

地層処分施設の耐震性評価



2011年3月
原子力発電環境整備機構

2011年3月 初版発行

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記へお問い合わせください。

〒108-0014 東京都港区芝4丁目1番地23号 三田NNビル2階
原子力発電環境整備機構 技術部
電話 03-6371-4004 (技術部) FAX 03-6371-4102

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:
Science and Technology Department
Nuclear Waste Management Organization of Japan
Mita NN Bldg. 1-23, Shiba 4-chome, Minato-ku, Tokyo 108-0014 Japan

©原子力発電環境整備機構

(Nuclear Waste Management Organization of Japan) 2011

地層処分施設の耐震性評価

2011年3月
原子力発電環境整備機構

目次

1. はじめに	1
1.1 背景	1
1.2 本報告書の目的と構成	1
2. 地下深部地震動の評価に関する情報の整理	2
2.1 最近発生した地震とそれらの地震がもたらした知見	2
2.1.1 地震観測精度の向上と最近発生した地震がもたらしたトピックスの概要	2
2.1.2 震源を特定できない地震についての知見	4
2.1.3 強震動評価についての最近の知見	6
2.1.4 最近発生した地震がもたらしたその他の知見	10
2.2 地下深部の地震動評価に関する国の委員会などに関する情報の整理	10
2.2.1 国の委員会などの動向	10
2.2.2 国の委員会などにおける活断層評価および強震動評価に係る見解	12
2.3 地震動に関する検討	16
2.3.1 対象地盤モデル	17
2.3.2 解析手法	17
2.3.3 入力地震動	19
2.3.4 解析結果と考察	19
2.4 まとめ	21
3. 地層処分施設の耐震性評価	22
3.1 検討方針	22
3.2 既往検討の概要	23
3.2.1 検討対象施設	23
3.2.2 検討用地震動	23
3.2.3 処分場の地盤条件	23
3.2.4 坑道の構造	24
3.2.5 耐震安全性評価指標	24
3.2.6 解析方法	24
3.2.7 既往検討の結論	24
3.3 検討用地震動の設定	25
3.4 処分坑道の耐震性評価	29
3.4.1 検討条件	29
3.4.2 検討方法	33
3.4.3 高レベル放射性廃棄物処分施設の処分坑道の耐震性評価	39
3.4.4 地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設の処分坑道の耐震性評価	43
3.5 立坑の耐震性評価	47
3.5.1 検討条件	47
3.5.2 検討方法	49
3.5.3 検討結果	54
4. まとめ	63

目次

図 2.2.2-1	中越沖地震の地震動が大きかった要因分析	12
図 2.3.2-1	地盤モデル	18
図 2.3.2-2	解析モデル	19
図 2.3.3-1	入力地震動	19
図 2.3.4-1	解析結果	20
図 3.2.1-1	処分施設の基本概念	23
図 3.3-1	コントロールポイントに基づく地震基盤の水平地震動の応答スペクトル	27
図 3.3-2	検討用地震動の時刻歴波形	28
図 3.3-3	検討用地震動の応答スペクトル	28
図 3.4.1-1	岩盤モデル	29
図 3.4.2-1	検討フロー	33
図 3.4.2-2	高レベル放射性廃棄物処分施設の処分坑道解析モデル	34
図 3.4.2-3	地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設の処分坑道解析モデル	34
図 3.4.2-4	岩盤剛性の非線形モデルの概要	35
図 3.4.2-5	切羽からの距離と掘削解放率	36
図 3.4.2-6	限界ひずみと弾性係数の関係	37
図 3.4.2-7	局所安全係数 f_s の定義	38
図 3.4.3-1	モデル中心断面の最大加速度の深度方向の分布	39
図 3.4.3-2	モデル中心断面の最大せん断ひずみの深度方向の分布	39
図 3.4.3-3	最大せん断ひずみの分布	40
図 3.4.3-4	局所安全係数の分布	40
図 3.4.3-5	地震時増分変位図	41
図 3.4.3-6	地震時増分断面力図	41
図 3.4.3-7	検討対象時刻の地震時増分断面力の概念	42
図 3.4.3-8	地震時増分応力度図	42
図 3.4.4-1	モデル中心断面の最大加速度の深度方向の分布	43
図 3.4.4-2	モデル中心断面の最大せん断ひずみの深度方向の分布	44
図 3.4.4-3	最大せん断ひずみ分布	44
図 3.4.4-4	局所安全係数分布	45
図 3.4.4-5	地震時増分変位図	46
図 3.4.4-6	地震時増分断面力図	46
図 3.4.4-7	地震時増分応力度図	47
図 3.5.2-1	立坑解析モデル図(1)	50
図 3.5.2-2	立坑解析モデル図(2)	51
図 3.5.2-3	シェル要素の局所座標系および断面力の定義	52
図 3.5.3-1	最大応答値の深度分布	55
図 3.5.3-2	XZ 平面の地震時増分せん断ひずみ (γ_{xz}) 分布図と変形モード	56
図 3.5.3-3	XY 平面の地震時増分せん断ひずみ (γ_{xy}) 分布図と変形モード	57

図 3.5.3-4	円周方向の地震時増分断面力	60
図 3.5.3-5	鉛直方向の地震時増分断面力	61
図 3.5.3-6	地震時増分最大応力度図	62

表目次

表 2.1.1-1	1995 年兵庫県南部地震以後わが国周辺で発生した大規模地震の例ともたらされた主なトピックス	3
表 2.1.2-1	「震源をあらかじめ特定できなかった地震」に関する震源を特定できる可能性	6
表 2.1.3-1	主要な距離減衰式一覧	7
表 3.2.4-1	坑道の諸元	24
表 3.3-1	新耐震指針の基準地震動に関する改訂点	25
表 3.3-2	地震基盤における水平地震動のコントロールポイント	26
表 3.4.1-1	岩盤物性値一覧（軟岩系岩盤）	30
表 3.4.1-2	高レベル放射性廃棄物処分坑道の諸元	31
表 3.4.1-3	地層処分低レベル放射性廃棄物処分坑道の諸元	32
表 3.5.1-1	立坑の諸元	48
表 3.5.3-1	立坑断面力の発生パターン（円周方向）	58
表 3.5.3-2	立坑断面力の発生パターン（鉛直方向）	59

1. はじめに

1.1 背景

2006年の「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」（原子力安全委員会，2006）の改定や，2010年の「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）の策定を踏まえ，地層処分施設についても耐震重要度分類に応じた耐震設計が必要になると考えられる。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。地震が多く発生するわが国では，地震時における施設の安全確保は極めて重要であり，長期的な検討スケジュールを踏まえた上で，段階的かつ戦略的に検討を進めていく必要がある。

発電用原子炉施設を対象にした基準地震動策定においては，距離減衰式，波動伝播特性など国内外の研究・適用事例は膨大であるが，地層処分施設の平面的拡がりに対応した地下深部の地震動伝播特性についての研究事例は多くはない。

NUMOは，地層処分における地震動にかかわる技術開発を，原子力発電所の基準地震動策定方法などを参考にしつつ，安全規制，候補サイトの調査，処分場の設計などとの関係を考慮しながら進めていく。NUMOは，これまでに地下深部における地震動評価に資するため，地下深部の地震動評価手法，国の委員会などで実施されている審査における活断層評価および強震動評価，地質・地盤に関する安全審査の手引き検討委員会における活断層評価，震源断層の設定，最近発生した地震などに関する最新知見を収集・整理してきた。地下深部地震動の評価手法については，近年，国内で発生した大規模な内陸地殻内地震の調査研究によって，新たな知見が増えてきている。

1.2 本報告書の目的と構成

本報告書では，地下深部地震動の評価に関する最新の知見を整理するとともに，それらの知見を踏まえて，保守的に地下施設に与える影響が大きいと考えられる地震動を設定し，操業期間中の空間保持の観点から処分坑道の耐震性について考察することを目的とする。

1章（本章）では，地層処分施設へ適用する地震動評価や耐震性評価に対するNUMOの取り組みの背景，および本報告書の構成について説明する。

2章では，「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」（1981年原子力安全委員会制定，2001年3月29日一部改訂）（以下，「旧耐震指針」という）策定後，2006年9月19日の改訂（以下，「新耐震指針」という）を経て現在に至るまでの，地震動および地震動策定に関する知見の進展について整理する。さらに地層処分施設の耐震性評価のための留意点を確認するためにNUMOが実施した検討事例についても紹介する。

3章では，新耐震指針に示された方法により，地下施設に与える影響が大きいと考えられる保守的な地震動を設定し，操業期間中の空間保持の観点から処分坑道と立坑の耐震性について評価を実施したので，その内容と結果を紹介する。

4章では，本報告を総括する。

2. 地下深部地震動の評価に関する情報の整理

地層処分施設の耐震性に対する検討として、NUMO 設立直前に公表された「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」(JNC, 1999)においては、地層処分施設の耐震検討を行うための地震動設定手法の例として旧耐震指針が挙げられていた。この旧耐震指針が、策定以降の地震学および地震工学に関する新たな知見の蓄積、ならびに発電用軽水型原子炉施設の耐震設計技術の改良および進歩を反映して全面的に見直され、2006年9月19日に現行の指針に改訂された。ここでは、旧耐震指針策定後から現在に至るまでの地震動評価に関する知見として、最近発生した地震とそれらがもたらした知見、およびそれらを踏まえた国の委員会などに関する情報について整理する。さらに、地層処分施設の耐震性評価における留意点を確認するために NUMO が実施した検討を示す。

2.1 最近発生した地震とそれらがもたらした知見

2.1.1 地震観測精度の向上と最近発生した地震がもたらしたトピックスの概要

ここ 30 年ほどの傾向として、日本や米国を中心に、強震動の研究、特に表層地盤の増幅特性が強震動に及ぼす影響の研究が進み、表層地盤の特性を同定するためには、どのような地震動が岩盤から入力されたかを把握することの必要性が明確になり、地表・地中を問わず岩盤における強震観測も盛んになってきた。これにより、地中における強震動観測記録が少しずつ得られるようになってきている。わが国では、1995 年兵庫県南部地震を契機とした強震ネット(以下、「K-net」)が展開されているが、K-net 以前から少しずつ展開されてきた地震予知や震源過程の解明を目的とした防災科学技術研究所のその他の観測網と併せて、地中における地震観測も充実されてきた。防災科学技術研究所は、長周期地震動を中心とした広帯域地震を観測する F-net、地表の強震動を観測する K-net、ノイズの少ない地中において高感度の加速度計と速度計による観測を行う Hi-net という 3 つの地震観測網を全国に展開している。これらの観測網のうち、Hi-net に強震観測用のセンサーを付加したものを KiK-net と呼んでいる。これらの地震観測網を利用して、近年、わが国周辺で発生した大規模地震の観測記録が取得されている。その結果、かつては米国など海外でしか得られなかった大加速度記録がわが国の観測網でも数多く記録され、震源近傍の強震動研究に大きな役割を果たしている。特に原子力発電所の近傍で発生した地震とその観測記録は、原子力施設の地震動評価に大きな影響を及ぼしている。最近発生し、主なトピックスや知見をもたらした地震を表 2.1.1-1 に示す。

強震観測網の充実は、質の高い地震観測記録を大量に取得することを可能にした。このデータの統計処理により、距離減衰式がいくつか策定された。これらのデータは震源特性や伝播経路の違いによる影響を大きく受けることから、評価式による評価結果のばらつきが大きくなることも明らかになった。さらに 2004 年新潟県中越地震において地中で極めて大きな地震動が推測されたことや 2008 年岩手・宮城内陸地震において地中でも大きな地震動が観測されたことから、地下の施設においても地震動の加速度の大きさを無視できず何らかの説明が必要であることが示唆された。

2000 年鳥取県西部地震、2004 年新潟県中越地震、2005 年宮城県沖の地震、2007 年能登半島地震、2007 年新潟県中越沖地震などは、原子力発電所の敷地近傍で発生し、それに伴っ

てさまざまな地域性や地震動伝播特性、敷地における増幅特性、基準地震動との整合性などについての検討が原子力安全・保安院に報告され、原子力施設の地震動評価に大きな影響を及ぼしている。

2005年福岡県西方沖地震、2007年能登半島地震、2007年新潟県中越沖地震などに代表される震源断層を事前に十分な精度で特定できていなかった地震により、大きな振幅の地震動が観測された事実が、震源を特定できない場合の地震動予測に関する考え方にも大きな影響をもたらした。

