

大深度地下構造物の耐震性評価 に関する現状と課題

平成 25 年 12 月 12 日

公益社団法人 土木学会
岩盤力学委員会 大深度地下構造物の耐震性評価に関する研究小委員会

目 次

第1章 はじめに

第2章 大深度地下構造物の耐震性評価の現状

2.1 一般トンネルの耐震性評価

2.2 原子力施設の耐震性評価の現状

2.3 放射性廃棄物処分における大深度地下構造物の耐震性能

第3章 大深度地下構造物の耐震性評価における課題

3.1 地下構造物・空洞の被害分析

3.2 大深度地下構造物の耐震性評価に対する入力地震動の考え方

3.3 放射性廃棄物処分における大深度地下構造物の耐震性評価法と課題

3.4 地震が岩盤に及ぼす水理学的影響

第4章 まとめ

付録

(1) 委員会議事録

(2) 委員会話題提供資料

(3) 文献リスト

第1章 はじめに

我が国では、複雑かつ必ずしも良好とは言えない地質条件にもかかわらず鉄道や道路のための長大トンネルや揚水式地下水力発電所、石油やプロパンガスなどのエネルギー貯蔵用地下タンクなどが大深度地下に建設されてきた。また計画中の中央リニア新幹線では、これまでにない大深度条件下での長大トンネル建設が計画されている。更に、これまで原子力政策の基本となっていた核燃料サイクルにおいて重要な役割を担う高レベル放射性廃棄物処分場は、深度 300 m 以深の広大（数 km²）な岩盤中に建設することが計画されている。また、低レベル放射性廃棄物の内、放射能レベルの比較的高いものについては、深度 50 m 以深の岩盤中の大空洞に処分（余裕深度処分）することが計画されている。そして、高レベル放射廃棄処分技術に関しては、深地層研究施設が岐阜県瑞浪市と北海道幌延町に、余裕深度処分に関しては、試験用空洞が青森県六ヶ所村に建設され、様々な実証試験・研究が実施されている。

原子力施策は、2011 年の東日本大震災を受けて見直しがおこなわれているが、エネルギー基本計画において核燃料サイクル政策については着実に推進する方針が示される見通しである（総合資源エネルギー調査会基本政策分科会、2013）。特に、東京電力福島第一発電所の事故に伴い発生した膨大な量の放射性廃棄物、既に発電に用いられ様々な場所で保管されている使用済み燃料、今後順次行われる原子力発電所の廃炉作業に伴い発生する放射性廃棄物などを安全かつ確実に処分するためには、安定した大深度地下空間を活用するための研究・技術開発の重要性は増すばかりである。

一方で、東日本大震災以降、構造物の安全性についての議論は大きく変化し、単にある基準を満たしていればよいというものではなく、想定し得る危険性に対しては、どれほどその発生確率が小さくとも壊滅的な状況に至らないような対策を講じる必要があるとされている。また、そうした安全性の議論は関係者、専門家と言った限定された人々の中だけで行われるのではなく、広く社会に向けて判り易く説明され理解される必要がある。

さて東日本大震災では、莫大な被害が生じ、今もなおその被害収束、復旧、復興の取り組みが成されている。地震被害として津波と原子力発電所事故によるものが余りにも大きく、その他の被害が霞んでしまっているが、大規模な地盤液状化、造成地斜面の崩壊などの地盤被害、球形タンクや建物などの構造物被害もかなり生じている。

ではトンネルの地震被害はどうなのであろうか。JR 東日本の「東日本大震災による地上設備の被害と復旧状況について（2011 年 4 月 5 日）」によると、東北新幹線では電化柱の折損・傾斜・ひび割れを最多（約 540 か所）として合計約 1200 か所で被害が生じている。この内トンネルに関連するものは 2 か所のトンネル内路盤部の損傷のみであり、覆工コンクリートの剥落などの大きな被害は生じていない。また、仙台市交通局の「平成 22 年度高速鉄道安全報告書（平成 23 年 9 月）」には、地下鉄については橋脚などの地上構造物の被害は報告されていたものの、トンネルなどの地下構造物については被災の報告は無く、大きな損傷は生じていない。このように地下構造物には重大な被害は生じておらず、やはり地下構造物が地震に強いということを示している。

一方、朝倉ら(2000)、野城ら(2009)の研究によれば、阪神・淡路大震災や中越沖地震などの幾つかの大きな地震では山岳トンネルにも被害が生じている。それらの被災事例を見ると、震源に近く地震動が大きい上に、

- 坑口部、小土被りなどの地形

- 破碎帯，断層などの地質
- 構造的弱部（背面空洞、巻厚不足、材料劣化など）

などの条件が重なった場合となっている。

鉄道や道路トンネルの場合，仮に地震被害を受けたとしても崩壊などの大被害が生じない限り，被災後にその部分の補修，補強を行うことにより，要求性能を早期に回復することができる。しかし，図-1.1に示すようにエネルギー貯蔵施設や放射性廃棄物処分施設など，力学的安定性だけではなく水密性，気密性，超長期安定性などが求められる構造物では，そのような事後の対応は不可能であり，これまででない事前の検討が求められる。

すなわち，このような大深度地下構造物については，巨大地震が発生した時何が起こるのか？それはどう性能に影響するのか？その影響は，短時間・簡単に修復できるのか？できないあるいは影響が大の場合，地震による損傷はどうすれば避けられるのか？などについて事前に明確にした上で，設計し施工する必要がある。

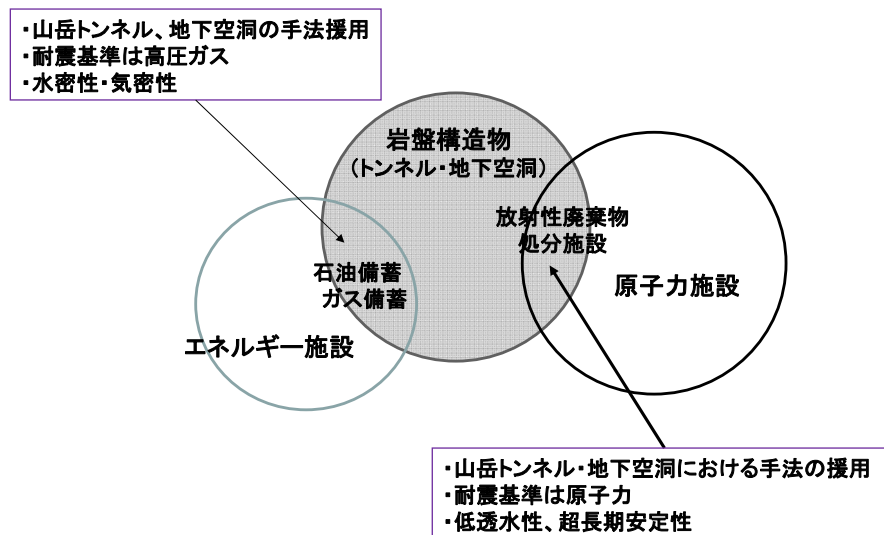


図-1.1 大深度地下構造物における課題

現在，大深度地下構造物の耐震性を評価するに当たっては，既存の地下構造物に対する設計・解析手法が援用されている。

例えば，高レベル放射性廃棄物処分施設の設計研究における施設の耐震性評価（核燃料サイクル開発機構，1999）は，処分坑，立坑を対象に，応答震度法（地盤応答解析から得られた加速度を震度に換算し，物体力として作用させる）を用い，入力地震としてはサイトが未定のためインペリアルバレー波を設定し，均質弾性体と仮定した解析モデルによって行われている。

その結果，

- ・ 処分坑道の安定性は，掘削時（静的）のひずみ値，安全係数が支配的であり，掘削時にロックボルトなどにより力学的安定が図られていれば，地震時も安定性は確保できる。
- ・ 立坑については，軟岩の場合 360 m 以深で安全係数が低下するが，その範囲は壁面より 2m 以内であり，安定性は確保できる。

という結論が得られている。

このように基本的な地震時の問題は既に検討されているものの、その内容は既存の手法による概略検討の域を出ていない。また評価に用いる地震動の設定手法、岩盤の動的特性など課題も多い。

このような現状認識の下、今後の大深度地下構造物の計画に当たって不可欠な耐震性評価について岩盤力学を中心として、トンネル工学、耐震工学、処分技術などの分野における知見を総括した上で、その現状と問題点、解決すべき課題等を明らかにすることを目的として委員会活動を行った。

これまで計 10 回開催された委員会では、様々な分野の専門家から技術の現状と課題が語られ、熱い議論が交わされた。本書はその内容を取りまとめたものである。この中から次のステップに向けた確実な歩みが始まることを期待したい。

第2章 大深度地下構造物の耐震性能

2.1 一般トンネルの耐震性評価

トンネル構造物は地盤・地山中に構築され、地盤・地山との相互作用で安定を保つことから、一般には地震に強く、耐震性に富んだ構造物と言われている。このため、都市部の開削、シールドトンネルでは構造物の規模や重要度に応じて地震による影響を考慮した設計がされてきたものの、山岳トンネルでは耐震設計はもとより、構造躯体となる覆工の力学的な機能を期待しない考え方で設計が行われてきた。これは、その構築方法に基づいた考えであり、掘削による影響は支保工が負担し、掘削挙動が収束した後で覆工を構築することによるもので、覆工には構築後の増加荷重が作用しないという考え方に基づいている。このように、山岳トンネルでは、常時の安定性評価においても構造躯体だけでなく、周辺地盤と一体で評価しなければならない。

トンネルの常時の状態は、地震発生時の初期状態であり、耐震設計の初期条件となる。そのため、トンネル構造や周辺地盤の現状を把握し、その安定性を評価することが非常に重要となる。特に、地層処分は大深度地下での建設になるため、地表構造物および浅深度の地下構造物に比べて、安定性の余裕度は小さくなっていることが考えられる。

山岳トンネルでは、トンネル掘削に伴って周辺地山に自立しない領域“ゆるみ領域”が発生・広がることでこの不安定な状態・現象が生じ、これを支持・抑制する支保に“ゆるみ荷重・地圧”が作用すると捉える考え方がある。現在の山岳トンネルの安定性評価（常時の安定性の確保・維持）は、トンネル掘削に伴う力学的な観点からの安定性の把握がなされるようになってきたが、“ゆるみ荷重・地圧”を理論的に十分説明するところまでには至っていない。また、トンネルの安定設計は、その特殊性から一般的な土木構造物の設計とは異なっている。すなわち、計画・設計時の情報の不足によるトンネルに求められる機能・性能の過不足を計測による情報化施工で補っているのが現状であり、その品質は制御されているとは必ずしも言えない。

トンネル建設時における周辺地山の不安定な現象（不具合）には、硬岩系岩盤に生じるブロックの崩落、山はねと軟岩系岩盤で生じる地山の押し出し、切羽の崩落、地表面陥没事故および支保（吹付けコンクリート、鋼製支保工、ロックボルト、インバート等）の変状や破壊などがある。これらの現象のいくつかは、過去の大規模地震時に確認された覆工コンクリートのひび割れや覆工片の崩落、断層部における段差・ずれ、坑口部の斜面崩壊などの現象に近いものと考えられる。このように「建設時と地震時の不安定・不具合の事象は同じ」と考えることができれば、地震時の耐震性評価は常時の（静的な）安定性評価の考え方を準用することができる。

一方、トンネルの耐震性評価には、都市トンネルの耐震設計に代表されるように、静的解析法としての応答変位法・FEM 応答震度法、動的解析法としての周波数応答解析法・時刻歴応答解析法などの数値解析が適用されている。これらの手法はすべて地震時におけるトンネル構造体と周辺地山の变形挙動と応力の発生状況を検討するものであり、その解析結果を常時の結果に加算することで地震時における安定性を評価している。これは地表付近および浅深度のトンネルが対象であり、常時の静的な応力が地震時のものに比べて非常に小さいことから適用された考え方と言える。

以上、一般トンネルの安定性評価に関しても技術的な課題が残っている実情を踏まえ、トンネルの耐

震性評価を実施する際にはトンネル躯体だけでなく、周辺地山との相互作用を前提に検討を進めていく必要がある。

2.2 原子力施設の耐震性評価の現状

原子力発電所の耐震設計では、図-2.1 に示すように、活断層調査等から基準地震動を設定し、各種構造物の設計が行われている。このうち、設置深度は浅いが地中構造物として、取水槽や海水管ダクト等の土木構造物がある。また、岩盤の地震時の評価として、原子炉建屋基礎地盤および周辺斜面の安定性検討が行われている。

取水槽や海水管ダクト等の土木構造物は、埋戻土や表土等の表層地盤に埋設されており、構造物と表層地盤の動的相互作用を考慮するため、表層地盤、躯体それぞれを非線形モデルでモデル化した非線形動的 FEM 解析により地震時の応答を求められることが多い。また、その応答を用いた耐震性評価では、各構造物の要求性能を明確にし、それを定量的に判断できる限界状態に置き換え（図-2.2）、これと応答値を比較することで行われている。例えば、構造物が曲げ破壊しない限界状態に対しては、層間変形角が例えば 1/100 以下であることを確認することがなされている。また、せん断破壊に対しては、発生断面力や部材厚に応じたせん断耐力式を用いて確認がなされており、より合理的な評価法として、材料非線形解析によるせん断耐力の評価が行われる場合もある。

このように、浅部の表層地盤に埋設された構造物の耐震設計法は、構造物と地盤との相互作用の考慮が重要とされ、非線形動的 FEM 解析が行われている。構造物の要求性能も配管を支持する機能等、具体的にすることにより照査項目が明確になっており、耐震設計手法が確立していると言える。

一方、原子力発電所の耐震性検討の内、岩盤を対象としている原子炉建屋基礎地盤および周辺斜面では、動的解析は実施するものの、線形、もしくは等価線形解析が行われており、発生応力が岩盤強度を超えないことの確認が行われている。これは、岩盤の微小ひずみ領域からピーク強度に至る区間、あるいはピーク強度後の挙動といった非線形特性が必ずしも明確でないことから、岩盤が破壊しないことを前提とした耐震性評価手法が採用されていると言える。従って、斜面掘削時においても、いわゆる緩み領域がほとんど生じない勾配で、あるいは、岩盤トンネルも緩み領域がほとんど生じない径でしか掘削されていない。すなわち、地中構造物の耐震設計と比較すると、岩盤の要求性能と評価すべき限界状態が明確になっていない課題があると言える。これが明確になれば、大口径岩盤トンネル等の更なる合理的な耐震設計が可能になると思われる。なお、原子炉建屋基礎地盤および周辺斜面の耐震性の検討では、その岩盤自体の機能とは別に、支持される設備もしくは波及的影響を受けるおそれのある設備の有する安全機能との関係で耐震設計上の要求事項を定める必要がある。

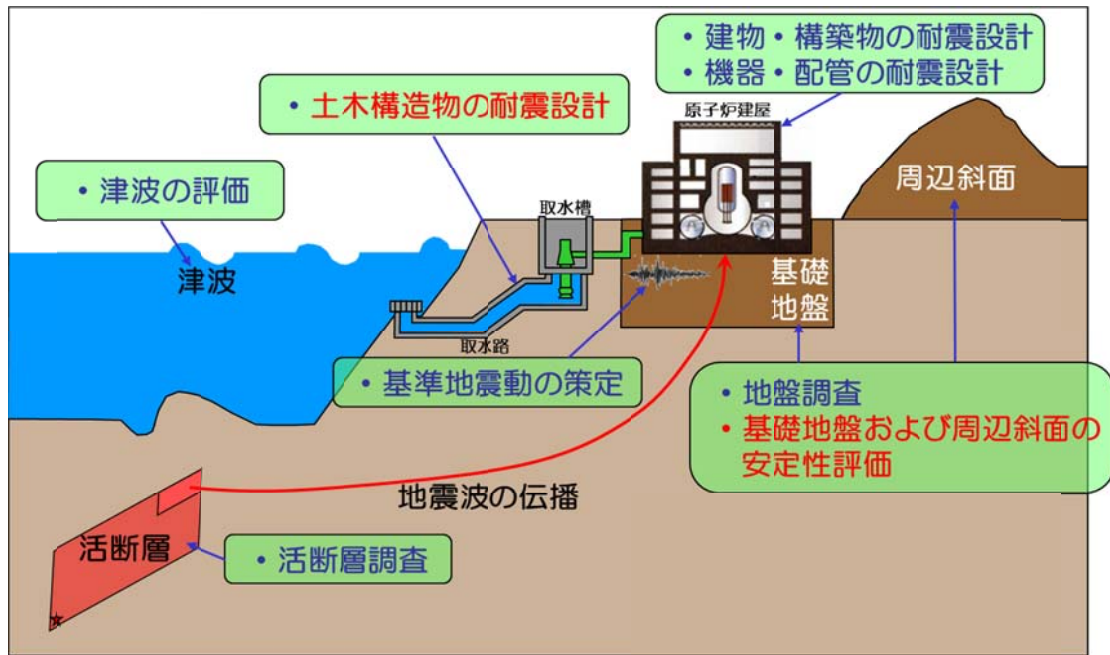


図-2.1 原子力発電所の耐震設計の全体像

要求性能	構造物の限界状態
機器・配管の機能維持	<ul style="list-style-type: none"> 機器の稼働を維持 配管を潰さない 構造物の内空間を確保
取水路の通水機能維持	<ul style="list-style-type: none"> 構造物の内空間を確保

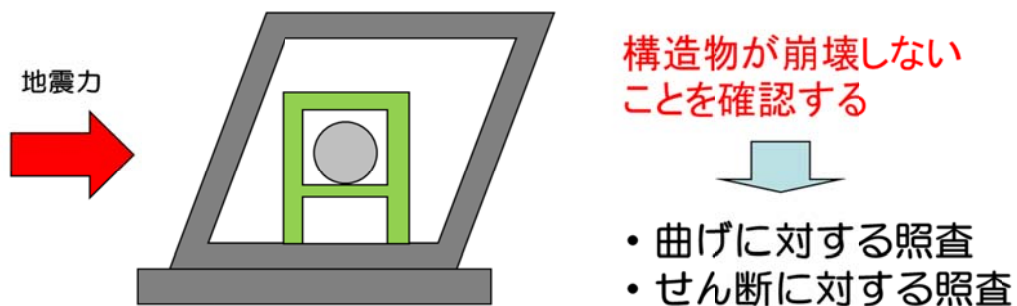


図-2.2 要求性能と構造物の限界状態

2.3 放射性廃棄物処分における大深度地下構造物の耐震性能

大深度に放射性廃棄物を処分する施設としては、高レベル放射性廃棄物地層処分施設（地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設を含む）と余裕深度処分施設があり、いずれの施設についても、地下深部に処分坑道（処分空洞：図-2.3）を構築し、人工バリアとともに廃棄体（放射性廃棄物）を処分するものである。

上述の大深度地下構造物の耐震設計を行う上で要求される性能（耐震性能）は、安全確保を考えるべき期間も踏まえて、放射性廃棄物を埋め戻すまでの“事業期間中”と放射性廃棄物を埋め戻した後の“閉鎖後長期”の期間に分けて設定される。

このうち事業期間中の耐震性能については、処分施設に起因する放射線被ばくから一般公衆および作業従事者などを防護する“放射線安全確保”の観点から、地震により設備の破損などによる放射性物質の漏えいが生じないように“重要設備の支持性能”と“処分坑道の空間保持性能”が求められる。また、放射線以外の災害から作業従事者などを守る“一般労働安全確保”の観点からは、地震時の労働災害を防止するために処分坑道などの“坑道の空間保持性能”が求められる。

一方、地層処分の安全性については、**図-2.4** に示す多重バリアシステム（人工バリア+天然バリア）によって担保され、この多重バリアシステムの安全機能は、地下深部に埋設した放射性廃棄物から放射性物質が地下水を介して移行し最終的に人間の生活環境に影響を及ぼさないことを目標に設定される。したがって、閉鎖後長期の期間における耐震性能は、処分施設に起因する放射線被ばくから一般公衆を防護する“放射線安全確保”の観点から、地震により多重バリアシステムに期待される“核種閉じ込め性能”などの安全機能が損なわれないように人工バリアおよび天然バリア（坑道周辺岩盤）に対しての地震時における影響の評価として求められる。

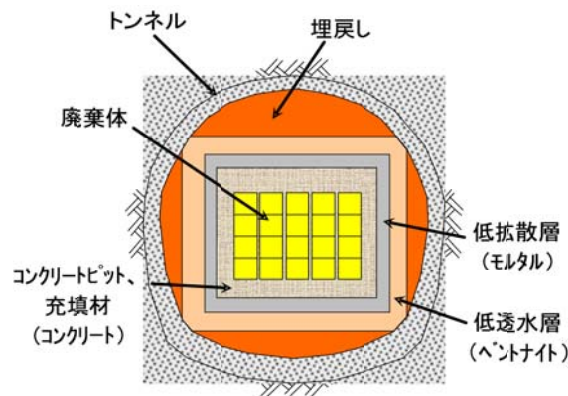


図-2.3 処分空洞の概要（余裕深度処分施設）

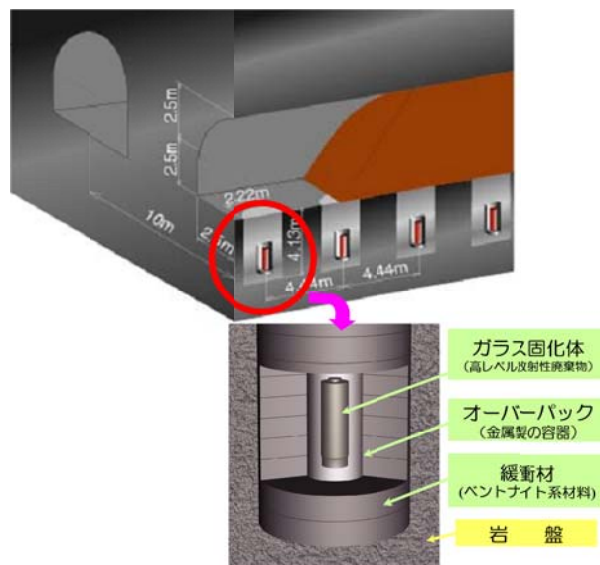


図-2.4 多重バリアシステム（高レベル放射性廃棄物地層処分施設）

第3章 大深度地下構造物の耐震性能評価における課題

3.1 地下構造物・空洞の被害分析

一般に地表構造物と比較して、トンネルは耐震性に富む構造物である。しかし、立地条件などによってはトンネルも地震によって大きな被害が発生することがある。最近の大規模地震による被害を顧みても、1995年の兵庫県南部地震(M7.2)では、地上構造物の甚大な被害に比較してトンネルの被害は軽微であったが、それでも被災地域内の100を越える山岳工法トンネルのうち、20余本のトンネルにおいて地震の影響を受け、その内、断層破砕帯区間や不良地山区間において覆工が崩壊するなどにより、補強・補修を要するような被害を受けたトンネルも約10本あった。また、2004年10月に発生した直下型の新潟県中越地震(M6.8)では、トンネル工学委員会により、この震源をはさんだ東西約90km、南北約80kmの範囲内に位置するトンネルの調査が行われた。調査対象トンネルは、道路トンネル、鉄道トンネル、発電用水路トンネルで、合計138トンネル(延長:264km)である。トンネル工法別にみると、矢板工法によるトンネルが104トンネルと最も多く、次いで標準工法(NATM)が33トンネルである。これらのトンネルで被害が発生したトンネルは全体の35%であり、そのうち、大規模な補修・補強を必要としたトンネルは8%であった。矢板工法によるトンネルでは39%に被害がみられたが、標準工法(NATM)によるトンネルでは23%であり、矢板工法に比べて被害の割合が低かった。また、地震断層面からある一定距離内にあるすべてのトンネルで被害が発生しているわけではなく、さらに、震源からの距離が同等でありながら、被害の有無およびその程度に差が生じているなど、被害原因としては地震規模や震源域からの距離はもちろんであるが、そのほかに矢板工法か標準工法かの違いや、地すべり地形や不良地山等の地形・地質的要因、さらに背面空洞やコールドジョイント等の構造的要因が複雑に競合して影響していることが考えられる。

過去の大規模地震(1923年関東地震、1930年北伊豆地震、1978年伊豆大島近海地震、1995年兵庫県南部地震、2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震)による代表的な被災事例を分析すると、トンネルに共通する被害パターンは、以下の4つに大別される。

- 1) 坑口等の浅い土被りでの被害
- 2) 深い土被りでの地質不良個所の被害
- 3) 断層のずれ
- 4) 斜面不安定化によるもらい災害

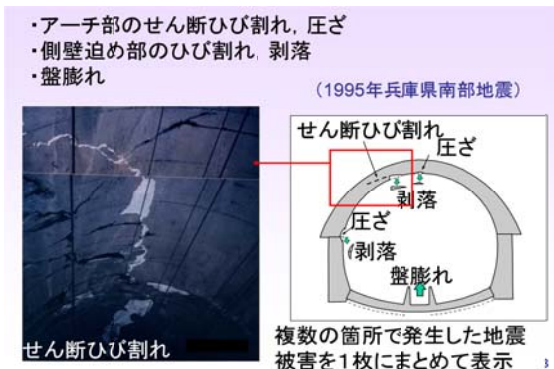


図-3.1 兵庫県南部地震の被害事例(小山ら,1996) 図-3.2 新潟県中越地震の被害事例(小島・野城,2007)

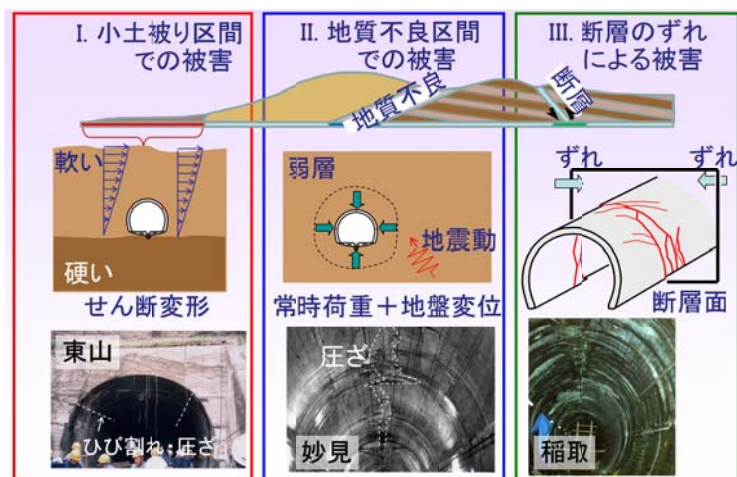


図-3.3 地震被害の形態の分類（トンネル内）（2006）

以上の被害分析の結果からも、地震時の被害を最小限に留めるには「建設段階において設計通りの躯体を確実に施工する」、「維持管理段階において各種変状への対応を適切に行う」ことが重要であることは明らかである。したがって、大深度地下構造物の計画・設計においては、地震時の挙動を数値解析等で適切に評価するだけでなく、常時の設計や建設後の維持管理計画についても適切な対応が望まれる。

