

瑞浪超深地層研究所研究坑道における工学技術に関する研究

Study of Engineering Technologies on Mizunami Underground Research Laboratory Project

○今津 雅紀*・佐藤 稔紀**・見掛信一郎**・玉井 猛**

Masanori IMAZU, Toshinori SATO, Shin-ichiro MIKAKE, Takeshi TAMAI

Two 1,000 m deep shafts and research galleries at several levels will be excavated in the Mizunami Underground Research Laboratory (MIU) Project for the purposes of establishing techniques for investigation, analysis and assessment of deep geological environment, and developing a range of engineering technologies for deep underground application. This paper describes the results of studies on engineering technologies, methods to feeding back measurement results to the design and the construction scheme, techniques for assessing quality of construction, risk management, countermeasures against high-pressure inflow, and earthquake-resistant.

Key word : Shaft, Engineering technologies, Feeding back measurement results, Risk management, Countermeasures, High-pressure inflow, Earthquake-resistant design, Rock burst

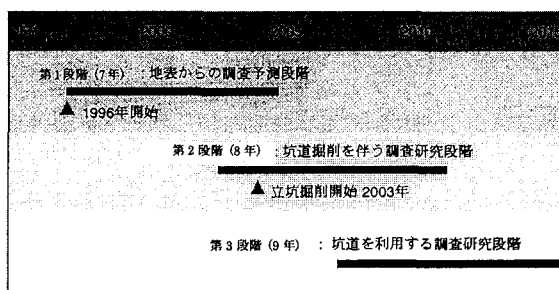
1. はじめに

瑞浪超深地層研究所（以下、研究所）は、2002年7月、造成工事に着工した後、2003年3月、研究坑道（立坑および水平坑道を総称して研究坑道と称す）工事に着手した。現在、坑口上部工および坑口下部工工事などを終え、一般部（GL約50m以深の立坑）掘削開始に向け、樁設備・防音ハウスなどの仮設備工事を本格的に開始しており、1,000m到達を目指して順調に施工が進められている。研究所は、深度1,000m程度まで達する2本の立坑と500mおよび1,000mの深度における水平坑道群等からなり、世界的にも例を見ない大深度の地下空間施設である。本稿では、研究所における工学技術に関する研究を対象とし、まず、全般的な建設の状況を概説し、具体的な項目として、立坑における計測結果の設計・施工計画へのフィードバック方法や研究および施工技術の品質管理方法や突発湧水に対する掘削・施工対策技術の考え方を中心に述べる。

2. 工学技術に関する研究の概要

研究所における工学技術に関する研究の詳細については3章以降に述べることとし、ここでは、研究坑道の設計・施工計画技術の開発および研究坑道の掘削技術、施工対策技術の高度化などについて、今後の研究計画や全体スケジュールとの整合を考慮しつつ検討してきた結果について示しておく。現段階は、表1における第2段階の前半にあたることから、表2に示す展開計画のように、立坑掘削に必要となる事項すなわち地表からの調査予測研究の一環として、本格掘削すなわち立坑一般部掘削に備えることとした。具体的な項目としては、①計測結果の設計・施工計画へのフィードバック技術の確立、②研究および施工技術の品質に関する技術の整備およびデータ取得、③研究坑道掘削に対するリスクマネジメントの適用、④突発湧水に対する掘削・施工対策技術の整備、⑤研究坑道に対する地震動評価に関する検討・解析である。

表1 超深地層研究所計画のスケジュール



(キーワード) 立坑, 工学技術, 地層処分, 計測管理, フィードバック

* フェロー会員 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター 瑞浪超深地層研究所 施設建設グループ
** 正会員 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター 瑞浪超深地層研究所 施設建設グループ

以降、①から⑤の概要とともに検討結果の一例を述べることにする。

表 2 研究坑道掘削の工程と工学技術研究の展開

年 度	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
研究坑道掘削工事	準備工		坑口工					
			設備工					
工学技術研究	立坑一般部掘削(約950m~1,000m)							
	地表からの調査予測研究							
	(フィードバック・品質管理・湧水対策・リスクマネジメント・地震動評価)							
	研究坑道の掘削に伴う研究							
	実験試行・対策改良							
	研究坑道を利用した本格適用・実施							

