般に、立坑のような長大構造物に対する静的震度法に用いる震度として、最大せん断応力分布（位相差を考慮しない：絶対値）から求められる等価

震度が用いられている<sup>17)</sup>。また、立坑の場合、解析評価着目深度によって用いる応答震度が異なるが、ここでは、処分深度及び地震振幅が比較的大きい地表面に着目した。このため立坑の応答震度として、図12で示した3ケースの応答震度の絶対値を用いた。表13に立坑の場合の検討ケースを示す。また、図14に立坑の検討に用いた応答震度を示す。

解析結果

解析結果の一例として、図15及び図16に処分坑道及び立坑における掘削時と地震時の局所安全率分布図を示す。これから処分坑道及び立坑ともに、坑道掘削時と比較して地震時増分は非常に小さいことが分かる。最小主応力、最大せん断ひずみについても地震時増分は非常に小さく、支保工応力度も許容値を下回ることが確認された。また、処分坑道においては、局所安全率が目標値を下回る領域は坑道壁面周辺に限られ、隣接する坑道との中心までは達していない。この傾向は、最小主応力、最大せん断ひずみについても同様であった。立坑に関しては、軟岩系岩盤における深度360m以深で、目標値1.5を下回ったが、その最小値は1.19であり、1.5以下の範囲は立坑壁面から2m以内に留まっている。また、最小主応力に関しては、硬岩系岩盤の坑口付近の一部で引張応力が生じているが、その値は0.02MPa以下であり、最大せん

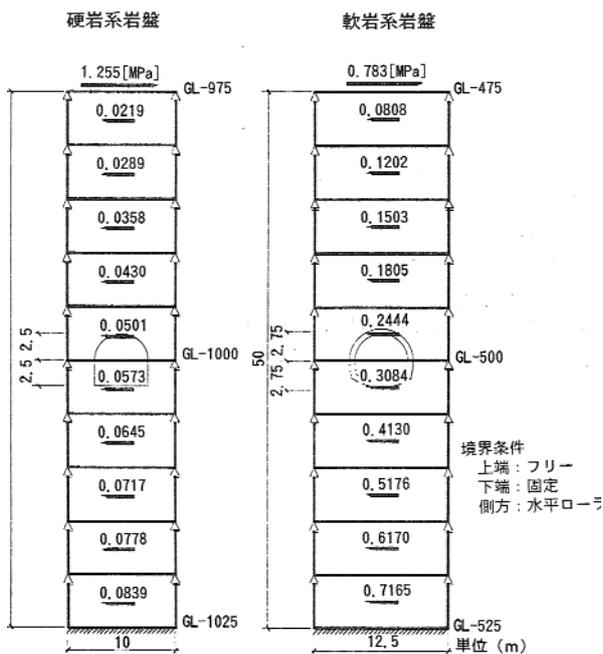


図13 解析モデル及び解析領域内に載荷した応答震度（処分坑道）

表13 立坑における解析ケース（応答震度の設定種類）

ケース名	地層条件	水平震度分布
H 1	硬岩系岩盤	最大ひずみ分布に基づく水平震度
H 2		地表面ひずみ最大時分布に基づく水平震度
H 3		処分深度(1000m)ひずみ最大時分布に基づく水平震度
S 1	軟岩系岩盤	最大ひずみ分布に基づく水平震度
S 2		地表面ひずみ最大時分布に基づく水平震度
S 3		処分深度(500m)ひずみ最大時分布に基づく水平震度