3.2 大深度地下構造物の耐震性評価に対する入力地震動の考え方

原子力発電所の基礎地盤及び周辺斜面や地中構造物の地震応答解析に用いる地震動は、敷地の解放基盤表面で定義された基準地震動 S_s を解析対象領域の底面まで引き戻して用いることとされている。基準地震動 S_s は、「敷地ごとに震源を特定して策定する地震動」及び「震源を特定せず策定する地震動」について、それぞれ解放基盤表面における水平方向及び鉛直方向の地震動として策定することとされている。

上記の手法に沿った形で地震動の策定を行い、対象構造物の地震応答解析が実施されてきた。その一方で、2007年新潟県中越沖地震時に取得された柏崎刈羽原子力発電所における地震観測データは、東西成分で最大加速度 680 cm/s^2 が観測されている（佐藤ら，2010）。これは、既往の最大加速度の距離減衰式と比較しても大きな値で、一つの要因として地震基盤から解放基盤面や地表面までの増幅の影響と考えられている（佐藤ら，2010）。深部地下の速度構造のコントラストや不整形性の影響で、地震動が増幅されたり、対象敷地内においても最大加速度で大きな差が表れることとなった。

東日本大震災以降、活断層の認定が議論されており、それに伴い検討用地震が変わってくる可能性がある。これは、対象施設との距離や震源の大きさが変わることが想定されるためである。手法としては、断層モデルも援用しながら基準地震動 S_s が算定され、そこから解析対象領域の底面まで引き戻されて、入力地震動として解析が進められると考えられる。

基準地震動 S_s を用いた地震応答解析は、地表面付近の地下構造物への適用は可能であると考えられる。一方で、本委員会が対象とする大深度地下構造物に対しては、どのように地震動を設定すればいいのかが課題となってくる。地震動に関する多くの情報は、地表面近傍で得られており、それらをもとに解析的に例えば地下 300 m の地震動を算定することが考えられる。しかしながら、大深度地下の地盤構造が

複雑な場合には、深部での地震動の挙動は不明な点が残されている。したがって、地表面の地震動とも整合した統一的な基準地震動を作成するためには、少なくとも地盤構造の十分な調査と地震観測が必要である。今後の大深度プロジェクトや深地層研究では、地下深部の地震動の観測体制を十分に整備し、一定期間情報を収集し、それらを分析し、地下深部での地震応答解析に必要な地震動の策定手法を構築すべきである。さらに、地下深部の速度構造の不均質性・不整形性をどのように反映させるのかも課題である。

また、岩盤とくに不連続性岩盤の動的物性に関する検討が不十分である。特に、深部では非常に固い岩盤と不連続面が混在し、不連続面の動的な挙動が岩盤の挙動を支配すると考えられる。地下深部では拘束された状態であり、それほど大きな変状が出ないと考えられるが、空洞周辺は相対的に緩んだ状態であり、地震時に緩み域がどのように挙動するのか、支保などの人工構造物にどのような影響を与えるのか、検討する必要がある。併せて、動的な履歴を受けたのち空洞周辺岩盤の水理的特性がどうなるのかは検討すべき課題であると考ええる。

3.3 放射性廃棄物処分における大深度地下構造物の耐震性評価法と課題

(1) 耐震性評価法

高レベル放射性廃棄物地層処分施設については、現時点において安全審査指針が策定されておらず、耐震重要度分類をはじめとした耐震設計の考え方が規定されていない。一方、余裕深度処分施設については、「第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方」（原子力安全委員会、2010）によれば、「廃棄物処分施設は、設計地震力に対して、適切な期間、安全上要求される機能を損なわない設計であること」とされており、この設計地震力は、「発電用原子力施設に関する耐震設計審査指針に基づき耐震クラスに応じて定めること」と記述されている。

以下に、本委員会において原子力発電環境整備機構と日本原燃により報告された当該施設の耐震性評価の方法について概説する。

【高レベル放射性廃棄物地層処分施設】

地層処分施設に関しては、耐震安全性の説明性の観点から、最も厳しい耐震重要度であるSクラスに対して適用する基準地震動を模擬的に作成し操業期間中の空洞安定性に対して予察的な検討が実施されている。

空洞安定性の評価において、地震時に岩盤および支保工に発生する応力状態は、静的解析によって求められた常時応力と地震応答解析によって求められた地震時増分応力とを重ね合わせることで算出されている。常時応力解析および地震応答解析の解析手法は、2次元FEM（岩盤：平面歪み要素、支保工：ビーム要素）が用いられている。ここで、常時応力解析では、応力状態（破壊近接度）に応じて剛性を低下させる非線形性を考慮したステップ解析（初期応力～掘削～一次支保工構築）が行われており、地震応答解析では、周波数応答解析が適用されているが、岩盤の非線形性（ひずみ依存性、要素破壊おける剛性低下）は考慮されていない。なお、検討用地震動については、基準地震動 S_S （水平動・上下動）に相当する地震動を解析モデルの下端に直接入力している。

上述の応力状態に対する空洞安定性の評価は、坑道周辺の岩盤と支保工のそれぞれについて行われて

いる。坑道周辺の岩盤に対して、岩盤の構成要素（FEMの各要素）については、局所安全係数（せん断破壊と引張破壊に対する破壊近接度）およびせん断ひずみ（最大せん断ひずみと限界せん断ひずみの大小関係）を指標として破壊判定がなされ、この破壊領域が坑道径の20%以下であるかどうかにより空洞としての安定性が評価されている。また、支保工に対しては、吹付けコンクリートに発生する圧縮応力（許容応力との大小関係）を指標として構造健全性が判断されている。

【余裕深度処分施設】

余裕深度処分施設に関しては、操業期間中の空洞安定性および人工バリア健全性と、管理期間終了後の人工バリアに与える地震時影響に対する検討が実施されている。

ここで、「第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方」によれば、公衆に過大な放射性被ばくを与える可能性がない地下の施設についての耐震重要度分類はCクラスであることから、操業期間中の空洞安定性および人工バリア健全性は、震度法（水平震度 $K_H = 0.2$ ）を適用した静的解析の結果に基づき評価が行われている。

一方、管理期間終了後の人工バリアに与える地震時影響については、廃棄体やRCコンクリート部材の鉄筋等の鋼材腐食膨張や、廃棄体から発生するガスの圧力、セメント系材料のカルシウム溶脱等といった人工バリアの経年変化に加え、施設に地震が作用した場合を想定して、地震発生前後の静的状態把握解析と地震応答解析を組み合わせた解析を実施することにより評価されている。静的状態把握解析および地震応答解析は、2次元FEM（岩盤、支保工、および躯体：平面歪み要素）が用いられている。ここで、地震時増分応力は構成要素（支保工と廃棄体除く）の非線形を考慮した時刻歴非線形解析により算出されており、コンクリート部材については分散ひび割れモデルが採用されている。なお、検討用地震動は、解放基盤面において規定した基準地震動 S_s （水平動・上下動）を解析モデルの下端に引き戻しており、評価期間中に基準地震動 S_s （水平動・上下動）を3回作用させることにより、低拡散層に生じる伸び率（開口幅）を指標として、地震動のくり返しによる影響を評価している（瀬瀬ら，2010）。

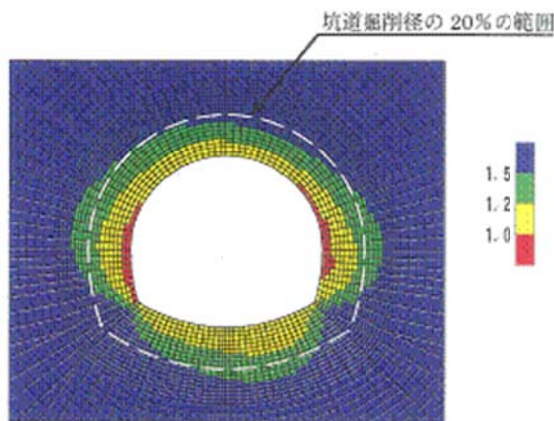


図-3.4 坑道周辺岩盤の局所安全係数分布
（高レベル放射性廃棄物地層処分施設）
（原子力発電環境整備機構，2011）

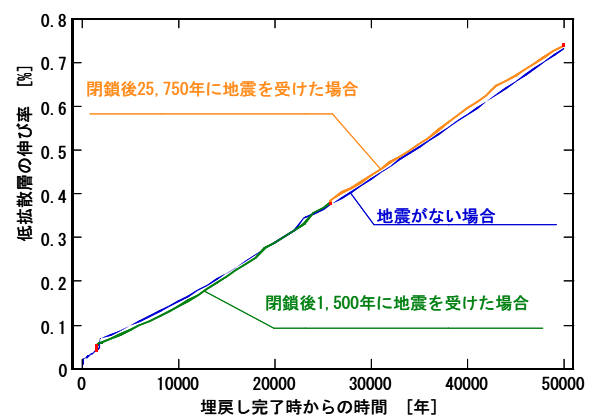


図-3.5 長期地震影響評価結果
（余裕深度処分施設）（瀬瀬ら，2010）

(2) 耐震性評価法の課題

上記(1)の高レベル放射性廃棄物地層処分施設および余裕深度処分施設の耐震性評価法に関して、当委

員会において主に留意点・課題の観点から議論を行った。

廃棄物処分施設の要求性能には、事業期間中の空間保持性能・機器支持性能と閉鎖後長期の核種閉じ込め性能（浸出抑制、移行抑制）がある。このことから、事業期間中では、数十年間の期間を対象に設定した地震動を用いて“耐震設計”の観点から空洞の力学的安定性について評価を行い、閉鎖後長期においては、万年オーダーの期間を対象に想定した地震動を用いて“安全評価”の観点から核種移行に関するバリア性能への影響を評価する必要がある。このように、廃棄物の設置前と設置後（緩衝材充填後など）の各段階でのインパクトを考慮して、短期（事業期間中）と長期（閉鎖後）に分けた評価が必要と考えられる。

これまでの山岳トンネルの被害事例をみると地震動によるトンネルの被害は、周辺と比較して地質条件が悪い箇所、設計・施工が地質状況に対応していない箇所、あるいは構造的な欠陥（巻厚不足や背面空洞）がある箇所が多く発生しており、飯山トンネルや日暮山トンネルの地表面陥没は縦構造の地質構造を有する地盤に対して不注意に掘削した結果発生したものと考えられる。また、地質的脆弱部は地震時に比較的大きなひずみが生じやすく耐震の観点からも懸念される箇所である。廃棄物処分施設では良好な地質条件のサイトが選定されることになるが、局所的には上述の地質の悪い箇所に遭遇する可能性もあることから、このような箇所への対応は設計段階から考えておく必要がある。また、大規模な断層や破碎帯がない場合でも、亀裂等の不連続面の地震時の空洞安定性に及ぼす影響をどこまで評価できるかも考えていく必要がある。

総じて大深度地下構造物は地震に対して安全という認識があるが、今まで行われてきた評価法から空洞周辺のゆるみ領域の評価等さらに踏み込んだ議論を行い、耐震設計時に考慮すべき事項について提言を行う必要がある。空洞を掘削した際には、壁面付近の岩盤は局所的に破壊しいわゆる“ゆるみ領域”が発生する。また地盤のゆるみは、掘削時だけではなく経年的な劣化により生じることも報告されている。このようなゆるみ領域については、健全な岩盤に比べて強度・変形特性が劣り、空洞周辺のゆるみ領域がせん断変形を受けた場合には残留変形が生じうることもあるため、ゆるみ領域に対する適切な考慮が望まれる。また、ゆるみ領域については、力学的な特性の低下だけでなく透水性が高くなることも考えられることから、閉鎖後長期の核種閉じ込め性能に対して地下水流動の観点から地震による影響を評価する際にも考慮する必要がある。

これ以外にも地盤物性の取り扱いに関しては、操業期間中の耐震性評価における課題として、静的物性で動的物性を取り扱ってよいかというような動的物性の評価の考え方について整理しておく必要がある。

一方、解析・評価の方法に関して言えば、大深度地下構造物の耐震性は常時応力が支配的になると考えられることから、処分施設建設時の安定性評価が非常に重要となる。現時点では、地震時の応力状態を掘削後の応力（常時応力解析による結果）と地震時増分応力（地震応答解析による結果）を重ね合わせることで算定しているが、常時の応力状態も加味した条件で地震応答解析を行わないと実際の破壊モードが再現できないことから、常時応力と地震時増分応力の重ね合わせについては注意すべきである。

また、岩盤や支保工といった地下構造物の安定性を評価する場合、加速度は直接的な指標とはならないと考えられる。すなわち、現実的には地下構造物は慣性力ではなく周辺地盤のせん断変形によって破壊することから、今後は観測データを拡充しせん断変形が慣性力に換算してどの程度になるかということも検討して、より実現象に即した空洞安定性の評価を考えるべきである。

地層処分施設の検討では、解析条件として支保工（吹付けコンクリート）と周辺岩盤は一体に動くものとしてモデル化されているが、支保工のモデル化は解析結果に直接効いてくることから重要であると考えられる。これについては、例えば地盤と構造物の境界部ではすべりや剥落等の複雑な現象が生じ構造物全体の応答挙動に影響を及ぼす可能性があることから、必要に応じて、これらの境界にノーテンションばねを設けることが望ましい。また、支保工の健全性を評価する場合には、構造物に要求される耐震性能を踏まえた損傷度レベルを考えることが重要である。トンネルの損傷度の分類（レベル 2：ひび割れ，レベル 3：圧ざ，レベル 4：剥落）を基準にしたとき、地層処分施設の支保工に許容されるのはレベル 3 までと考えるのが適当と考えられる。

余裕深度処分施設の検討では、地震応答解析に際して解放基盤面において規定した基準地震動を解析モデルの底面に引き戻し計算を行っているが、解放基盤面における地震動に対してモデル底面の地震動が大きくなる可能性があることから地盤の減衰特性などモデル化には注意が必要である。また、Cクラスの設計において $K_H = 0.2$ の静的震度が用いられているが、これは地上施設や機器の設計に対して決められた値であり合理的な設計を行う意味では地下深部の静的震度の設定方法が今後の課題と言える。上述の地震動の引き戻しや静的震度の設定（末広俊夫他，2013）については、余裕深度処分施設だけでなくむしろ地層処分施設についての方が重要なものと考えられる。

上述以外についても、3次元解析の実施や複数回の地震が発生した際の損傷履歴といったところが、操業期間中の耐震性評価における課題として挙げられる。

3.4 地震が岩盤に及ぼす水理学的影響

地震は、大規模な地殻変動帯に位置する日本において特に頻繁に見られる自然現象であり、高レベル放射性廃棄物地層処分の観点からの研究は国際的にも例がない。地震による直接的な影響あるいは地震に伴う岩盤や地下水の変化は一時的なものであり、地層処分システムの健全性に与える影響は大きくはないことや、シナリオで説明しうることを、観測結果や解析結果を用いて示すことは重要な課題である。

① 地下深部の地震動

（独）日本原子力研究開発機構では、岩手県釜石鉾山や岐阜県瑞浪市の瑞浪超深地層研究所において地表から地下深部に至る領域での地震観測等を実施し、地震動の深度分布を把握する調査を実施している（核燃料サイクル開発機構，1999; Niimi et al., 2012）。これまでの観測結果では、地下深部の地震動は地表部の数分の 1 に低減される等の知見を得ている（図-3.6）。また、地震に伴う地下水圧の変化や地下水の地球化学的特性への影響について観測を実施している（Shimizu et al., 1996; Ishimaru et al., 1997）。

② 地震に伴う地下水圧の変化

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震により、瑞浪超深地層研究所および周辺で複数の観測地点において地下水圧の変化が観測された（図-3.7）。地下水圧の変化の傾向としては、広域的には地震に伴う岩盤の体積歪の変化の計算結果と整合的であった（瑞浪を含む中部地方では 10^{-7} strain オーダーの引張りに対し、数十 cm～1m 以上の水圧低下）。しかし、一部では、坑道掘削に伴う人為的な影響や水理地質構造の不均質性が要因と考えられる、大幅な水圧の上昇が見られた。これらの変化は一時的なものであり、数ヶ月のオーダーで元のトレンドに戻る傾向が認められている（Niwa et al., 2012）。

一方、東北地方太平洋沖地震のように規模の大きな地震の場合、震源に近い位置では、岩盤中の水み

ちの変化や透水性の変化が体積歪の変化を上回ると推定される現象も観測されている（産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター，2011a；2011b；北川・小泉，2011）。

観測された地震動の一覧

Data No.	発生日時	震源	瑞浪市の震度	最大加速度 (gal) [計測成分]		
				地表部	GL-100m	GL-300m
1	2008年11月24日 06:15	岐阜県美濃東部 深さ11km M:3.9	1	12.0 [E-W]	7.1 [E-W]	—
2	2009年5月25日 20:26	静岡県西部 深さ26km M:4.7	2	5.6 [E-W]	3.1 [E-W]	1.8 [N-S]
3	2009年7月14日 03:57	岐阜県美濃東部 深さ50km M:3.4	2	6.5 [E-W]	3.1 [E-W]	2.0 [E-W]
4	2009年7月27日 09:44	愛知県西部 深さ40km M:4.0	2	8.2 [N-S]	3.0 [N-S]	1.9 [E-W]
5	2009年8月11日 05:07	駿河湾 深さ23km M:6.5	3	30.8 [E-W]	14.7 [N-S]	6.7 [E-W]
6	2011年3月11日 14:46	三陸沖 深さ24km M:9.0	3	10.4 [N-S]	7.7 [N-S]	5.7 [U-D]

最大加速度の深度分布

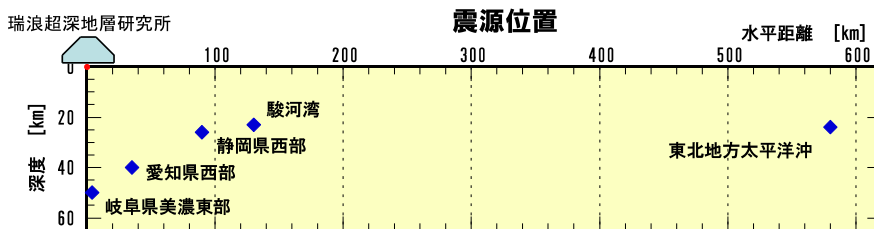
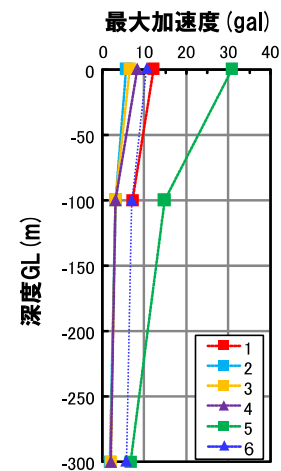


図-3.6 瑞浪超深地層研究所における地震動の観測結果

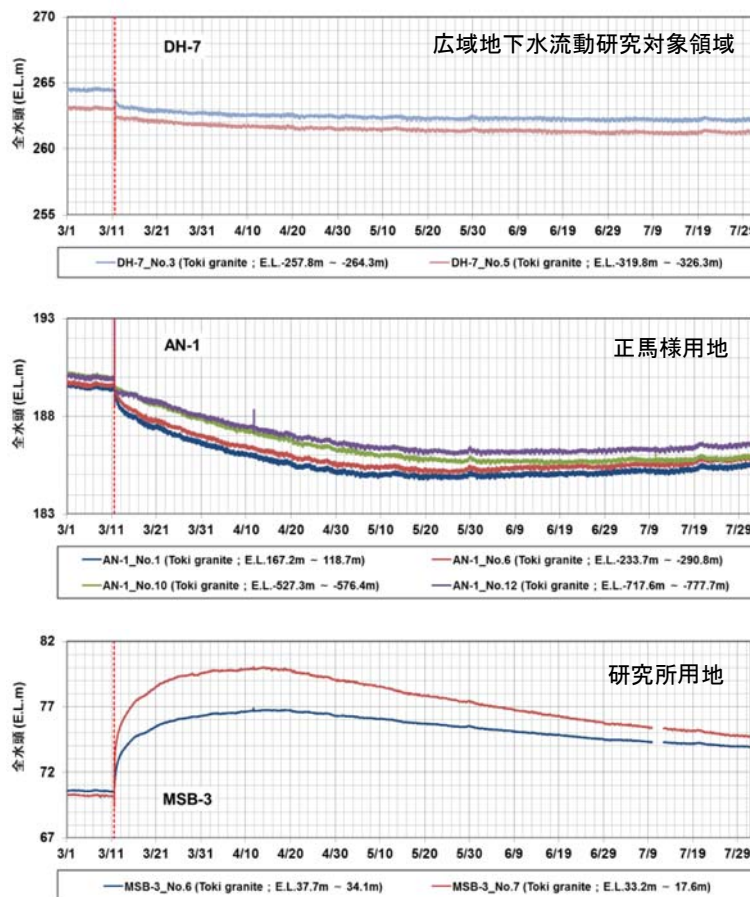


図-3.7 瑞浪超深地層研究所および周辺において観測された東北地方太平洋沖地震時の地下水圧の変化

今後も各種のモニタリングを継続し、特に大規模地震時における地下構造物への影響や周辺の地質環境の変化に関する情報を収集することが重要と考えられる。

③ 地下水流動解析の事例に基づく今後の研究課題

岩盤内に内在する大小の不連続面は、力学および水理学的挙動に様々な影響を及ぼすことが知られている。花崗岩のように岩石のスケールでは工学的に見て実質的に不透水とみなせる場合でも、岩盤のスケールで見ると不連続面が水みちとして機能し、主要な地下水流動経路となっていると想定される。既存の透水試験結果では、同一のサイトでも数オーダーにわたって分布することも珍しくない。すなわち、不連続性岩盤は水理学的に非常に不均質な材料特性を有する材料である。このため、トンネルや地下空洞の掘削時には、突発湧水や局所的な高水圧に伴う施工上のトラブルが発生する可能性がある。また、地下構造物の維持管理における排水計画や長期的な空洞安定性の検討を行う上でも、空洞周辺の地下水挙動の把握が重要である。広域的に見ると、断層や破碎帯などの、より大きなスケールの不連続面が広域地下水流動に影響を与えている。以上のことから、構造物～広域のスケールにおける不連続性岩盤内の地下水挙動を定量的に把握する技術の確立が求められている。

様々なスケールの不連続面を統一的に考慮できる岩盤のモデル化手法およびそれをを用いたサイトスケール（1～2km 四方程度）～広域スケール（10～20km 四方程度）のモデル化や地下水流動解析による検討事例があり、研究開発が進められている（瑞浪および幌延の深地層研究施設、波方および倉敷の地下備蓄基地）。

今後の地下水流動解析に関する研究開発課題としては、以下のものが考えられる。

- ・ 地下水流動モデルを用いた地震に伴う一時的な湧水量変化の説明およびその際の物性値の変化の取扱い
- ・ 不連続性岩盤を対象とした場合の不飽和領域の取扱い
- ・ 地震に伴う構造物周辺のゆるみ領域の透水性の変化とその影響
- ・ 地震に伴う地下水の変化と不連続面の開口幅の変化の把握（原位置および室内試験）
- ・ 操業期間中や閉鎖後長期における地震による影響（直撃シナリオ、緩衝材のパイピング現象など）の重要度の確認

第4章 まとめ

本研究小委員会では、2011年から3年にわたり、岩盤力学を中心として、トンネル工学、耐震工学、放射性廃棄物処分技術などの分野における大深度地下構造物の耐震性評価に関する調査研究を実施し、その現状と問題点、解決すべき課題などをとりまとめた。検討の結果、明らかになった課題に対して今後、取り組むべき事項や方向性を「大深度地下構造物」と「長期の安全評価が求められる放射性廃棄物処分施設」について下記のとおり提言する。

4.1 大深度地下構造物

(1) 地下深部地震動

地下深部の地震動は、一般に地表部での地震動に比べて小さいと言われており、釜石鉱山における地下深部の地震観測結果では、地下深部地震動は地表部の数分の一程度との知見がある。一方、耐震性評価における入力地震動については、地震動に関する多くの情報が、地表面近傍で得られていることから、それらをもとに解放基盤面で定義された基準地震動を地下深部（解析対象領域下部）まで引き戻して地震動が設定されている。しかし、上記のように設定された地震動の妥当性を地下深部で観測された地震動と比較・評価した事例が少ないため、信頼性の高い地下深部入力地震動の設定方法には課題が残されている。このため、信頼性の高い耐震性評価を実施するには、地下深部地震動の観測体制の強化および岩盤構造データを整備し、地下深部での地震応答解析に必要な地震動設定の調査研究が望まれる。

(2) 地震応答解析（岩盤と構造物の相互作用）

地下構造物は岩盤に取り囲まれているため、その地震時挙動は周辺岩盤の挙動に強く影響を受けることが特徴である。現状、地下構造物の耐震設計では、掘削解析や構造物の構築過程を考慮した解析で得られる周辺岩盤や構造物の常時の静的な応力に、地震応答解析により求められた地震時増分応力を加算して安定性の検討がなされることが多い。しかし、大深度、すなわち高地圧下で掘削されるトンネルや地下空洞では、掘削時の地圧解放に因り周辺岩盤に塑性化する領域等、いわゆる“ゆるみ領域”が広がる可能性が高まるため、耐震設計においては、このゆるみ領域の静的および動的な特性を考慮することが望ましい。さらに、地震による地下構造物の挙動は、構造物の構造・形状・剛性ならびに質量の違いによる影響を受けること、地震による損傷の進展に伴い、構造物の剛性・強度の低下が生じその影響を受けること、覆工と岩盤との境界部のように、構造的に不連続な部位においては、すべりや剥離といった複雑な現象が生じることも想定される。したがって、周辺岩盤と地下構造物および両者の相互作用に関する下記のような調査研究を進め、解析手法の高度化が望まれる。