3. 計測結果の設計・施工計画へのフィードバック技術の確立

トンネル掘削の NATM において一般的に実施されているフィードバック技術を基に、研究所建設用地周辺の地盤構造や岩質、立坑掘削における特殊性を考慮したフィードバック技術確立を目的として、地山評価、空洞安定性評価などに着目し検討した。3.1~3.4 の試行結果に基づいて、立坑施工にあたっての具体的なフィードバック技術案を示すと図 1 の通りとなる。

3.1 観察による地山評価

観察の方法による地山評価においては、掘削後の壁面を対象に RQD・圧縮強度・風化変質・割れ目の間隔・割れ目の方向・土被り高さおよび湧水状況等を詳細に観察し、電中研式岩盤分類法に基づいて評価することとする。あわせて、日本道路公団による岩盤分類等による定量的地山評価法を併用し、地山の総合的な評価を行うこととする。地山観察のうち、割れ目の状態・間隔および方向に関しては、撮影した壁面画像を参考に走向と傾斜を精度よく算定することとする。また、割れ目幾何分布に関しては CAD 技術を利用することで、3 次元分布形状を任意の方向から可視できる方法が確認でき、さらなる地山評価を行うためには不安定ブロックの抽出と移動可能性の評価も必要であることを確認する。これらの観察手法では、立坑周辺の割れ目に着目することになり、壁面等に現れない割れ目は評価することが不可能となる。したがって、事前調査ボーリングデータおよび物理探査データを基に、立坑周辺に存在する割れ目系を補完することで、総合地山評価は信頼度を増すものと考えられる。

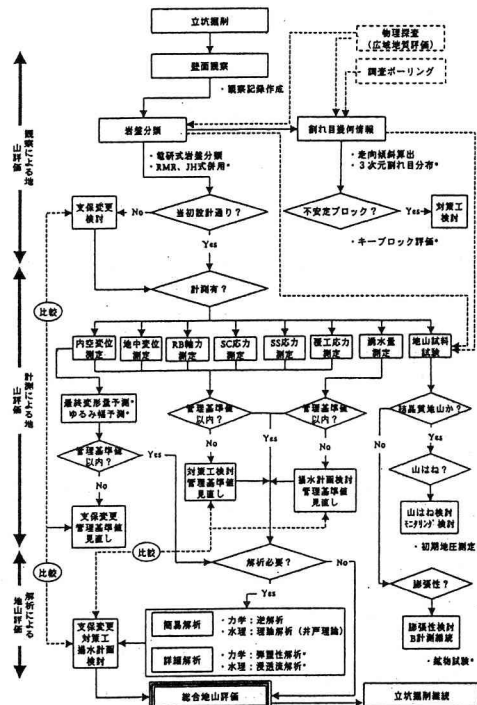


図 1 立坑施工におけるフィードバック案

3.2 計測による地山評価

一般に、計測による地山評価では、切羽観察や内空変位測定などの A 計測と地中変位測定を始めとする B 計測によってトンネル挙動ならびに支保工規模の適否が判断される。本立坑は、ショートステップ工法の在来工法を採用していることから、NATM で一般的に行われている内空変位測定による地山評価方法が適用困難である。そこで、立坑掘削に伴う先行変位を事前に測定し、地山変位の観点からトンネル挙動予測や支保工規模決定ができる判断基準の作成を試みることにした。また、突発事象として山はねや湧水が危惧されることから、山はねに関しては初期地圧測定や AE モニタリングを、湧水に関しては先行ボーリングをオプション的に含めることにした。