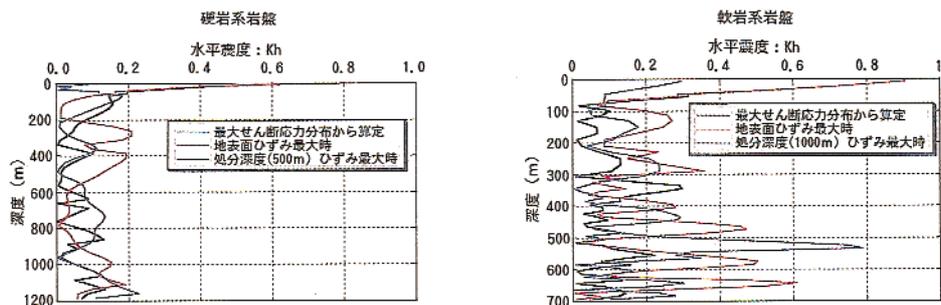


図14 立坑の解析に荷した応答震度（水平成分）

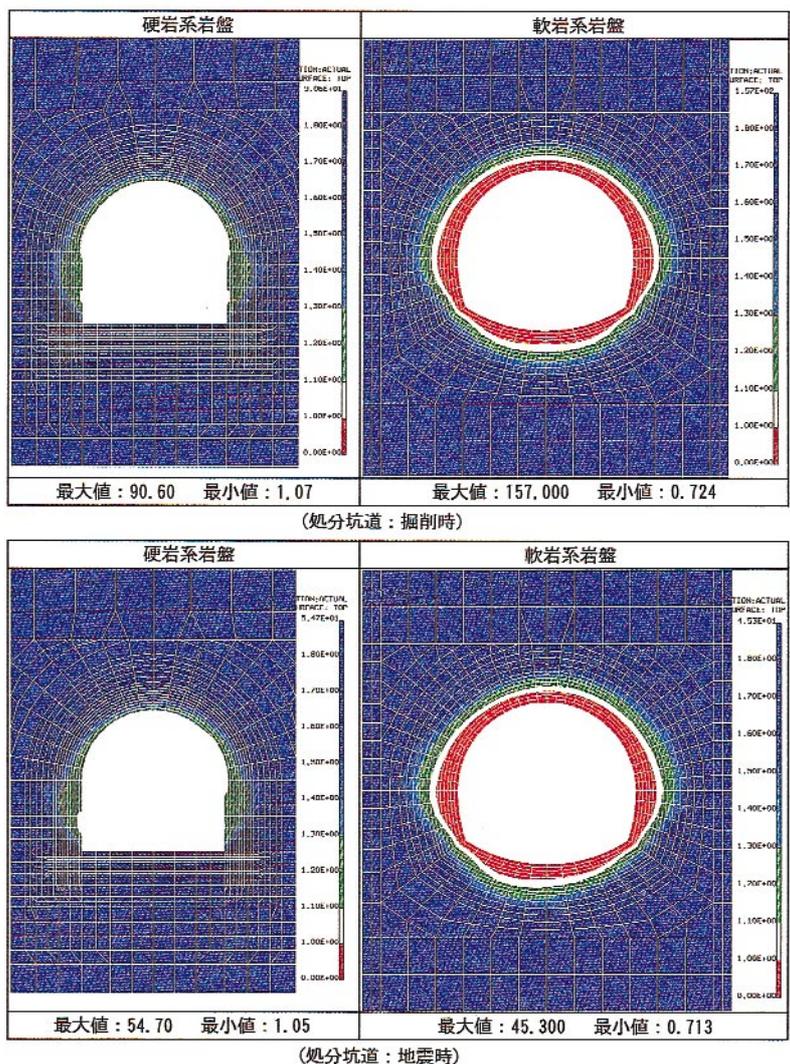
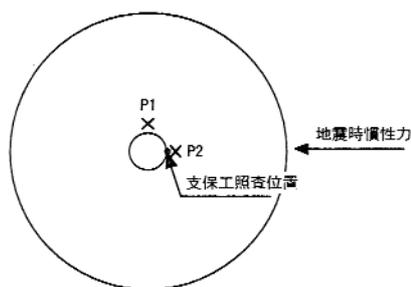


図15 処分坑道の局所安全率分布図

断ひずみに関しては、目標値（硬岩系岩盤：0.30%、軟岩系岩盤：0.57%）を上回ることはなかった。これらの、結果から、処分坑道（水平坑道）及び立坑ともに、掘削時の力学的安定性が確保されているのであれば、地震時の力学的安定性も確保されると考えられる。

4. おわりに

以上の検討により、アクセス坑道については適切な支保工により、また、主要・連絡坑道、処分坑道においては、表10～11に示した離間距離と適切な支保工仕様を満足すれば、坑道の力学的安定性は確保できるものと考えられる。しかし、これ



出力点

(硬岩系岩盤：立坑)

(軟岩系岩盤：立坑)