- 応力再配分過程など、非線形特性を考慮した常時（掘削後）応力と地震時増分応力の重ね合せに関する考え方
- ゆるんだ岩盤のおよび損傷後の構築物の動的物性の取扱い
- 地震時における岩盤と地下構造物（空洞内に構築される構造物境界も含む）境界面の境界条件の考え方

(3) 維持管理体制

岩盤内に構築される地下施設は、従来から耐震性に富むと言われているが、既往の地震によるトンネル被災事例調査結果から、地震規模が大きく震源距離が近い場合で、特殊条件が介在すれば、地震被害を受けることが報告されている。特殊条件とは、断層のずれ、地質不良箇所、坑口部等の不安定な斜面内、ならびにトンネル自体が既に変状を生じていた箇所などである。

地下構造物は常時においても、長期間にわたり継続的に変状が進行する場合があることに加え、地震時の被害、そのメカニズムを解明するためには、地震時挙動を数値解析等で適切に評価するだけでなく、適切な施工や長期間計測を続ける維持管理計画を構築することが必要である。とくに、施工時に困難を伴った箇所では、長期間計測可能な計測機器の埋設等、完成後の安定性を確認することが望まれるため、長期耐久性に優れた計測機器等の開発も必要である。

4.2 長期の安全評価が求められる放射性廃棄物処分施設

大深度に構築される放射性廃棄物処分施設のうち、特に高レベル放射性廃棄物地層処分施設の要求機能については、確実な建設・操業を行う観点から「空間保持機能」「重要設備の支持機能」が、放射線安全確保の観点から「隔離機能」「閉じ込め機能」が求められる。前者は事業期間中で短期間（数十年程度）であるが、後者は事業期間に加えて閉鎖後長期（数十万年オーダー）となり、個々に評価する必要がある。事業期間中の要求機能は、大深度地下構造物の耐震性能評価の課題を踏まえて、「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」（以下、耐震設計審査ガイド、2013a, 2013b）に基づき検討することになる。一方、閉鎖後長期については、核種閉じ込め機能を担保するバリアシステム（人工バリア・天然バリア）の変状影響について安全評価をする必要がある。以下に、長期間の安全評価が必要な地震影響に係る課題、提言について記載する。

(1) 長期間に発生する地震動（確率論的評価）

評価期間数十万年の間には、耐震設計審査指針に基づき策定される基準地震動 S_s より規模の小さい地震が数多く発生すること、また、規模の大きい地震が複数回発生することの可能性は否定できないことから、複数回の地震が発生した際のバリア構築物の損傷履歴による影響評価が課題となる。このため、長期の評価期間に発生する地震動の組み合わせを確率論的に策定し、それによる人工バリア構築物の損傷履歴およびその影響を評価することが望まれる。また、評価期間中にはバリア材料の経年劣化も発生することから、劣化材料の動的物性の調査研究も望まれる。確率論的に評価する検討としては、下記のような調査研究が望まれる。

- 地震ハザードによる地震規模、年超過確率の関係から策定する長期間の地震動の策定手法
- 確率論的手法（モンテカルロシミュレーション等）による地震の影響評価手法

(2) 地震が岩盤に及ぼす水理学的影響

地震時の岩盤の水理学的挙動については、瑞浪深地層研究所近傍の観測地点で一時的な地下水変動が観測されているが、地震後2年ほどで地震前の状況に戻る傾向となっている。また、他の地下構造物においても地震による地下水変動が観測されているが、基本的には元に戻る傾向にある。

大規模地震による地下水流動の変化は確認されているが、深部岩盤の地下水流動特性に対して具体的にどのような影響を及ぼすのか、それが天然バリアの閉じ込め性能にどう影響するのかについてはまだ未解明な部分が多い。今後とも、基礎となる地震時の地下水挙動に関するデータの取得を含めて調査研究を継続していく必要がある。

また、数千年から数万年にわたる超長期の地下水流動特性の評価については、地震のみならず地域の活動性（地盤の隆起、沈降）や海水準の変動など広域の境界条件の変動も視野に入れて議論する必要がある、今後の課題である。

参考文献

第1章

総合資源エネルギー調査会基本政策分科会：エネルギー基本計画に対する意見の骨子（案）（資料1），
<http://www.enecho.meti.go.jp/info/committee/kihonseisaku/12th/12th1-1.pdf>, 2013.

朝倉俊弘，志波由紀夫，松岡茂，大矢敏雄，野城一栄：山岳トンネルの地震被害とそのメカニズム，土木学会論文集，No.659/III-52, pp. 27 -38, 2000.

野城一栄，小島芳之，宮林秀次，西藤潤，朝倉俊弘，竹村次朗：地質不良区間における新設山岳トンネル用地震対策工の適用性，土木学会論文集C，Vol. 65 (2009) No. 4, pp. 1062-1080, DOI: 10.2208/jscejc.65.1062

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 地層処分の技術的信頼性 ―地層処分第2次取りまとめ ― 分冊2 地層処分の工学技術，JNC TN1400 99-022，平成11年11月26日

第3章

小山幸則，朝倉俊弘，佐藤豊：兵庫県南部地震による山岳トンネルの被害と復旧，トンネルと地下，Vol.27, No.3, p.54, 1996.3.

小島芳之，野城一栄：トンネルの地震被害実態と今後の対策のあり方，RRR，Vol.21, No.1, p.29, 2007.1. 京都大学，鉄道総合技術研究所，鉄道建設・運輸施設整備支援機構：平成20年度運輸分野における基礎的研究推進制度 研究成果報告 山岳トンネルの地震被害メカニズムと耐震性向上に関する研究（2006-03），p.3-5, 2006.3

佐藤浩章，東貞成，植竹富一，徳光亮一：微動・地震観測に基づく深部地盤のモデル化-柏崎刈羽原子力発電所を対象とした微動アレイ観測の適用性-，電力中央研究所報告 研究報告 (09013), 1-18, 巻頭1～3, 2010, 05.

原子力安全委員会放射性廃棄物・廃止措置専門部会：第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方，2010, 08.

瀧由雄，富田敦紀，西村創，鈴木康正，西川洋二，新美勝之：余裕深度処分施設の長期力学安定性に対する地震の影響に関する基本検討，土木学会第65回年次学術講演会，2010.9.

末広俊夫，山本陽一，窪田茂，新美勝之，小林伸司，征矢雅宏，福田毅：地層処分施設の耐震性評価における静的地震力の設定方法に関する検討，土木学会第68回年次学術講演会，2013.9.

核燃料サイクル開発機構：釜石原位置試験総括報告書，核燃料サイクル開発機構，JNC TN7410 99-001, 1999.

Niimi, K., Kobayashi, S., Shingu, Y., Nobuto, J., Matsui, H., Kamiya, A., Yamamoto, M.: Analysis and Numerical Simulation of Seismic Records Observed in the Ventilation Shaft at the Mizunami URL, Proceedings of European Rock Mechanics Symposium (EUROCK 2012)(CD-ROM), 2012.

Shimizu, I., Osawa, H., Seo, T., Yasuike, S. and Sasaki, S.: Earthquake-related ground motion and groundwater pressure changes associated with earthquake, Engineering Geology, 43, 107-118, DOI: 10.1016/0013-7952(96)00054-3, 1996.

- Ishimaru, K. and Shimizu, I.: Groundwater pressure changes associated with earthquakes at the Kamaishi Mine, Japan –A study for stability of geological environment in Japan-, Proc. of 30th Int. Geol. Cong., 24, 31-41, 1997.
- Niwa, M., R. Takeuchi, H. Onoe, K. Tsuyuguchi, K. Asamori, K. Umeda and K. Sugihara: Groundwater pressure changes in Central Japan induced by the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, AGU, Volume 13, Q05020, DOI: 10.1029/2012GC004052 , May 2012.
- 産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター (2011a : 地震後の地下水・温泉水の変化, 産業技術総合研究所 活断層・地震研究センターHP, <http://unit.aist.go.jp/actfault-eq/Tohoku/chikasui.html>, 2011a
- 産業技術総合研究所 活断層・地震研究センター (2011b) : 2011年4月11日福島県浜通りの地震 (M7.0) に伴う温泉の変化, 産業技術総合研究所 活断層・地震研究センターHP, <http://unit.aist.go.jp/igg/crufluid-rg/iwaki/onsen.html>, 2011b.
- 北川有一, 小泉尚嗣 : 東北地方太平洋沖地震 (M9.0) 後 1 日間での地下水位・地下水圧・自噴量変化, 活断層・古地震研究報告, 11, 309-318, 2011.

付録

(1) 委員会議事録

(2) 委員会話題提供資料

(3) 文献リスト

- ・重要文献（10 件程度）は要約版を作成
- ・年次講演会レベルの論文は除く
- ・海外文献もリストに追加

(1) 委員会議事録

土木学会 岩盤力学委員会「大深度地下構造物の耐震性評価に関する小委員会」
第1回小委員会議事録

日 時：2011年6月7日 14:00～17:20
場 所：土木学会 A会議室
出席者：朝倉俊弘，亀村勝美，岸田潔，加藤準治（京谷孝史代理，）熊坂博夫，
岡田哲実（澤田昌孝代理），鈴木康正，高原秀夫，玉田潤一郎，
平川芳明，松井裕哉，保田尚俊，渡辺和明，浅井隆一，山本真哉
資 料：資料H23-1-1 研究小委員会設置申請書
資料H23-1-2 委員名簿
資料H23-1-3 公募書類
資料H23-1-4 全体計画，話題提供
資料H23-1-5 トンネル・地下空洞の耐震設計について
資料H23-1-6 山岳トンネルの地震被害と地震対策の現状

1. 委員長挨拶

朝倉委員長から，本研究小委員会設立に関する挨拶を頂いた（資料H23-1-1）。

2. 委員自己紹介

本小委員会の委員による自己紹介が行われ（資料H23-1-2），各自のバックグラウンドと本小委員会のテーマに関する問題意識が述べられた。

3. 委員会活動について

資料H23-1-4および資料H23-1-5に基づき，委員会設立の経緯について亀村副委員長から説明があった。また，トンネル・地下空洞の耐震設計に関する問題点を整理した中に，今後の進め方についての提案があった。

委員からは，放射性廃棄物処分場を主な対象として，各自が認識している耐震設計における具体的課題，耐震安全性の考え方などについて多くの発言がなされた。

小委員会の方向性や活動内容に関しては今後2，3回をめどに継続して議論を行い，方向性を固めることとする。

4. 話題提供

朝倉委員長から，「山岳トンネルの地震被害と地震対策の現状」（資料H23-1-6）と題して話題提供がなされ，これに関して質疑応答が行われた。

話題提供の概要は，別紙を参照。

5. 討議, その他

- 2012年1月12, 13日に開催される, 「第41回岩盤力学に関するシンポジウム」において当小委員会によるパネルディスカッションを実施する. 内容については今後検討していく.
- 今後の委員会では話題提供を2件程度行うものとする. 話題提供者は内容を200~300字にまとめ, 数枚の説明図表とともに提出する.
- 次回委員会は, 6月16日(金)14時から実施する(会場は別途調整して連絡する). 話題提供者は玉田委員と松井委員とする. 次々回の候補として, 鈴木委員にお願いする.
- 委員名簿(資料H23-1-2)に誤りや変更が認められる場合は岸田幹事長に連絡する.

以上

土木学会 岩盤力学委員会「大深度地下構造物の耐震性評価に関する小委員会」
第2回小委員会 議事録

日 時：2011年9月16日 14:00～17:00

場 所：弘済会館 1階 葵会議室

出席者：朝倉俊弘，亀村勝美，岸田潔，窪田茂，熊坂博夫，澤田昌孝，高原秀夫，玉田潤一郎，
出口朗，富田敦紀，平川芳明，松井裕哉，松長剛，保田尚俊，渡辺和明，浅井隆一，
山本真哉

資 料：資料H23-2-1 第1回議事録（案）

資料H23-2-2 委員名簿

資料H23-2-3 地層処分における地震による地下環境への影響に
関する研究の現状（概要）

資料H23-2-4 地層処分における地震による地下環境への影響に
関する研究の現状（スライド）

資料H23-2-5 岩盤力学シンポジウムでのパネルディスカッション

1. 委員長挨拶

朝倉委員長から、第2回委員会の開会挨拶を頂いた。

2. 第1回委員会議事録（案）の確認

第1回の委員会議事録の確認を行い、出席委員の了承を得た。なお、委員会 web サイトへの議事録掲載に関して質問が出されたが、委員会の主な議事と話題提供のタイトルを示すのみとし詳細な内容は掲載しないとの方針が説明された。

3. 新委員紹介

新委員ならびに今回初出席の委員により自己紹介が行われた。

4. 話題提供

①地層処分における地震による地下環境への影響に関する研究の現状（JAEA：松井委員）

JAEA 松井委員より資料H23-2-4のスライドを用いて、背景となる地層処分の全体概要と、地下構造物の地震に関する研究内容および現状の課題について説明がなされた。また、提供された話題に対して以下のような議論が行われた。

- ・トンネル等では地震動によって数10cmの残留変形が生じた事例もある。また、断層のずれだけでなく、空洞周辺のゆるみ領域がせん断変形を受けた結果、残留変位が生じうる。これらを課題として議論する必要があるのではないか。
- ・瑞浪の立坑覆工部でのひずみ計測では、ひずみ計を長軸方向に設置したため地震動によるひずみ変化は小さかったが、円周方向のひずみは必ず出ていると考えた方が良い。

- ・処分施設のスケールを踏まえると、ずれを伴う断層を避けることは難しく、活断層の無い地点を選定するという説明では成立しないと思われる。また、活断層でない不連続面であっても地震時に悪影響を与える可能性はあるので考慮が必要である。
- ・遮蔽機能上問題になる地質脆弱部は地震時のひずみを受けやすく、耐震性の観点からも懸念される箇所となる。
- ・100 万年後までの耐震安全性を設計で担保するのは不可能と思われる。廃棄体設置前であれば、断層のずれ等により坑道が被害を受けたとしても核種漏洩は無く、設置後であれば緩衝材が充填されるため、ずれは小さいはずである。したがって、各段階でのインパクトを考慮して、短期（建設、操業時）と長期（閉鎖後）に分けた評価が必要ではないか。
- ・通常は深度が大きいほど地震動（加速度）は小さくなるが、幌延では地震動が深度方向に必ずしも小さくならないという報告もある。この点について可能であれば次回以降紹介して欲しい。
- ・深度による地震動の違いを考慮すれば、アクセス坑道と埋設坑道とは分けて評価した方がよいと思われる。
- ・当委員会では地震による地下建造物の健全性への影響および耐震設計手法の必要性に絞って議論していきたい。

②地層処分施設の耐震性に関する概略検討（NUMO：玉田委員）

NUMO 玉田委員より、地層処分事業の耐震検討例の紹介と耐震設計の考え方および課題についての説明があった。また、提供された話題に対して以下のような議論が行われた。

- ・地震応答解析モデルにおいて、支保工と地盤とは一体化してモデル化されているが、実際にはノーテンションパネのような境界条件が望ましいのではないか。
- ・支保のモデル化方法は解析結果に直接効いてくるため重要な問題となる。
- ・今回の耐震検討例では、地震時増分応力と常時応力の足し合わせにより評価しているが、ゆるみ領域の評価という観点では問題ではないか。
- ・地震時増分応力だけでなく、常時応力も加えた条件で動的解析を行わないと実際の破壊モードが再現できないことも確認されており、解析条件には注意すべきである。
- ・大深度の地下建造物の場合、常時応力が支配的になり、地震時応力の影響が小さいことが、今回の結果からも分かる（初期の地盤の変形が小さいため耐震検討は必要ないとも言える結果かと・・・）。坑道の大部分は耐震上問題がなく、ごく一部の脆弱部が存在する地点の耐震設計を主に考えねばならない。
- ・操業の形態によって地下施設の耐震設計に関する要求性能は時空間的に変化するが、現状では明確でない。例えば、施工時であれば補修可能な程度のずれは許容するなど合理的と考えられないか（実際に操業が始まる時には、操業部と施工部が錯綜することになるため、個別に評価方法を変え

るのは難しいのでは).

- ・総じて、地下構造物は安全であるという認識はあるものの、今まで行われてきた評価法からさらに踏み込んだ議論を行い、耐震設計時に考慮すべき事項（ゆるみ領域、動的物性など）について委員会として何らかの提言ができれば良いのでは.
- ・処分施設の耐震性を考える上で、建設～操業期間の常時応力に対する安定性確保の考え方を整理した方がよいと思われる.

5. 岩盤力学シンポジウムでのパネルディスカッションについて

来年1月の岩盤力学シンポジウムで開催する当小委員会のパネルディスカッションに関して、発表内容やパネラーについて協議を行った（資料H23-2-5）.

- ・パネラーは委員会メンバーを主体とし、朝倉委員長、亀村副委員長のほか、放射性廃棄物処分の実施主体としてNUMO、また、岩盤の動的物性に関して電中研の岡田氏が適当である.
- ・具体的なパネラーの選定や内容については再度確認を行う.
- ・当委員会の設立趣旨および各パネリストのレジメを用意する.

6. その他

- ・第3回委員会は、2011年12月2日（金）14時から土木学会にて実施する.
- ・次回の話題提供者は以下の2名とする.
日本原燃（株）出口委員（六ヶ所の余裕深度処分に関して）
清水建設（株）熊坂委員（処分施設建設時における常時安定性の確保）

以 上

土木学会 岩盤力学委員会「大深度地下構造物の耐震性評価に関する小委員会」
第3回小委員会 議事録

日 時：2011年12月2日 14:00～17:20

場 所：土木学会 A会議室

出席者：朝倉俊弘，亀村勝美，岸田潔，長田昌彦，加藤準治，熊坂博夫，澤田昌孝，
鈴木康正，高原秀夫，玉田潤一郎，平川芳明，松井裕哉，渡辺和明，
出口朗，富田敦紀，窪田茂，青木慶彦，末広俊夫，山本真哉，浅井隆一

資 料：資料H23-3-1 第2回議事録（案）

資料H23-3-2 岩盤シンポジウムプログラム

資料H23-3-3 岩盤力学シンポジウムでのパネルディスカッション

資料H23-3-4 放射性廃棄物処分場の耐震設計について

1. 委員長挨拶

朝倉委員長から，第3回委員小委員会の開催挨拶がなされた。

2. 第2回小委員会議事録（案）の確認

第2回小委員会議事録（案）の確認を行い，出席委員の了承を得た（資料H23-3-1）。

3. 話題提供

①余裕深度処分施設の耐震性に関する検討状況（日本原燃株：出口委員）

出口委員より余裕深度処分施設の概要と，耐震性の評価方法および現状の課題について説明がなされた。また，提供された話題に対して以下のような議論が行なわれた。

- ・処分坑道の断面を馬蹄形としている点について意見がなされた。これに対して，日本原燃では収納効率や耐震性評価結果をもとに合理的な断面として考えているとの説明がなされた。一方で，施設の使用年数を考えると施工性や経済性よりも長期的な力学的安定性を優先して円形とする方が良いのではないかという委員からの意見もあった。
- ・六ヶ所の施設において観測された東北地方太平洋沖地震の記録では，深度方向にあまり変化が見られなかったという説明がされた。これに対して，当該地震は直下型ではなく，数百キロ離れた震源から水平方向に到達する地震動であることから，対象とした深度では明確な差異が出ないでは，という意見も出された。
- ・便宜的に設計では慣性力が用いられており，これは積み上げてきた経験に基づいた手法として実績を持つが，現実には地下構造物は慣性力でなく，周辺地盤のせん断変形により破壊するものである。したがって，今後は観測データを拡充し，せん断変形が慣性力に換算してどの程度になるかということも検討する必要があるのではないか，という意見が示された。

- ・Cクラス設計に用いられている設計水平震度「0.2」という考えは、地上施設や機器の設計に対して決められた値であり、これをそのまま地下の岩盤に対して適用することは問題ではないか、という質問がなされた。現状は、原子力施設ということでこの値を用いることは妥当である。このテーマは、本委員会でも議論すべきテーマであるという意見がなされた。
- ・紹介された検討事例で、解放基盤面における地震動を解析モデル下端に引き戻し計算を行なうと、解放基盤面に比べ約2.5倍にもなってしまうことについては、地盤の減衰特性の物性やモデルが現実と合っていないことが原因ではないかという質問がなされた。
- ・日比野氏（元電中研）が原子力発電所の地下立地の検討時に地下震度の分布について報告しており、そこでは深部になるほど震度が小さくなることが示されている。大深度構造物の設計を考える際には、そうした考え方を取り入れて等価震度を求めることが可能なのではという意見がなされた。
- ・解放基盤面における基準地震動を用いた設計法が現在の標準となっているため、引き戻し計算を行うこともやむを得ないが、将来的には地震波の伝播状況を考慮した検討が必要と思われる。
- ・高レベル放射性廃棄物の処分坑道については、国が示した余裕深度処分に関する安全審査の基本的考え方を参考にすると、廃棄体の堅牢性に依りて耐震重要度はCクラスあるいはBクラスになると予想している。余裕深度処分の報告で論点として挙げられている地下深部での静的地震力については、高レベルの場合にもその設定方法が課題であると認識している。また、動的解析を行う場合については、大深度地下構造物の解析モデル下端まで地震動の引き戻しを行うと、深部岩盤の減衰定数のデータが未整備であるために一律の値を用いると、実際の観測事実と整合しない大きな加速度が算出されてしまう傾向がある。これについては、余裕深度処分よりも地層処分の方が課題であると思われる。
- ・サイトが選定された段階でボーリング孔を用いて深部に地震計を設置し、観測記録から、その場所における地震波の伝播特性や地震による特性の違いを説明することが必要になる。また、これまでに青函トンネルなど幾つかのトンネルにおいて、地下深部での地震観測が行われてきており、これらの観測データを用いた解析が近道となると思われる。
- ・2次元解析における空洞長手方向の検討の必要性に関して、高レベル廃棄物処分場のような大深度では、斜め入射による位相差に伴って長手方向に応力が生じることが考えられるため、検討を実施したが、解析結果では影響はあまり見られなかった。一般的には長手方向に対して地層が変化しなければひずみは発生しにくい。ただし、3次元解析の結果では、ある条件下で斜め入射の影響が大きくなるという結果も得られている。

②処分施設建設時における常時安定性の確保（清水建設㈱：熊坂委員）

熊坂委員より、処分施設建設時における常時の安定性に関する設計の現状と課題について、山岳トンネルにおける不安定現象の事例をまじえて説明がなされた。また、提供された話題に対して以下のような議論が行なわれた。

- ・第1回委員会の話題提供でも触れられていたが、これまでの事例を分析する限り、地震動で破壊されるのは、①周辺と比較して地質条件が悪い箇所、または、②設計・施工が地質状況に対応できていない箇所である。荷重の形態が静的か動的かによりトンネルの破壊様式も異なると思われるが、設計手順や地質脆弱部への対策は同じ考え方に基づいて対応できると考えられる。
- ・飯山トンネルの地表面陥没は、鉛直に近い地質構造に対してトンネルが不注意に掘削した結果であり、地層処分には直接該当しない事例ではあるが、このようなことも心得ておく必要がある。さらに、地表面陥没が生じた場所を含め、複数のボーリング調査が事前に行われていたにもかかわらず、現象を予見出来なかったことは肝に銘じなければならない。
- ・地山が縦構造を有する場合のトンネル掘削や、水抜きボーリング後に水頭が再上昇する現象の危険性は、これまでの事例から教訓として得られており、これらの知見を共有しておくことは重要である。
- ・一方で、こうした不安定現象を防ぐために、どこまで地盤調査をすれば良いのかという判断は難しい問題である。
- ・放射性廃棄物の地層処分では立坑掘削が先行調査となるため、その後の計画にとって有用な情報を取得できる。
- ・地層処分では良好な地質条件のサイトが選定されるが、それでも局所的に地質の悪い箇所に遭遇する可能性がある。このような箇所への対応は設計段階から考えていく必要があるが、設計と施工には十分余裕を持たせることが重要であり、地質条件によって設計・施工にコントラストを付けることが望ましい。なお、地質条件が良い場合でも山はねには注意が必要である。
- ・結晶質岩のサイトである瑞浪では、局所的な地質性状の変化を地表からの物理探査だけで全て捉えることは不可能であるため、原位置において地山特性を取得することが必要と考えている。
- ・トンネルの離隔については、地質条件が悪いと5D程度であっても先行トンネルが影響を受ける可能性があると言われている。

4. 岩盤力学シンポジウム DS への対応

2012年1月13日に開催するパネルディスカッションのパネラーと議論の内容について確認を行った(資料H23-3-2, 資料H23-3-3, 資料H23-3-4).

5. とりまとめに向けて

- ・岸田幹事長より, 本委員会の成果のとりまとめ内容についての以下の提案がなされた.
 - ▶ 文献調査「地震による空洞の被害」「空洞の耐震性の検討」「岩盤の動的物性」等.
 - ▶ 委員会の活動記録として, 話題提供の内容や議論の内容についてまとめる.
 - ▶ 一般に向けた啓蒙ツールを整備する(中高生ぐらいが理解できるような).
- ・次回以降, とりまとめに向けた内容については, 委員会で継続的に議論し, とりまとめ作業を進める.

6. その他

- ・第4回委員会は, 2012年3月6日(火) 15:00~18:00 土木学会にて実施する.
- ・次回の話題提供者は以下の2名とする.