また、2003年十勝沖地震では、遠地において長周期地震動が観測され、このような地震動を評価することの必要性が指摘された。

表 2.1.1-1 1995年兵庫県南部地震以後わが国周辺で発生した大規模地震の例ともたらされた主なトピックス

No	地震の名称	主なトピックス・知見 ([] は観測記録の出典)	備考 (出典、同様の趣旨を示す関係機関等)
1	2000年 鳥取県西部地震 (2000.10.16, M7.3)	・事前調査では活断層が知られていなくても M7 級地震が起こりうる事が、事実により示されたこと ・KiK-net により地中の強震観測記録が得られたこと[NIED]	・地震調査研究推進本部地震調査委員会「確率論的地震動予測地図」(2004)
2	2003年 十勝沖地震 (2003.9.26, M8.0)	・遠地の長周期地震動を評価することの必要性が指摘されたこと	・地震調査研究推進本部「長周期地震動予測地図」(2009b)
3	2004年 新潟県中越地震 (2004.10.23, M6.8)	・地表の観測記録から極めて大きな地中地震動が推定されたこと ・活褶曲帯における地震動評価(震源モデル化)の必要性が指摘されたこと	・科学技術振興調整費「活褶曲帯における地震被害データアーカイブの構築と社会基盤施設の防災対策への活用法の提案(土木学会, 2007)」 ・地形分類とボーリングデータの統合処理による地盤増幅度評価と2004年新潟県中越地震における地震動分布の推定(末富ほか)
4	2005年 福岡県西方沖地震 (2005.3.20, M7.0)	・海域の活断層が十分知られていないことによるモデル化の困難さが指摘されたこと。	・地震予知連絡会(産業技術総合研究所, 2006) ・地震調査研究推進本部
5	2005年 宮城県沖の地震 (2005.8.16, M7.2)	・震源特性の地域性を把握して地震動を評価する必要性が指摘されたこと	・女川原子力発電所 基準地震動 Ss の策定概要(NISA 審議会資料)
6	2007年 能登半島地震 (2007.3.25, M6.9)	・海域の活断層が十分知られていないことによるモデル化の困難さが指摘されたこと	・志賀原子力発電所 原子力安全・保安院による海上音波探査(NISA 審議会資料) ・地震予知連絡会
7	2007年 新潟県中越沖地震 (2007.7.16, M6.8)	・海域の地震の震源メカニズム評価の困難さが指摘されたこと ・「ランブ(地表付近の傾斜部) フラット(深部の水平断層面) 震源となる断層」という3段階の異なる傾斜を持った断層構造が扱われたこと ・変動地形と震源断層との関係が指摘されたこと	・科学技術振興調整費「新潟県中越沖地震に関する緊急調査研究(AIST, 海洋研究開発機構, 東京大学地震研究所, NIED, 北海道大学, 2007)」 ・AIST ・JNES
8	2008年 岩手・宮城内陸地震 (2008.6.14, M7.2)	・地表で 4022Gal, 地下で 1078Gal (共に三成分合成)の観測記録が得られたこと[NIED] ・大きな地震動の成因が、サイト固有の条件によるメカニズム(ここでは「トランポリン効果」)で提案されたこと	・NIED
9	平成 21 年 8 月 11 日 の駿河湾の地震 (2009.8.11, M6.5)	・地震波の到来方向によって、地下の地盤構造の影響で増幅特性が異なる場合がある可能性が指摘されたこと	・「駿河湾の地震において浜岡原子力発電所 5 号機の観測記録が他号機に比して大きかったことの要因分析等に係る審議状況の整理について」(2010.12.15, NISA)
注	AIST: 独立行政法人産業技術総合研究所 JNES: 独立行政法人原子力安全基盤機構 NIED: 独立行政法人防災科学技術研究所 NISA: 原子力安全・保安院		

2.1.2 震源を特定できない地震についての知見

活断層やプレート沈み込み帯で発生する地震は、その震源の特徴をある程度モデル化することができるのに対して、過去に地震が発生した痕跡を見つけることができない領域では、震源の幾何特性や物性などを特定することができない。主にこのような地域で発生する地震のことを、「震源を特定できない地震」と定義している。防災的な観点からは、震源を特定できない地震の中でも、内陸地殻内の浅い領域で発生するものの活断層などの痕跡が事前に見つけれない地震、すなわち検出できない伏在断層による地震についての議論が中心になされている。

震源をあらかじめ特定できないにもかかわらず規模の大きな内陸地殻内の浅い地震が発生することは、2000年鳥取県西部地震(M7.3)の発生によって注目され、原子力施設の安全評価上の取り扱いなどに多くの議論を引き起こした。本項では、この議論の現状と最新知見についての整理を行う。

(1) 地球科学的議論に基づく知見

地球科学分野における震源を特定できない地震に関する議論としては、地震地体構造の考え方を挙げることができる。地震地体構造は、日本被害地震総覧(宇佐美, 2003)などによって整理された歴史地震の類似性や、第四紀の活構造、全国の重力やキュリー一点深度、地磁気異常のスペクトル特性などの地球物理学的特性を踏まえ、同じような地震が発生しうる構造区分内では、震源を特定できなくとも、ある程度の規模の地震を想定しておくべきであるとする考え方に基づいている。このような地球物理学的な知見の反映が可能になったのは、重力探査が全国的に密に展開されたことや、地震発生時の高速すべりを引き起こすことが可能な温度・物性と岩石中に含まれる磁性体の状態(帯磁/非帯磁など)が関係していることが次第に明らかになってきたためである。

地震学や地球物理学の立場からは、地上に痕跡を残さない地震が、どのような震源像を持ち、どのような領域で発生すると特定することができるのかが議論の焦点となっている。

一方、地質学の立場からは、地表に痕跡を残さない場合の震源断層の地中での形状や、逆に地表に痕跡をわずかでも残す場合の震源断層の地中での形状の関係について議論される場合もある。震源断層は完全な矩形ではなく、地質構造の不整形や地震時の滑り分布の不均質に影響され、その一部の区間だけが地表に露出して地震断層を形成する場合がある。このような地震断層を形成する可能性のある地震の規模の下限値と、ほぼ確実に地表に地震断層を形成する地震の規模の下限値を把握することは、活断層情報に基づいて断層モデルを構築し、強震動評価を行う上では重要な知見である。

(2) 地震工学における議論に基づく知見

地震工学、あるいは地震動評価の立場からは、地表に痕跡を残さない地震によって、どこまで大きな地震動が生成されるのかが主として議論されている。しかし、現時点では震源が特定されていない地震による強震動観測記録を集めて、主として工学的基盤における上限地震動の設定について議論をした「震源を事前に特定できない内陸地殻内地震による地震動レベル - 地質学的調査による地震の分類と強震観測記録に基づく上限レベルの検討 - 」(加藤ほか, 2004)が事実上唯一の論文である。これらの議論は、震源を特定できない場合の震源

特性は良くわからなくとも、地震動の上限は、岩盤や震源の物理的および幾何学的な限界により把握できる可能性があるとの考え方に基づいている。

一方、新耐震指針への改訂の中で、地震ハザード評価（確率論的地震動予測）を義務付けられたことに対応して、確率論的地震動予測手法の高度化にかかわるいくつかの研究における「震源を特定しにくい地震の取り扱い方についての知見」を得ることを目的の一つとした研究が「震源を特定しにくい地震による地震動の検討に関する報告書」（JNES, 2004）としてまとめられた。この研究では、断層の運動様式による断層出現率の違いや、地震発生層上端の取り扱い方や地域性に関する検討が論点として取り上げられている。

(3) 過去に発生した大地震の震源モデルの特定の可能性について

地震断層が表出しなかったことや活断層が認知されていないことを理由として、当時あらかじめ震源を特定できなかったと思われる地震について、現在の技術を適用すれば震源を特定できる可能性があるかどうかを検討した結果を表 2.1.2-1 に記す。基本的には、どの地震についても震源を特定できた可能性が高いが、単独の手法で特定された可能性のあるもの、複数の手法によって特定されたと考えられるものなどさまざまである。

表 2.1.2-1 「震源をあらかじめ特定できなかった地震」の震源を特定できる可能性

地震		事前に震源を特定できる可能性				
名称 (発生日, 規模)	特徴	断層推定の可能性				震源モデルが 構築できるか
		物理探査	地震観測	地質調査	変動地形	
福井地震 (1948.6.26, M7.1)	堆積層の厚みが大, 戦後の混乱期にあって, 地震前後の情報が質・量ともに十分ではない	(比抵抗探査による)	不明	不明	震源が存在する範囲の特定は可能(平野端部の地形は断層を示唆)	規模が不明
* 鳥取県西部地震 (2000.10.6, M7.3)	未成熟断層帯	震源が存在する範囲の特定は可能(重力, 弾性波探査による)	微小地震分布からただし断層面過小評価の可能性	露頭調査	共役方向にもリニアメントが存在しているため判定が困難	過小評価の可能性
宮城県北部地震 (2003.7.26, M6.4)	撓曲地帯	(弾性波探査による)	不明 (下部地殻の低速度層がわかっていた可能性がある)	地質断層として確認できた可能性	困難	規模が不明 (周辺歴史地震との対比の可能性)
* 新潟県中越地震 (2004.10.23, M6.8)	活褶曲地帯	(弾性波探査による)	不明	活褶曲帯であること自体が断層の伏在を示唆	活褶曲帯であること自体が断層の伏在を示唆	規模が不明
* 福岡県西方沖地震 (2005.3.20, M7.0)	沿岸部	震源が存在する範囲の特定は可能(弾性波探査による)	震源が存在する領域の特定は可能	困難 (海域のため)	困難 (海域のため)	過小評価の可能性
* 能登半島地震 (2007.3.25, M6.9)	沿岸部	(弾性波探査による)	不明	困難 (海域のため)	陸域は困難 海岸地形に痕跡	ほぼ可能
* 新潟県中越沖地震 (2007.7.16, M6.8)	沿岸部 ただし石油探査による情報多数	(弾性波探査による)	不明	震源が存在する範囲の特定は可能	震源が存在する範囲の特定は可能	規模が不明
* 岩手・宮城内陸地震 (2008.6.14, M7.2)	火山地域	(弾性波探査による)	震源が存在する領域の特定は可能	困難 (第三系が平坦)	困難 (地すべり地帯)	過小評価の可能性
備考	<ul style="list-style-type: none"> ・ 凡例 : 断層の位置が特定できると考えられる : 断層の存在が推定できると考えられる 範囲 : 断層位置を平面的に限定できる場合を示す 領域 : 断層位置を立体的に限定できる場合を示す ・ * を付した地震については, 表 2.1.1-1 で根拠とした資料を基に判定 ・ 福井地震については, 内ほか (1983), 太田・廣内 (1998) を基に判定 ・ 宮城県北部地震については, 東京大学地震研究所, 東北大学総合博物館資料を基に判定 ・ () は, 探査手法など判断の理由を示す 					

2.1.3 強震動評価についての最近の知見

最近の地震および地震動評価の動向を踏まえ, 距離減衰式, 断層モデル, 長周期地震動の問題など, 強震動評価にかかわる新しい知見を以下に示す。

(1) 距離減衰式について

地震動の距離減衰式策定に関しては, 観測装置の能力向上や観測網の充実によるデータ数の増加を反映させるとともに, 震源特性の地域性による違いや, 伝播経路の違いに起因する

ばらつきなどを分離することによる評価手法のばらつき低減による精度向上や、断層の幾何学形状などを考慮した震源近傍における評価への対応などの工夫が進められる傾向にある。近年策定されている距離減衰式のうち主なものを、表 2.1.3-1 に示す。このうち耐専スペクトル (Noda et al., 2002) は、原子力発電所立地のための先新第三系地盤における地震動を評価することを目的として設置された観測網によって得られた記録を用いているものである。その観測網は地震基盤露頭地点と、地震基盤までを含み、かつ先新第三系地盤および表層の未固結地盤のそれぞれ複数の位置に観測点を持つ鉛直アレイとの組み合わせになっている。この観測網を利用することにより、地震基盤への入力地震動の把握、先新第三系地盤内での地震応答特性の影響評価、未固結地盤の影響評価を踏まえた経験的地震動評価を可能にしている。

表 2.1.3-1 主要な距離減衰式一覧

	評価式	適用可能な地震発生様式	主なパラメータ(注1)	備考
1)	Noda et al.(2002)	内陸地殻内地震 プレート間地震 海洋プレート内地震	Mj, Xeq, Vs, Vp	耐専スペクトル
2)	大野ほか(2001)	内陸地殻内地震	Mw, Xeq	
3)	Kanno et al.(2006)	内陸地殻内地震 プレート間地震 海洋プレート内地震	Mw, Xsh	
4)	Zhao et al.(2006)	内陸地殻内地震 プレート間地震 海洋プレート内地震	Mw, Xsh, D	
5)	内山・翠川(2006)	内陸地殻内地震 プレート間地震 海洋プレート内地震	Mw, Xsh, D	
6)	片岡ほか(2007)	内陸地殻内地震 プレート間地震 海洋プレート内地震	A をパラメータにした場合 Mw, A, Xsh	
			D をパラメータにした場合 Mw, D, Xsh	
7)	Abrahamson and Silva(2007)	内陸地殻内地震	Mw, F, Xsh, Ztop, Vs30, Z1.0, Xjb, θ , W, Dip	(注2)
8)	Campbell and Bozorgnia(2007)	内陸地殻内地震	Mw, F, Xsh, Ztop, Vs30, Z2.5, Xjb, Dip	(注2)
9)	Boore and Atkinson(2007)	内陸地殻内地震	Mw, F, Xjb, Vs30	(注2)
10)	Chiou and Youngs(2006)	内陸地殻内地震	Mw, F, Xsh, Ztop, Vs30, Xjb, W, Dip	(注2)
11)	Idriss(2007)	内陸地殻内地震	Mw, F, Xsh	(注2)

(注 1) パラメータ

Mj : 気象庁マグニチュード	Ztop : 断層面上端の深さ(km)
Mw : モーメントマグニチュード	Vs30 : 地表から深さ 30m までの平均 S 波速度(m/s)
Xeq : 等価震源距離(km)	Z1.0 : Vs=1.0km/s 層上面までの深度(m)
Xsh : 断層最短距離(km)	Z2.5 : Vs=2.5km/s 層上面までの深度(km)
Xjb : 断層面の地表投影面までの最短距離(km)	θ : 断層面と観測点間の方位角(deg)
D : 震源深さ(km)	W : 断層面の幅(km)
F : 断層タイプ(横ずれ断層, 正断層, 逆断層)	Dip : 断層面の傾斜角(deg)

(注 2) NGA プロジェクト: Next Generation Attenuation (=次世代地震動距離減衰モデル) プロジェクトの成果

(2) 断層モデルについて

(i) 断層モデル手法について

強震動評価における断層モデルについて、入倉の強震動予測レシピ（入倉，2004）に基づいた特性化震源モデルが標準的なモデルとして国の委員会などで認識されている。以下、その概要を示す。