3.3 解析による地山評価

解析による地山評価では、簡易解析と詳細解析の2本立てを考えた。簡易解析は、日常管理的に迅速に実施できることを要件とした。空洞の力学安定性評価のためには逆解析法を、水理評価のためには井戸理論を利用した理論解析を組み入れることとする。これらの解析は、基本的に内空変位測定やB計測実施箇所において行うものと考えた。簡易解析における逆解析では、地山を等方均質の線形弾性体と仮定しているため、断層などの弱層をモデル化することは難しい。また、偏圧的な初期地圧を考慮しなければならない場合、内空変位・地中変位計測結果の利用では、測定されていない方向の情報は考慮されていないため、偏圧的な初期地圧の考慮には限界がある。つまり、簡易解析は、日々の管理のためのツールとしては最適であるが、その結果はあくまで目安的な位置づけとして利用することとした。一方、詳細解析は、簡易解析の結果を勘案し、施工中の観察を基に岩盤等級や地質構造の変化点において、掘削前方の事前評価の観点から実施すべきものと想定した。したがって、力学安定評価のためには弾塑性解析法とし、その岩盤物性は、壁面観察および計測による地山評価から得られるものである。また、水理評価にあたっては、浸透流解析を組み入れることとした。

4. 研究および施工技術の品質に関する技術の整備およびデータ取得

研究および施工技術の品質を管理するシステムについて検討するとともに、品質を管理するシステムの構築に必要な技術を整備する。具体的には、品質管理システム・覆工コンクリートの品質および耐火性能・立坑仕上りの品質管理（スムーズブラッシング効果の調査試験計画立案）・ワイヤロープや掘削設備の品質管理項目・方法の検討²⁾、予防保全対策の立案を行った。

4.1 品質管理システムの整備

工学技術研究を対象としてデータを統合化することにより、調査によって取得したデータがその解釈を経てデータセット化され、それらが施工管理をはじめとして、地質構造・岩盤力学・水理・地球化学のモデル化、数値解析等に反映されていく流れを整理するため、品質管理システムを構築した。具体的には、下記に示すシステムを整備する予定である。

① 坑内管理システム

入出坑管理・坑内環境管理・坑内火災管理・坑内通信の4システムからなる。

1) 入出坑管理システム

入坑者の人数と人物の特定および具体的な人員配置を把握し、災害発生時における避難誘導などの安全管理を目的とするシステムである。

2) 坑内環境管理システム

坑内の環境を計測し、入坑者が安全に坑内作業が出来る環境か否かを監視し、状況に応じて換気設備を制御できるシステムである。

3) 坑内火災管理システム

坑道内の火災発生を速やかに検知し、坑内に設置する警報通報設備により、入坑者に非常事態の発生を知らせると同時に避難所への誘導を行う。また、避難所への非常給気弁の開閉切替えと通気門の開閉を制御し、熱気・煙を換気コントロールすることにより避難通路の確保を目的とするシステムである。

4) 坑内通信システム

坑内外の音声通信、警報の通報および画像状況などを、中央モニターで一括管理する。非常事態の発生時には、中央からの一斉通報や坑道内のサイレン・パトライトの通報およびCCDカメラによる画像監視を行うことを目的とするシステムである。

② 工程・情報管理システム

超深地層研究所研究坑道の建設に係わる各種文書やデータを管理することを目的として、工程進捗データおよび日常の管理データを管理するシステムである。

③ 計測管理システム

各立坑における計測データを管理するシステムである。計測は、切羽観察と内空変位計測の一部を除き自動計測とし、地上および100mごとの予備ステージに設置するデータロガーにてデータを収集し、無線LANユニット・光ファイバー等を介して地上の計測管理室にて収録することとした。計測管理システムは、地上の計測管理室におけるリアルタイムでの計測値の把握と記録が可能な仕様とした。

④ 掘削設備・施工技術・工学技術研究の品質管理システム

長期にわたる掘削に用いる各種設備の品質管理や超深地層研究所研究坑道の建設中における施工技術の品質管理データ、および地質環境情報や各種材料の品質管理データについて、追跡性を有して保存・管理するシステムを予定している。

4.2 覆工コンクリートに対する要求性能項目

立坑の要求性能を満足するために要求される覆工コンクリートの主な性能として、設計健全性、材料健全性、施工性、構造健全性、耐震安定性、耐久性（耐火性含む）、止水性、周辺環境への影響の8項目が挙げられる。