(財)電力中央研究所 佐藤氏 (原子力発電所の耐震安全性検討に用いる地震動について)
パシフィックコンサルタンツ(株) 松長委員 (処分施設建設時における維持管理について)

以 上

土木学会 岩盤力学委員会「大深度地下構造物の耐震性評価に関する小委員会」
第4回小委員会 議事録

日 時：2012年3月6日 15:00～17:30

場 所：土木学会 A会議室

出席者：朝倉俊弘，岸田潔，長田昌彦，窪田茂，熊坂博夫，澤田昌孝，鈴木康正，高原秀夫，
玉田潤一郎，出口朗，富田敦紀，平川芳明，松井裕哉，保田尚俊，渡辺和明，浅井隆
一，山本真哉，関口高志

《オブザーバ》 佐藤清隆，末広俊夫，小川智広

資 料：資料H23-4-1 第3回議事録（案）

資料H23-4-2 話題提供資料（出口委員）

資料H23-4-3 委員会名簿

資料H23-4-4 文献調査標

資料H23-4-5 話題提供資料（佐藤氏）

資料H23-4-6 「断層モデルにもとづく設計用地震動評価」スライド

資料H23-4-7 「廃棄物管理事業変更許可申請における耐震に関する安全審査
の考え方について」

第3回話題提供資料（熊坂委員）

1. 委員長挨拶

朝倉委員長から，第4回委員小委員会の開催挨拶がなされた。

2. 新委員紹介

新委員の関口氏の紹介が行われた。

3. 第3回小委員会議事録（案）の確認

第3回議事録（案）の確認を行い，出席委員の了承を得た（資料H23-4-1）。

4. 話題提供

「断層モデルにもとづく設計用地震動評価」（電力中央研究所：佐藤氏）

佐藤氏より新耐震設計審査指針から義務付けられた，断層モデルにもとづく地震動の評価方法について説明頂いた。また，提供された話題に対して以下のような議論が行なわれた。

- ・原子力発電所では40年程度の運転期間中に起こりうる最大の地震動を設定して評価するのに対し，放射性廃棄物処分施設では万年オーダーの極めて長い期間が評価対象となる。そのため，想定される最大規模の地震（例：再現期間10万年の地震）に対する評価だけではなく，比較的大きな地震が複数回繰り返す事象（例：再現期間1万年の地震が10回発生）についても評価が必要と思われるが，

発電所を対象とした現状の地震 PSA 手法では難しい面もある。

- ・放射性廃棄物処分施設では長期の評価期間となるため、確率論的評価で考えると、原子力発電所の基準地震動の S_s と比較して、再来期間がより長い、非常に大きな地震動を考える必要が出てくる。ただし、再来期間が長くなっても地震動の大きさには頭打ちがあるはずであり、これを起こりうる最大規模の地震動として評価するのが現実的と考えられる。
- ・10 万年オーダーの期間を対象にするならば、地震動に対する評価だけでなく、例えば、隆起・浸食などの地質構造の経時変化についてもシナリオとして考慮し、常時の状態の安全性を評価しなければならない。
- ・放射性廃棄物処分施設の地震動評価では、数十年間続く操業期間については設計の観点で評価を実施し、それ以降の期間に対してはバリア性能への影響が大きいシナリオに基づいて安全性の評価を行う方向で議論が進んでいる。
- ・新潟県中越沖地震では、柏崎刈羽原子力発電所の同じサイト内でも原子炉建屋によって応答加速度が異なることが観測記録より確認されており、これは深部の褶曲構造によって各建屋での地震動の伝播経路特性に違いが生じた結果であるとの知見が得られている。この事実を考慮すると、概して敷地が広い原子力発電所サイトにおいて 1 つの基準地震動を考えるだけで十分なのかという意見もある。一方で、不確かさの大きい深部地下構造から精緻な地震動評価を行うことには限界があるようにも思われる。
- ・位相をランダムに与える人工地震波では、自然現象としての地震動の特徴が反映されていないという問題点が断層モデルにもとづく地震動評価に至った一つの動機となっている。今後、解析手法の高度化により地盤に対して逐次非線形解析などを行う場合は、地震動の位相の影響も大きく係わるため、どのように基準地震動を設定するかが課題となってくる。また、土木構造物では地震動の長周期成分および継続時間が問題となることが以前より指摘されている。

5. 岩盤力学シンポジウム DS の結果と今後に向けて

2012 年 1 月 13 日に行われた、岩盤力学シンポジウムのパネルディスカッションの結果の報告と今後に向けての意見交換を行った。主な意見として以下のようなものがあつた。

- フロアとの活発な意見交換がなされ、セッションは大変盛況であつたが、時間が多少足りなかつた。
- 可能であれば次回の岩盤力学シンポジウムでも DS を実施したい。
- フロアから出た質問については記録に残しておく必要がある。

6. とりまとめに向けて

当委員会活動のとりまとめに向けて文献調査を行うことで合意した。文献調査は以下の方針に沿って行うこととなった。具体的な作業については、今後、岸田幹事長から各委員に依頼する。

- 調査の第一段階としてキーワードを決めて文献検索を行い、抽出された論文のリストを作成する。
キーワード例：空洞，トンネル，地震被害，耐震性，動的物性，動的解析・・・
- 文献検索とは別に，各委員は調査対象とすべき論文のタイトルを 10 件程度挙げる。
- 以上の作業で得られた論文リストに基づき，文献調査結果のとりまとめ方法を決める。

7. その他

第5回委員会は，2012年6月18日（月）14:00～17:00 に土木学会A会議室において実施するものとし，次回の話題提供者は以下の2名に決まった。

- ・ パシフィックコンサルタンツ(株) 松長委員 「処分施設建設時における維持管理について」
- ・ 鹿島建設(株) 高原委員（内容未定）

以 上

土木学会 岩盤力学委員会「大深度地下構造物の耐震性評価に関する小委員会」
第5回小委員会 議事録

日 時：2012年6月18日 14:00～17:00

場 所：土木学会 A会議室

出席者：朝倉俊弘，亀村勝美，岸田潔，長田昌彦，熊坂博夫，澤田昌孝，窪田茂，末広俊夫，
高原秀夫，玉田潤一郎，佐藤稔紀，渡辺和明，出口朗，富田敦紀，小川智広，
保田尚俊，関口高志，森岡宏之，松長剛，山本真哉，浅井隆一

資 料：資料H24-5-1 第4回議事録（案）
資料H24-5-2 文献リスト一覧
資料H24-5-3 文献とりまとめ事例
資料H24-5-4 文献とりまとめ事例（簡易版）

1. 委員長挨拶

朝倉委員長から，第5回委員小委員会の開催挨拶がなされた。

2. 新委員紹介

松井委員の後任として佐藤氏が参加される旨の紹介があった。

3. 第4回小委員会議事録（案）の確認

第4回議事録（案）の確認が行われ，出席委員の了承を得た（資料H24-5-1）。

4. 話題提供

①原子力発電所の耐震設計（鹿島建設株）：高原委員）

高原委員より，原子力発電所の耐震設計について説明を頂いた。また，提供された話題に対して以下のような議論が行なわれた。

- ・放射性廃棄物処分施設に関して地震に対する心配の声が多いが，埋め戻された処分坑道では地震動の影響は小さくなることもあり，操業中と閉鎖後では要求性能が変わってくる。したがって，閉鎖後の超長期の評価において地震をどう取り扱っていくべきかについて明確にすることが必要ではないか。
- ・超長期の時間スケールでの地震に対する安全性を設計でもって担保することは不可能である。建設・操業期間中に発生する地震動に対する構造物の力学的安定性の評価（耐震設計的考え）と，超長期で考慮した場合に地震に関連して生じうる核種移行によって人間が受ける影響の評価（安全評価的考え）に切り分けて考える必要がある。例えば，断層が処分坑道を直撃するような事象は，後者の安全評価側の範疇となり，核種移行の一つのシナリオとして想定されている。
- ・まずは操業期間に絞って，一般トンネルの耐震性能の評価基準を参考にして処分坑道の耐震性について議論し，処分施設の機能上，考慮すべき項目や，現状の技術で足りないと考えられる項目を洗い出し，議論のたたき台として整理したものを本委員会から発信していくのが良いのではないか。

- ・トンネルの損傷度の分類（レベル2（ひび割れ）、レベル3（圧ざ破壊）、レベル4（剥落））を基準にしたとき、放射性廃棄物の処分坑道が許容されるのはレベル3までと考えるのが妥当ではないか。
- ・処分施設のスケールを考えた時に、鉄筋が入った2次覆工を全体にわたって施工することは建設コストの面から非現実的であり、繊維補強吹付けコンクリート等による支保工を検討する必要があるかもしれない。
- ・操業期間中の耐震評価に限っても、現状では下記のように解析手法や物性の取り扱い方等に難しい点が多く存在する。
 - 2次元解析 or 3次元解析
 - 岩盤の動的物性
 - 複数回の地震が発生した際の損傷履歴
 - 地下深部での基準地震動の設定
 - 支保のモデル化

②処分施設建設時における維持管理について（パシフィックコンサルタンツ(株)：松長委員）

松長委員より、処分施設建設時及び操業時における維持管理について説明を頂いた。また、提供された話題に対して以下のような議論が行われた。

- ・同じトンネル内でも場所によって変状の有無に違いがあるが、これは主に、覆工背面が充填されず空洞が存在する、もしくは、地山条件が悪く、地山の押し出しが生じていることによる。そうしたことから、変状に対する予防保全として確実かつ堅実な建設が必要である。
- ・地山の緩みは掘削時だけでなく、建設後の経時的な劣化により生じることもある。今後、風化のメカニズムなどが明らかになれば緩みに関する予測精度も向上すると思われる。
- ・トンネルのような構造物では、地質条件の良い区間と悪い区間が存在する。変状は地質が悪く、かつ、支保が十分でない箇所が生じる。そのため、極めて条件が悪い箇所では重点的な対策により問題が生じないが、逆にその周辺では支保が不足し、変状が発生することもある。
- ・グリーントフの地山は掘削が容易なため、紹介事例のトンネルでは弾頭型の形状で設計されているが、グリーントフは時間依存性の変位進行があることが次第に分かって来ており、現在ではこのような設計は行われない。
- ・これまで、背面空洞は初期の施工不良により形成されるものと考えられてきたが、新潟の地震では、元々充填されている箇所地震後に新たに背面空洞が形成されていたり、既存の背面空洞が地震により無くなっていたりするのを確認している。地質条件が悪い場合には、このようなことも起こりうると思われる。
- ・低品質のコンクリートが使用された年代の古いトンネルを除き、躯体コンクリートの強度が劣化により低下することはほとんどない。
- ・放射性廃棄物の処分坑道の場合、目視による変状の観察ができるとは限らない。維持管理のためには

掘削直後の検査結果を初期状態として把握しておくことが重要と思われる。

5. とりまとめに向けて

委員会のとりまとめに向けて以下のような意見交換を行った。

(1) 文献調査

- ▶ 各委員は1件以上の文献について、指定書式のシートに概要をまとめる（資料H24-5-3を参考とする）。また、文章だけでなく、代表的な図表も挿入する。
- ▶ 各委員から挙げられたすべての文献について調査を行うのは困難なため、重要と思われる文献を選択する。特に文献リストで重複するものを優先する。
- ▶ 現状の文献リストにはないが、調査が必要と思われる文献があれば追加する。
- ▶ 文献の分類に加えて、キーワードも記述する。

(2) 議事録の整理

- ▶ 本委員会で対象とする操業期間中（100年程度）の処分坑道の耐震設計の観点に立ち、これまでの議事録を整理し直す。
- ▶ 幹事会にて議事録を整理した第一ドラフトを作成し、次回の委員会でこれをたたき台として議論を行う。

6. その他

- ・ 第13回岩の力学国内シンポジウムでのパネルディスカッションは中止とした。
- ・ 第6回委員会について
 - ▶ 2012年9月24日（月） 日本原燃株（六ヶ所村）にて実施する。
 - ▶ 話題提供者は保田委員とする。また、日本原燃株に事業説明と施設見学をお願いする。

以 上

土木学会 岩盤力学委員会「大深度地下構造物の耐震性評価に関する小委員会」

第6回小委員会 議事録

日 時： 2012年9月24日 9:00～11:30

場 所： 日本原燃(株)濃縮・埋設事務所 A会議室

出席者： 朝倉俊弘， 亀村勝美， 岸田潔， 長田昌彦， 熊坂博夫， 澤田昌孝， 鈴木康正， 関口高志， 高原秀夫， 玉田潤一郎， 出口朗， 富田敦紀， 佐藤稔紀， 松長剛， 保田尚俊， 南部茂義， 青木慶彦， 末広俊夫， 多田浩幸， 浅井隆一

資 料： 資料H24-6-1 第5回議事録（案）

資料H24-6-2 とりまとめの構成（案）

資料H24-6-3 親委員会報告

1. 委員長挨拶

朝倉委員長から，第6回委員小委員会の開催挨拶がなされた。

2. 新委員紹介

出口委員の後任として南部氏が参加される旨の紹介があった。

山本幹事の代理として多田氏が参加される旨の紹介があった。代理ではなく，多田氏を幹事兼委員とする。山本幹事は，名簿にはそのまま記載する。

3. 第5回小委員会議事録（案）の確認

第5回議事録（案）の確認が行われ，出席委員の了承を得た（資料H24-6-1）。

4. 話題提供

①埋設施設の概要説明（日本原燃(株)：南部委員）

南部委員より，日本原燃(株)における埋設施設の概要について説明がなされた。また，以下のような議論が行なわれた。

- ・ 余裕深度処分においては，廃棄体を定置しモルタル充填を行うまでは遠隔操作となるが，それ以降の作業は人が行うことができる。また，モルタル充填までされていなくとも，機械のメンテナンスなどは遮蔽扉の外に出すことで人が作業を行うことができる。
- ・ 空洞を併設する場合，空洞の離隔距離はセンター間で2D程度を考慮しており，解析的にはフォローをしている。また，どのような順番で掘ると力学的安定性が良いか，さらには，どのような順番で廃棄体を埋設するのが良いのかなどの検討も行っている。今後，実際に隣接する空洞を掘る際には必要なモニタリングを行い，地盤の挙動を把握する必要があると考えているが，計測項目等の具体的な計画までは実施していない。
- ・ 申請上はCクラス設計で良いとされているが，社内の財産保護上の面から，2万年に1度程度の確率

で考えられる地震動に対する耐力照査も行っている。

- ・現在の埋設方法は、廃棄物の再取り出しは考えていない。モルタルを使用して充填するので、高レベルに比べて取り出しにくいと考えられる。技術的に全く不可能ということはないが、再取り出しを行う場合にはそれを前提とした別の埋設方法を検討する必要がある。

②次期埋設施設の調査坑（日本原燃：六ヶ所村）での地震動及び常時微動の測定について

（戸田建設株：関口委員）

関口委員より、埋設施設調査坑における地震動及び常時微動の測定結果についての話題提供がなされた。また、以下のような議論が行なわれた。

- ・地下深部における常時微動の震源は明確に分かっていないが、昼夜で同様の常時微動が計測されている事を考えると、地上において計測される常時微動と同じ震源だと考えている。
- ・常時微動の計測では広帯域計測機を使っているため、余震にも対応できるものとしている。
- ・地震時の空洞の安定性からすると、廃棄体を定置する前にコンクリート躯体側部の緩衝材を施工した方が良いが、現在は廃棄体の搬入工程などを考え、最も厳しくなる緩衝材が無い状態で安定性評価を行っている。今後、工程の見直しも含めて施工順序についても検討をすることも考えられる。
- ・地下構造物の安全性評価を行う際に、加速度は直接的な指標では無いと思われる。他にもひずみレベルなども見ていくことも大切である。そちらは、今回紹介した加速度測定とは別に、国の性能確認試験の方で実施している。
- ・地表面と地下 100m の間で増幅率が 6 倍となる結果は大変大きく感じるが、地下 20m と 100m の間ではあまり増幅が見られないことを考えると、地表面付近の軟弱層で大きく増幅しているものと思われる。ただし、まだ計測点数は少ない所もあるため、今後、計測点を増やしていくことも考えている。
- ・工学的基盤層であれば、地下空洞に被害が無いということはなく、被害はあるということ認識する必要がある。
- ・常時微動の観測の目的に、その地盤の卓越周期を見るということもあるが、今回の計測結果から卓越周期が見られなかったことに対して、地下深部における常時微動をどのように解釈したら良いかを文献調査を含めて検討している。

4. とりまとめに向けて（資料H24-6-2）

委員会のとりまとめに向けて、幹事会で作成した目次案をもとに意見交換を行った。

- ▶ タイトルを「一現状と課題」とするのが良いのではないか。
- ▶ 2章で現状を整理し（2章のタイトルを「耐震性評価の現状」とする）、3章では課題を整理する。
- ▶ 3章では地震が岩盤に及ぼす水理学的影響についても整理する必要があると思われるため、次回の委員会にて話題提供をして頂く。
- ▶ 4章のまとめは富田委員にお願いをする。

▶ 各々のテーマに対して、2～3 ページ程度で取りまとめる。

5. その他

▶ 本委員会のとりまとめ（案）を、9月27日に行われる親委員会に報告予定である（資料H24-6-3）。

▶ 本委員会の活動期間は2年間で、本年度で終了の予定であるが、議論が十分にできていない話題等もあるので、もう1年延長する方向で今後検討することとなった。

▶ 次回の第7回委員会は2012年12月13日（木）14:00-17:00とする。場所は、確定後に連絡をする。

▶ 次回の話題提供者は佐藤委員と、もう1名水理的影響についての話題提供を依頼する。

以 上

土木学会 岩盤力学委員会「大深度地下構造物の耐震性評価に関する小委員会」

第7回小委員会 議事録

日 時：2012年12月13日 14:05～16:55

場 所：京都大学東京オフィス 会議室3

出席者：朝倉俊弘、亀村勝美、岸田潔、窪田茂、熊坂博夫、佐藤稔紀、澤田昌孝、鈴木康正、
関口高志、高原秀夫、玉田潤一郎、富田敦紀、櫻井友彰（南部委員代理）、平川芳明、
保田尚俊、渡辺和明、小川智広、末広俊夫、浅井隆一、下茂道人、多田浩幸

資 料：資料H24-7-1 第6回議事録（案）
資料H24-7-2 関口委員前回発表概要
資料H24-7-3 報告書案
資料H24-7-4 保田委員発表 ppt 資料
資料H24-7-5 2章原稿案
資料H24-7-6 3章原稿案
資料H24-7-7 下茂氏発表概要

1. 委員長挨拶

朝倉委員長から、第7回小委員会の開催挨拶がなされた。

2. 第6回小委員会議事録（案）の確認

第6回議事録（案）の確認が行われ、出席委員の了承を得た（資料H24-7-1）。なお、本小委員会の活動期間の延長に関して、正式に承認されたのかを岸田幹事長より親委員会に確認することとした。

3. 第6回小委員会の発表概要資料の確認

第6回小委員会において関口委員より発表いただいた発表概要の資料H24-7-2を参考資料として保管することが確認された。

4. 話題提供

① 3次元弾性波動論に基づいた山岳トンネルの地震被害メカニズムに関する基礎的研究（京都大学：保田委員）

保田委員より、山岳トンネルの地震被害メカニズムについての話題提供がなされた。また、以下のような議論が行なわれた。

- ・地中建造物の耐震計算法に関する用語の使い方について、関連する示方書や設計基準書等で使用されている定義と整合しているか確認する必要がある。
- ・解析結果から、地盤が軟らかい場合、縦断方向の耐震評価が必要となる可能性が示された。これについては、地質の悪いところで地震被害が生じている状況とも調和した結果となっている。
- ・今回の解析検討は一様地盤を想定した場合であり、地層が縦断方向で変化する場合は今後の課題である。重要建造物については実際の地質状況を忠実にモデル化して数値解析を実施することとなるが、通常のトンネルに対しては、典型的な地質モデルを設定して、縦断方向の地層変化の影響を理論解によって一般的に表現しておくことが実務においては有用であると考えられる。

② 不連続性岩盤を対象としたサイトスケール～広域スケール地下水流動解析の事例（大成建設株：下茂氏）

下茂氏より、様々なスケールの不連続面を統一的に考慮できる岩盤のモデル化手法およびそれを用いた地下水流動解析事例についての話題提供がなされた。また、以下のような議論が行なわれた。

- ・現場で測っている透水係数の確からしさについては、対象とする建造物がどの程度の精度を必要とするかによって変わってくる。地層処分研究においては、高精度の計器、高性能パッカーを使用して、場所も気をつけて選んでいるので、精度は高い。一方、地下備蓄施設ではグラウトの機材を使っているので精度としては高くないが数多くの計測を行っているので、得られたデータの信頼性の意味での精度は高い。精度は使う目的によって異なると考えている。
- ・地下建造物において、地震によって一時的に湧水量が増加して、時間が経つともとに戻ることがよく観測される。提案したモデルでそれを説明することは課題と考えている。その現象を表現するには物性が地震直後に変わるような取り扱いが必要になる。それについての知見がない。釜石では地震によって圧力が上昇したり低下したりすることが観測されていて、それは地震が起きている方向と亀裂の方向によって変わるのではないかと考えられている。必ずしも、一方向の挙動はしていない。
- ・瑞浪でも東日本大震災では、周辺の地域が引張状態にあり、地上から掘削した大多数のボーリングで水圧は低下した。一方、立坑を掘っている研究所用地のボーリング孔では水圧が上昇した。その現象についてはいろいろと検討しているが今のところ説明がついていない。
- ・等価連続体で解析するメリットとして建造物をモデル化しやすい点が挙げられる。扱う建造物が長いとか、上部に建造物があるとか、その場合に、不連続体モデルではデータ数が多くなる。トンネル周

辺の問題には不連続体モデルが適していると考えられるが、亀裂と亀裂の間の圧力が求まらない点は、設計するうえで扱いにくいと考えられる。

- ・不連続性岩盤の場合に不飽和領域についてどのように考えるのかはあまり知見がない。飽和度が小さくなれば透水性は小さくなることは想定できる。飽和度が小さくなれば毛管張力は大きくなることも確かなことと考えられる。しかし、その関係が実際はどうなるのかがわからない。現状は、従来のモデルを使用している。
- ・地震時の地下水挙動については、産総研に研究されている方がいるのでお話を聞くのがよい。
- ・地震で構造物が破壊するようなことはないと考えている。地震が起こった時に構造物周辺のゆるみ領域の透水場がどのくらいかわるのか？水が流れたり戻ったりする動的な挙動がどのように影響するのか、これから勉強しないといけないというのをレポートに書こうとしている。
- ・地震が何回も起きて応答がでてくる。それが当初予定していた核種移行の問題に影響がまったくないのか、考えておいたほうがよい。科学者としては絶対に取り組むべきである。
- ・同じ箇所で変形と地下水のデータが同時に計測されることが重要と考えられる。間隙水圧計だけでなくクラックゲージも同じ場所においた計測で、あとからアクセスできて、繰り返しの測定ができるのが望ましい。しかし、原位置でそのような計測を長期にわたって実施するのは難しいので、室内試験でシミュレーションするようなことも考える必要がある。
- ・超長期について地震の影響を考える必要はない。操業期間、空洞があいているときに地震によってなかがどうなるのか？埋め戻した後については、シナリオによれば地震が直撃する場合を想定して安全評価が行われると考えられる。
- ・スウェーデンのSKB社では、廃棄体の定置後、再冠水してベントナイトが膨潤圧を発生して内圧がかかるような状態、それまでの間に地震が発生して湧水が増えてパイピング現象が生じて緩衝材が流出していくことを懸念している。
- ・本小委員会では現状の処分施設の耐震性評価法がリーズナブルなのか、足りないものはないのか、それをはっきりさせることを目的としている。

4. とりまとめに向けて

委員会のとりまとめに向けて、報告書案と2章および3章の原稿案（松長委員・熊坂委員作成）をもとに意見交換を行った。

- ▶ 各テーマの担当者は、2～3ページ程度で報告書の1次原稿を word で作成して岸田幹事長に提出する。来年5月末を1次原稿の締め切りとする。
- ▶ 提出された報告書を編集し、委員全員でチェックして最終版に仕上げる。
- ▶ 議事録等を整理した報告書案のファイルを執筆担当者にメールで送付する。

5. その他

- ▶ 次回の第8回委員会は2013年4月15日（月）14:00-17:00とする。場所は、確定後に連絡をする。

以 上

土木学会 岩盤力学委員会「大深度地下構造物の耐震性評価に関する小委員会」

第8回小委員会 議事録

日 時：2013年4月15日 14:00～17:20

場 所：土木学会 EF会議室

出席者：朝倉俊弘、亀村勝美、岸田潔、長田昌彦、窪田茂、熊坂博夫、佐藤稔紀、澤田昌孝、鈴木康正、関口高志、玉田潤一郎、保田尚俊、渡辺和明、小川智広、江崎太一（代理）、櫻井友彰（代理）、多田浩幸、浅井隆一

資料：資料H25-8-1 第7回議事録（案）
資料H25-2-2 澤田委員今回発表概要
資料H25-8-3 澤田委員発表資料
資料H25-8-4 岸田幹事長発表資料
資料H25-8-5 平成25年度活動計画

1. 委員長挨拶

朝倉委員長から、第8回小委員会の開催挨拶がなされた。

2. 第7回小委員会議事録（案）の確認

第7回議事録（案）の確認が行われ、出席委員の了承を得た（資料H25-8-1）。

3. 話題提供

①地層処分場の地震リスクに関する検討事例の紹介（（財）電力中央研究所：澤田委員）

澤田委員より、地層処分場の地震リスクの一つである断層変位に対して、SKB（スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社）で検討された事例の紹介がなされた。また、以下のような議論が行なわれた。

- SKB が実施している解析の前提は割り切りが大きい（例えば、地表に 3km 以上断層変位が認められるものしか震源断層にならない、フラクチャーを一方向しか考えない、Mw7.5 までを考える、規模の小さな破碎帯は動かない等）。日本の地層処分場に適用するためには、より説明性の高い解析条件を設定する必要がある。
- 現在、断層変位による地盤の変形を評価する手法としては、食い違い弾性理論などを用いて、静的に強制変位を与え、均質な半無限弾性地盤の傾斜を広域的に算出するというもの。3DEC を用いて、断層が破壊してどのような断層変位となるのかを算出するのは非常に難しい（断層が壊れる強度と初期応力の関係を見つけるのは難しい）。
- スウェーデンでは氷河期と間氷期の間で、断層の活動があると考えているため、1 回の変形のみを考えているが、評価期間を 100 万年とすれば、10 回程の繰り返しを受ける可能性もあるので、本

来そうした変位の累積も考えていなくてはいけないと思われる。

- ・スウェーデンの地層処分は、縦置きで考えられてきていたが、横置きも考え始められている（日本でもまだサイトが選定されていないため、縦置きと横置きの両方を考えている）。
- ・縦置きはベントナイトの充填がしやすいというメリットがあるが、施工中に湧水が入ってくるという課題がある。一方、横置きはコスト的にメリットがあるが、坑道とスーパーコンテナのクリアランスに、どのようにベントナイトを充填するかという課題がある。
- ・キャニスターの損傷リスクとして腐食も考える必要があるが、ナチュラルアナログ的に金属として長期間保存されている金属である銅を用いることで、100 万年の閉じ込め機能を期待している。
- ・スウェーデンは、最初 1000 年間は科学的な知見で詳細な評価をする、10 万年くらいまでは、その延長上であるという考え方、そこから先はアバウトになるけれども 100 万年までは最大考えなさいとされている。100 年以上は考えても意味がないとされている。
- ・それに対して、低中レベルの評価期間は 1 万年としているため氷河期を考えていない。また、確率は低いとしながらも、初期に人工バリアが壊れるというシナリオを考えている。こうしたシナリオを想定することで、地震に限らず、バリアが崩壊する全てのシナリオをすべて包含しているとの考え方がある。