震源断層と地震モーメントとの間には、全破壊領域の面積と地震モーメントの関係と、震源断層内のアスペリティの総面積と地震モーメントの関係という二つのスケーリング則が存在すると考えられている。このうち前者のスケーリングに関連するパラメータを巨視的パラメータと呼び、後者に関連するパラメータを微視的パラメータと呼ぶ。断層モデルに基づく強震動評価手法とは、これらのスケーリングに則って与えたパラメータによって地震動を理論的に評価する手法ということができる。

巨視的パラメータとして代表的なものは、地震時の全発生モーメントが、全破壊領域の総面積と自己相似の関係にあるとされるものである。これは、断層面全体の平均応力降下量が地震規模によらずほぼ一定であることに起因する（例えば Kanamori et al., 1975; Somerville et al., 1999）。従って、平均応力降下量を経験的に（観測によって）求めることができる震源域において、破壊領域の総面積がある程度特定できる地震であれば、地震モーメントもおのずと求められるため、巨視的パラメータによる理論的な地震動評価が可能となる。

微視的パラメータは、アスペリティに関するパラメータと言い換えることができる。断層の総面積に対するアスペリティの総面積の割合は、Somerville et al. (1999) による統計的な研究と、それ以降の地震についての検討がなされている。これによれば、地震によらず面積比はほぼ一定であるとされており、巨視的パラメータが求められれば、アスペリティの面積まではモデルとして設定することが可能であることがわかる。アスペリティの応力降下量については、Madariaga (1979) によるアスペリティと全体の面積比から推定する手法、円形の断層モデルを便宜的に仮定した場合のアスペリティ面積から推定する手法（Boatwright et al., 1988）、加速度震源スペクトルから推定する手法（壇ほか，2001）などによって求められる。

上記の微視的パラメータの推定によって、アスペリティにおける平均応力降下量を得ることができるが、アスペリティのすべり分布を求めることはできない。そこで、断層面における摩擦構成則と臨界すべり量を用いた動学的シミュレーションによって、全体の平均すべり量に対するアスペリティにおける平均すべり量の比が求められる。ここから、アスペリティの個数、分布、すべり量分布、破壊開始点、破壊進行方向などを、観測および解析結果に基づく統計量から適切に与えることによって、断層モデルによる地震動評価が行われる。

(ii) 断層モデル構築の課題

原子力施設において震源を特定して策定する地震動評価は、断層モデルを用いた理論的な評価と、これを補完する経験的評価（距離減衰式）の組み合わせによって行われる。この断層モデルによる評価は、アスペリティの位置や各種物理量、面積、破壊開始点の位置、応力降下量に大きく依存する。

地震調査研究推進本部による震源断層を特定した地震の強震動予測手法（「レシピ」）（地震調査研究推進本部，2008）に基づく評価では、平均的なパラメータを影響の強い位置に分

布させたり、パラメータや位置をある程度ばらつかせたりしてモデルを構築するが、どの程度のばらつきを持っているのかについての知見が十分あるわけではない。例えば一般的な傾向としては、「地震災害軽減のための強震動予測マスターモデルに関する研究(第1期)(宮腰ほか, 2001)」の成果に見られるように、「現在用いられている特性化震源モデルの方法論, すなわち運動学的インバージョンによって推定されたアスペリティから広帯域の強震動生成が行われていることが, プレート境界地震, スラブ内地震でもそのような特性化が有効であることを示し, アスペリティにおける応力降下量は, 深さに依存して大きくなる特徴があること」などが指摘されている。しかし, この考え方を活断層情報から断層モデルを構築することによって内陸地殻内地震の地震動評価に適用しようとした場合, いくつかの課題が残っている。

第一に, 断層モデルを用いた手法では, 想定する地震の震源断層の地域性が最終的な微視的断層パラメータ, さらに強震動評価結果そのものに対して大きな影響を及ぼすため, 評価する地域での地震観測が従来にも増して重要視されており。活断層が十分調査されていないければ想定地震の規模を誤る可能性が高いことが挙げられる。

第二に, 活断層に関連付けられる地震は, 海洋プレートの沈み込み境界で発生する地震と違って活動間隔が非常に長いため, 過去に起こした地震を歴史資料として把握することが困難であることが多い。このため, 過去の活動の規模や特徴が適切に把握できない可能性が少なからず生じてしまう。地下の断層の存在が確実であっても, 新潟県中越地震の震源域のような活褶曲帯では, 地表に過去の活動履歴が現れにくいいため, 発生する地震の推定はさらに困難である。

第三に, 活断層の地震発生様式が十分にわかっていないことが挙げられる。中央構造線や糸魚川 - 静岡構造線のような長大な活断層は, 複数のセグメントに分かれて活動した履歴がよく知られているが, これらのうちのいくつかと同時に活動した場合に, どのような断層すべりが生じるのかについて複数の考え方がある。一つは個々のセグメントは常に固有地震として固有のすべり量を持っているとするモデル, もう一つは, スケーリングが成立し, 全体としての規模が大きくなれば個々のすべり量も大きくなるというモデルである。前者をカスケードモデル, 後者をスケーリングモデルと呼ぶことがある。また, これらの中間のすべり量になるとする考え方もある。

(3) 長周期地震動について

大都市大震災軽減化特別プロジェクトなどに代表される最近の研究によれば, 首都圏の地盤構造は非常に複雑であり, これらが南海トラフで発生する巨大地震の長周期地震動に大きな影響を及ぼす可能性がわかってきた。また, 2003年十勝沖地震で石油タンクがスロッシングによる被害を受けたことから, 長周期地震動(表面波)の励起特性の地域性に関する研究も進んでいる。この成果に基づき, 連動型の南海トラフの地震(宝永型の地震)を想定すると, 富士川流域や首都圏で大きな地震動が想定されていることが判明している。国土交通省では, 平成21年度までに国土交通省建築基準整備促進事業において長周期地震動についての検討を進め, その成果を「長周期地震動に対する超高層建築物等の安全対策に関する検討」(独立行政法人 建築研究所, 2010)でとりまとめている。そこでは, 主として超高層建築物を対象とした地震動についての課題として

- ・各地点の深い地盤構造に起因する地域固有の卓越周期の考慮
- ・応答の成長の観点から重要な要素である非常に長い継続時間の考慮
- ・短周期地震動と長周期地震動の生起時間帯の差の考慮

が指摘されている。この報告を基に、国土交通省は2010年に「超高層建築物等における長周期地震動への対策試案について」（国土交通省住宅局建築指導課，2010a）と「観測データに基づく設計用長周期地震動の作成について」（国土交通省住宅局建築指導課，2010b）を公表し、長周期地震動の評価と超高層建築物への影響評価手法を提示した。

2.1.4 最近発生した地震がもたらしたその他の知見

2008年岩手・宮城内陸地震は、6月14日岩手県内陸南部の深さ10km付近を震源として発生したM7.2の地震で、震源域直上にある防災科学技術研究所のKiK-net観測網の一関西観測点の地表に設置された加速度計で、上下動3,866Gal、三成分合成で4,022Galという、地表における強震観測史上初めて重力加速度の4倍を超える地震動が観測された。同じ観測点の地下約260mにおいても、上下動640Gal、三成分合成で1,078Galであった。

この極めて大きな地震動の成因として、青井ほか（2010）は、トランポリン効果を提案した。トランポリン効果とは、上下動の振幅が正負で大きく異なり、下向きの加速度がほぼ自由落下の状態で上限となることを示している。このような地震動は、入倉・倉橋（2008）によれば表層の密度が小さく、弾性波速度の小さいモデルを考慮しなくては再現できないとされており、火山地帯（低密度層）、断層直上という当該地域の条件が作用しているものと思われる。

この事例は、トランポリン効果の発生を検討すべきサイトが存在することを示すとともに、サイトが具体的にになった時点でサイト固有の条件により生じうる現象を十分検討することの必要性を示していると考えられる。

2.2 地下深部の地震動評価に関する国の委員会などに関する情報の整理

新耐震指針への改定を踏まえ、原子力施設の安全性を確認するための国の委員会などの動向と、その遂行にあたって取りまとめた最新の知見に対する見解を以下に整理する。

2.2.1 国の委員会などの動向

耐震設計審査指針の改訂に伴って、2007年4月から経済産業省総合資源エネルギー調査会において、また、2007年7月からは原子力安全委員会において、既設原子力施設の耐震安全性の確認（以下、「バックチェック」）に関する調査・審議が開始された。さらに、2007年7月16日に新潟県中越沖地震が既設原子力施設の近傍で発生したため、同地震による原子力施設への影響調査・対策に関する審議がバックチェックに加わることとなった。ここではこれらの審議について、将来の地層処分施設においても重要と考えられる活断層評価および強震動評価にかかわる最新知見、および活断層評価のうち地盤・地質調査に関する内容について取りまとめた。

(1) 経済産業省総合資源エネルギー調査会

2008年9月4日に、原子力安全・保安院は、2007年新潟県中越沖地震を踏まえて、原子力

発電所などの耐震安全性に反映すべき事項について、原子力安全委員会に報告するとともに、原子力事業者などへ耐震バックチェックの中間報告に反映するように通知した（原子力安全・保安院，2008）。この反映事項のうち地震および地震動の評価については、概略が以下のように記されている。

- ・基準地震動 S_s の策定において考慮する検討用地震の評価においては、震源断層モデルのパラメータの不確かさを考慮し、パラメータの設定根拠を明確にすること。
- ・不確かさのパラメータとして選択しなかったものについてもその根拠を明確にすること。
- ・サイトの地下構造特性が地震動に及ぼす影響については、地震観測記録の分析や地下構造データに基づいた適切な地下構造モデルを用いて評価すること。

(2) 原子力安全委員会

原子力安全委員会では、2007年12月27日に耐震安全性評価特別委員会（以下、「耐特委」という）を設置した。耐特委は、バックチェック結果の検討において、活断層評価および強震動評価に関して以下の項目を検討ポイントとして設定した（耐特委，2008a，2008b）。

a 活断層の認定に関する検討ポイント

- ・「地質・地盤に関する安全審査の手引き検討委員会」における「活断層等に関する安全審査の手引き（2008）」（以下、「新手引き」）を参考にして、評価サイト敷地に大きな影響を与える検討用地震に関する活断層調査が行なわれ、活断層の三次元的な構造が可能な限り把握されていること。
- ・調査手法、調査精度および調査結果の信頼性を確認すること。
- ・耐震設計上考慮する活断層の連動性について考慮すること。

b 基準地震動策定に関する検討ポイント

- ・震源を特定して策定する地震動については、活断層調査結果の信頼度や精度を考慮して三次元的な断層相互の位置関係や地震活動を把握した上で検討用地震が選定されていること。また地震発生様式、地震波伝播経路などに応じた諸特性が観測記録の分析結果や活断層調査結果などを踏まえ、基本的な震源モデルが設定されていることが確認されている必要があり、その際には、設定された基本的な震源モデルのパラメータのうち、不確かさ（ばらつき）を考慮したパラメータと考慮しなかったパラメータについて、その根拠が確認されていることをワーキンググループ（以下、「WG」という）で確認すること。特に、震源近傍においては断層モデルによる地震動評価が適切に行われていること。
- ・震源を特定せず策定する地震動については、地震調査研究推進本部による震源を特定しにくい地震の領域ごとの最大地震規模、地域ごとの地震発生層の厚さから評価した地震規模などに基づいて設定した地震動によってその妥当性が検証されていることを確認すること。
- ・入力地震動は、基準地震動 S_s に基づき、以下の3項目をWGで確認すること。
 - 1) 解放基盤表面からの地震波伝播特性を考慮して評価されていること。
 - 2) 地震波伝播特性は、敷地における詳細な地質調査結果に基づき評価し、必要に応じて二次元、三次元的な不均質地盤構造や地盤の非線形性が考慮されていること。
 - 3) 地震波伝播特性は観測記録などによってその妥当性が確認されていること。
- ・地震発生層の上限位置と下限位置の決定方法について、検討が必要である。
- ・震源を特定せず策定する地震動の妥当性の検証方法について、検討が必要である。

2.2.2 国の委員会などにおける活断層評価および強震動評価にかかわる見解

経済産業省総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会や耐特委による「新耐震指針」を踏まえての国の原子力安全・保安院および原子力安全委員会で実施されているバックチェック評価に関する調査・審議の過程において、得られた活断層評価および強震動評価にかかわる見解が示されている。ここでは地層処分施設の地震動評価において参考になると考えられる項目として、「2007年新潟県中越沖地震に関する見解」、「震源を特定して策定する地震動に関する見解」、「震源を特定せず策定する地震動に関する見解」の3項目を対象として調査した。なお、調査に際しては、耐特委での調査・審議結果は国の委員会としての最新知見に基づいていると判断し、主に最近の耐特委での調査・審議内容を重視することとした。

さらに原子力安全委員会の新手続きが制定され、活断層評価および震源断層の設定などに関する考え方が提示されているので、そこでの見解についても調査を行った。

(1) 2007年新潟県中越沖地震に関する見解

2.2.1(1)に示したように、原子力安全・保安院は、2007年新潟県中越沖地震を踏まえて原子力発電所などの耐震安全性に反映すべき事項について、原子力安全委員会に報告するとともに、原子力事業者などへ耐震バックチェックの中間報告に反映するように通知した(2008年9月4日)。これは、2007年新潟県中越沖地震による東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所(以下、「東電柏崎サイト」という)各号機の原子炉建屋基礎盤において観測された地震動が、同規模の地震から推定される平均的な地震動と比較して大きかった要因が以下の3つであったとの分析結果に基づいている。