- ① 設計による構造体としての健全性：覆工コンクリートが、構造体としての耐久性、要求性能等を満足するために、その設計において性能を確保しておくことが考えられる。
- ② 材料としての健全性：覆工コンクリートが、構造体としての耐久性、要求性能等を満足するために、材料の設定において性能を確保しておくことが考えられる。
- ③ 施工における健全性：施工性能は、施工条件・構造条件・環境条件に応じて、運搬・打ち込み・締固めなどの作業に適する能力であり、所要性能の覆工コンクリートを所要の寸法・精度で実現するために必要である。
- ④ 常時の構造健全性：覆工コンクリート自体に支保機能は付加されていないが、所要の強度を発現することで、地質の不均一性、支保工材料の品質のばらつき、ロックボルトの腐食などの不確定要素を考慮した構造体としての安全性を高めることができる。
- ⑤ 耐震安定性：研究所の地震に対する基準としては、基本的にコンクリート標準示方書に基づくとともに、別途、耐震解析を行い検討することとする。
- ⑥ 耐久性・耐火性・水密性・構造維持性：耐久性とは、劣化外力に対して抵抗し、要求される力学的ならびに機能的な性能を保持する能力を示し、立坑においては、補修が困難であることから、漏水や材料の経年変化などによる劣化の少ない耐久性のあるものでなければならない。また、火災時にコンクリートの爆裂を防止でき、二次災害が発生しないようにする必要がある。
- ⑦ 運用時止水性：立坑は地下研究施設へのアクセスの役割を担い、人員・資材の移動・運搬・換気などの経路となる。建設中においては施工のための掘削設備、運搬設備、作業用通路、諸設備等の工事用設備が、建設後において配置されることから、それらの配置を満足する内空断面を保持し、漏水の少ない水密性の構造体であることが重要である。
- ⑧ 周辺環境への影響：立坑の構造や材料が天然バリアである岩盤に悪影響を与えない必要がある。今後は、上記の要求性能項目の確認を、立坑掘削の進捗に応じて適宜実施していく予定である。

4.3 スムーズブラスティング効果の調査試験計画立案

研究坑道掘削の品質管理として重要な立坑の仕上がりについて、スムーズブラスティング（SB と略す）工法を立坑掘削に適用する場合の①具体的な試験施工の計画、②SB の効果を評価するための試験測定項目を立案した。具体的な実施内容は、表 3 に示す 2 項目が考えられ、その際必要な試験測定項目を示しておく。

表 3 具体的な実施内容と試験測定項目

具体的な実施内容	試験測定項目
1. 余掘り量の低減確認	削孔精度測定、孔数&装薬量調査、のみ跡率&のみ戻長測定、坑壁形状測定、コソク時間測定、坑壁観察、コンクリート打設量計測
2. 掘削影響領域の低減確認	ボーリングコア観察、BHTV 測定、高精度屈折法、PS 検層、孔内載荷試験

5. 研究坑道掘削に対するリスクマネジメントの適用

研究坑道の建設に対するリスクマネジメント手法の有用性を検証するために、まず、坑道施工時のリスクについて主観的評価を行った³⁾。具体的には、施工時に生じる可能性のあるリスクの抽出を行い、図 2 に示すよう定量化した場合にリスクが小さいと思われる項目を除外した 12 項目（人的災害・落下物による設備損害・発破による設備損傷・火災・突発湧水・地震・山はね他）について検討した。さらに、坑道施工時のリスクに対してより詳細な検討を行い、実務的なレベルに適用するために評価制度の向上を図ることを目的として、イベント間の相関や複数事象の連鎖的発生を考慮し個々のリスクの発生確率、損失量等をより詳細に検討して精度の向上を図った。

一例として、山はねの事例をここでは紹介する。山はねは、一般に大深度の坑道や空洞の周辺地盤において生じる破壊現象であり、岩塊の飛び出しや岩盤が破壊する音が鳴る「山鳴り」などが生じる。山はねを起こす地山の特徴としては、以下の通りである⁴⁾。