②岩盤不連続面の構造の変化と強度回復現象（京都大学：岸田幹事長）

岸田幹事長より、岩盤の不連続面に力や熱が加わった時の強度や透水性の変化に関する実験的研究についての話題提供がなされた。また、以下のような議論が行なわれた。

- ・圧力をかけることで接触部に応力が生じ、変形や削れなどで透過率は変わる（10Mpa 程度では弾性的な挙動も示す）。また、温度をかけることで接触部の溶解や沈濁が生じて透過率が大きく減少する（非接触部のからも溶解・再沈殿が生じること考えられるが、接触部に対して多いか少ないかは確認できていない）。
- ・接触部に圧力溶解現象が生じている様子については、今後、CT を用いて確認する予定であるが、加温した実験では供試体をはがすときに取れにくいという感覚からも圧力溶解現象は生じていると考えている。
- ・高温状態における母岩の物性としては、強度はそれほど変わらないが、弾性係数やポアソン比などは変わる。
- ・実際のトンネル挙動を評価するには、原位置試験等により、どのように実証していくかという課題もあるが、こうしたヒーリング挙動や熱による挙動を解析モデルに取り込むことで、これまで考えていなかった、ひずみ軟化領域の強度回復を見込めるといった議論はしていけると考えている。

4. とりまとめに向けて（資料H25-8-5）

平成25年度の活動計画と、とりまとめの方針について意見交換を行った。

- ▶ 報告書のとりまとめは、PDFにてWeb公開するという方向で考える。
- ▶ 岩盤力学に関するシンポジウムについては、委員会報告会という形で調整する。

5. その他

- ▶ 次回の第9回委員会は、8月9日（金）14:00-17:00 土木学会 A 会議室にて実施する。話題提供者は、原環センターの寺田様と NUMO（発表者調整）にお願いする。
- ▶ 9月25、26日で、幌延深地層研究センターの見学が行えるか調整する（佐藤委員に、現地との調整を依頼）。

以上

土木学会 岩盤力学委員会「大深度地下構造物の耐震性評価に関する小委員会」

第9回小委員会 議事録

日 時：2013年8月9日 14:00～17:20

場 所：土木学会 A会議室

出席者：朝倉俊弘、亀村勝美、岸田潔、長田昌彦、窪田茂、熊坂博夫、佐藤稔紀、澤田昌孝、末広俊夫、鈴木康正、関口高志、富田敦紀、田村仁（代理）、南将行、保田尚俊、渡辺和明、小川智広、山本陽一、秋山吉弘、山田淳夫、多田浩幸

資 料：資料H25-9-1 第8回議事録（案）
資料H25-9-2 報告書
資料H25-9-3 報告書添付資料（回覧）
資料H25-9-4 報告書添付資料（回覧）
資料H25-9-5 岩盤力学シンポジウム案内
資料H25-9-6 秋山氏、山田氏発表資料

1. 委員長挨拶

朝倉委員長から、第9回小委員会の開催挨拶がなされた。

2. 第8回小委員会議事録（案）の確認

第8回議事録（案）の確認が行われた。話題提供①の記述に関して、一箇所、修正意見が挙げられ、これを修正することとして、出席委員の了承を得た（資料H25-9-1）。

3. 新委員紹介

櫻井委員の後任として南氏が参加される旨の紹介があった。また、玉田委員の後任としてオブザーバーの末広氏が委員となり、新たに山本氏がオブザーバーとして参加される旨の紹介があった。

4. 話題提供

①地下深部の地震動と関連課題の検討（原子力発電環境整備機構：末広委員）

末広委員より、地下深部の地震動と関連課題の検討についての話題提供がなされた。また、以下のような議論が行なわれた。

- ・地震動の作成において、地表だけの波形を用いても地中の地震動を再現することは難しい。今回、KiK-net のデータを用いて地中でも補正することで再現性が良くなる感触を得られた。
- ・引戻し解析では V_s と減衰定数をパラメータとしている。KiK-net で V_s の情報は得られるが、減衰定数は仮定をしている。今回は、KiK-net の結果を再現するために試行錯誤的に行った、現実にはこのような情報もきちんと取得しないとイケない。

- ・静的水平震度の検討については、日本全国この方法で割り出そうということではなく、地点が決まれば、その地点で集中的に地震観測して、その結果をきちんと整理することで、信頼性が上がると考えている。

②地下空洞型処分施設における地震時影響の解析的検討（原子力環境整備促進・資金管理センター：秋山氏、山田氏）

秋山氏、山田氏より、地下空洞型処分施設における地震時影響の解析的検討についてのお話提供がなされた。また、以下のような議論が行なわれた。

- ・地震応答解析において、地盤は修正 R-O モデルを用いているのに対して、同じ土質系の埋め戻し材は修正 R-O モデルではなく弾性モデルを用いている。これは、埋め戻し材に関する物性値がなかったため、今年度は物性値を取得して解析することを検討している。
- ・各フェイズにおける要求性能に関して、コンクリートピットはある程度ひび割れを許容するが、コンクリートピットの外側の低拡散層はひび割れの発生を許容しない。長期性能に影響を与えるので、操業中、低拡散層にはひび割れは入れたくないという要求性能はある。
- ・埋め戻しが終わって長期に保存が始まったときに、土質系の埋め戻し材は地震で揺らされて圧密沈下し空洞ができることが懸念される。また、地震に関わらず、埋め戻し材は経年劣化して水みちになる可能性がある。これに対しては、プラグを設けることによって水みちを遮断し天然バリアとしての機能を保持することが考えられる。
- ・埋め戻し材については、現地発生土を使いたい考えがあるが、締固めが難しい。現状、吹付け工法が一番効果があると考えている。どのような材料を選定するかも含めて、要求性能を確保できる締固め方法を確立する必要がある。

4. とりまとめに向けて（資料H25-9-2～資料H25-9-4）

報告書の作成状況、委員会からの提言について意見交換を行った。

- ▶ 3.3 節の原稿を窪田委員から岸田幹事長に再度送付する。
- ▶ 執筆担当者において資料H25-9-2の各担当部分の図の配置と図番号の対応等について確認する。
- ▶ 第4章まとめにおいて、以下の三項目を本委員会からの提言とする案が提示され、再度議論することとした。

①地震動の設定に関して、地上で取得した地震情報を援用するのではなく、地下深部での観測網を整備して、地震情報を取得し、地震動の設定に反映する必要がある。

②大深度地下構造物に求められる耐震性能の定量的な表現が必要である。

③力学だけでなく水理学的な挙動も含めた総合的な解釈に必要な動的な物性値に関する精緻な研究が必要である。

▶ 次回委員会開催の前に原稿を委員に送付して事前に読んでおいてもらう。

5. 岩盤力学に関するシンポジウムでの報告について（資料H25-9-5）

シンポジウムにおける報告のやり方について意見交換を行った。

▶ 発表 10 分＋質疑 5 分の発表を 3 人で行う。ディスカッションはなしで、全体で 45 分とする。

▶ 1 月 9 日の一日目を第一希望とする。

▶ 12 月までに 3 人の発表者の案を幹事で作成して相談させていただく。

6. その他

▶ 9 月 25、26 日の幌延深地層研究センターの見学会は予定通り開催する。現在 12 名が参加の予定。

▶ 次回の第 10 回委員会は、最終委員会とし、12 月 12 日（木）14:00-17:00 土木学会会議室にて実施する。

以 上

土木学会 岩盤力学委員会「大深度地下構造物の耐震性評価に関する小委員会」

第10回小委員会 議事録

日 時：2013年12月12日 14:00～17:15

場 所：土木学会 A会議室

出席者：朝倉俊弘、亀村勝美、岸田潔、長田昌彦、窪田茂、佐藤稔紀、澤田昌孝、末広俊夫、鈴木康正、関口高志、富田敦紀、平川芳明、松長剛、南将行、保田尚俊、山本陽一、多田浩幸、山本真哉、浅井隆一

資 料：資料 H25-10-1 第9回議事録(案)

資料 H25-10-2 報告書

資料 H25-10-3 岩盤シンポジウムプログラム

資料 H25-10-4 朝倉委員長発表スライド

資料 H25-10-5 ARMS8

資料 H25-10-6 東濃地域における地震時の地下水位および湧水量の変化

1. 委員長挨拶

朝倉委員長から、第10回（最終回）小委員会の開催挨拶がなされた。

2. 第9回小委員会議事録（案）の確認

第9回議事録（案）の確認が行われ、出席委員の了承を得た（資料H25-10-1）。

3. 話題提供

①東濃地域における地震時の地下水位および湧水量の変化（日本原子力研究開発機構：佐藤委員）

佐藤委員より、東濃地域で観測された地震に伴う地下水圧の変化やその後の回復状況についての話題提供がなされた。また、以下のような議論が行なわれた。

- ・瑞浪超深地層研究所付近において、東北地方太平洋沖地震を初めとし、地震における水圧の変化を観測し、最大で+15mの水圧変化が観測された（東北地方太平洋沖地震）。広域的には引っ張り方向の体積ひずみの変化によって、数10cm～1m以上の水圧低下が見られている中で、瑞浪超深地層研究所付近で水圧の上昇が見られたのは、水位観測地点近傍にある断層（粘性土を挟んでいる）等による水理地質構造の不均質性が要因だと思われる。
- ・震度が同程度の地震に対して水圧の変化量が違うのは、地震動の特性の違いによるものだと考えられ、変位が大きい地震動に対して水圧が大きくなる傾向が見られた。その他にも地震動の継続時間なども影響を与えると考えられる。
- ・最も地下水圧が上昇した東北地方太平洋沖地震の場合でも、地震後1.5年から2年程度で地震前の状態（地震前の水圧あるいはトレンド）に回復することが確認された。
- ・このように地震動によって水圧が上昇したとしても、2年程度で元の状態に戻るのであれば、万年オーダーを対象とする地層処分において、影響はわずかであるとも考えられるが、一方で、万年オーダ

一の中で何千回と繰り返される地震動の履歴に対して影響が無いといえるのだろうか。工学的に研究しなければいけないことと、シナリオベースで議論しなければいけないことを分けて考えていかなければならない。

- ・むしろ万年オーダーを考えた時には、隆起浸食などにより地形が変化することにより水流や流速が変化する影響の方が大きいと考えられる。
- ・深い深度に存在する濃度の高い塩化物イオンが、水圧の上昇に伴い、浅い深度においても高い塩化物イオン濃度が観測され、その後水圧の低下に伴い、イオン濃度も低下していると考えられる。しかし、それは水の動きがあるということでもあるため注意が必要である（核種移行、地層の風化等）。今後、瑞浪では再冠水試験等の研究も進める予定である。

4. 報告書について（資料H25-10-2）

最終的な報告書のとりまとめについて以下の議論を行なった。

▶以下の章立ての修正を行なう。

3.1 大深度地下構造物の耐震性評価に対する入力地震動の考え方 ⇒ 3.2 とする。

3.2 地下構造物・空洞の被害分析 ⇒ 3.1 とする。

▶参考文献は丁寧に入れ、図表についても引用先を追記する。

▶各委員にて最終チェックを実施し、意見があれば1週間以内に連絡する。

5. 岩盤力学に関するシンポジウムでの報告について（資料H25-10-4ほか）

シンポジウムにおける、各発表資料について確認及び修正を行なった。今回報告の発表資料の修正及び今回未報告の発表資料の作成を1週間程度で行い、各委員に送付して確認し、加筆・修正等があれば年内に連絡をする。

6. ARMS 8について（資料H25-10-5）

ARMS 8への参加案内を行なった。

7. 委員長挨拶

朝倉委員長から、本委員会の閉会の挨拶がなされた。

以 上

(2) 委員会話題提供資料

話題概要

日時：2011年6月7日（火）

場所：土木学会 A 会議室

発表：朝倉俊弘（京都大学）

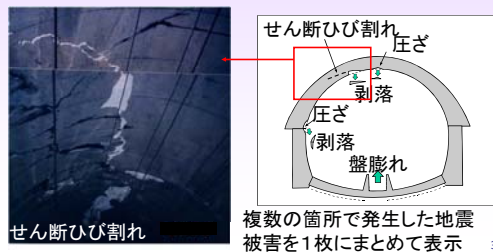
題目：「山岳トンネルの地震被害と地震対策の現状」

概要

地表構造物と比較してトンネルは耐震性に富む構造物である。ただし、条件によってはトンネルも地震により大きな被害を被ることがある。過去のいくつかの地震（1923年関東地震、1930年北伊豆地震、1978年伊豆大島近海地震、1995年兵庫県南部地震、2004年新潟県中越地震、2007年新潟県中越沖地震）による代表的な被災事例を紹介し、共通する被害パターンとして、1)坑口等の浅い土被りでの被害、2)深い土被りでの地質不良個所の被害、3)断層のずれ、4)斜面不安定化によるもらい災害に大別されることを示した。次にそれぞれの被害形態を説明できる想定メカニズムを解析、実験により示した。また、これらの事例に対応して進められてきた鉄道分野における地震対策の歴史的変遷についても述べた。

被害事例・山陽新幹線六甲トンネル

- ・アーチ部のせん断ひび割れ、圧ざ
- ・側壁迫り部のひび割れ、剥落
- ・盤膨れ

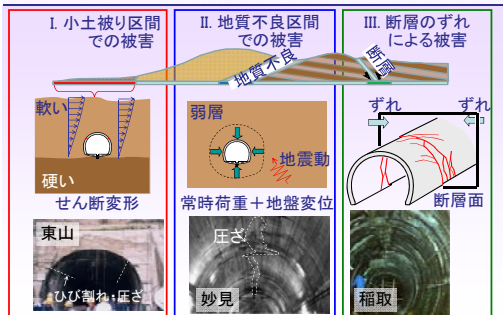


被害事例・上越新幹線魚沼トンネル

(2004年新潟県中越地震)



地震被害の形態



地震被害のメカニズム

被害	①小土被り区間	②地質不良区間	③断層のずれ
特徴的な被害	肩部 開口ひび割れ	天端 圧ざ・せん断 側壁 せん断、剥落	輪切りひび割れ 打継目 剥落
推定被害メカニズム	低土被り部における動的挙動	せん断変形・塑性圧覆工の構造欠陥	断層のずれに伴う相対変位
再現方法	応答変位法	ひび割れ進展FEM	覆工模型実験

話題概要

日時：2011年9月16日（金）

場所：土木学会 A 会議室

発表：松井裕哉（日本原子力研究開発機構）

題目：「地層処分における地震による地下環境への影響に関する研究の現状」

概要

日本原子力研究開発機構（Japan Atomic Energy Agency: JAEA）は、平成17年度に旧日本原子力研究所と旧核燃料サイクル開発機構の統合により発足した独立行政法人であり、日本における原子力発電に関連する技術開発や原子力を利用した基礎研究を実施する機関である。現在、原子力発電により最終的に生じる高レベル放射性廃棄物の処分方法としては、廃棄物を地下深部に埋設し超長期にわたり生物圏から隔離する方法（地層処分）が国際的に認知されており、JAEAも日本国内でそれを実現するため必要な技術開発や情報の蓄積をはかっている所である。

地震は、大規模な地殻変動帯に位置する日本において特に頻繁に見られる天然現象であり、地層処分の観点からの研究は国際的にも例がない。このため、JAEAは、岩手県釜石鉱山や現在岐阜県瑞浪市の瑞浪超深地層研究所で実施した地表～地下深部に至る領域での地震観測等を実施し、中～硬岩系岩盤では地下での地震動は地表部の数分の1に低減される等の知見を得てきている（図参照）。今後も各種のモニタリングを継続し、特に大規模地震時における地下構造物への影響や周辺の地質環境の変化に関する情報を収集する予定である。

Data No.	発生日時	震源	瑞浪市の震度	最大加速度 (gal) [計測成分]		
				地表部	GL-100m	GL-300m
1	2008年11月24日 06:15	岐阜県美濃東部 深さ11km M:3.9	1	12.0 [E-W]	7.1 [E-W]	---
2	2009年5月25日 20:26	静岡県西部 深さ26km M:4.7	2	5.6 [E-W]	3.1 [E-W]	1.8 [N-S]
3	2009年7月14日 03:57	岐阜県美濃東部 深さ50km M:3.4	2	6.5 [E-W]	3.1 [E-W]	2.0 [E-W]
4	2009年7月27日 09:44	愛知県西部 深さ40km M:4.0	2	8.2 [N-S]	3.0 [N-S]	1.9 [E-W]
5	2009年8月11日 05:07	駿河湾 深さ23km M:6.5	3	30.8 [E-W]	14.7 [N-S]	6.7 [E-W]
6	2011年3月11日 14:46	三陸沖 深さ24km M:9.0	3	10.4 [N-S]	7.7 [N-S]	5.7 [U-D]

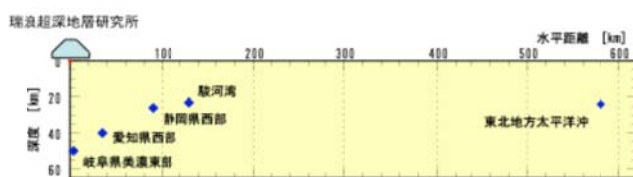
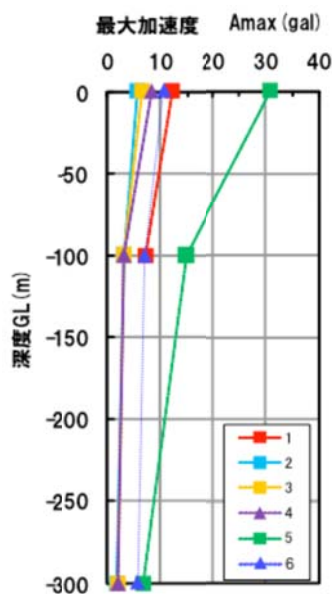


図 瑞浪超深地層研究所における地震観測結果の例

話題概要

日時：2011年9月16日（金）

場所：弘済会館 1階 葵会議室

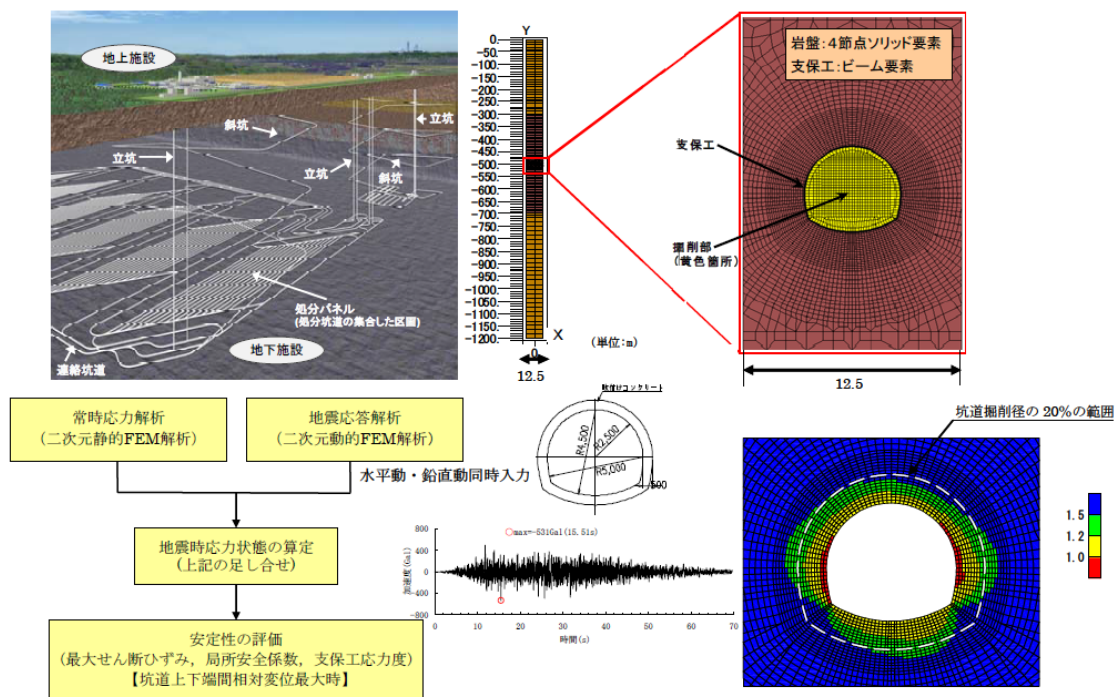
発表：玉田潤一郎（原子力発電環境整備機構）

題目：「地層処分施設の耐震性に関する概略検討」

概要

地層処分のための地下施設は、耐震設計の観点からこれまでの原子力関連施設に比べて、地下深部に建設する構造物であること、大規模な連接坑道を有する広い面積の構造物であること、閉鎖後長期の安全性を確保する必要があることなどの特殊性を有している。ここで、地層処分の安全確保を考えるべき期間は、作業中および閉鎖後という大きく二つの期間に分けられ、放射線の防護を考えなければならないのは、一般公衆と作業従事者に対する作業中の期間および一般公衆に対する閉鎖後の期間となる。すなわち、地層処分の耐震性を評価する上では、作業期間中の地震による公衆被ばくや作業安全を坑道の空間保持性能の観点から評価するのに加えて、閉鎖後長期の公衆被ばくを核種移行抑制機能に及ぼす影響の観点から評価することが重要である。

本稿では、上記のうち作業期間中の坑道の空間保持性能について、「わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—」（1999, 核燃料サイクル開発機構（現 日本原子力研究開発機構））に掲載されている坑道諸元や地盤モデル等の検討条件を用いて、現行のトンネルおよび原子力施設の耐震設計手法を勘案することにより、概略的に検討を行った結果について報告する。



研究紹介 概要

日時：2011年12月2日（金）

場所：土木学会 A 会議室

発表：出口朗（日本原燃株式会社）

題目：「余裕深度処分施設の耐震性に関する検討状況」

概要

現在、日本原燃が調査・検討を進めている余裕深度処分施設は、低レベル放射性廃棄物のうち比較的高いレベルの廃棄物を対象とした施設である。余裕深度処分施設は、地下100m程度の軽石凝灰岩を主体とする堆積軟岩中に、幅18m、高さ18m程度の空洞を建設し、そこに人工バリアと共に廃棄体を処分する計画である（図-1）。国が定めた「第二種埋設施設の事業に関する安全審査の基本的考え方」では、地下施設に対し、埋め戻しまでの作業期間内については公衆や作業員への有意な影響を回避するため、原子力施設に対する耐震設計を準用した設計が求められている。一方、埋め戻し以降については、処分施設特有の長期にわたり生活環境に有意な影響を及ぼさないことを確認するため、人工バリア等の状態変化を地震動の影響も加味して評価することが求められている。

本稿では後者の地震動による人工バリアへの影響評価に焦点を当てた検討について紹介する。廃棄体やRCコンクリート部材の鉄筋等の鋼材腐食膨張や、廃棄体から発生するガスの圧力、セメント系材料のカルシウムの溶脱等といった人工バリアの経年変化に加え、施設に地震が作用した場合を想定して、地震発生前後の静的状態把握解析と地震応答解析を組み合わせた解析を実施して、地震が施設の状態に及ぼす影響を定量的に評価している（図-2）。地震によりひび割れは増えるものの、その増分は僅かであり、地震が長期的なセメント系材料のひび割れの発生状態と、低拡散層のひび割れ幅に及ぼす影響は少ないものと評価している。

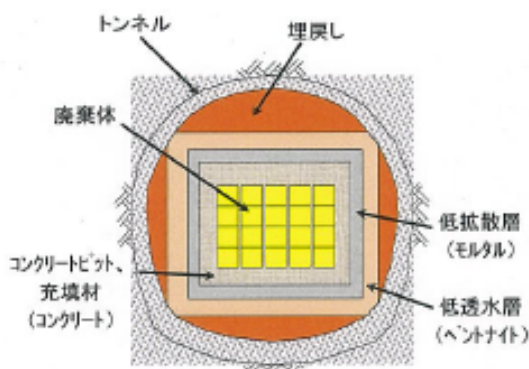


図-1 処分空洞の概要

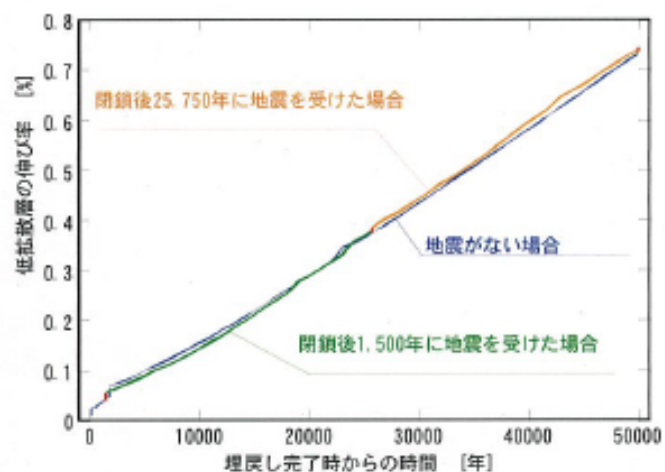


図-2 長期地震影響評価結果

話題概要

日時：2011年12月2日（金）14：00～17：20

場所：土木学会 A 会議室

発表：熊坂博夫（清水建設）

題目：「処分施設建設時における常時の安定性の確保について」

概要

トンネルの常時の状態は、地震発生時の初期状態であり、耐震解析・設計の初期条件となる。そのため、トンネル構造体や周辺岩盤の状態の把握と安定性評価は重要となる。特に、地層処分では大深度での建設になるため、地表および浅地下構造物に比べて安定性の余裕度は小さくなっていることが考えられる。また、地層処分における常時とは、建設、操業、埋め戻し・閉鎖の期間を対象としている。この中の建設と操業から閉鎖までが山岳トンネルにおける建設と維持管理の各段階に相当するため、クリープや劣化等の経時的な影響も考慮する必要がある。