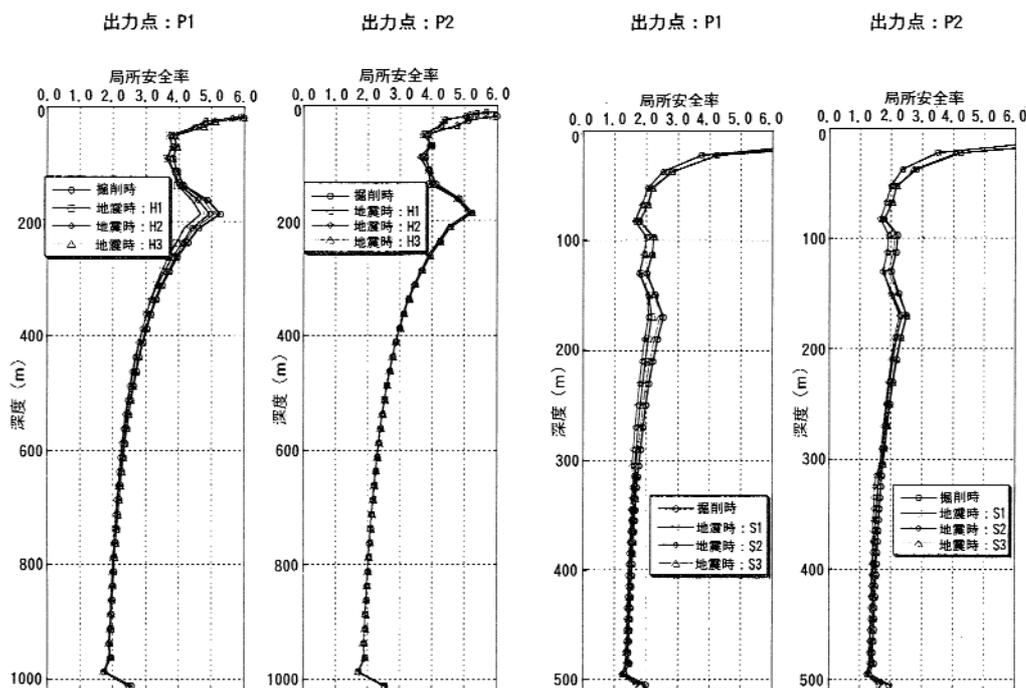


図16 立坑の局所安全率分布図

らの検討においては、ニアフィールドの温度制限やサイトからの制限(地形、敷地の形状、面積)、初期地圧の主応力方向や割れ目の卓越方向、広域地下水流動(流速、流向)といった地質環境からの制限などは考慮されていない。今後、実施設計にあたっては、これらの制限を設計に反映させるとともに、技術の進展に伴い、随時設計手法や施工方法を見直し、より安全で合理的な設計が行われることが望まれる。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物 地層処分技術の信頼性，地層処分研究開発第2次取りまとめ - 分冊2 地層処分の工学技術 -，JNC TN1400 99-022 (1999)。
- 2) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物 地層処分技術の信頼性，地層処分研究開発第2次取りまと

- め - 分冊1 わが国の地質環境 -，JNC TN1400 99-021 (1999)。
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書 - 設計編 - (1996)。
- 4) 土木学会：トンネル・ライブラリー 第6号 - セグメントの設計 - (1994)。
- 5) 日本鉄道建設公団：NATM設計施工指針 (1996)。
- 6) 併進工法研究会：掘削・覆工併進工法 - 直打ちコンクリート工法(山岳編) -，吉井書店 (1991)。
- 7) 土木学会：トンネル標準示方書 - 開削工法編 - (1996)。
- 8) 土木学会：トンネル標準示方書 - 山岳工法編 - (1996)。
- 9) 桜井春輔：NATMにおける現場計測と管理基準値，土と基礎，Vol.34-2(337)，pp.5~10 (1986)。
- 10) 桜井春輔，足立紀尚：都市トンネルにおけるNATM，鹿島出版会 (1988)。
- 11) 岡 行俊：NATMにおける支保理論，施工技术，Vol.10，No.11，pp.6~12 (1977)。
- 12) 鈴木幾雄，川北真嗣 他：飛騨トンネルにおける大断面交差部の設計と施工，トンネルと地下，Vol.29，No.10，pp.7~14 (1998)。
- 13) 今田 徹，山崎良一 他：光弾性実験によるトンネル交差部の応力性状，土木学会論文集，第421号 / -13，pp.155~163(1990)。
- 14) 土木学会：地下貯油施設技術指針(案) (1980)。
- 15) 電気事業連合会：水封式燃料地下貯蔵施設技術指針 (1980)。
- 16) 宇津徳治，嶋 悦三，吉井敏毅，山科健一郎：地震の事典(1987)。
- 17) 例えば、電気技術調査委員会：原子力発電所耐震設計技術指針(1984)。