- ① 石英閃緑岩・片麻岩等を主体とする堅硬で節理・シームを含まない塊状の岩石等で発生する。
- ② 大深度における水平方向の初期応力が卓越する地山では小さい土被りでも発生する。

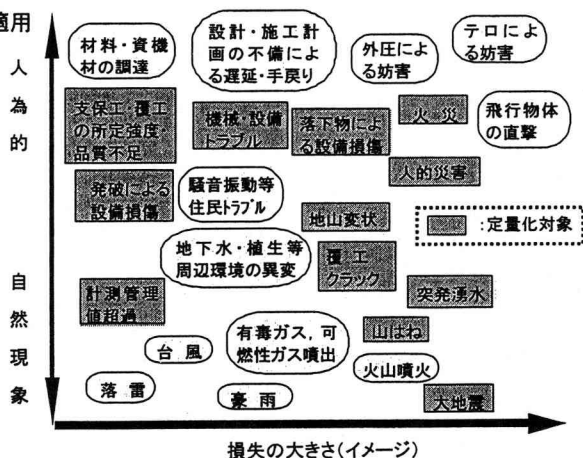


図 2 リスクの抽出³⁾

- ③ 変形係数 30～50GPa 以上、一軸圧縮強度 100～200MPa 以上、脆性度 15～20 以上の岩石で発生しやすい。
 ④ 断層や大規模節理前後および湧水のあるところ
 では、一般に発生しない。

山はねによる被害は、国内において事例が少なく明確な定義が難しいが、これまでの事例調査による被害状況をもとに分類・定義をした。表 4 に示すように、山はねによる被害状況の分類（離散化）は 3 種類とした。山はねが生じた際に想定される損失は、被害報告からの推定が困難であるため、表 5 に示すような仮定のもとで、各損失の評価値を決めた。約 40 年における大規模山はねの発生事例は、文献調査に基づき国内（鉱山・トンネル）で 13 例、海外（鉱山・トンネル・地下発電所）で 28 例が確認されている。このうち発生地点の土被りが確認できるものは、36 例であり、その分布を図 3 に示す。

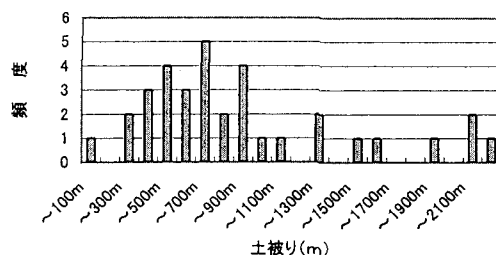


図 3 山はね発生事例の土被り別頻度分布

また、前述の 12 項目の相関関係を考慮した定量化イベントツリーによる被害進展シナリオを作成した後、＜山はね+地震+人的被害＞など 7 種類の被害進展シナリオのモデル化を実施し、リスクの定量化を行った。その結果、損失日数・損失金額・社会的信用度などの定量化された評価値が、有益な指標として意思決定に利用できることがわかった。

表 4 山はねによる被害事象の分類

イベント	事 象	状 況（定 義）
山 は ね	被 害 無	際立った岩盤のはらみ出し等がなく、山はねによる被害は生じない。
	小 被 害	音がなる、小規模な岩盤のはらみ出し等。安全対策の強化、支保構造、補助工法の強化等を行う。
	大 被 害	大規模な岩盤の飛び出し、崩壊等を生じ工事再開までに長期間を要する。

表 5 山はねによる被害事象別損失指標の評価値

イベント	事 象	状 況（定義）	カテゴリーⅠ 損失日数	カテゴリーⅡ 損失金額	カテゴリーⅢ 社会的信用低下
山はね	被 害 無	山はねによる被害は生じない。	0 日	0 百万円	0
	小 被 害	音がなる、小規模な岩盤のはらみ出し等。安全対策の強化、支保構造、補助工法の強化等を行う。	5 日	2 百万円	0
	大 被 害	大規模な岩盤の飛び出し、崩壊等を生じ工事再開までに長期間を要する。	立坑の場合 180 日 水平坑道の場合 60 日	立坑の場合 50 百万円 水平坑道の場合 10 百万円	立坑の場合 10 ⁹ unit 水平坑道の場合 10 ⁸ unit