山岳トンネルでは、従来より、トンネル掘削に伴って周辺地山に自立しない領域“ゆるみ領域”が発生・広がることでこの不安定な状態・現象が生じ、これを支持・抑制する支保に“ゆるみ荷重・地圧”が作用すると捉えている。現在の山岳トンネルの安定設計法（常時の安定性の確保・維持）は、トンネル掘削に伴う力学的な観点からの安定性の把握がなされるようになってきたが、“ゆるみ荷重・地圧”を理論的に十分説明するところまでには至っていない。また、トンネルの安定設計は、その特殊性から一般的な土木構造物の設計とは異なっている。すなわち、計画・設計時の情報の不足によるトンネルに求められる機能・性能の過不足を計測を活用した情報化施工で補っているのが現状であり、その品質は制御されているとは必ずしもいえない。同様に、地層処分における既検討では建設時の安定設計時の岩盤の安定性の基準も様々な定義が用いられており、常時の安定性の状態も様々な状態を取り得ることが考えられる。

本話題提供では、このような考えを説明するとともに、山岳トンネルにおける不安定な現象（不具合）の具体的な事例として、硬岩系岩盤に生じるブロックの崩落、山はねと軟岩系岩盤で生じる地山の押出し、切羽の崩落・押出し、地表面陥没事故および支保（吹付けコンクリート、鋼製支保工、ロックボルト、インバート等）の変状や破壊などを示した。

これらの事例から、「建設時と地震時の不安定・不具合の事象は同じか？」という一つ目の疑問を提起した。もし同じと考えられると、地震時の耐震性の安定性評価は常時（静的な）安定性評価の考え方が準用できる。

次に、岩盤の静的弾性数と動的弾性係数が異なり、岩種によっては動的弾性係数が静的な弾性係数の10倍程度となることを示し、その結果として「坑道周辺の岩盤の常時の静的な応力と地震時の動的な応力を加算して安定性評価に用いることに無理はないか？」との第二の疑問を説明した。これに関連して、「地震に伴って地震後に生じた残留ひずみによる岩盤中の応力変化をどう表現するか？」との疑問を示した。

本委員会の活動を通じて、ここで示した疑問・課題への回答、解決策あるいは考え方が得られることを期待したい。

話題概要

日時：平成24年3月6日（火）

場所：土木学会

発表：佐藤清隆（電力中央研究所）

題目：「原子力発電所の耐震安全性検討に用いる地震動について」

概要：

平成18年9月に原子力耐震設計審査指針の改訂（以後、新耐震指針と呼ぶ）が行われ、これ以後、既設原子力サイトの審査対象施設は新耐震指針に照らして耐震安全性評価（バックチェック）を実施してきた。しかし、東日本大震災以後の原発事故を踏まえ、地震および津波のストレステストによる原子力施設の一次・二次評価により安全確保対策を確認している。4月に原子力規制庁が新しく設置され新耐震指針の改訂も予定されている。

本発表では、現時点での新耐震指針での地震動の取り扱いや放射性廃棄物貯蔵施設で取り組まれたバックチェックの内容を紹介し、大深度地下構造物における同様な施設を想定した場合の今後の課題について議論する予定である。

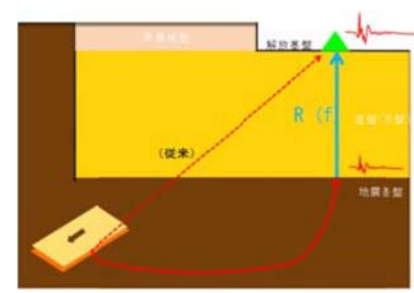
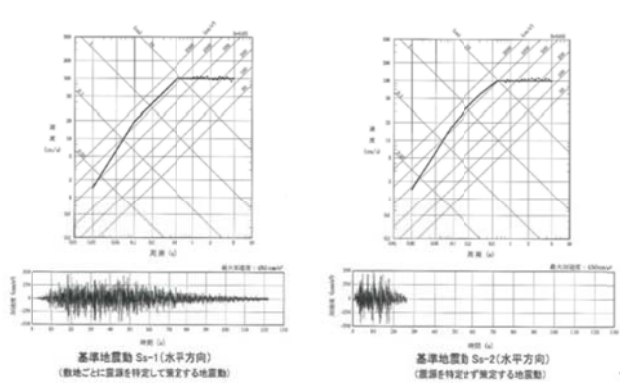
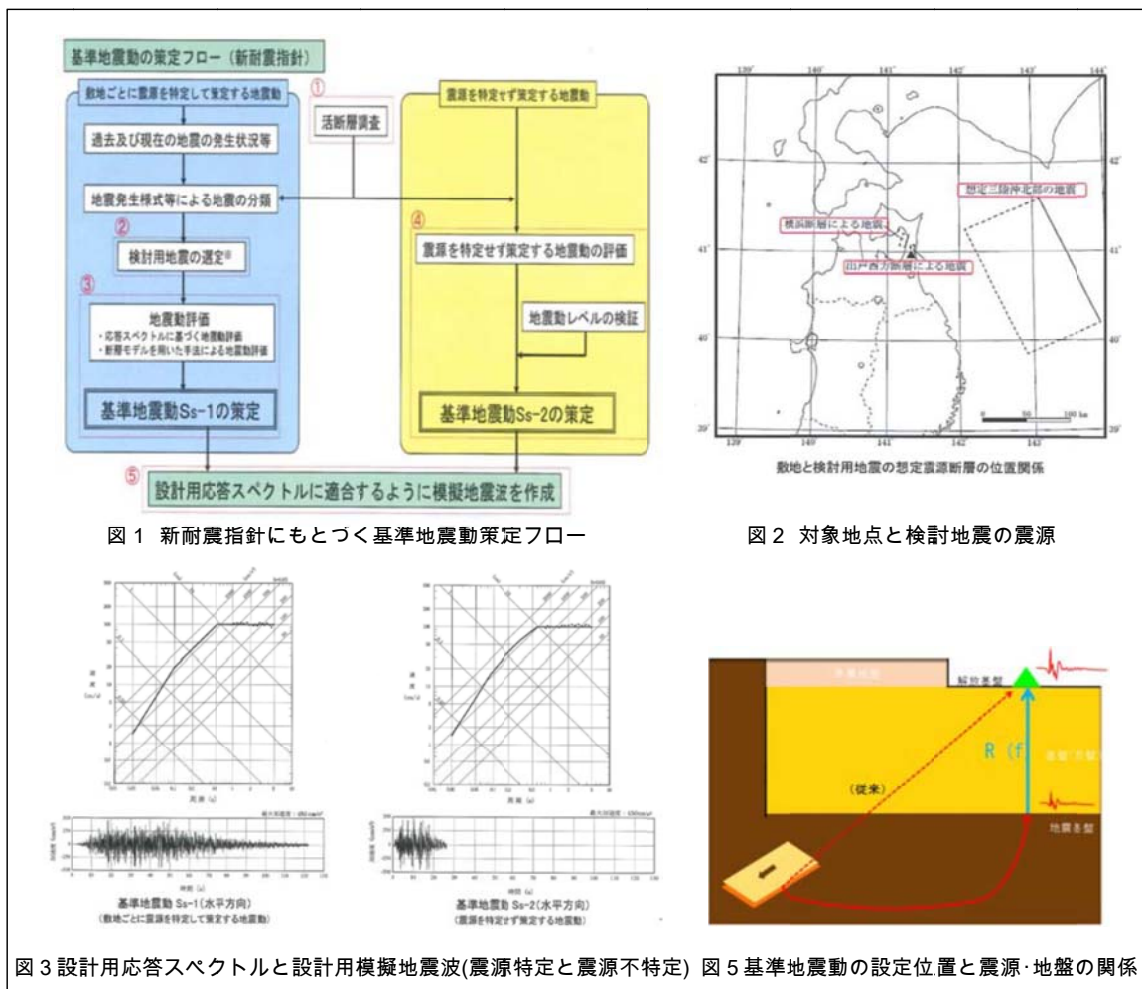


図3 設計用応答スペクトルと設計用模擬地震波(震源特定と震源不特定) 図5 基準地震動の設定位置と震源・地盤の関係

話題概要

日時：2012年6月18日（月）

場所：土木学会 A 会議室

発表：高原秀夫（鹿島建設株式会社）

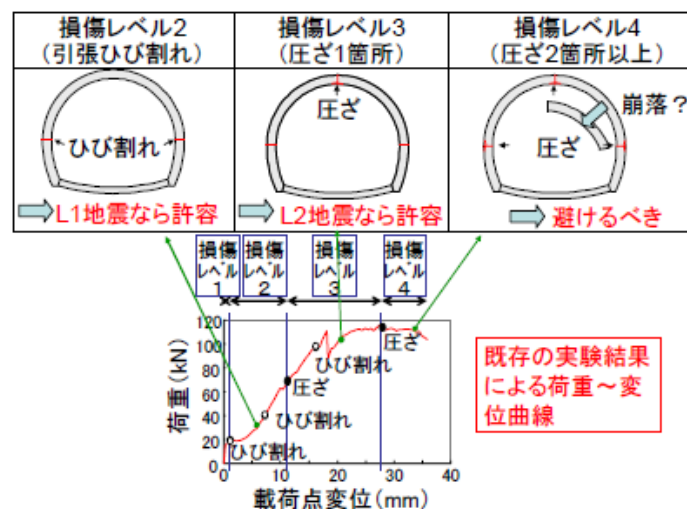
題目：「原子力発電所における耐震設計の現状」

概要：

原子力発電所の地下構造物には、取水槽・海水ポンプ室等の土砂部の構造物、取水トンネル等の岩盤部の構造物があり、それぞれ耐震性検討結果を国に報告し審査を受けることになっている。本報告では、土砂部と岩盤部の地中構造物の設計方法の現状を紹介するとともに、今後設計される大深度処分施設で考えられる課題を示す。

土砂部の地中構造物（ボックスカルバート等）と岩盤部の地中構造物（トンネル等）ともに、構造物の要求機能を機器・配管の間接支持機能とし、これに対し、実験等を基にした評価基準が設定されている。しかし、評価方法は、土砂部の場合、非線形動的解析手法が整備され、構造物に作用する荷重が合理的に評価されているのに対し、岩盤部では等価線形解析による解析が基本とされ、周辺岩盤の引張破壊、せん断破壊の影響が懸念される場合は、着目時間に対し静的非線形解析による応力再配分解析を実施し、覆工コンクリートの断面照査が行われており、構造物に作用する荷重が土砂部と比べ保守的に評価されている。これは、岩盤に適用すべき構成則が明確でないためであり、今後、初期応力から地震時まで一貫した非線形解析による評価方法の確立が望まれる。

大深度処分施設では、構造物の要求機能、重要度が、必ずしも統一した認識ができていない。今後の課題として、要求機能を明確化し、例えば下図に示すような評価基準を定め、合理的な解析手法による定量的な性能評価手法を構築することが、一般への説明性の上でも重要であると考えられる。



山岳トンネルの地震被害メカニズムと耐震性向上に関するシンポジウム配布資料（2009,京大，鉄道総研他）より

話題概要

日時：2012年6月18日（月）

場所：土木学会 A 会議室

発表：松長 剛（パシフィックコンサルタンツ株）

題目：「処分施設建設時における維持管理について」

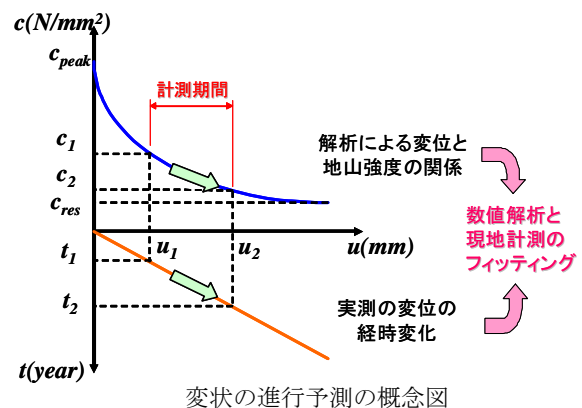
概要：

1. はじめに

鉄道・道路・水路等のサービストンネルにおいては、①経年・材料劣化、②漏水・凍結、③変形・ひび割れ 等の変状に対して適切な対応が図られている。一般に上記サービストンネルの供用期間は概念的に 100 年程度と考えられており、処分施設の建設・操業期間と同程度となっている。したがって、これまで鉄道・道路・水路等で蓄積された維持管理技術は、今後の処分施設の建設・操業時における維持管理に向けて有用なものと考えられる。本研究は、トンネル変状のうち、事例数は少ないものの、内空断面の確保や構造の安定性に直結する ③変形・ひび割れ を対象としたものであり、地山強度の経年劣化が変状に及ぼす影響を評価したものである。

2. 研究概要

本研究は、堆積軟岩（主にグリーンタフ地域）に建設された変状トンネルを対象とし、供用後の断面変形やひび割れ発生等の評価に「現地計測」と「数値解析」を適用し、変状の将来予測を行うものである。現地計測では、数年オーダーの内空変位やひび割れの発生箇所・発生過程を評価対象とする。一方、数値解析では、周辺地山の経年的な強度劣化をモデル化し、劣化⇒応力再配分の繰り返しによって、変状の進展を再現する。この数値解析によって、現地計測の結果をできるかぎり忠実に再現し、計測期間を外推することで変状の将来進行を予測する（図参照）。



研究の詳細については、下記論文を参照されたい。

- 1)松長,熊坂,小島,朝倉: 地山強度の経時劣化を考慮したトンネル変状の予測と対策に関する研究, 土木学会論文集 No.799/III-72, pp.75-88, 2005.9.
 - 2)野城,嶋本,小島,高橋,松長,朝倉: 地山劣化モデルによるトンネル変状の再現解析とその長期予測への適用, 土木学会論文集 C Vol.65 No.1, pp.107-119, 2009.2.
 - 3)松長,野城,朝倉: 地山劣化モデルによるトンネル変状の進展予測に関する研究, 土木学会論文集 C Vol.65 No.2, pp.467-479, 2009.9.
- ### 3. 処分施設の建設・操業時における維持管理に向けて

既往の知見から、トンネルの変状は供用後 30～40 年で発生している事例が多いことが分かっている。したがって、トンネルの健全性を確保するためには、建設時の地山の緩みだけでなく、供用後の経年的な地山の劣化やトンネル変状の進行性を考慮した適切な維持管理が望まれる。なお、変状の予防保全には『確実かつ堅実な建設』が最も効果的であることは周知の事実であるが、ここで再度その重要性を言及しておく。

話題概要

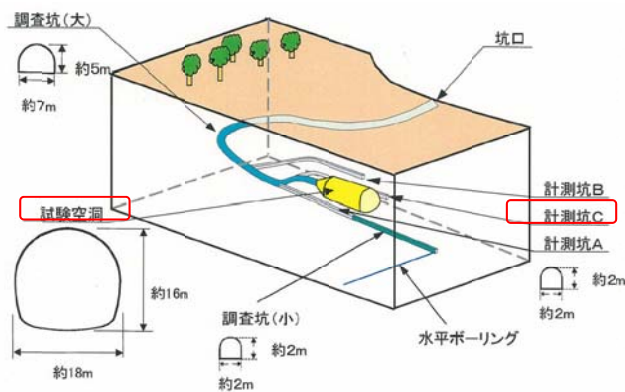
日時：2012年9月24日（月）

場所：日本原燃(株)濃縮・埋設事務所 A会議室

発表：関口高志（戸田建設）

題目：「次期埋設施設の調査坑（日本原燃：六ヶ所村）での地震動及び常時微動の測定について」

概要：「地下深部の構造物は地震に対して安全」ということを、測定データを用いて説明することを目的として、日本原燃(株)と戸田建設(株)で共同研究（H23年5月～）を行っている。今回、H23年度の研究成果の一部を整理して報告した。報告した項目ごとの説明内容と知見を以下に示す。



1. 本研究で用いたデータ

①測定概要

- ・次期埋設施設の調査坑（日本原燃：六ヶ所村）のうち、計測坑C、試験空洞、性能確証試験施設*1で地震動、常時微動を測定（図-1参照）。
- ・KiK-net*2のデータを活用。

②分析に用いた常時微動と地震動

- ・計測坑CとKiK-net六ヶ所では、H23.6～H24.1の地震動27件、微小地震2件。
- ・計測坑Cと試験空洞、性能確証試験施設では、H23.6に常時微動。
- ・地表と地下100m付近に測点のあるKiK-netの10箇所（沿岸・内陸で各5箇所、結晶質岩・堆積岩で各5箇所）では、海洋プレート型と内陸型のM6以上の地震動を3件ずつ。

*1 性能確証試験施設：経済産業省からの委託研究として、(公財)原子力環境整備促進・資金管理センターが実施している「管理型処分技術調査等事業（地下空洞型処分施設性能確証試験）」の施設で、今回、一時的に借りてデータ採取

*2 KiK-net：防災科学技術研究所が公開しているデータ

2. 地下深部における地震動の特性の解明

①鉛直方向の増幅特性

- ・今回整理したデータでは、鉛直方向の増幅率は、岩種別の指数近似式で相関がよい。
- ・今回抽出した結晶質岩のサイトではVsの深度方向の変化が大であり、増幅率も大。
- ・鉛直方向の増幅率は、地震の規模（マグニチュード）が大の場合、比較的小。

②水平方向の伝播特性

- ・地下深部の2点間の水平方向の伝達関数があれば、片側の実測値から推測が可能。

③常時微動と地震動の振動特性

- ・岩盤とピットの伝達関数は、常時微動と地震動で傾向が似ている。
- ・H/Vスペクトル比のピークの出現位置は測定場所ごとにほぼ一定。

3. 放射性廃棄物処分場での耐震性の検討の考え方

①試験空洞とピット間の伝達関数

- ・岩盤と構造物間の伝達関数からピークの周波数が16Hz程度で比較的剛な構造。

②耐震性の検討ツールの例示

- ・FEM動的解析の試行、モニタリングの考え方を例示。

話題概要

日時：2012年12月13日（木）

場所：京都大学東京オフィス 会議室3

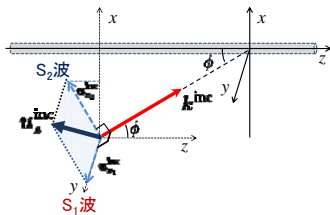
発表：保田尚俊（京都大学）

題目：「3次元弾性波動論に基づいた山岳トンネルの地震被害メカニズムに関する基礎的研究」

概要：

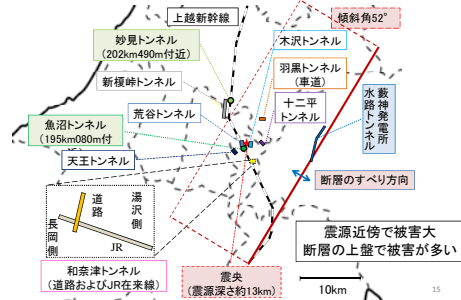
トンネルは耐震性に富む構造物とされているが、条件によっては地震による被害を受けることがある。山岳トンネルの耐震検討は横断方向についてのものがほとんどであり、3次元的な地震応答に関する理解は十分とは言えない。そこで、調和振動の平面波がトンネル軸に対して斜めに入射した場合の円形トンネルの変形挙動を3次元弾性波動論に基づいて解析し考察を行った。さらに、弾性波動論から得られた結果をもとに、山岳トンネルの地震被害事例についての考察を行った。

問題設定

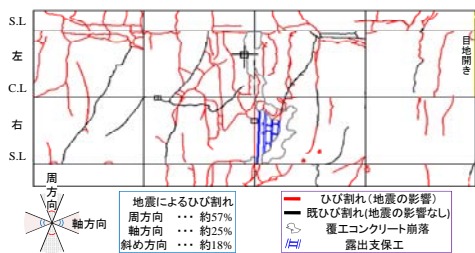


- 入射S波（調和振動の平面S波）を2つに分解
 ①トンネル横断面と平行な面内に変位成分をもつS波（ S_1 波）
 ②トンネル軸を含む面内に変位成分をもつS波（ S_2 波）
 （横断方向の耐震検討の条件= S_1 波が90度で入射）

2004年新潟県中越地震で
大きな被害が見られた山岳トンネル

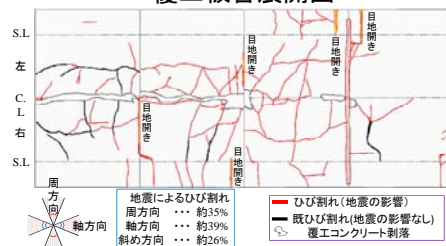


魚沼トンネル(195km080m付近)の
覆工被害展開図



周方向のひび割れが卓越（軸応力が卓越）
このひび割れはトンネル軸を含む面内に変位成分をもつS波（ S_2 波）が深い角度で入射したためと考えられる。

妙見トンネル(202km490m付近)の
覆工被害展開図



周方向ひび割れやトンネル打継目での目地開きはトンネル軸を含む面内に変位成分をもつS波（ S_2 波）が入射したため生じたと考えられる。

話題概要

日時：2012年12月13日（木）

場所：京都大学東京オフィス 会議室3

発表：下茂道人（大成建設株式会社技術センター）

題目：「不連続性岩盤を対象としたサイトスケール～広域スケール地下水流動解析の事例」

概要：

岩盤内に存在する大小の不連続面は、力学のおよび水理的挙動に様々な影響を及ぼすことが知られている。花崗岩のように岩石のスケールでは工学的に見て実質的に不透水とみなせる場合でも、岩盤のスケールで見ると不連続面がみずみちとして機能し、主要な地下水流動経路となっていると想定される。既存の透水試験結果では、ボーリング透水試験結果は同一のサイトでも数オーダーにわたって分布することも珍しくない。すなわち、不連続性岩盤は、水理学的に非常に不均質な材料特性を有する材料である。このため、トンネルや地下空洞の掘削時には、突発湧水や局所的な高水圧に伴う施工上のトラブルが発生する可能性がある。また、地下構造物の維持管理における排水計画や長期的な空洞安定性の検討を行う上でも、空洞周辺の地下水挙動の把握が重要である。広域的にみると、断層や破碎帯などの、より大きなスケールの不連続面が広域地下水流動に影響を与えている。以上のことから、構造物～広域のスケールにおける不連続性岩盤内の地下水挙動を定量的に把握する技術の確立が求められている。

本講演では、このような様々なスケールの不連続面を統一的に考慮できる岩盤のモデル化手法およびそれを用いたサイトスケール（1km～2 km四方程度）～広域スケール（10 km～20km 四方程度）の地下水流動解析事例を紹介する。あわせて、今後の地下水流動解析技術の向上に向けたいくつかの課題について述べる。

話題概要

日時：2013年4月15日（月）

場所：土木学会 EF 会議室

発表：澤田昌孝（電力中央研究所）

題目：「地下処分場の地震リスクに関する検討事例の紹介（スウェーデン SKB）」

概要：

スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（SKB）はスウェーデンの使用済み核燃料地層処分の実施主体である。スウェーデンは地震国とはいえないが、特に氷河期終わりから間氷期にかけて北部で大きな地震があったことが分かっており、処分場の地震リスクについて検討を行っている。地層処分における最大の地震リスクとして近傍で地震が発生したことにより、処分孔と交差する破砕帯にせん断変位が発生し、キャニスタ（使用済み燃料を封入する金属容器）が破損し、核種が漏洩することが想定されている。

まず、キャニスタが損傷に至る破砕帯の変位量を FEM 解析による検討から設定している。さらに、ブロック体個別要素法 3DEC による 3 次元断層変位解析により、処分場に分布する破砕帯の地震時の破壊を判定し、変位量を算出している。震源断層との距離による破砕帯の変位量分布等から、処分孔の配置に関する基準について検討している。

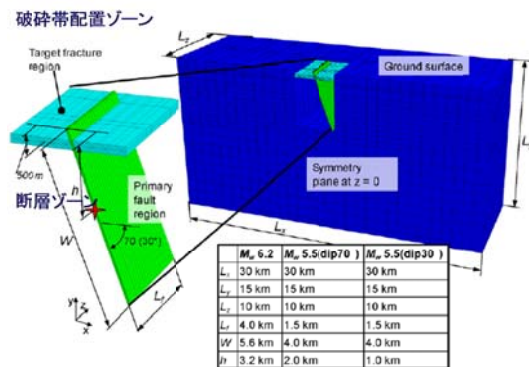


図-1 断層変位解析のモデル

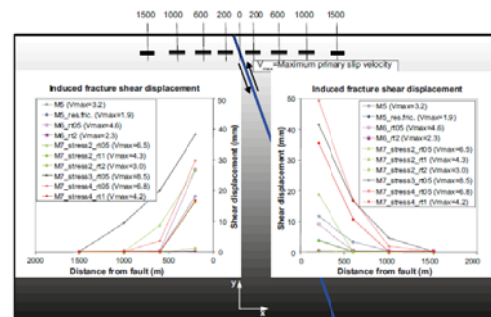


図-2 破砕帯での断層からの距離と変位の関係

参考文献

Fälth, B. and Hökmark, H.: Effects of large earthquakes on a KBS-3 repository, SKB Technical Report, TR-08-11, 2010.