要因1：震源の影響

- ・短周期レベルが平均的なものより1.5倍程度大きい。
- ・3つのアスペリティのうちの1つが敷地に近く、強い地震動が伝播。

要因2：深部地盤における不整形性の影響

要因3：古い褶曲構造での増幅

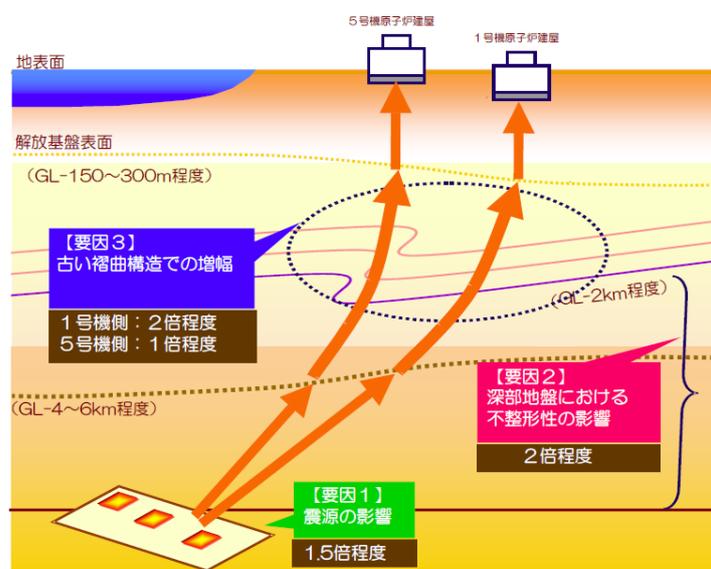


図 2.2.2-1 中越沖地震の地震動が大きかった要因分析(東京電力, 2008)

特に、2007年新潟県中越沖地震の震源特性において短周期レベルが平均的な内陸地殻内地震の1.5倍であったという知見に対して、東電柏崎サイトのバックチェック評価では、震源断層を特定した地震の強震動予測（「レシピ」）（地震調査研究推進本部、2009a）に基づく応力降下量の1.5倍として断層パラメータが設定されている。これについては、原子力安全委員会による「地震動解析技術等作業会合」において各バックチェック対象プラントにおける具体的な地震動評価方法について調査・審議が行われた。この調査・審議において、波形合成法における応力降下量の不確かさを考慮するための手法が示された。さらに、片貝断層による東電柏崎サイトの地震動評価結果の報告がなされ、基本震源モデルに対して応力降下量を1.5倍として計算する場合には、手法の違いにより短周期レベルの結果に差が生じるとの指摘があった。結果として、以下のことが確認された。

断層モデルを用いた手法による地震動評価において、2007年新潟県中越沖地震を踏まえた震源モデルの不確かさを考慮する場合は、地域特性などを踏まえて短周期レベルを1.5倍にする必要がないと判断される場合を除き、短周期レベルが（「レシピ」による）基本震源モデルの1.5倍となる手法で評価される必要がある。

(2) 震源を特定して策定する地震動に関する見解

基準地震動策定において検討用地震を選定する際に重要なことは、精度や信頼性の高い調査結果に基づいて、考慮する活断層を適切に評価することである。ここでは、基準地震動策定に関する耐特委によるバックチェック評価結果に対する検討ポイントのうち、長さの短い孤立断層および長大な起震断層（特に断層の連動）に関してバックチェックの調査・審議過程から得られた見解（a, b）、および想定地震の震源断層が評価地点に近い場合の地震動評価手法の適用性についての見解（c）を示す。

a 孤立断層による地震動評価

孤立断層の震源断層のモデル化に関する見解は以下のようにまとめられる。

- ・孤立断層として評価する必要があると考えられる地表地震断層の長さは、地震発生層上端から下端までの深度差（地震発生層の厚さ）よりも短い。
- ・震源断層の上端と下端が地震発生層の上端と下端に一致するように、断層面を設定する。
- ・地震規模は、地震モーメント M_0 と気象庁マグニチュード M_J の経験的な関係式（武村, 1990, 1998）、もしくは断層長さから松田式（松田, 1975）によって $M_J 6.8$ 以上を想定する。

b 長大な起震断層および複数断層の連動性

複数の活断層の連動性を考慮することによって、長大な起震断層（一つの地震と見なせる連鎖的な活動を起す可能性のある活断層群）を想定した地震動評価を行う必要がある。長大な起震断層による地震動評価および複数断層の連動の可能性に関する見解は以下のようにまとめられる。

- ・長大な起震断層のモデル化において、微視的パラメータについては、基本的に地震調査研究推進本部（2008）による強震動予測手法（「レシピ」）に準拠するが、断層全体の応力降下量については、例えば、無限長の地表垂直縦ずれ断層に対する評価式を用いて算定される。
- ・複数の断層の連動性を評価する場合、地表の断層トレースだけでなく、地下、特に、

地震発生層に対応する深さにおける三次元形状を考慮して、複数の断層の相互作用（波動伝播，静的応力変化 など）を考える必要がある。

- ・ 2つの断層の連動性に関する動力的破壊シミュレーションの試算結果から，地表トレースが近くても地下深部で断層面が離れていく（鉛直断面が「八」の字型）2つの逆断層は連動しにくいこと，地下深部で断層面が近づく（鉛直断面が「X」字型，あるいは，「V」字型）2つの逆断層の方が連動する可能性が高い。

c 耐専スペクトルの適用性

応答スペクトルに基づく地震動評価手法の一つである Noda et al. (2002) の方法による標準応答スペクトル（以下，「耐専スペクトル」）の適用性について，「震源断層の極近傍への適用については，他の距離減衰式などによる検証が必要であるものの極近距離までその適用性には問題のないこと」，さらに「断層モデルによる地震動評価結果との比較から，震源近傍まで両手法による評価結果は概ね調和的であること」が国の委員会で確認された。この結果を踏まえ，震源断層が評価対象地点に近い場合の応答スペクトルに基づく地震動評価に関する留意点について，原子力安全委員会によって以下のように整理され，バックチェック検討ポイントに反映された。

- ・ 各種の応答スペクトルによる手法について，用いられているデータを確認し，敷地近傍に適用するために必要な要件（地震規模，震源距離など）を満足していることが確認されていること。
- ・ 当該敷地において地震観測記録が存在する場合には，これを活用して応答スペクトルによる手法の補正を行うなど，適用する手法の妥当性が確認されていること。
- ・ 応答スペクトルによる手法には，岩盤上の地震動を評価するため，観測記録に含まれる地盤特性が必ずしも適切に評価されていないものがある。応答スペクトルによる手法の適用に当たっては，敷地の地盤特性が適切に考慮されていること。

(3) 震源を特定せず策定する地震動に関する見解

基準地震動策定に関する耐特委による検討ポイントに，震源を特定せず策定する地震動の妥当性の検証方法が追加された。震源を特定せず策定する地震動に関する見解は以下 a～c のようにまとめられる。なお下記 c における震源をあらかじめ特定できない地震の規模の上限については，さまざまな調査研究が進められている状況であり，結論付けるに十分な知見が得られていないことから，引き続きこれに関する知見の収集などを進めることを原子力安全委員会は原子力安全・保安院に指示している。

a 地震動レベルの妥当性の検証

「全国地震動予測地図（地震調査研究推進本部，2009c）」によるあらかじめ震源を特定できない地震の領域ごとの最大規模，サイト周辺領域における歴史地震の最大規模，地震発生層から想定される地震規模に基づいて想定した地震動によって，震源を特定せず策定する地震動レベルの妥当性を検証する。その際に，地震発生層の上下限深さを適切に評価することが重要である。

b 地震動レベルの検討例

地震動レベルの評価については，以下のような検討例がある。

- ・ 歴史地震による最大規模の地震が，敷地から 30 km の位置で発生することを想定。
- ・ 敷地から 30 km 以内に地震発生層を飽和する活断層がある場合，この断層を敷地直下

に設定。

- ・加藤ほか(2004)で参照されている1997年鹿児島県北西部地震および1984年長野県西部地震が敷地直下で発生したと仮定し、これらの地震の観測記録を敷地周辺の地震発生層上端深さまで距離補正。

c 「震源を特定して策定する地震動」による検討の妥当性

上記bの地震動評価の結果、「震源を特定せず策定する地震動」が全周期帯域において、基準地震動を下回る場合には、「震源を特定して策定する地震動」による基準地震動で「震源を特定せず策定する地震動」を代表させることが可能である。

さらに耐特委では、「詳細な地形・地質調査結果から、敷地・敷地近傍に耐震設計上考慮する活断層が認定されていない場合には、地域性を考慮した適切な規模の震源断層を敷地直下に想定し、NFRD効果(Near Fault Rupture Directivity effect: 震源近傍での破壊伝播効果)を考慮した地震動レベルから妥当性を検証する方法」で検証を行うこととし、以下a~cについて、原子力安全・保安院による評価が適切であることを確認した(耐特委, 2009)。

a 震源断層モデルの設定に関する確認

震源断層モデルの設定として、以下の事項などが適切に評価されていること。

- ・断層タイプが、当該地域における応力場などを考慮して想定されていること。
- ・断層の傾斜角が地質調査結果などおよび地域性を踏まえて設定されていること。
- ・地震規模が、全国地震動予測値図(地震調査研究推進本部, 2009c)による震源断層をあらかじめ特定しにくい地震の領域ごとの最大規模を参考に適切に設定されていること。
- ・アスペリティ位置、震源断層モデルのパラメータなどが適切に設定されていること。

b 地震動レベルの検証方法に関する確認

地震動レベルの検証として、作業会合での検討を踏まえ、統計処理が可能な震源近傍の複数点における面的な地震動評価を行い、震源での破壊過程の影響を受ける震源近傍域での平均的な地震動レベルを把握していること。

c 地震動レベルの検証結果に関する確認

震源近傍における平均的な地震動レベルは、震源を特定せず策定する地震動に基づく基準地震動を下回っていること。

(4) 「地質・地盤に関する安全審査の手引き検討委員会」における見解

新手引きは、旧手引きに規定されている事項のうち、活断層などの調査・認定などに関する部分をまず先行して見直し、新たなルールとして策定されている。これは、新耐震指針に基づくバックチェックがすでに進捗していることから、原子力安全委員会による評価結果の検討に際し、新手引きを活用することが重要であるとの観点から、当該部分を先行して定めることとしたとされている(耐特委, 2008)。

新手引きは、新耐震指針の「5. 基準地震動の策定」の本文および解説に関連して、「既存文献の調査、変動地形学的調査、地表地質調査、地球物理学的調査などを適切に組み合わせた十分な調査」および「震源として想定する断層に関する評価」のうち、「耐震設計上考慮する活断層の認定」について方法などを明らかにするために定められたもので、新手引きは新耐震指針の下部規定として、その運用・解釈を明確にするために、活断層調査および評価

に関する考え方を取りまとめたものである。第5回耐特委における資料（耐特委，2008）によれば，新手引きのポイントは以下のとおりである。

- a 旧来のリニアメント重視から地形発達過程（地形の成因を含む）重視への移行
 - ・新耐震指針においては「変動地形学的調査」が導入された点を踏まえ，新手引きでは，リニアメント調査重視を改め，成因を重視した変動地形学的調査，地表地質調査および地球物理学的調査を総合し，活断層に加え，活撓曲や活褶曲などについても十分な調査の実施が必要である。
 - ・断層通過地点の変動だけでなく，段丘面などに現れている傾動などの広域的な変位・変形も検討の対象とすることが必要である。
- b 各手法（既存文献調査，変動地形学的調査，地表地質調査，地球物理学的調査など）による調査結果の総合的な検討の重要性
 - ・新耐震指針では，「地形学・地質学・地球物理学的調査等を総合した十分な調査を行うこと」とされている。
 - ・これらの各手法で調査結果が異なる場合もあり，その場合は，まずそれらの結果を相互比較して個々の結果の妥当性を検証し，最終的に総合的な評価判断が必要となる。
- c 断層の三次元形状の把握の重要性
 - ・耐震設計上考慮する活断層の認定やそれに基づく地震動評価においては，各種の調査手法を組み合わせ活断層の三次元構造を可能な限り把握することが必要である。
 - ・例えば，断層構造が複雑な場合には，三次元弾性波探査など適切な探査法を使用することにより，断層の構造を三次元的に把握できれば極めて有益な情報・データを取得できる。
- d 一貫した活断層の認定の考え方
 - ・活断層の認定は，一貫した認定の考え方により適切な判断を行うこと。
 - ・その際，評価の考え方，評価の根拠となる情報，その精度や信頼性を示すことに努めることが必要である。
- e 必要に応じ調査原資料に立ち返った審査の必要性
 - ・安全審査に当たっては，すべての原資料を確認することは困難ではあるが，できるかぎり原資料を確認することが望ましい。

なお，これらのポイントは，平成22年に取りまとめられた「発電用原子炉施設の耐震安全性に関する安全審査手引き（案）」（耐特委，2010）に反映されている。

2.3 地震動に関する解析検討

2007年新潟県中越沖地震では，深部地盤の不整形性や比較的浅い地層の褶曲構造により地震動が増幅されたと言われている。地層処分施設は，不整形な深部地盤を有する敷地に設置される可能性もあり，かつ数 km 四方の広範囲に及ぶことから，地下深部での地震動の増幅により局部的に大きな地震動を受ける可能性がある。そこで NUMO は，深部地盤構造の不整形性が地震動に及ぼす影響について解析検討し，処分場スケールにおける地下深部地震動の詳細な検討の必要性について考察した。