6. 突発湧水に対する掘削・施工対策技術の整備

研究坑道掘削工事における突発湧水を対象として、前方予測技術の概略検討、掘削・施工段階での対策工、施工上の対処方法の現状を整理するとともに、湧水対策としてのグラウトや立坑覆工時の裏込め材としてのグラウトに対する掘削・施工対策技術の現状について調査検討した。一般に、湧水発生時における対策としては、①掘削続行（対策無し）、②排水工（排水処理設備の増強+水抜きボーリング施工等）、③止水工（グラウト注入等）が考えられるが、現実的には、湧水状況に応じた対策の選定および排水工と止水工の組合せも考えられる。そこで、図 4 に示す湧水対策の基本フローとともに、以下の留意点を整理した。

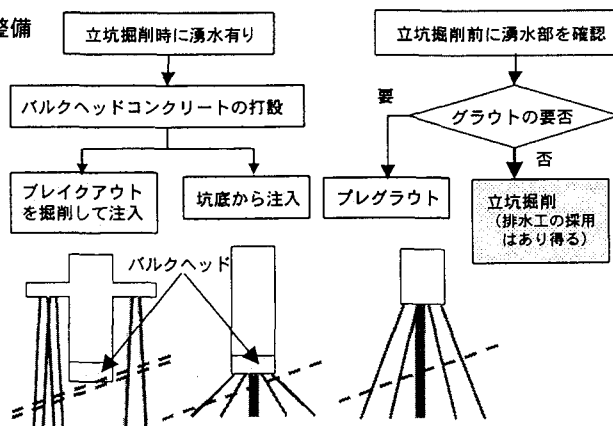


図 4 突発湧水対策フロー

- ① 堆積岩・風化花崗岩・花崗岩中には、亀裂や亀裂密集帯が想定され湧水が存在する可能性が高い。
- ② 前方探査により、岩盤中の亀裂分布・性状を事前調査し、高透水帯を予測することが望ましい。
- ③ 前方探査は、先行ボーリング孔を利用して行うことが望ましく、深度 100m ごとに立坑切羽または予備ステージを利用して削孔し、水理状況をチェックする。
- ④ 先行ボーリングの結果、水みちとなる亀裂が存在し亀裂密集帯がある場合には、必要に応じて物理探査を実施し、これらのゾーンの連続性を確認することが望ましい。
- ⑤ 前方探査で注入対象を把握した後にプレグラウトを実施する場合、注入方法は、バルクヘッドコンクリートを打設して、ブレイクアウトして掘削し注入する方法や立坑底部から注入する方法が考えられる。
- ⑥ グラウトの実施基準については、例えば、湧水量の増加や周辺孔での間隙水圧の低下など幾つかの項目が考えられる。

地下水流動解析結果等に基づく立坑への湧水状況も踏まえたうえで、現状整理した技術の中から適用可能なものを抽出し、前方予測も含めた突発湧水に対する具体的な対処方法を決定することを目的として、突発湧水対策フローに基づき、前方予測計画の立案、グラウト実施基準等の立案等を行った。その結果、突発湧水の可能性が否定できないこと・先行ボーリングが有効であること・グラウト注入には最大ポンプ圧 7~8MPa が必要なこと・現状の施設形状で最大限排出可能な排水量が 6.5m³/min であること等の結論を得ることができた。