話題概要

日時：2013年4月15日（月）

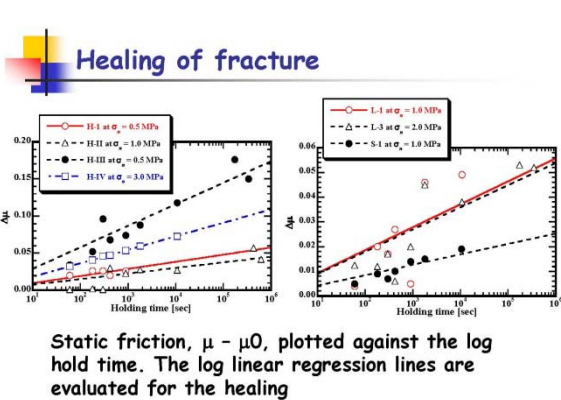
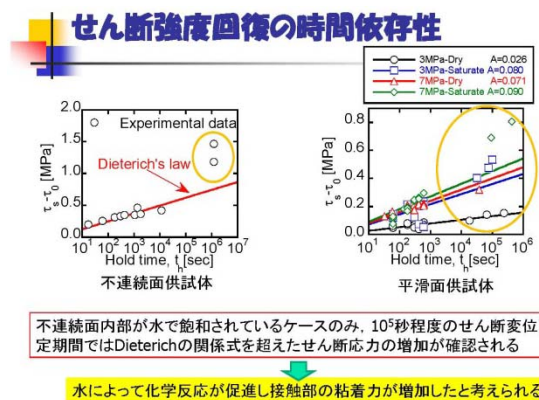
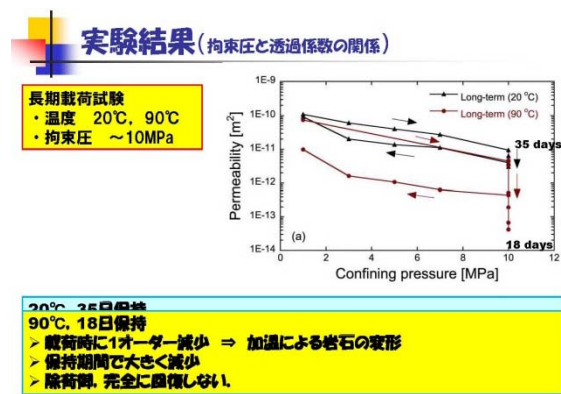
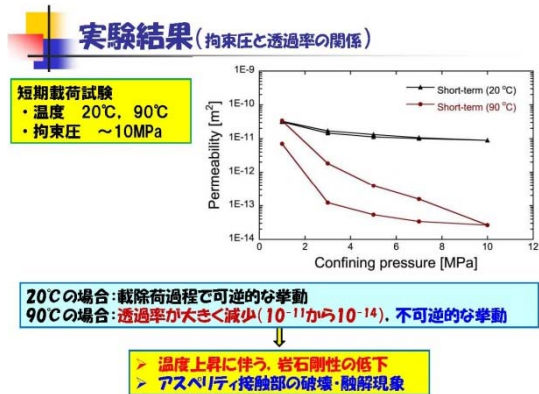
場所：土木学会 EF 会議室

発表：岸田 潔（京都大学）

題目：「岩盤不連続面の構造の変化と強度回復現象」

概要：

地熱発電におけるエネルギー回収に関する問題や、放射性廃棄物を地層処分する問題においては、対象となる不連続性岩盤の透水・物質輸送特性の空間的・時間的変化を詳細に把握する必要がある。地下深部の高温・高圧環境では、岩石構成鉱物の溶解や沈殿等の地球化学的作用が顕在化し、その結果、不連続性岩盤の物理特性は時間の経過と共に変性することになる。特に、結晶質性の不連続性岩盤では、流体の流れは不連続面で支配的となるため、不連続面自体の透水・物質輸送特性を空間的かつ時間的に把握することが重要となる。外的要因により不連続面周辺の応力や温度状態が変化する場合、力学および化学作用などの複合的な影響によって不連続面の開口幅は変化し、その結果、透水・物質輸送特性は時間の経過と共に変化することが考えられる。ここでは、拘束圧、温度、拘束圧保持時間の3点に着目して、種々の条件でSHS型一面せん断試験や透水試験を実施し、それら3つのパラメータが強度回復現象や透水特性の変化に及ぼす影響について精査すると共に、粘弾性的な可逆現象の有無についても説明を行った。



話題概要

日時：2013年8月9日（金）

場所：土木学会 EF 会議室

発表：末広俊夫（原子力発電環境整備機構）

題目：「地下深部の地震動と関連課題の検討」

概要：

原子力発電環境整備機構では、大深度地下に埋設される地層処分地下施設の耐震設計に関する検討を行っている。地下深部の地震動を評価するために、「耐専スペクトル」に対して観測地点固有の地中地震動に関する補正係数(図-1.1)を考慮する方法を提案し、2011年東北地方太平洋沖地震の地中観測記録(KiK-net)を用いて検証した結果、比較的良好に再現できた(図-1.2)。静的設計における「地中震度」は、地上構造物と同じ震度を深さ方向に一様に与えると著しく不合理であるため、一次元地震応答解析による地中の応答値と比較検討した。その結果(図-2)、深さ方向に震度を低減した既往の方法についても比較したところ、一様分布より合理的であるが、深度300m以深では地震応答解析結果との差が大きくなり不合理になるため、さらなる合理化の検討が必要であることがわかった。今後の課題である。

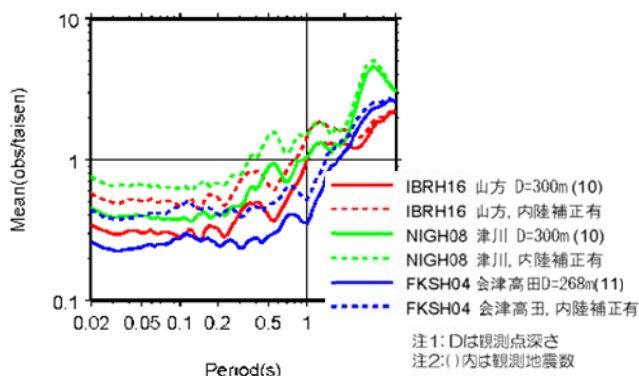


図-1.1 応答スペクトル比(地中観測記録/耐専スペクトル)の例
(内陸地殻内地震 水平方向-平均値)

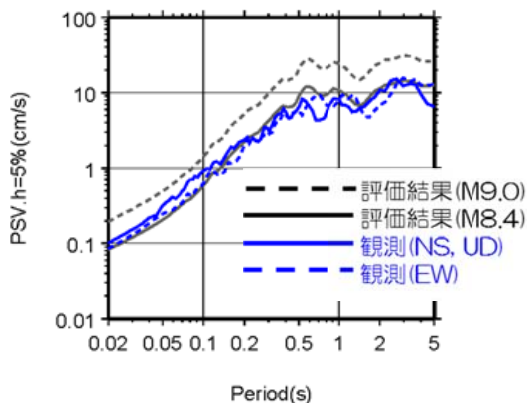


図-1.2 応答スペクトルの例
等価震源距離を釜江・川辺(2011)の
サイト最短のアスペリティで評価した場合
(銚子中(CHBH14), 等価震源距離 137km)

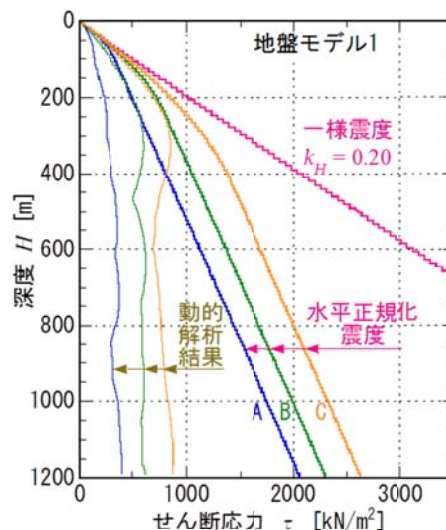


図-2 地中震度の設定方法の違いによる
せん断応力の深度方向分布

話題概要

日時：2013 年 12 月 12 日（木）

場所：土木学会 A 会議室

発表：佐藤 稔紀（日本原子力研究開発機構）

題目：「東濃地域における地震時の地下水圧および湧水量の変化」

概要

日本原子力研究開発機構は、岐阜県東濃地域において深地層の研究施設である瑞浪超深地層研究所を建設しているが、2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震直後に、研究所および周辺において実施している地下水圧モニタリング孔では水圧変化が観測された。また、同研究所の研究坑道内で湧水量増加が確認された。モニタリング開始以降、地震に伴う水圧変化は観測されてきたが、東北地方太平洋沖地震直後の変化は過去最大のものであった。本報告では、地震に伴う地下水圧の変化とその後の回復状況について概要を示すとともに、水圧変化の要因について考察した。また、研究坑道への湧水量の変化について示すとともに、地下水の地球化学的影響についても示した。

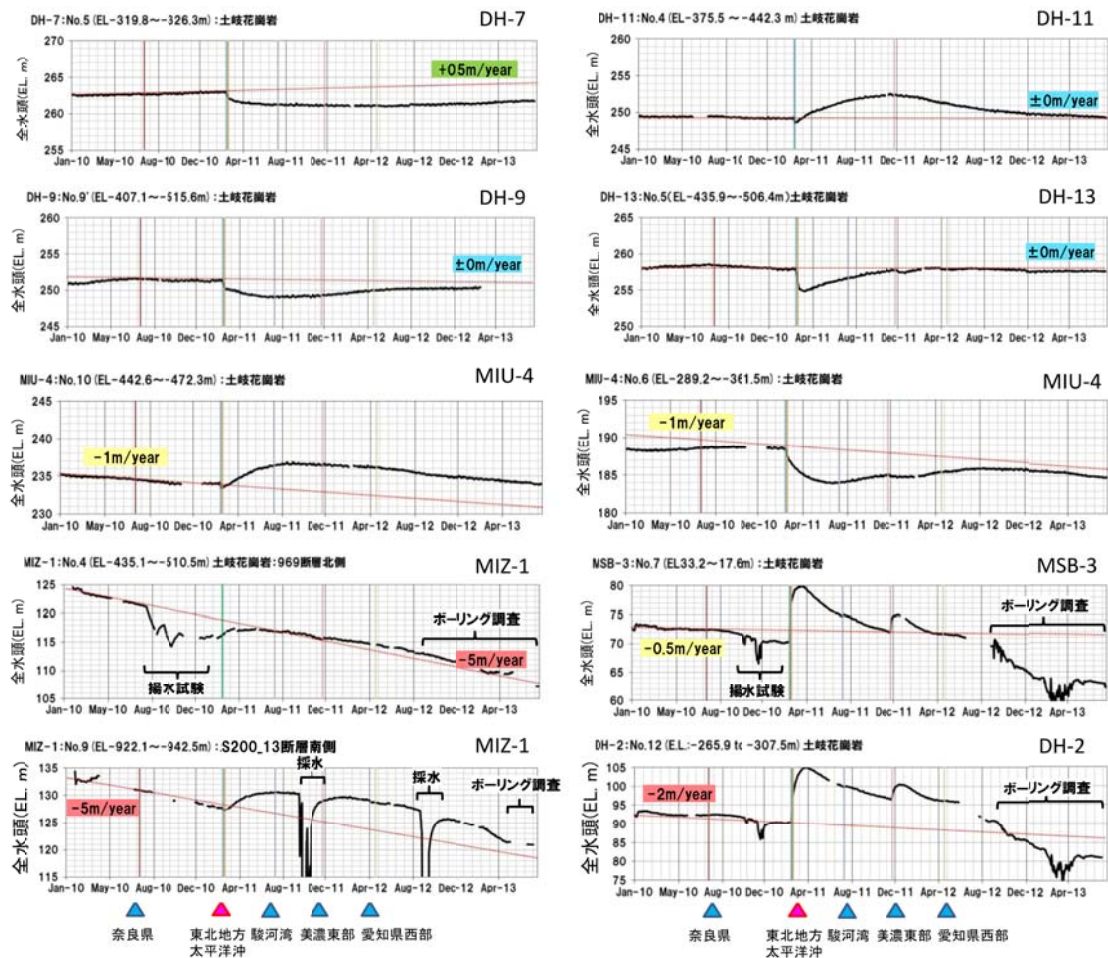


図 東北地方太平洋沖地震時の長期的な水圧変化(2年の変化)

(3) 文献リスト

・文献抽出 109 件

・分類別件数

I. 地震による空洞の被害	19 件
II. 空洞の耐震性の検討	36 件
III. 岩盤の動的物性	24 件
IV. その他	21 件
V. 海外文献	21 件

・要約版

3 件

I. 地震による空洞の被害

I-1							
題名	鉄道トンネルの震災事例調査						
雑誌名	鉄道技術研究報告	刊号	1123	頁		発行年	1979
著者名	吉川恵他						
I-2							
題名	地震断層による鉄道トンネルの被害						
雑誌名	土と基礎	刊号	Vol.30, No. 3	頁	27-32	発行年	1982
著者名	吉川恵他						
I-3							
題名	地下構造物の被害と復旧						
雑誌名	安全工学	刊号		頁	436-443	発行年	1995
著者名	日比野 敏 伊藤 洋						
I-4							
題名	地下構造物の被害と復旧(別冊 安全工学—阪神・淡路大震災特集)						
雑誌名	安全工学	刊号		頁	65-72	発行年	1995
著者名	日比野 敏 伊藤 洋						
I-5							
題名	地下構造物の被害(平成7年(1995年)兵庫県南部地震災害調査報告)						
雑誌名	土木研究所報告	刊号		頁	443-470	発行年	1996
著者名	大塚 久哲 真下 英人 星隈 順一 [他]						
I-6							
題名	兵庫県南部地震による山岳トンネルの被害と復旧						
雑誌名	トンネルと地下	刊号	Vol. 27, No.3	頁	51-61	発行年	1996
著者名	小山幸則, 朝倉俊弘, 佐藤豊						
I-7							
題名	地中構造物の地震被害解析に及ぼす計算手法の影響に関する一手法						
雑誌名	地震工学研究発表会講演論文集	刊号	25回	頁	645	発行年	1999
著者名	中村晋, 西山誠治, 酒井久和						
I-8							
題名	山岳トンネルの地震被害とそのメカニズム						
雑誌名	土木学会論文集	刊号	No.659/III-52	頁	27-38	発行年	2000
著者名	朝倉俊弘, 志波由紀夫, 松岡茂, 大矢敏雄, 野城一栄						
I-9							
題名	山岳トンネルの地震被害に関する考察						
雑誌名	土木学会第60回年次学術講演会	刊号		頁		発行年	2005
著者名	関 茂和(旧:日本道路公団), 山本 一敏, 山本 秀樹(パシフィックコンサルタンツ)						
I-10							
題名	地下構造物と地震動の関係について —強震記録から地下構造物に被害をもたらす地盤ひずみを算定する方法						
雑誌名	土木学会 地震工学論文集	刊号	28回	頁	169-1	発行年	2005
著者名	鈴木崇伸						

I-11							
題名	新潟県中越地震における木沢トンネルの被害とそのメカニズム						
雑誌名	土木学会 地震工学論文集	刊号	28回	頁	182-1	発行年	2005
著者名	森伸一郎, 土谷基大						
I-12							
題名	兵庫県南部地震(1995),新潟県中越地震(2004)におけるトンネルの被害の傾向						
雑誌名	トンネル工学報告集	刊号		頁	215-219	発行年	2007
著者名	橘直毅 小島芳之 野城一栄 [他]						
I-13							
題名	山岳トンネル設計施工標準・同解説						
雑誌名	刊行物	刊号		頁		発行年	2008
著者名	鉄道建設・運輸施設整備支援機構						
I-14							
題名	表層地盤の影響を考慮した露頭岩盤観測点の地震動特性の解明 —根室観測点における検討—						
雑誌名	電力中央研究所報告	刊号	N07024	頁	1-22	発行年	2008
著者名	芝良昭, 佐藤浩章, 東貞成						
I-15							
題名	山岳トンネルの地震被害発生メカニズムと耐震性能の評価						
雑誌名	鉄道総研報告	刊号	23-12	頁	17	発行年	2009
著者名	野城一栄, 小島芳之, 朝倉俊弘, 深沢成年						
I-16							
題名	山岳トンネルの耐震対策技術に関する研究						
雑誌名	土木研究所研究成果報告書	刊号		頁		発行年	2009
著者名	角湯克典, 日下敦(土木研究所)						
I-17							
題名	土木部門 最近の山岳トンネルの地震被害の傾向						
雑誌名	日本鉄道施設協会誌	刊号		頁	307-309	発行年	2009
著者名	野城一栄 西藤潤 井浦智実						
I-18							
題名	トンネルの被害状況(四川大地震復旧技術協力団による災害速報)						
雑誌名	自然災害科学研究西部地区部会報	刊号		頁	132-135	発行年	2009
著者名	蔣宇静						
I-19							
題名	小土被り山岳トンネル覆工の耐震性能と耐震設計手法に関する基礎的研究						
雑誌名	土木学会論文集F1	刊号	Vol.67, No.2	頁	126-143	発行年	2011
著者名	宮林秀次, 井浦智実, 小島芳之, 野城一栄, 朝倉俊弘						

II. 空洞の耐震性の検討

II-1							
題名	地中構造物に働く地震力に関する研究						
雑誌名	土木学会論文集	刊号	92	頁	37-53	発行年	1963
著者名	岡本舜三, 加藤勝行, 伯野元彦						
II-2							
題名	岩盤空洞の地震時ひずみの解析と耐震設計						
雑誌名	土木学会論文集	刊号	341	頁	197-205	発行年	1984
著者名	浜田政則, 杉原豊, 岩野政浩, 志波由紀夫						
II-3							
題名	地下式原子力発電所の耐震性検討						
雑誌名	電力土木	刊号	No.193	頁	57-67	発行年	1984
著者名	駒田広也, 日比野敏						
II-4							
題名	近距離強地震観測による岩盤内半地下発電所の地震時挙動						
雑誌名	土木学会論文集	刊号	358号	頁	Ⅲ-3,85	発行年	1985
著者名	駒田広也, 日比野敏, 江川顕一郎						
II-5							
題名	山岳トンネルおよび周辺岩盤の地震時挙動[英文]						
雑誌名	土木学会論文集	刊号	374	頁	249-259	発行年	1986
著者名	山口靖紀, 辻田満, 脇田和試						
II-6							
題名	山岳トンネルにおける空洞および周辺岩盤の地震時挙動 -空洞のひずみと周辺岩盤の挙動の関係について-						
雑誌名	第7回日本地震工学シンポジウム	刊号		頁	1849-1854	発行年	1986
著者名	山口靖紀, 辻田満, 脇田和試						
II-7							
題名	電力施設地下構造物の設計と施工						
雑誌名	刊行物	刊号		頁		発行年	1986
著者名	電力土木技術協会						
II-8							
題名	地下空洞における地震観測 -円筒ピット立型地下空洞の地震時挙動-						
雑誌名	電力中央研究所報告	刊号	U86031	頁	1-72	発行年	1987
著者名	駒田広也, 野崎隆司, 日比野敏						
II-9							
題名	地下式原子力発電所の立地調査技術						
雑誌名	電力中央研究所研究報告	刊号	U01	頁		発行年	1987
著者名	本荘静光, 金川忠, 伊藤洋, 中川加明一郎, 北野晃一, 澤田義博, 藤原義一, 本島睦, 野崎隆						
II-10							
題名	大河内水力発電所地下発電所空洞の設計と施工						
雑誌名	電力土木	刊号	No.230	頁	46-57	発行年	1991
著者名	原田稔, 片山武, 矢田篤						

II-11							
題名	岩盤地下構造物の耐震性評価のための地下深部地震動特性						
雑誌名	第13回西日本岩盤工学シンポジウム	刊号		頁	3-8	発行年	1992
著者名	駒田広也, 佐々木俊二, 新見建, 堀田光						
II-12							
題名	立坑掘削と原位置試験による堆積軟岩の変形						
雑誌名	土木学会論文集No.463/Ⅲ-22	刊号		頁	143-152	発行年	1993
著者名	越智健三, 壺内達也, 龍岡文夫						
II-13							
題名	大規模な地下空洞の耐震性について						
雑誌名	第9回日本地震工学シンポジウム	刊号		頁	1249-1254	発行年	1994
著者名	市川芳忠						
II-14							
題名	硬質地盤を通過する剛性の高いトンネルの地震時応答性状と耐震設計						
雑誌名	土木学会論文集	刊号	No.516	頁	VI-27,41	発行年	1995
著者名	中川誠志, 式田直孝, 田中努, 大竹省吾						
II-15							
題名	原子力発電所の立地多様化技術 第3編 地下立地技術						
雑誌名	土木学会刊行物	刊号	第3編	頁		発行年	1996
著者名	土木学会 原子力土木委員会						
II-16							
題名	山岳トンネルの地震被害とそのメカニズム						
雑誌名	土木学会論文集	刊号	No.659/Ⅲ-52	頁	27-38	発行年	2000
著者名	朝倉俊弘, 志波由紀夫, 松岡茂, 大矢敏雄, 野城一栄						
II-17							
題名	地下構造物の断面力に与える鉛直地震動の影響について						
雑誌名	構造工学論文集	刊号	46A	頁	1757-1763	発行年	2000
著者名	伊東守, 大塚久哲, 豊永臣悟						
II-18							
題名	岩盤タンク技術指針						
雑誌名	刊行物	刊号		頁		発行年	2001
著者名	石油学会 石油公団						
II-19							
題名	地層処分施設地下空洞の耐震性評価						
雑誌名	土木学会第56回年次学術講演会	刊号		頁		発行年	2001
著者名	窪田 茂(大成建設), 杉原 豊(大成建設), 小野 文彦(東京電力)						
II-20							
題名	土被りの浅い岩盤地下空洞の地震時安定性に及ぼす地表面傾斜の影響について						
雑誌名	構造工学論文集	刊号	Vol.48A	頁	1469-1478	発行年	2002
著者名	小林薫, 松元和伸, 筒井雅行, 熊谷幸樹, 近久博志						

II-21							
題名	上下動を考慮した原子力発電所 基礎地盤及び周辺斜面の地震時安定性評価						
雑誌名	土木学会論文集	刊号	757号	頁	Ⅲ-66,21	発行年	2004
著者名	原子力土木委員会・地盤安定性評価部会						
II-22							
題名	レベル2地震動に対するトンネルの等価剛性に関する一考察						
雑誌名	土木学会第58回年次学術講演会	刊号		頁		発行年	2004
著者名	浦野 和彦, 鈴木 雅行, 三原 正哉, 足立 有史(ハザマ技術研究所)						
II-23							
題名	山岳トンネルの地震被害に関する解析的検討						
雑誌名	トンネル工学報告集	刊号	Vol.15	頁	249-256	発行年	2005
著者名	松長剛, 服部修一, 野々村政一						
II-24							
題名	山岳トンネルの要求性能としての耐震性能に関する一考察						
雑誌名	地下空間シンポジウム論文・報告集	刊号	11	頁	201-208	発行年	2006
著者名	山田 浩幸, 岡田 正之, 藤原 康政 [他]						
II-25							
題名	大深度地下構造物の耐震解析における地震外力評価に関する検討						
雑誌名	土木学会第61回年次学術講演会	刊号		頁		発行年	2006
著者名	黒川 聡(東京電力), 松原 勝己(東電設計)						
II-26							
題名	使用済み燃料の浅地下ボールド貯蔵方式のフーズビリティに関する研究						
雑誌名	電力中央研究所報告	刊号	N07015	頁		発行年	2007
著者名	新 孝一, 三枝利有, 古賀智成, 寺村政浩, 加賀屋裕治, 吉村英二, 白浜健二, 武内邦文, 佐藤 伸						
II-27							
題名	地震による変位を想定したトンネルの模型実験						
雑誌名	トンネル工学報告集	刊号	第17巻	頁	195-202	発行年	2007
著者名	野城一栄, 橘直毅, 小島芳之, 野々村正一, 朝倉俊弘						
II-28							
題名	低土被り山岳トンネルの地震時の挙動の予測法						
雑誌名	鉄道総研月例発表会講演要旨	刊号	218回	頁		発行年	2008
著者名	野城一栄						
II-29							
題名	表層地盤の影響を考慮した露頭岩盤観測点の地震動特性の解明 -根室観測点における検討-						
雑誌名	電力中央研究所報告	刊号	N07024	頁	1-22	発行年	2008
著者名	芝 良昭, 佐藤浩章, 東 貞成						
II-30							
題名	山岳トンネルの地震被害発生メカニズムと耐震性能の評価						
雑誌名	鉄道総研報告	刊号	23-12	頁	17	発行年	2009
著者名	野城一栄, 小島芳之, 朝倉俊弘, 深沢成年						

II-31						
題名	山岳トンネルの耐震対策技術に関する研究					
雑誌名	土木研究所研究成果報告書	刊号		頁		発行年 2009
著者名	角湯 克典, 日下 敦(土木研究所)					
II-32						
題名	小土被りトンネルの地震被害メカニズムに関する実験的研究					
雑誌名	土木学会論文集, F1, トンネル工学	刊号	Vol.66, No.1	頁	1月7日	発行年 2010
著者名	宮林秀次, 高橋源太郎, 小島芳之					
II-33						
題名	トンネル周辺地山の緩みのトンネル耐震性に及ぼす影響					
雑誌名	土木学会第65回年次学術講演会	刊号		頁		発行年 2010
著者名	橘 直毅, 山本 雅広, 宮城 大助(中央復建コンサルタンツ)					
II-34						
題名	小土被り山岳トンネル覆工の耐震性能と耐震設計手法に関する基礎的研究					
雑誌名	土木学会論文集F1	刊号	Vol.67, No.2	頁	126-143	発行年 2011
著者名	宮林秀次, 井浦智実, 小島芳之, 野城 一栄, 朝倉俊弘					
II-35						
題名	地層処分施設における大深度地中構造物の耐震性評価に関する基礎的研究					
雑誌名	土木学会第66回年次学術講演会	刊号		頁		発行年 2011
著者名	渡辺 和明, 澤田 茉伊, 志波 由紀夫(大成建設)					
II-36						
題名	余裕深度処分施設の長期力学安定性に対する地震の影響に関する基本検討					
雑誌名	土木学会第65回年次学術講演会	刊号		頁		発行年 2011
著者名	瀬瀬 由雄, 富田 敦紀, 西村 創(日本原燃), 鈴木 康正(東電設計), 西川 洋二, 新美 勝之(清水建設)					

Ⅲ. 岩盤の動的物性

Ⅲ-1							
題名	人工および自然軟岩の変形と強度						
雑誌名	土と基礎	刊号	38-7	頁		発行年	1990
著者名	渋谷啓, 金有性, 龍岡文夫, 佐藤剛司						
Ⅲ-2							
題名	立坑掘削と原位置試験による堆積軟岩の変形						
雑誌名	土木学会論文集No.463/Ⅲ-22	刊号		頁	143-152	発行年	1993
著者名	越智健三, 壺内達也, 龍岡文夫						
Ⅲ-3							
題名	1. 硬質岩盤の動的強度と変形特性						
雑誌名	第12回岩盤システム工学セミナー「岩の動特性と岩盤構造物の耐震性評価に関する技術の現状」	刊号		頁	3~30	発行年	1994
著者名	伊藤洋						
Ⅲ-4							
題名	2. 軟岩の動的強度特性						
雑誌名	第12回岩盤システム工学セミナー「岩の動特性と岩盤構造物の耐震性評価に関する技術の現状」	刊号		頁	31~46	発行年	1994
著者名	吉中龍之進						
Ⅲ-5							
題名	4. 岩盤の動的特性に関する調査と試験						
雑誌名	第12回岩盤システム工学セミナー「岩の動特性と岩盤構造物の耐震性評価に関する技術の現状」	刊号		頁	67~104	発行年	1994
著者名	田中荘一						
Ⅲ-6							
題名	繰返し載荷に伴う不連続面の変形挙動について						
雑誌名	不連続性岩盤と構造物に関する研究報告書、地盤工学会	刊号		頁	417~420	発行年	1995
著者名	近藤寛道、上田稔、西村均、若林成樹、石塚与志雄、熊坂博夫						
Ⅲ-7							
題名	堆積軟岩の変形特性						
雑誌名	土木学会論文集No.561/Ⅲ-38	刊号		頁	1-17	発行年	1997
著者名	龍岡文夫, 小高猛司, 王林, 早野公敏, 古関潤一						
Ⅲ-8							
題名	岩盤の動的変形特性に関する実験的研究						
雑誌名	第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集	刊号		頁	121~126	発行年	1998
著者名	鈴木健一郎、並木和人、桑原徹、平間邦興						
Ⅲ-9							
題名	深部および表層地質特性と地震動						
雑誌名	地震工学研究発表会講演論文集	刊号	25回	頁	273	発行年	2000
著者名	久保田隆二, 趙志新, 脇坂安彦, 梶川昌三						