2.3.1 対象地盤モデル

深部地盤構造による影響検討が比較的進んでいる実在の深部不整形地盤構造の特徴を抽出し、以下の3つのモデルを設定した。

褶曲構造モデル：柏崎サイト周辺地下構造モデル

段差構造モデル：神戸市周辺地下構造モデル

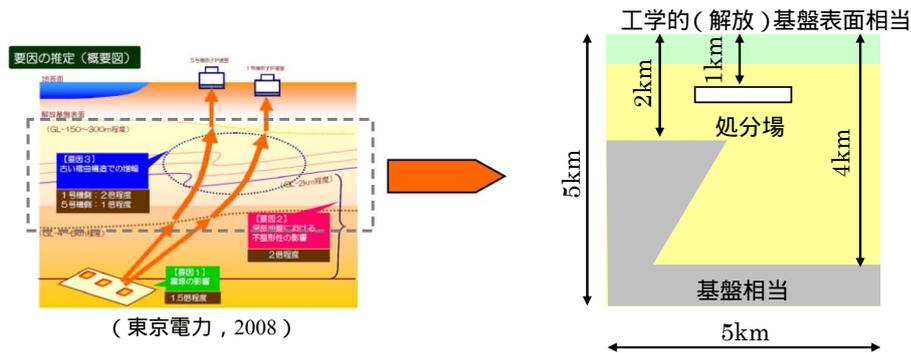
半地溝構造モデル：関東地方地下構造モデル

ここで、地層処分施設の設置深度は最大1 km程度が想定されていること、施設は2 km四方程度の平面的な広がりを呈することなどから、解析モデル(二次元断面)はこれら処分施設の空間的な条件を満たすように設定した。また、ここでは深部地盤構造の不整形性による影響を検討することを目的とするため、地盤条件としては、工学的基盤もしくは原子力施設に適用する基準地震動を策定する解放基盤以深の硬質地盤を想定する。従って、地盤モデルの地表面は、工学的基盤表面あるいは解放基盤表面相当とする。なお、実在する地下構造の不整形形状の特徴のみに着目し、空間スケールおよび地盤物性は必ずしも現実の地盤に対応してはいない。これらを考慮して設定した地盤モデルを図 2.3.2-1 に示す。

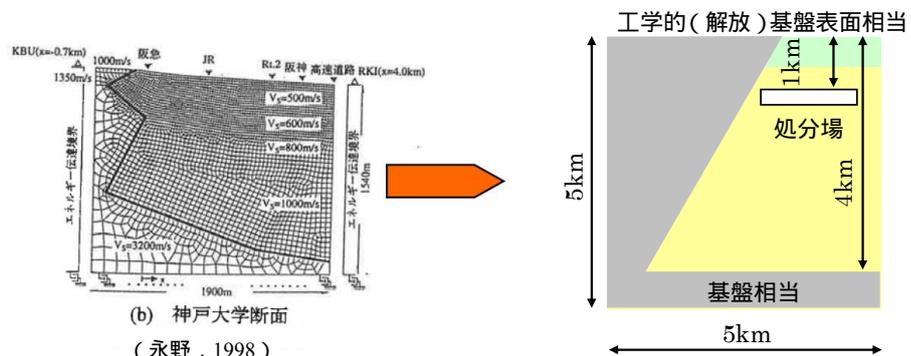
2.3.2 解析手法

深部地盤構造の不整形性による影響検討に用いた解析手法は、二次元動的 FEM 解析(解析コード「SuperFLUSH/2D」)である。解析では、解析領域の底面に粘性境界、側面にエネルギー伝達境界を考慮して地盤の半無限性を評価した。

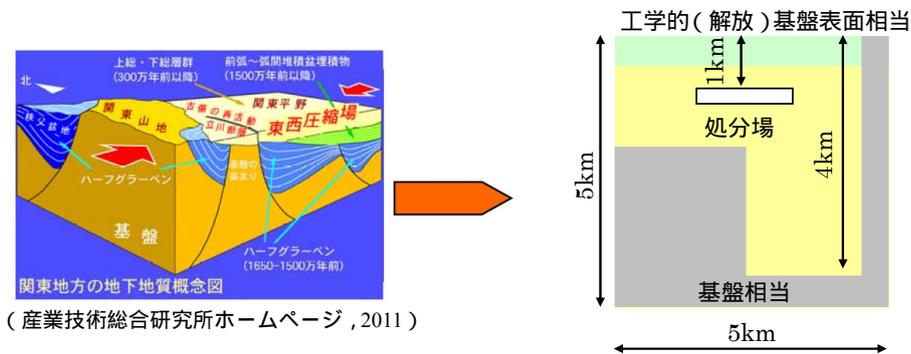
地層処分施設の平面的広がりに対しては長周期地震動への対応、処分場設置位置の岩盤の硬さや搬入機器などの評価に対しては短周期地震動への対応が必要となる。FEM 解析では短周期地震動を適切に評価するためには要素を細かく分割する必要があり、その結果として膨大な計算時間を必要とする。ここでは地盤の卓越振動数と解析領域サイズから、現実的な解析周波数(振動数)範囲として、最大周波数を 10Hz と設定した。解析モデルの例(褶曲構造モデルの例)を図 2.3.2-2 に示す。



(1) 褶曲構造モデル (柏崎サイト周辺地下構造モデル)



(2) 段差構造モデル (神戸市周辺地下構造モデル)



(3) 半地溝構造モデル (関東地方地下構造モデル)

区分識別	地層区分	単位堆積重量 ρ (t/m ³)	S波速度 V_s (m/s)	P波速度 V_p (m/s)	Q値	減衰定数 h	せん断剛性係数 G (t/m ²)	ポアソン比 ν
1	解放基盤相当	2.5	700	1200	50	1.000E-2	1.249E+5	0.25
2	工学的基盤相当	2.6	1200	2100	100	5.000E-3	3.818E+5	0.25
3	基盤相当 (硬質岩盤)	2.7	3000	5200	300	1.667E-3	2.478E+6	0.25

注1) 減衰定数 h は、 $Q=1/2h$ より算出。

注2) せん断剛性係数 G は、 V_s と ρ より算出。

注3) ポアソン比は、 V_s 、 V_p より算出。(ただし、 $V_p = \sqrt{3}V_s$ を仮定。)

注4) 単位体積重量及び弾性波速度を設定する際に、表層の解放基盤層もしくは工学的基盤層については泥岩や砂岩、最下層の基盤層は花崗岩の平均的な物理定数を参照した。

図 2.3.2-1 地盤モデル

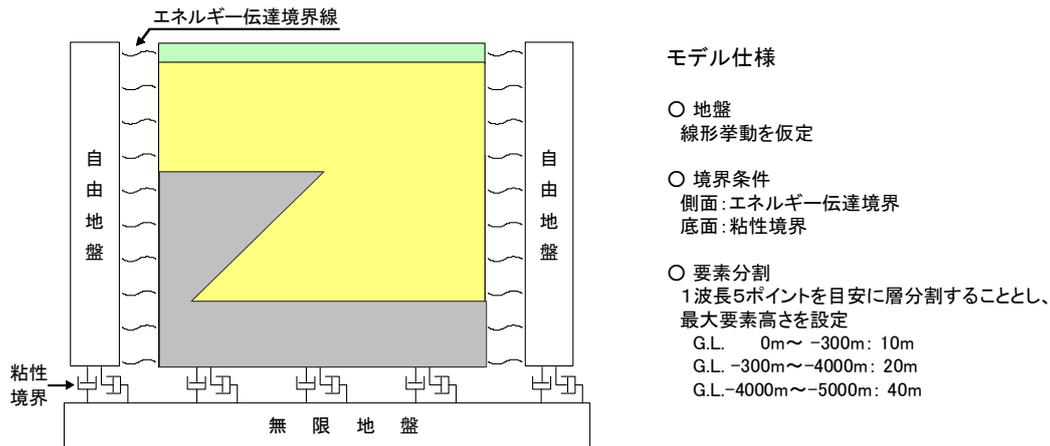
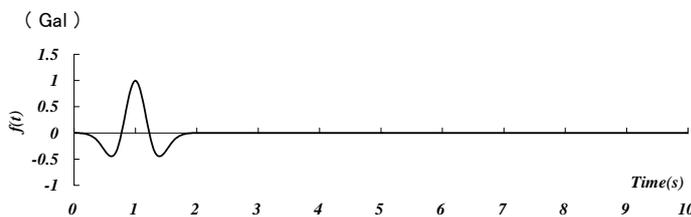


図 2.3.2-2 解析モデル

2.3.3 入力地震動

入力地震動として、単一のパルスを有するリックカー波（大崎，1996）を用いた。リックカー波の中心振動数は、地盤の卓越振動数を参考に 1.0 Hz とした。検討に用いたリックカー波を図 2.3.3-1 に示す。入力は解析モデル底面（地震基盤）から鉛直入射した。

① 時刻歴波形



② フーリエスペクトル

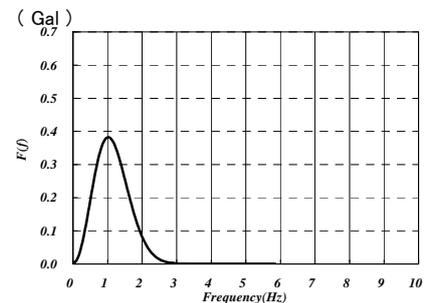
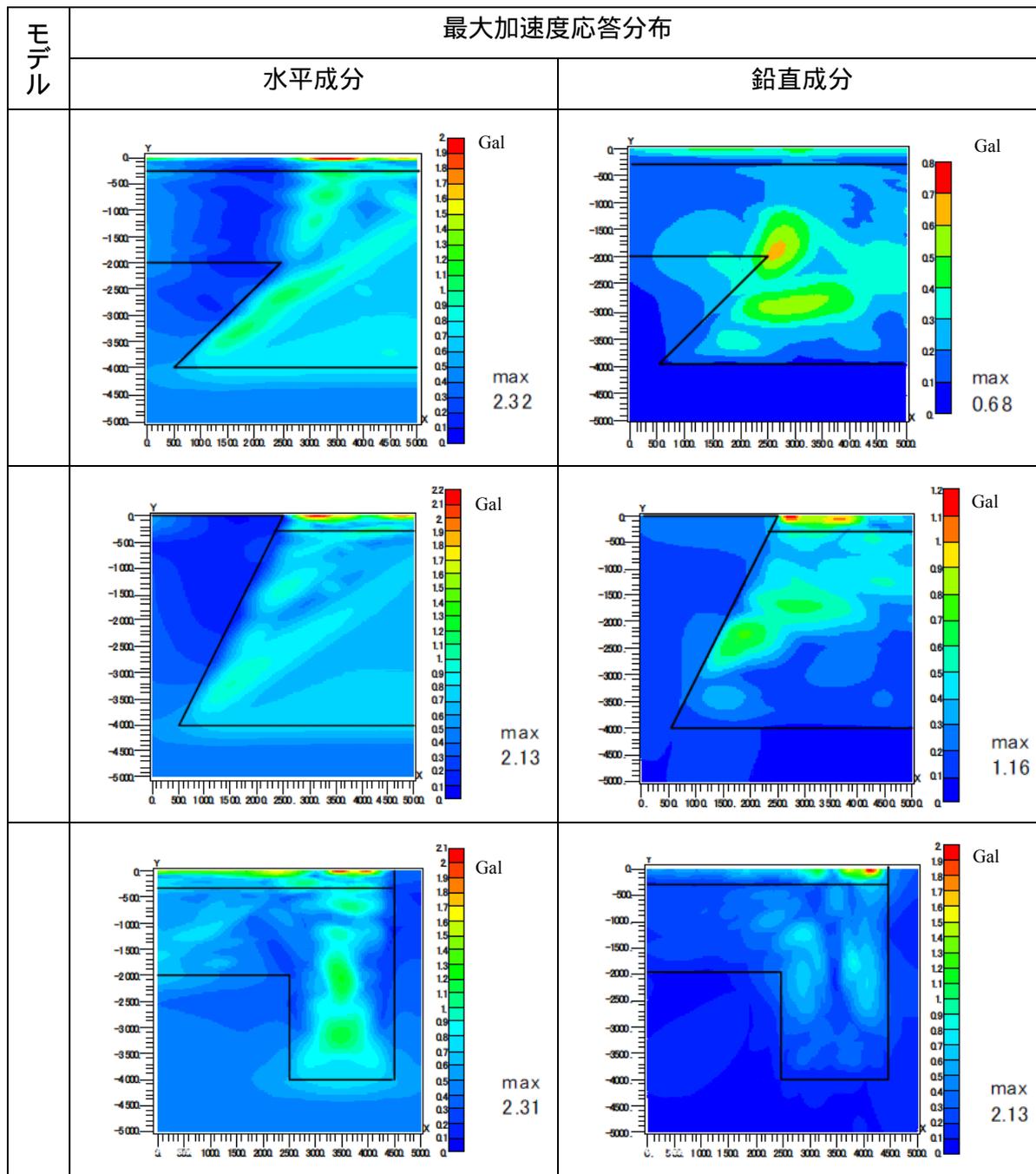


図 2.3.3-1 入力地震動

2.3.4 解析結果と考察

上記(1)～(3)の条件で行った解析結果として、解析領域の最大加速度分布を図 2.3.4-1 に示す。解析結果から以下の知見が得られた。

- ・ 褶曲構造モデル（モデル ）における加速度応答分布の鉛直成分を見ると、同一平面位置において地表より深度 2,000 m 付近の地中の方が大きな加速度が発生している。これから、地中においても地上と同等以上の地震力を受ける可能性があることが確認された。
- ・ 加速度応答分布の水平成分を見ると、同じ物性の地盤においても最大加速度に数倍の差が生じている（例えば、モデル の深度 500 m 付近）。これから、地層処分施設スケール（数 km 四方）では同じ物性の地盤においても、地震力の大きさが数倍異なる可能性があることが示され、地層処分施設への地震影響を適切に把握するためには周辺の詳細な地盤調査や観測された地震の高度な分析が必要であることが確認された。



(注) モデル周辺のメモリは寸法 (単位: m)