7. 研究坑道に対する地震動評価に関する検討・解析

研究所周辺で過去に発生した既往地震および近傍の活断層を考慮して、簡易的手法により水平方向の検討用地震動を設定した⁵⁾。次に、FEM 解析により主立坑の地震時健全性を検討した結果、覆工コンクリートに発生する地震時応力増分は、掘削時の発生応力に比較して十分に小さいため、地震時に主立坑の健全性が損なわれないことを確認した。さらに、社会的関心が高まっている東海地震および東南海地震（想定新東海地震）を対象に、より精緻な手法である断層モデルにより検討用地震動を作成し、想定新東海地震は、歴史地震や活断層の地震源に比べてその影響度が小さく、健全性においてクリティカルでないことを確認した。検討した地震動評価フローを図 5 に示す。また、図 6 に示すように水平地震動に対する鉛直地震動の応答スペクトル比から、地中における上下/水平比は平均で 0.86 となり、鉛直地震動に関しても主立坑の健全性を確認した⁶⁾。

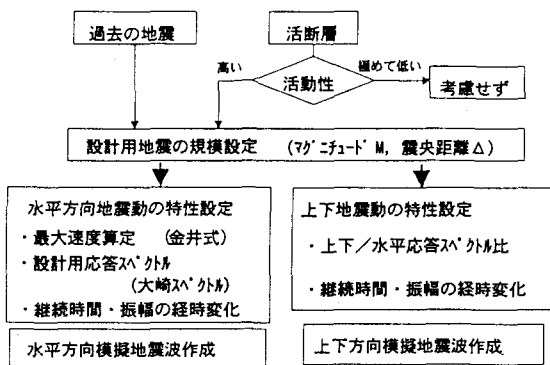


図 5 地震動評価フロー

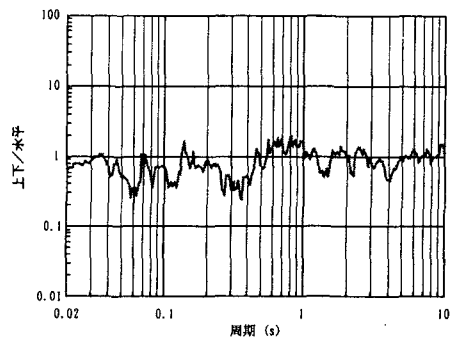


図 6 鉛直地震動と水平地震動の比

8. おわりに

今後展開する「研究坑道の掘削を伴う研究段階」における工学技術に関する主な研究では、「地表からの調査予測研究段階」で検討した研究坑道の設計および施工計画構築にかかわる技術の適用性の評価、ならびに実際の建設工事を通じての掘削技術、対策工、品質確保技術および安全対策など適用し、その有効性を評価し、高度化を図っていくこととしている。なお、本研究にあたっては、清水建設・大林組・大成建設・鹿島建設の協力を得たので、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 今津雅紀, 佐藤稔紀, 坂巻昌工: 地下1,000mの立坑工事に着手 瑞浪超深地層研究所研究坑道掘削工事, トンネルと地下, vol. 34, No. 6, pp. 37-48, 2004. 6.
- 2) 延藤達, 福田和寛, 佐藤稔紀, 見掛信一郎, 今津雅紀: 瑞浪超深地層研究所立坑掘削工事におけるワイヤロープの品質管理について, 土木学会第59回年次学術講演会, CSI-011, 2004. 9.
- 3) 見掛信一郎, 佐藤稔紀, 田口洋輔, 亀村勝美, 下野正人: 超深地層における研究坑道建設プロジェクトのリスクマネジメント, JCROSSAR. 2003.
- 4) 土木学会: トンネルライブラリー第5号「山岳トンネルの補助工法」, 1994. 3.
- 5) 佐藤稔紀, 見掛信一郎, 今津雅紀, 延藤達, 西川洋二: 瑞浪超深地層研究所主立坑の地震時健全性について, 土木学会第58回年次学術講演会, CS7-060, pp. 397-398, 2003. 9.
- 6) 須原淳二, 萩原哲也, 藤川智, 延藤達, 佐藤稔紀, 見掛信一郎, 今津雅紀: 超深地層研究所計画における施設設計・施工の現状-研究坑道の耐震健全性評価に用いる検討用地震動の試算-, 土木学会第59回年次学術講演会, CSI-010, 2004. 9.