Ⅲ-10							
題名	京都盆地の地下構造と地盤震動特性						
雑誌名	地震工学研究発表会講演論文集	刊号	26回	頁	281	発行年	2001
著者名	清野純史, 土岐憲三, 坂井康伸						
Ⅲ-11							
題名	深部および表層地質特性と地震動(その2)						
雑誌名	地震工学研究発表会講演論文集	刊号	26回	頁	273	発行年	2001
著者名	久保田隆二, 脇坂安彦, 阿南修司						
Ⅲ-12							
題名	濃尾平野の深層地下構造の推定						
雑誌名	地震工学研究発表会講演論文集	刊号	26回	頁	289	発行年	2001
著者名	野澤貴, 小島清嗣, 北野哲司, 大保直人, 永田茂, 石田寛						
Ⅲ-13							
題名	山地形における地震動の増幅特性						
雑誌名	日本地震工学会論文集	刊号	5巻3号	頁	1	発行年	2005
著者名	栗田哲史, 安中正, 高橋聡, 嶋田昌義, 末広俊夫						
Ⅲ-14							
題名	工学的基盤での地震動にみられる深い地盤構造による増幅特性						
雑誌名	土木学会論文集A	刊号	Vol.62	頁	No.2,225	発行年	2006
著者名	増井大輔, 翠川三郎						
Ⅲ-15							
題名	深部地下構造を考慮した内陸活断層型地震の経験的評価						
雑誌名	土木学会 地震工学論文集	刊号	-	頁	98	発行年	2007
著者名	坂井公俊, 室野剛隆, 佐藤勉, 澤田純男						
Ⅲ-16							
題名	KiK-net地震記録を用いた基盤から地表への震動増幅評価法						
雑誌名	日本地震工学会論文集	刊号	8巻2号	頁	16	発行年	2008
著者名	國生剛治, 佐藤克晴, 長尾晋悟						
Ⅲ-17							
題名	表層地盤の影響を考慮した露頭岩盤観測点の地震動特性の解明 -根室観測点における検討-						
雑誌名	電力中央研究所報告	刊号	N07024	頁	1-22	発行年	2008
著者名	芝 良昭, 佐藤浩章, 東 貞成						
Ⅲ-18							
題名	モンテカルロシミュレーションを用いた地盤特性のばらつきと地盤応答特性との関係に関する 基礎検討						
雑誌名	土木学会第63回年次学術講演会	刊号		頁		発行年	2008
著者名	畑 明仁, 志波 由紀夫(大成建設)						
Ⅲ-19							
題名	原子力発電所の基礎地盤及び周辺斜面の耐震安定性評価技術 2.3 岩の動的強度特性						
雑誌名	土木学会刊行物	刊号		頁	67-74	発行年	2009
著者名	土木学会 原子力土木委員会						

Ⅲ-20							
題名	堆積軟岩の動的変形特性						
雑誌名	日本地震工学会論文集	刊号	9巻1号	頁	46	発行年	2009
著者名	福元俊一, 吉田望, 佐原守						
Ⅲ-21							
題名	軟岩の動的強度評価法の提案						
雑誌名	電力中央研究所研究報告	刊号	N08061	頁		発行年	2009
著者名	岡田哲実, 伊藤洋						
Ⅲ-22							
題名	モンテカルロシミュレーションによる岩盤物性のばらつきが地盤応答に与える影響に関する ケーススタディ						
雑誌名	第30回土木学会地震工学研究発表会論文集	刊号		頁		発行年	2009
著者名	畑 明仁, 志波 由紀夫(大成建設)						
Ⅲ-23							
題名	モンテカルロシミュレーションを用いた地盤特性のばらつきと地盤応答特性との関係に関する 基礎検討(その2)						
雑誌名	土木学会第64回年次学術講演会	刊号		頁		発行年	2009
著者名	畑 明仁, 志波 由紀夫(大成建設)						
Ⅲ-24							
題名	モンテカルロシミュレーションを用いた地盤特性のばらつきと地盤応答特性との関係に関する 基礎検討(その3)						
雑誌名	土木学会第65回年次学術講演会	刊号		頁		発行年	2010
著者名	畑 明仁, 志波 由紀夫(大成建設)						

IV. その他

IV-1							
題名	アレー観測による岩盤地震動の短周期成分に関する研究						
雑誌名	第6回日本地震工学シンポジウム	刊号		頁	201-208	発行年	1982
著者名	長橋純男						
分類	その他(深部地盤・岩盤の地震動評価)						
IV-2							
題名	岩盤における強震アレー観測						
雑誌名	第6回日本地震工学シンポジウム	刊号		頁	193-200	発行年	1982
著者名	表俊一郎, 太田外気晴						
分類	その他(深部地盤・岩盤の地震動評価)						
IV-3							
題名	岩盤空洞の地震時挙動観測と考察						
雑誌名	土木学会論文集	刊号	341	頁	187-196	発行年	1984
著者名	浜田政則, 杉原豊, 志波由紀夫, 岩野政浩						
分類	その他(岩盤内での地震観測)						
IV-4							
題名	山岳トンネルおよび周辺岩盤の地震時挙動 -観測記録の波形解析(昭和58年7月~昭和59年6月)-						
雑誌名	岩の力学国内シンポジウム講演論文集	刊号	6	頁	187-192	発行年	1984
著者名	中村豊, 朝倉俊弘, 山口靖紀, 辻田満, 脇田和試						
分類	その他(岩盤内での地震観測)						
IV-5							
題名	鉛直アレー地震観測による地震動特性に関する研究						
雑誌名	第7回日本地震工学シンポジウム	刊号		頁	481-486	発行年	1986
著者名	表俊一郎, 飯塚節夫, 高橋克也						
分類	その他(深部地盤・岩盤の地震動評価)						
IV-6							
題名	高密度アレー観測記録による位相速度の考察						
雑誌名	第7回日本地震工学シンポジウム	刊号		頁	475-480	発行年	1986
著者名	阿部健一, 嶋田剛, 粕田金一, 神山真, 柳沢栄司						
分類	その他(深部地盤・岩盤の地震動評価)						
IV-7							
題名	山岳トンネルおよび周辺岩盤の地震時挙動[英文]						
雑誌名	土木学会論文集	刊号	374	頁	249-259	発行年	1986
著者名	山口靖紀, 辻田満, 脇田和試						
分類	その他(岩盤内での地震観測)						
IV-8							
題名	山岳トンネルにおける空洞および周辺岩盤の地震時挙動 -空洞のひずみと周辺岩盤の挙動の関係について-						
雑誌名	第7回日本地震工学シンポジウム	刊号		頁	1849-1854	発行年	1986
著者名	山口靖紀, 辻田満, 脇田和試						
分類	その他(深部地盤・岩盤の地震動評価)						

IV-9							
題名	石油地下備蓄施設における地震観測と解析						
雑誌名	第7回日本地震工学シンポジウム	刊号		頁	1879-1884	発行年	1986
著者名	竹脇尚信, 青木謙治, 吉村隆, 花村哲也, 田島孝也						
分類	その他(深部地盤・岩盤の地震動評価)						
IV-10							
題名	地下空洞における地震観測 -横型地下空洞の地震時挙動-						
雑誌名	電力中央研究所報告	刊号	385043	頁	1-43	発行年	1986
著者名	駒田広也						
分類	その他(深部地盤・岩盤の地震動評価)						
IV-11							
題名	岩盤内深部で観測された近距離地震動特性 -(その1)加速度, 速度の最大振幅と従来の提案式の比較-						
雑誌名	間組研究年報	刊号		頁	141-149	発行年	1987
著者名	山口靖紀, 辻田満, 脇田和試, 新井伸夫						
分類	その他(深部地盤・岩盤の地震動評価)						
IV-12							
題名	地下空洞における地震観測 -円筒ピット立型地下空洞の地震時挙動-						
雑誌名	電力中央研究所報告	刊号	U86031	頁	1-72	発行年	1987
著者名	駒田広也, 野崎隆司, 日比野敏						
分類	その他(深部地盤・岩盤の地震動評価)						
IV-13							
題名	地中地震動の深さ方向の低減特性とその定式化						
雑誌名	電力中央研究所報告	刊号	U88022	頁	1-76	発行年	1988
著者名	佐藤清隆, 沢田義博, 伊藤洋, 当麻純一, 矢島浩, 緒方正彦						
分類	その他(深部地盤・岩盤の地震動評価)						
IV-14							
題名	立体アレー観測による地下深部の地震挙動 -細倉鉦山における地震観測-						
雑誌名	電力中央研究所報告	刊号	U88074	頁	1-66	発行年	1989
著者名	駒田広也, 沢田義博, 青山成夫						
分類	その他(深部地盤・岩盤の地震動評価)						
IV-15							
題名	地下空洞における地震観測 -立坑型岩盤空洞における地震時挙動-						
雑誌名	電力中央研究所報告	刊号	U90074	頁	1-44	発行年	1991
著者名	野崎隆司, 駒田広也, 日比野敏						
分類	その他(深部地盤・岩盤の地震動評価)						
IV-16							
題名	岩盤地下構造物の耐震性評価のための地下深部地震動特性						
雑誌名	第13回西日本岩盤工学シンポジウム	刊号		頁	3-8	発行年	1992
著者名	駒田広也, 佐々木俊二, 新見建, 堀田光						
分類	その他(深部地盤・岩盤の地震動評価)						

IV-17							
題名	岩盤における地震動特性 -加速度応答スペクトルの距離減衰特性						
雑誌名	土木学会第49回年次学術講演会	刊号		頁	1334-1335	発行年	1994
著者名	江尻讓嗣, 後藤洋三						
分類	その他(深部地盤・岩盤の地震動評価)						
IV-18							
題名	大規模な地下空洞の耐震性について						
雑誌名	第9回日本地震工学シンポジウム	刊号		頁	1249-1254	発行年	1994
著者名	市川芳忠						
分類	その他(深部地盤・岩盤の地震動評価)						
IV-19							
題名	東灘ボーリングデータを用いた1次元解析による大深度地盤の地震動増幅特性						
雑誌名	第26回地震工学研究発表会講演論文集	刊号		頁	165-168	発行年	2001
著者名	國生剛治, 万谷昌吾						
分類	その他(深部地盤・岩盤の地震動評価)						
IV-20							
題名	地質不良区間における新設山岳トンネル用の地震対策工の適用性						
雑誌名	土木学会論文集	刊号	Vol.65, No.4	頁	1062-1080	発行年	2009
著者名	野城一栄, 小島芳之, 宮林秀次, 西藤潤, 朝倉俊弘, 竹村次朗						
分類	その他(地震対策工)						
IV-21							
題名	第二種廃棄物埋設の事業に関する安全審査の基本的考え方						
雑誌名	http://www.nsc.go.jp/shinsashishin/pdf/1/si035.pdf	刊号		頁		発行年	2011
著者名	原子力安全委員会 放射性廃棄物・廃止措置専門部会						
分類	その他(処分場の要求性能)						

V. 海外文献

V-1							
題名	Exploratory Shaft Seismic Design Basis Working,Yucca Mountain Project.						
雑誌名	Sandia National Laboratories,	刊号	SAND	頁	118	発行年	1990
著者名	C.V.Subramanian, J.K.King, D.M.Perkins, R.W.Mudd, A.M.Richardson, J.C.Calovini,						
分類	空洞の耐震性の検討						
V-2							
題名	Seismic design of circular-section concrete-lined underground openings: Preclosure performance considerations for the Yucca Mountain Site.						
雑誌名	American Society of Civil Engineers (ASCE) symposium on dynamic analysis and design considerations, for high-level nuclear waste repositories.SAND--92-0279C	刊号	23	頁	20	発行年	1992
著者名	Richardson, A.M.,Blejwas, T.E.						
分類	空洞の耐震性の検討						
V-3							
題名	Preclosure seismic design methodology for a geologic repository at YuccaMountain. Revision 1.						
雑誌名		刊号		頁	126	発行年	1996
著者名							
分類	地震による空洞の被害, 空洞の耐震性の検討, 岩盤の動的物性						
V-4							
題名	Effects of earthquakes on the deep repository for spent fuel in Sweden based on case studies and preliminary model results						
雑誌名	SKB	刊号	TR-02-24	頁		発行年	2002
著者名	Bäckblom, Göran 1); Munier, Raymond 2)						
分類	地震による空洞の被害, 空洞の耐震性の検討, 岩盤の動的物性						
V-5							
題名	Elastodynamic Analysis of Underground Structural Failures Induced by Seismic Body Waves						
雑誌名	JOURNAL OF APPLIED MECHANICS-TRANSACTIONS OF THE ASME	刊号	79(3)	頁		発行年	2012
著者名	Uenishi, K.						
分類	地震による空洞の被害						
V-6							
題名	Evaluation of seismic site response nearby underground cavities using earthquake and ambient noise recordings: A case study in Catania area, Italy						
雑誌名	ENGINEERING GEOLOGY	刊号	122(3-4)	頁	281-291	発行年	2011
著者名	Sgarlato, G., Lombardo, G., Rigano, R.						
分類	その他(空洞での地震計測)						
V-7							
題名	Seismic analysis of deep tunnels in near fault conditions: a case study in Southern Italy						
雑誌名	BULLETIN OF EARTHQUAKE ENGINEERING	刊号	9(4)	頁	975-955	発行年	2011
著者名	Corigliano Mirko; Scandella Laura; Lai Carlo G, Paolucci, Roberto						
分類	空洞の耐震性検討						
V-8							
題名	RESPONSE OF TUNNELS TO INCIDENT SH-WAVES						
雑誌名	JOURNAL OF THE ENGINEERING MECHANICS DIVISION-ASCE	刊号	105(4)	頁	643-659	発行年	1979
著者名	LEE, VW, TRIFUNAC, MD						
分類	空洞の耐震性検討						

V-9							
題名	DYNAMIC DISPLACEMENTS AND STRESSES IN THE VICINITY OF A CYLINDRICAL CAVITY EMBEDDED IN A HALF-SPACE						
雑誌名	EARTHQUAKE ENGINEERING & STRUCTURAL DYNAMICS	刊号	23(3)	頁	321-340	発行年	1994
著者名	LUCO, JE, DEBARROS, FCP						
分類	空洞の耐震性検討						
V-10							
題名	Damage to Rock Tunnels from Earthquake						
雑誌名	Journal of the Geotechnical Engineering Division	刊号	Vol.104 No.GT2	頁	175-191	発行年	1978
著者名	Charles H. Dowding, M. ASCE, Arnon Rozen						
分類	地震による空洞の被害						
V-11							
題名	Performance of Underground Coal Mines During the 1976 Tangshan Earthquake						
雑誌名	Tunnelling and Underground Space Technology	刊号	Vol.2 No.2	頁	199-202	発行年	1987
著者名	C. F. Lee						
分類	地震による空洞の被害						
V-12							
題名	Aseismic Design of Undergrond Structures						
雑誌名	Tunnelling and Underground Space Technology	刊号	2	頁	165-197	発行年	1987
著者名	C. M. St John, T. F. zahrah						
分類	地震による空洞の被害, 空洞の耐震性の検討						
V-13							
題名	Underground Opening Damage from Earthquakes						
雑誌名	Engineering Geology	刊号	30	頁	263-276	発行年	1991
著者名	Sunil Sharma, William R. Judd						
分類	地震による空洞の被害						
V-14							
題名	Seismic Design and Analysis of Underground Structures						
雑誌名	Tunnelling and Underground Space Technology	刊号	16	頁	243-293	発行年	2001
著者名	Youssef M.A.Hashash, Jeffrey J.Hook, Birger Schmidt, Jhon I-Chiang Yao						
分類	地震による空洞の被害, 空洞の耐震性の検討						
V-15							
題名	Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi Earthquake						
雑誌名	Tunnelling and Underground Space Technology	刊号	16	頁	133-150	発行年	2001
著者名	W.L. Wang, T.T.Wang, J.J.Su, C.H. Lin, C.R. Seng, T.H. Huang						
分類	地震による空洞の被害						
V-16							
題名	Case Study on Seismic Tunnel Response						
雑誌名	Can. Geotech. J.	刊号	45	頁	1734-1764	発行年	2008
著者名	Stavroula Kontoe, Lidija Zdravkovic, David M.Potts, Christopher O.Menkiti						
分類	地震による空洞の被害, 空洞の耐震性の検討						

V-17							
題名	Dynamic behavior of rock joints						
雑誌名	24th U.S. Symposium on Rock Mechanics	刊号		頁	163~179	発行年	1983
著者名	Gillete, D. A., Sture, S., Hon-yim Ko, Goukd, M. C. and Scott, G. A.						
分類	岩盤の動的物性						
V-18							
題名	Effects of large earthquakes on a KBS-3 repository						
雑誌名	SKB Technical Report	刊号	TR-08-11	頁		発行年	2010
著者名	Faith, B., Hokmark, H. and Munier, R.						
分類	空洞の耐震性の検討						
V-19							
題名	Assessment of damages in Mountain Tunnels due to the Taiwan Chi-Chi Earthquake						
雑誌名	Tunnelling and Underground Space Technology	刊号	vol.16 No.3	頁	133-150	発行年	2001
著者名	W.L. Wanga, T.T. Wangb, J.J. Sua, C.H. Lina, C.R. Senga, T.H. Huang						
分類	地震による空洞の被害						
V-20							
題名	Response and Stability of Underground Structures in Rock Mass during Earthquakes						
雑誌名	ROCK MECHANICS AND ROCK ENGINEERING	刊号	Vol.43 No.6	頁	857-875	発行年	2010
著者名	Omer Aydan, Yoshimi Ohta, Melih Genis, Naohiko Tokashiki, K. Ohkubo						
分類	地震による空洞の被害						
V-21							
題名	Seismic analysis of deep tunnels in near fault conditions: a case study in Southern Italy						
雑誌名	BULLETIN OF EARTHQUAKE ENGINEERING	刊号	Vol.9 No.4	頁	975-995	発行年	2011
著者名	Mirko Corigliano, Laura Scandella, Carlo G. Lai and Roberto Paolucci						
分類	空洞の耐震性の検討						

題名	立坑掘削と原位置試験による堆積軟岩の変形			
雑誌名	土木学会論文集No.463/III-22	刊号	頁	143-152
発行年	1993	著者名	越智健三, 壺内達也, 龍岡文夫	
分類	空洞の耐震性の検討, 岩盤の動的物性			

目的

堆積軟岩などの比較的硬い地盤に重要構造物を構築する事例が多くなってきているが、従来の手法が必ずしも実際の現象を的確に捉えているとはいえない。これは、従来の1%以上の大ひずみでの変形特性を扱う土質力学的手法、およびクラックジョイントの影響が大きい岩盤力学的手法が、堆積軟岩のような均一で比較的硬い地盤の変形問題に必ずしも即していないからである。そのため、堆積軟岩の変形特性の研究は、土質力学的手法かあるいは岩盤力学的手法で行うべきかという基本的な点を明らかにする必要がある。

手法

上総層群泥岩地盤を対象にして実験空洞を構築し、そこから得られた現場挙動の逆解、および原位置試験の結果を基に岩盤の変形係数を求め考察を行う。なお、ここでの現場挙動の逆解析とは試掘横坑周囲ひずみを用いた逆解析、内空変位を用いた逆算、支保工荷重(立坑土圧)からの逆算の3つであり、また、原位置試験とはPS検層、孔内水載荷試験、平板載荷試験の3つである。

結果

原位置試験の結果、および現場挙動の逆解析を基に岩盤の変形係数を求め、その変形係数を測定したひずみレベルに対してプロットすると下の図ようになる。図からわかるように、原位置試験によって得られた弾性係数は様々であったが、原位置試験の結果をそれぞれの試験で取り扱ったひずみレベルに応じて整理すると、見かけ上げらついていたデータ群が、一部のデータを除いて統一的に関連あるものとなった。さらに、逆解析値もそれに対応するひずみレベルと比較すると原位置試験の結果と整合した。つまり、変形係数のひずみレベル依存性を考慮することにより、現場挙動や各種原位置試験は統一的に関連できる。このことは、当該堆積軟岩地盤では、クラック・ジョイントなどの不確実性要因の影響は小さく、原位置調査・試験結果をそのまま用いて連続体の解析手法を適用する土質力学の取り扱いが可能であることを示している。ただし、孔内水載荷試験や平板載荷試験での変形係数はかなりばらつくため、これらの試験だけから信頼のおける地盤の変形係数を求めるのは難しい。なお、ここで扱った泥岩地盤は比較的一様であり、顕著な異方性も見られなかった。

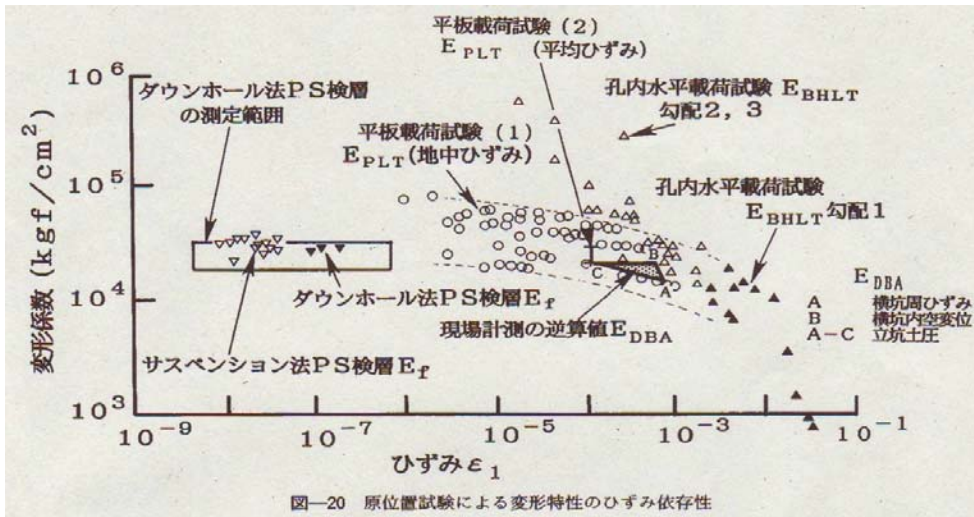


図-20 原位置試験による変形特性のひずみ依存性

題名	山岳トンネルの耐震対策技術に関する研究						
雑誌名	土木研究所研究成果報告書	刊号		頁		発行年	2009
著者名	角湯 克典, 日下 敦(土木研究所)						
分類	地震による空洞の被害, 空洞の耐震性の検討						
目的	<p>これまで山岳トンネルは、経験的に地震被害を受けにくいとされてきた。しかし、規模の大きい地震(阪神淡路・新潟中越)では、覆工の崩落を伴うような被害を受けたトンネルが確認された。このような被害を最小限にするための耐震対策を合理的に実施するには、山岳トンネルの地震時における被害発生メカニズムを解明し、耐震対策が必要となるトンネル条件と効果的な耐震対策を確立する必要がある。論文では、既往の山岳トンネルの地震被害データの分析から、地震被害が発生するメカニズムを解明し、被害モードをパターン化するとともに耐震対策についての考え方を検討している。</p>						
手法	<p>過去の地震により被災した山岳トンネルの被害状況と被害発生要因に関し事例分析とパターン化。トンネル被害モードの検討のため、静的な線形弾性解析を行った。</p>						
結果	<p>①山岳トンネルの地震被害は、主としてせん断変形、鉛直圧縮変形、水平圧縮変形が発生することにより説明できることが判明した。また、トンネルの被害モードは5パターンに大別することができることが判明した。②地震によるトンネルの変形は、地山の挙動にほぼ支配され、覆工の剛性が大きいほど地山の変形に追随できず、覆工に大きな応力が発生する傾向があると考えられる。③トンネル被害を低減させるためには、日常の維持管理において、異常が発生される場合に補修・補強をおこなうこと。また、トンネル自体を地震時に覆工に発生する応力を低減させる構造に変える方法が有効であることが判明したとしている。</p>						

題名	モンテカルロシミュレーションによる岩盤物性のばらつきが地盤応答に与える影響に関するケーススタディ						
雑誌名	第30回土木学会地震工学研究発表会論文集	刊号		頁		発行年	2009
著者名	畑 明仁, 志波 由紀夫(大成建設)						
分類	岩盤の動的物性						
目的	<p>平成19年度原子力学会において制定された「原子力発電所の地震を起因とした確率論的安全評価実施基準」では、岩盤物性のばらつきに起因する自由岩盤応答のばらつきを等価線形解析により評価すると示されている。論文では等価線形解析について地盤物性の不確実性に起因する応答振幅のばらつきを考慮した検討を行ったとしている。</p>						
手法	<p>等価線形解析にモンテカルロシミュレーションを適用し、材料物性のばらつきに起因する自由岩盤応答のばらつきを評価するとともに、R-Oモデルによる逐次非線形解析でも同様の検討を行い両者を比較した。</p>						
結果	<p>地盤の動的物性のうち、初期せん断剛性G_0、ひずみ依存特性$G/G_0 \sim \gamma$、$h \sim \gamma$関係を変動させ、最大応答値のばらつきを評価した結果、平均応答は入力加速度に比例して増加するものの、応答値のばらつきは必ずしも増大しない結果を得、また、応答のばらつきに最も影響を与える因子は地盤のひずみ依存非線形特性$G/G_0 \sim \gamma$関係であることが判明したとされている。</p>						