図 2.3.4-1 解析結果

2.4 まとめ

最近発生した地震と、それらの地震がもたらした知見と国の委員会などの動向について整理した。近年の地震観測精度の向上にともなう強震動記録の集積により、震源を特定できない地震についての知見や強震動評価にかかわる知見の集積が進められていること、地下の地層構造が地震動にもたらす影響についてさまざまな考察がなされていること、およびそれらが新耐震指針などの国の動向に反映されていることを確認した。

ついで地震動に関する解析検討を行い、地層処分施設を建設する可能性のある深度において地震動が地上に比べて無視できるほど小さいとは限らないこと、また地層処分施設の広さなどこれまでの原子力施設での検討とは異なる要素が存在することを確認した。

これらを踏まえ、地層処分施設への地震影響については、施設周辺の詳細な地盤調査や観測された地震の高度な分析が必要であること、地震動評価には最新の知見を取り込んだ検討が不可欠であることを確認した。

3. 地層処分施設の耐震性評価

3.1 検討方針

原子力関連施設である高レベル放射性廃棄物および地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設は、設計地震力に対して安全が確保されることが要求される。従って、地層処分施設は本来、原子力施設として安全審査指針に準拠して耐震設計を考えていく必要があるが、当該処分施設については、まだ安全審査指針が策定されておらず、耐震重要度分類を始めとした耐震設計の考え方が規定されていない。一方、類似施設である余裕深度処分の安全審査指針である「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。ここで「適切な期間」とは埋め戻しまでの期間とされ、「安全上要求される機能」とは閉じ込め性などが失われないことと示されている。さらに、「廃棄物の取り扱い中の落下事故あるいは一時保管時の転倒事故などを想定しても放射性固体廃棄物が容器に固定化されており飛散する恐れがない場合、含有する放射性物質が飛散することがないように放射性物質が封入されるよう廃棄物が設計されている場合、あるいは取り扱う放射性固体廃棄物の放射性濃度が公衆被ばくの観点から十分低い場合には、耐震設計上の重要度分類 C クラスの施設に対応するものと定め、これに適合しない場合には、耐震設計上の重要度分類 B クラスの施設に対応するものとする」と記述されている。

また、原子力発電所など原子力施設の設計に用いる地震動については、「発電用原子炉施設の耐震設計審査指針」(原子力安全委員会, 2006)で規定されているが、本指針は 2006 年 9 月に最新の知見を反映した上で改訂され、新しい基準地震動の考え方、策定方法が導入された。主な改訂点は以下のとおりである。

基準地震動を二種類規定するという考え方を改め、これまでの策定方針を統合し高度化した基準地震動 S_s を一種類のみ規定し、水平方向に加え鉛直方向の地震動も考慮
弾性設計用地震動を導入

基準地震動の策定方法には、「敷地毎に震源を特定して策定する地震動」と「震源を特定せず策定する地震動」を考慮

「敷地毎に震源を特定して策定する地震動」の検討用地震の選定においては、「内陸地殻内地震」、「プレート間地震」、「海洋プレート内地震」に分類し、地震動評価法については、「応答スペクトル法に基づく評価」に加え「断層モデルによる評価」も適用

地層処分施設の耐震安全性は、公衆被ばく防止の観点や操業中の作業安全確保の観点に加え、地下深部の構造物であることなど処分場の構造的な特徴を考慮して総合的に検討すべき課題と考えられる。現状、地層処分に関する指針類が未整備であることから、ここでは、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新耐震指針に準じて模擬的に作成し、予察的な検討を行った。

なお、サイトが特定できない現段階においては、坑道の諸元や地盤モデルについては、「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 - , 分冊 2 地層処分の工学技術」(JNC, 1999) (以下, 「第 2 次取りまとめ」という), 「TRU 廃棄物処分技術検討書 - 第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ-」(電事連・JNC, 2005) (以下, 「第 2 次 TRU レポート」という) に示されている条件を踏まえ設定した。

3.2 既往検討の概要

3.2.1 検討対象施設

地層処分施設の概要を図 3.2.1-1 に示す。既往の検討では, 操業中の空洞安定性に対して耐震安全性の評価が実施されており, 第 2 次取りまとめでは, 処分坑道(水平坑道)とアクセス坑道(立坑)が, 第 2 次 TRU レポートでは処分坑道が検討対象とされている。

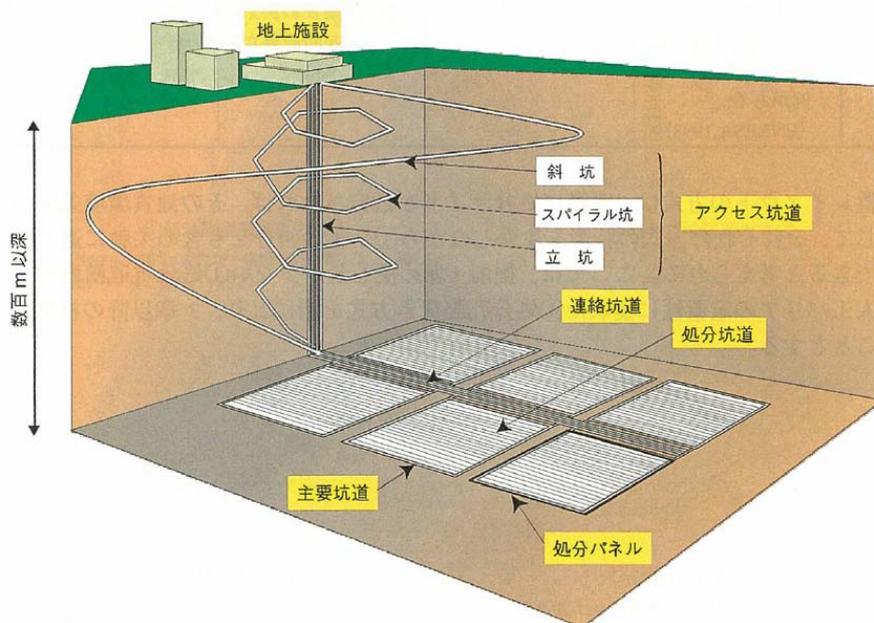


図 3.2.1-1 処分施設の基本概念

3.2.2 検討用地震動

第 2 次取りまとめおよび第 2 次 TRU レポートのいずれも, Imperial Valley 地震(震央地: 米国カリフォルニア州南部, 32.7° N, 115.5° W, マグニチュード: M=6.7, 観測地: 南シアラ電力会社エルセントロ発電所(震央付近)) (宇津ほか, 1987) の地震動を用いている。本地震の観測波形を最大加速度が約 1,000 gal になるように補正して地表面での水平方向の地震動として定義されている。

3.2.3 処分場の地盤条件

第 2 次取りまとめでは, 硬岩および軟岩が対象とされており, 第 2 次 TRU レポートでは, 軟岩が対象とされている。これらは, 処分場のサイトが特定されていないため, 日本国内の代表的な地盤として, 動力炉・核燃料開発事業団(以下, 「PNC」という)が整備した, 岩

石・岩盤特性データベース（PNC，1992）などに基づいて設定されたものである。

3.2.4 坑道の構造

検討対象とされた坑道の諸元を表 3.2.4-1 に示す。

表 3.2.4-1 坑道の諸元

		第2次取りまとめ				第2次 TRU レポート
		処分坑道		立坑		処分坑道
		硬岩	軟岩	硬岩	軟岩	軟岩
断面形状 (内径)		D 5.0 m (幌形)	D 5.0 m (三心円)	D = 6.5 m (円形)	D = 6.5 m (円形)	D = 12.0, 10.0, 8.0 m (円形)
支保工仕様	一次 支保工	吹付けコンクリート t=0.05 m	吹付けコンクリート t=0.5 m	坑口部：覆工コンクリート t=1.5 m 本体部：吹付けコンクリート t=0.1 m	坑口部：覆工コンクリート t=1.5 m 本体部：覆工コンクリート t=0.5 m	吹付けコンクリート t=0.3 m
	二次 支保工	/	/	/	/	吹付けコンクリート t=0.3m
坑道離間 距離		ctc10 m	ctc12.5 m	-	-	ctc39.6 m ~ ctc27.6 m
深度		1,000 m	500 m	最大 1,000 m	最大 500 m	500m (D=12.0, 10.0, 8.0 m) 300 m (D=10.0, 8.0 m)

3.2.5 耐震安全性評価指標

第2次取りまとめ，および第2次 TRU レポートのいずれも，岩盤の局所安全係数の分布範囲，最大せん断ひずみの分布範囲，および支保工応力度を，空洞安定性に対する耐震安全性の評価指標としている。

3.2.6 解析方法

第2次取りまとめでは，自重解析（初期応力算定），および掘削解析を行った常時応力と，検討用地震動を地盤モデルに入力した一次元波動伝播解析による最大せん断応力分布から設定した等価震度を有限要素モデルに静的に作用（応答震度法）させて求めた地震時増分応力を重ね合わせ，地震時応力状態を算定している。

第2次 TRU レポートでは，基本的に第2次取りまとめと同様であるが，地震時増分応力を静的解析ではなく，二次元動的 FEM 解析により算定している。

3.2.7 既往検討の結論

第2次取りまとめおよび第2次 TRU レポートのいずれにおいても，岩盤の地震時増分応力は，常時応力に比較して小さく，岩盤の最大せん断ひずみ，および局所安全係数分布は常時からほとんど変化せず，また，支保工の応力度は評価基準値以下であると報告されている。したがって，掘削後の常時において十分な空洞安定性が確保されていれば，地震時にも空洞安定性は確保されると結論付けられている。

3.3 検討用地震動の設定

適用した地震動の設定について説明する。

まず，新耐震指針において改訂された地震動に関する項目は次のとおりである。

- ・ 旧指針で規定されていた基準地震動を二種類策定 (S_1, S_2) するという考え方を改め，これまでの策定方針を統合して高度化した基準地震動 S_s の一種類のみを策定することとした。さらに，基準地震動 S_s は，敷地における解放基盤面において，従来の水平方向に加え鉛直方向の地震動も策定することとした。
- ・ 基準地震動 S_s に基づいて，工学的判断により弾性設計用地震動 S_d を設定することとした。
- ・ 基準地震動 S_s の策定方法について，「敷地毎に震源を特定して策定する地震動」と「震源を特定せず策定する地震動」を定めることとした。
- ・ 「敷地毎に震源を特定して策定する地震動」の検討用地震の選定においては，「内陸地殻内地震」，「プレート間地震」，「海洋プレート内地震」という地震発生様式などに着目した分類によることとした。
- ・ 「敷地毎に震源を特定して策定する地震動」の地震動評価法については，「応答スペクトル法に基づく評価」に加え「断層モデルによる評価」も適用することとした。

表 3.3-1 には，原子力安全・保安院，JNES パンフレット「新しい耐震設計審査指針」(2007) から基準地震動に関する改訂点を整理したものの抜粋を示す。

また，この新耐震指針に適合させるべく最新の知見を取り入れた指針として，具体的な地震動の策定方法などを記した「JEAG4601-2008 原子力発電所耐震設計技術指針」(日本電気協会，2008) が作成された。

表 3.3-1 新耐震指針の基準地震動に関する改訂点(原子力安全・保安院，JNES パンフレット「新しい耐震設計審査指針」(2007)に加筆)

基準地震動	基準地震動 S_s	地震学及び地震工学的見地から施設の供用期間中に極めてまれにはあるが発生する可能性があり，施設に大きな影響を与えるおそれがあると想定することが適切な次の地震動を検討して想定します。なお，旧指針では基準地震動は水平方向のみ定められていましたが，新指針では水平方向に加え鉛直方向も定めることとしています。
	敷地ごとに震源を特定して策定する地震動	地震発生様式ごとに複数の「検討用地震」を選び，「応答スペクトルによる評価」と「断層モデルによる評価」を行います。
	震源を特定せず策定する地震動	震源と活断層の関連付けが難しい内陸地殻内の地震に対して，全ての敷地で考慮すべき地震動です。旧指針の「直下地震」に代わるものに位置づけられます。
	弾性設計用地震動 S_d	安全機能の保持を確実にするために用いる地震動で，この地震動に対して施設の地震応答が概ね弾性範囲に収まることを確認します。

適用した地震動は、マグニチュードと等価震源距離から地震動の応答スペクトルを算定できる距離減衰式に基づいた経験的な方法（新耐震指針でいう「応答スペクトル法に基づく評価」に該当する。以下、「経験的な方法」）により設定した。検討対象のサイトが定まっていないことから保守的な評価を行うために、地震動の応答スペクトルのコントロールポイントは、最大の応答スペクトルを与える極近距離の値とした。また、極近距離のコントロールポイントは、マグニチュードと領域（等価震源距離）に応じて各4種類示されているが、これらのうち、周期 0.02 秒の応答速度が最も大きいマグニチュード $M_j = 8.0$ 、等価震源距離 $X_{eq} = 25$ km のコントロールポイントを採用することとした。地震基盤における水平地震動のコントロールポイントを表 3.3-2 に示す。また、この表に基づく地震基盤の水平地震動の応答スペクトルを図 3.3-1 に示す。なお、マグニチュード $M_j = 8.0$ は、日本国内で発生した内陸地殻内地震としては最大規模の地震である。

検討用地震動の応答スペクトルが対象とする地盤は、検討対象の解析モデル下端がせん断波速度 $V_s = 2.2$ km/s 以上であることから、経験的な方法に示されるせん断波速度 $V_s = 2.2$ km/s 以上の応答スペクトルのコントロールポイントを用いることとした。

検討用地震動の模擬地震波は、上記の応答スペクトルに経験的な方法に示される地震動の経時特性を付与し、「JEAG4601-2008 原子力発電所耐震設計技術指針」（日本電気協会，2008）に示される模擬地震波の作成例を参考に正弦波の重ね合わせにより作成した。

検討用地震動の時刻歴波形を図 3.3-2 に、速度応答スペクトルを図 3.3-3 に示す。

表 3.3-2 地震基盤における水平地震動のコントロールポイント
 (JEAG4601-2008 原子力発電所耐震設計技術指針（日本電気協会，2008）に加筆)

	M	X_{eq} (km)	コントロールポイントの座標 pS_v (cm/s)							
			A	B	C	D	E	F	G	H
			T_A (s)	T_B (s)	T_C (s)	T_D (s)	T_E (s)	T_F (s)	T_G (s)	T_H (s)
領域			0.02	0.09	0.13	0.30	0.60	1.00	2.00	5.00
極近距離	8.5	40	1.62	18.44	27.32	47.87	68.05	64.66	53.52	40.06
	8	25	1.69	20.05	28.96	48.22	67.80	65.25	52.51	38.35
	7	12	1.40	17.20	24.84	33.86	43.42	36.42	25.15	17.85
近距離	6	6	1.04	12.82	18.51	21.84	23.17	17.41	9.64	3.88
	8.5	80	0.73	7.36	11.43	22.92	34.79	32.58	27.60	21.96
	8	50	0.67	7.45	11.17	20.05	28.65	27.06	22.70	17.19
	7	20	0.78	9.44	13.64	19.10	24.83	20.69	14.46	10.37
中距離	6	8	0.77	9.45	13.65	16.23	17.18	12.73	7.16	2.89
	8.5	160	0.26	2.22	3.67	9.45	15.17	14.83	13.64	12.26
	8	100	0.32	3.08	4.86	10.27	16.04	14.96	12.73	10.37
	7	50	0.23	2.65	4.01	6.02	7.64	6.68	4.87	3.64
遠距離	6	25	0.21	2.49	3.60	4.54	4.84	3.98	2.07	0.86
	8.5	200	0.18	1.44	2.43	6.87	11.17	11.17	10.67	10.04
	8	200	0.10	0.80	1.35	3.82	6.21	6.21	5.93	5.58
	7	125	0.046	0.43	0.70	1.34	1.81	1.59	1.26	1.05
	6	78	0.041	0.45	0.65	0.95	1.03	0.80	0.49	0.22

pS_v の値は、減衰定数 5% の擬似速度応答スペクトルの絶対値

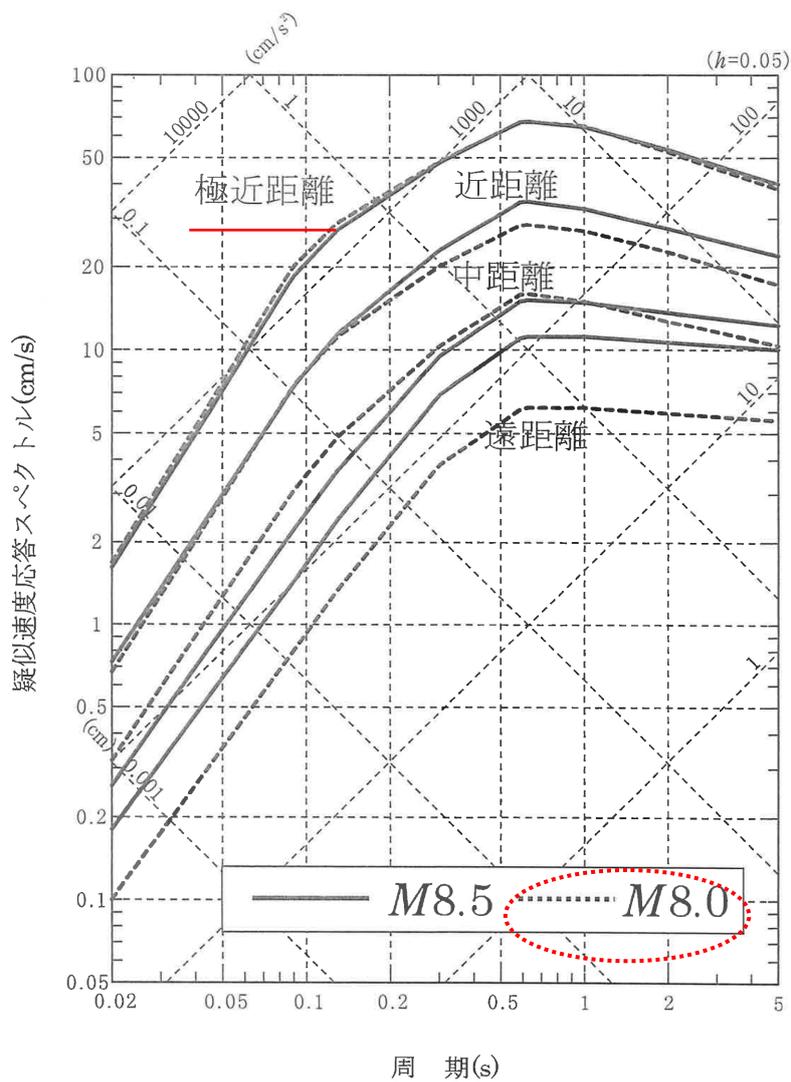
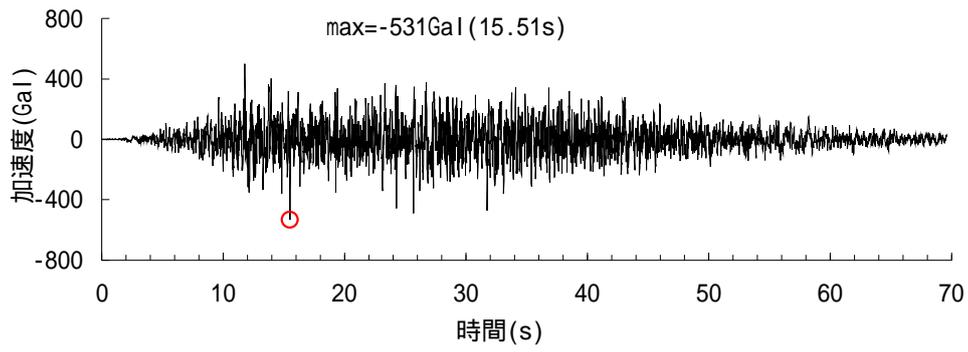
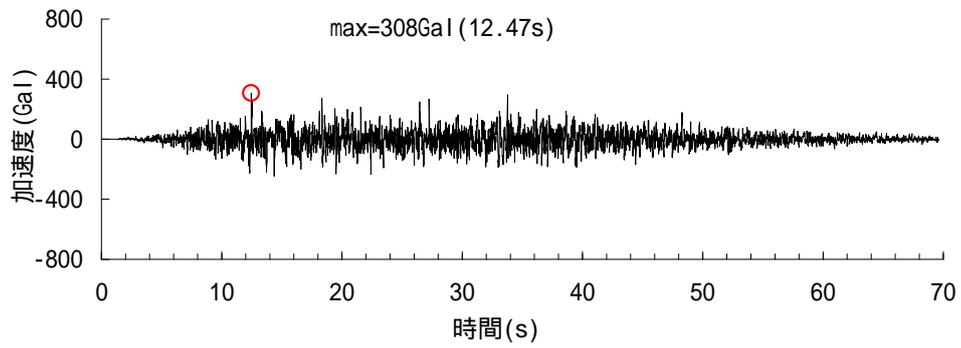


図 3.3-1 コントロールポイントに基づく地震基盤の水平地震動の応答スペクトル
 (JEAG4601-2008 原子力発電所耐震設計技術指針 (日本電気協会, 2008) に加筆)



(a) 水平方向



(b) 鉛直方向

図 3.3-2 検討用地震動の時刻歴波形

— 本検討における検討用地震動(2E:GL-1200m)【水平】
 — 本検討における検討用地震動(2E:GL-1200m)【鉛直】

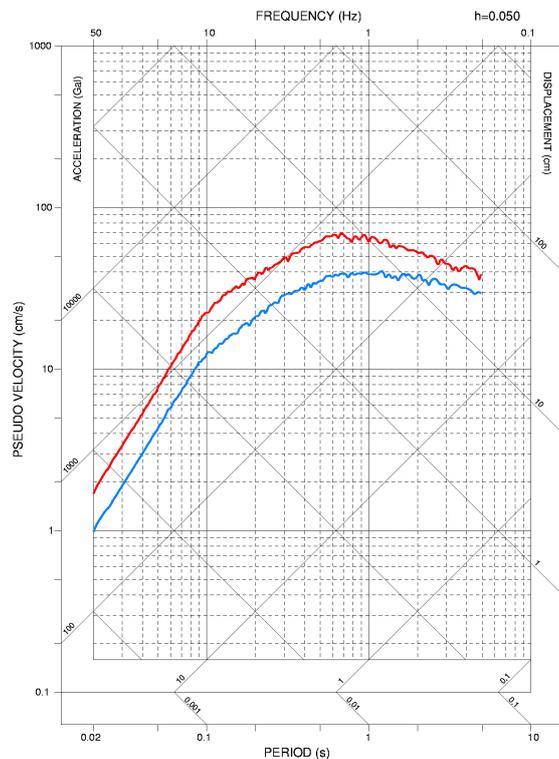


図 3.3-3 検討用地震動の応答スペクトル

3.4 処分坑道の耐震性評価

3.4.1 検討条件

(1) 地盤条件

処分場のサイトが特定できない現段階では、既往検討と同様に、第2次取りまとめにおいて岩石・岩盤特性データベース（PNC，1992）などに基づいて選定された岩盤モデル（軟岩系岩盤）を検討用の地盤とした。なお、第2次 TRU レポートでは、Model-1（砂質岩 - 泥質岩 - 砂質岩の三層構造）と Model-2（泥質岩の単層モデル）の2種類の地盤モデルが設定されている。Model-1 における空洞設置位置である泥質岩中の応答は、インピーダンス比の異なる砂質岩による反射波（下降波）の影響により Model-2 に比べて大きくなるという特徴がある。このため、地盤モデルには耐震安全性の評価結果が厳しくなる Model-1 を用いた。岩盤モデルを図 3.4.1-1 に、岩盤物性値一覧を表 3.4.1-1 に示す。

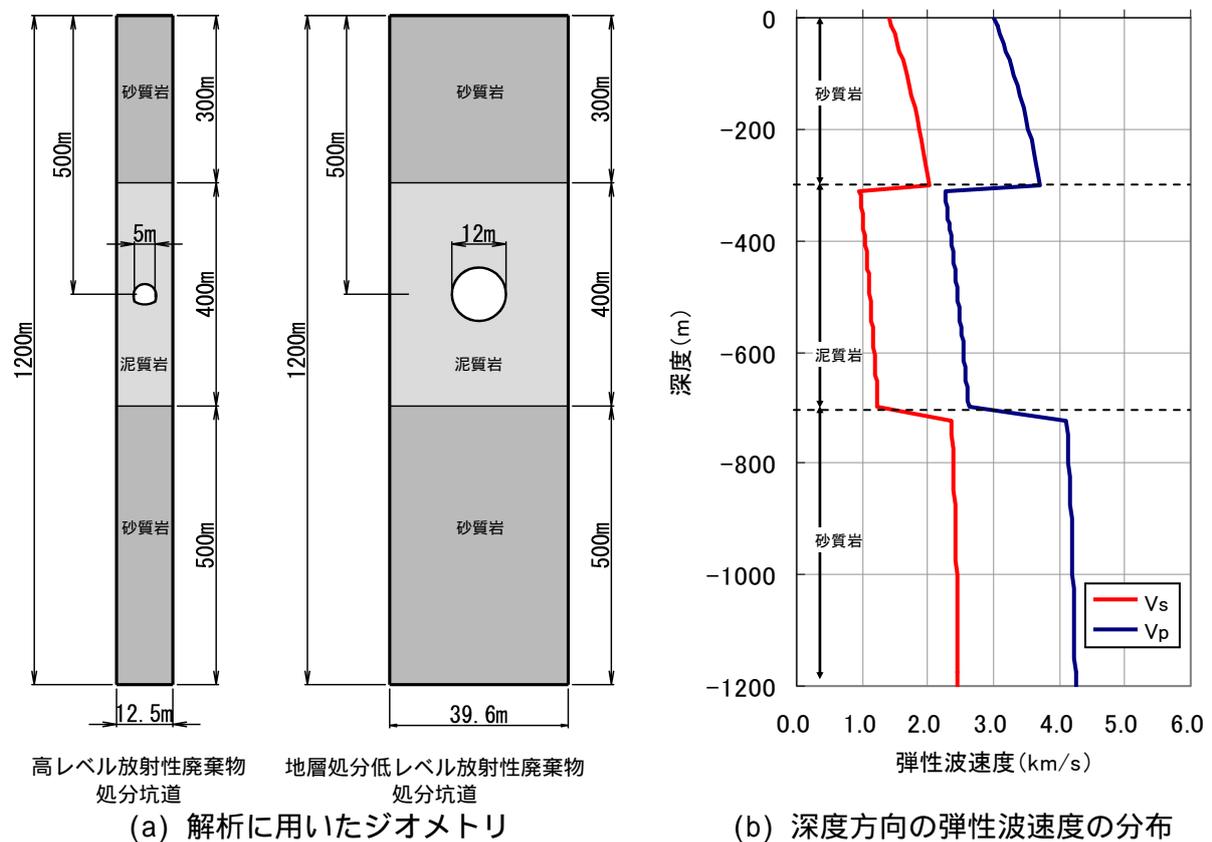


図 3.4.1-1 岩盤モデル

表 3.4.1-1 岩盤物性値一覧（軟岩系岩盤）

項目		物性値	設定根拠（出典）
飽和密度 (Mg/m ³)		2.2	第2次取りまとめ 付録A 岩盤特性の設定 p.A-25 表A-9より設定
引張強度 t_t (MPa)		2.1	
粘着力 c (MPa)		3.0	
内部摩擦角 (°)		28	
静弾性係数 E (MPa)		3,500	
静ポアソン比		0.30	
初期側圧係数 K_0 (初期応力設定時に使用)		$164/h+0.74$ (h: 深度(m)) ただし, $K_0 = 2.0$	
泥 質 岩	弾性波(P波)速度 V_p (km/s)	$1.8+1.4\{1-\exp(-0.000572ph)\}$	第2次 TRU レポート根拠資料集 3-7 処分坑道の地震時安定性評価 p.5 表-2より設定
	弾性波(S波)速度 V_s (km/s)	$0.6+1.0\{1-\exp(-0.000661ph)\}$	
砂 質 岩	弾性波(P波)速度 V_p (km/s)	$3.0+1.3\{1-\exp(-0.00120ph)\}$	
	弾性波(S波)速度 V_s (km/s)	$1.4+1.1\{1-\exp(-0.00128ph)\}$	
動せん断弾性係数 G_d (MPa)		$G_d = V_s^2$	
動ポアソン比 μ_d		V_p, V_s から算定	
減衰定数 h		0.02	
限界せん断ひずみ ϵ_0		1.34×10^{-2}	限界ひずみ $\epsilon_0 = 1.03 \times 10^{-2}$

(2) 構造条件

処分場のサイトが特定できていないため、第2次取りまとめおよび第2次 TRU レポートと同様の坑道諸元（断面形状，支保工，坑道離間距離，深度）を設定した。

地層処分低レベル放射性廃棄物処分坑道については，保守的な設定とし，第2次 TRU レポートにおける最大深度，最大径を採用した。坑道諸元を表 3.4.1-2，および表 3.4.1-3 に示す。支保工の弾性係数は，掘削時は若材齢で荷重を受けることから若材齢強度に基づく値を，地震時は硬化後に荷重を受けることから材齢 28 日強度に基づく値を設定した。ただし，地層処分低レベル放射性廃棄物処分坑道は大断面のため上下分割掘削を想定していることから，下半掘削時の上半支保工の弾性係数は，打設後の時間経過を考慮して材齢 28 日強度に基づく値とした。

表 3.4.1-2 高レベル放射性廃棄物処分坑道の諸元

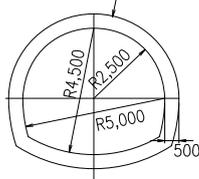
項目		諸元	設定根拠（出典）
断面形状		R 2.5 m (三心円) 吹付けコンクリート 	第2次取りまとめ 処分場の設計に関する検討 p. -252 より設定
支保工仕様	一次支保工	吹付けコンクリート t=0.5 m (掘削解放力(掘削時に受ける荷重)を考慮)	
	二次支保工		
設計基準強度 f_{ck} (kN/m ²)		40,000	第2次取りまとめ 処分場の設計に関する検討 p. -260 表 4.2.2-27 より設定
弾性係数 E(MPa)		4,000 (若材齢) 31,000 (材齢 28 日)	
ポアソン比		0.20	
密度 (Mg/m ³)		2.3	
減衰定数 h		0.05	第2次 TRU レポートを参照し，一般的なコンクリート構造物の値として設定
坑道離間距離		ctc12.5 m	第2次取りまとめ 処分場の設計に関する検討 p. -257 より設定
深度		500 m	第2次取りまとめ 処分場の設計に関する検討 p. -252 より設定
支保工の評価基準値 c_a (kN/m ²)		30,909	第2次 TRU レポートを参照し，NATM 設計施工指針（日本鉄道建設公団，1996）の仮設構造物の許容応力度より設定

表 3.4.1-3 地層処分低レベル放射性廃棄物処分坑道の諸元

項目		諸元	設定根拠 (出典)
断面形状		<p>内径 R = 6.0m (円形)</p> <p>吹付けコンクリート 吹付けコンクリート</p> <p>12,000 300 300</p>	第 2 次 TRU レポート 根拠資料集 3-7 処分坑道の地震時安定性評価 p.2 表-1 より設定
支保工仕様	一次支保工	吹付けコンクリート t=0.3 m (掘削解放力(掘削時に受ける荷重)を考慮)	
	二次支保工	吹付けコンクリート t=0.3 m	
設計基準強度 f_{ck} (kN/m ²)		36,000	第 2 次 TRU レポート 根拠資料集 3-7 処分坑道の地震時安定性評価 p.6 表-3 より設定 下半掘削時の上半の支保工は設計基準強度に基づいた剛性とする
弾性係数 E(MPa)		4,800 (若材齢) 29,600 (材齢 28 日)	
ポアソン比		0.20	
密度 (t/m ³)		2.3	
減衰定数 h		0.05	
坑道離間距離		ctc39.6 m	第 2 次 TRU レポート p.3-29 より, 掘削径の三倍として設定
深度		500 m	第 2 次 TRU レポート 根拠資料集 3-6 処分坑道の力学的安定性評価 (硬岩地盤) p.13 表-8, 3-7 処分 坑道の地震時安定性評価 p.2 表-1 より設定
一次・二次支保工の 評価基準値 c_a (kN/m ²)		27,818	第 2 次 TRU レポートを参照し、NATM 設計施工指針 (日本鉄道建設公団, 1996) の仮設構造物の許容応力度より設定

3.4.2 検討方法

(1) 検討手順

ここでは、初期応力状態から掘削、支保工構築までの常時応力状態を二次元静的 FEM 解析により、地震時増分応力を二次元動的 FEM 解析により求めた。次いで、これらを重ね合わせた応力状態に対して地震時安全性検討を行うことを基本とした。なお、検討結果の説明は、適宜、足し合わせた応力状態、あるいは地震時増分応力状態により行った。また、検討対象時刻は、処分坑道にとって厳しい評価となるように坑道上下端間で相対変位が最大となる時刻とした。ここで、動的 FEM 解析では、最新知見を反映して、水平動、および鉛直動を同時に入力した地震応答解析を実施した。検討フローを図 3.4.2-1 に示す。

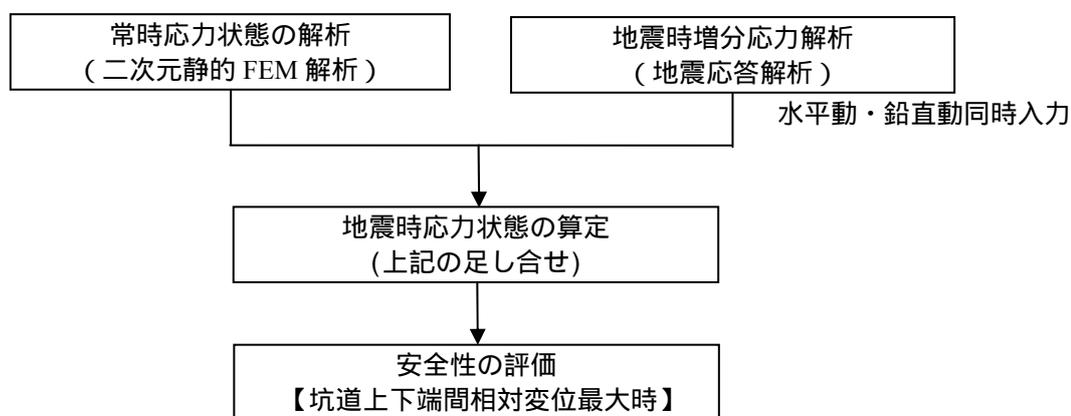


図 3.4.2-1 検討フロー

(2) 解析モデル

解析モデルは、常時応力状態の解析、および地震時増分応力解析で共通の FEM モデルを用いることとし、以下の考え方に基づき設定した。高レベル放射性廃棄物処分坑道の解析モデル図を図 3.4.2-2 に、地層処分低レベル放射性廃棄物処分坑道の解析モデル図を図 3.4.2-3 に示す。

(i) モデル化領域・境界条件

水平方向のモデル化領域は、第 2 次取りまとめおよび第 2 次 TRU レポートと同様に、対称条件を考慮して隣接坑道の中心間距離（高レベル放射性廃棄物処分坑道：12.5 m，地層処分低レベル放射性廃棄物処分坑道：39.6 m）とした。鉛直方向のモデル化領域は、第 2 次 TRU レポートと同様、地表面から G.L.-1,200 m の範囲とした。

常時応力状態の解析の境界条件は、第 2 次取りまとめと同様、モデル底面を固定境界、モデル側方を鉛直ローラーとした。この境界条件は、坑道が水平方向に同じ間隔で連続している処分坑道の特徴を踏まえたものである。

地震応答解析の境界条件は、モデル底面を粘性境界とし、モデル側方は、坑道が水平方向に同じ間隔で連続していることを模擬するため、モデル左右端の節点の水平方向、鉛直方向の応答が同一となる境界とした。

側方の境界条件

〔常時：鉛直ローラー
地震時：モデル左右端の節点の水平方向，
鉛直方向の応答が同一となる境界〕

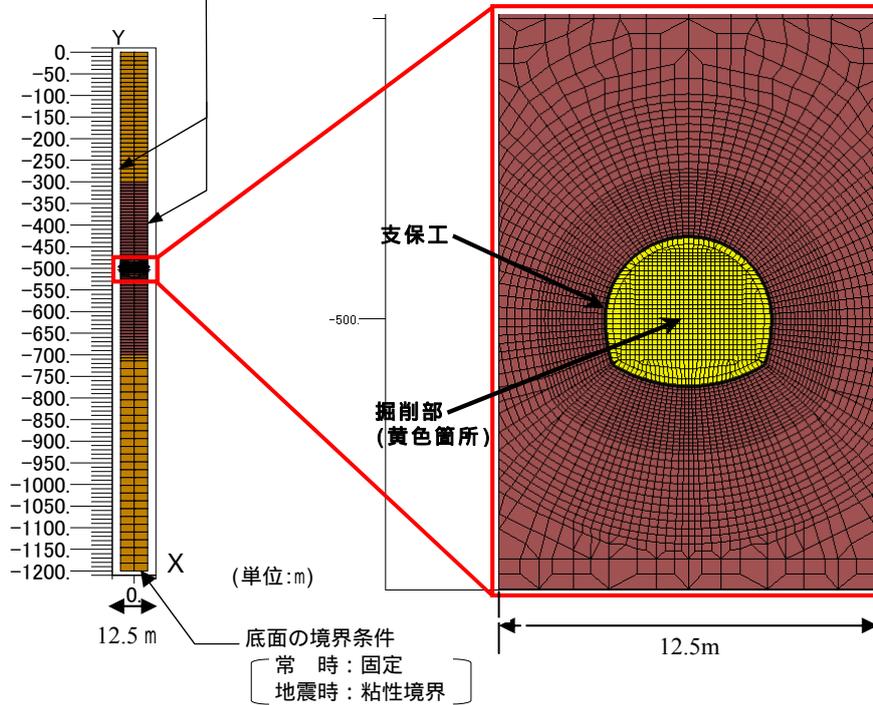


図 3.4.2-2 高レベル放射性廃棄物処分施設の処分坑道解析モデル

側方の境界条件

〔常時：鉛直ローラー
地震時：モデル左右端の節点の水平方向，
鉛直方向の応答が同一となる境界〕

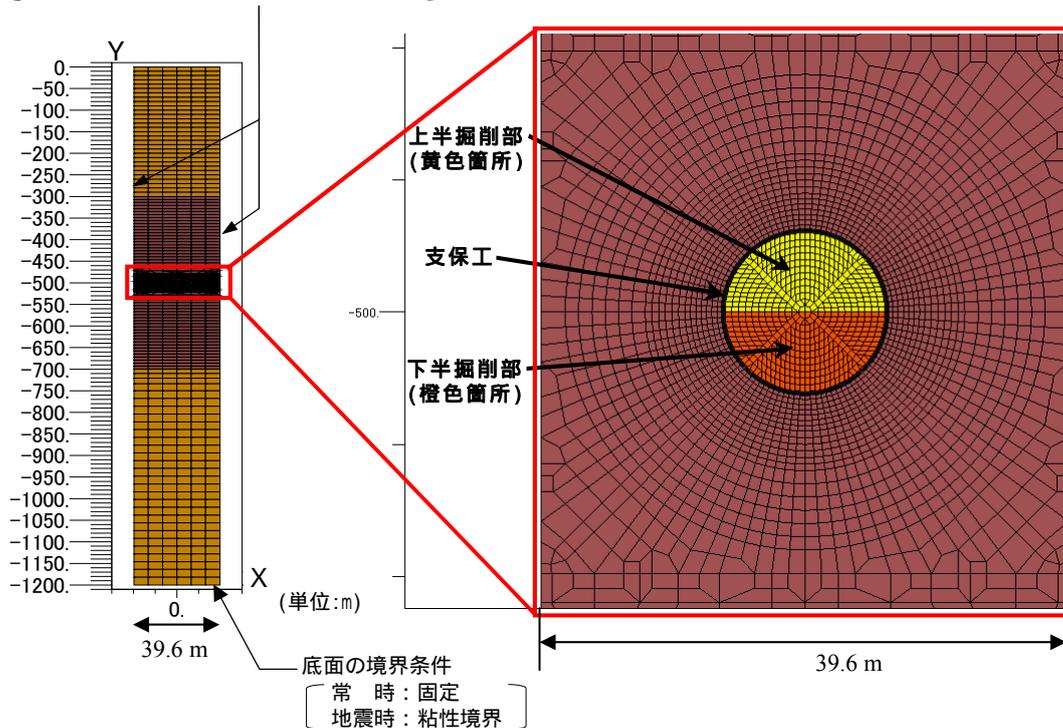


図 3.4.2-3 地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設の処分坑道解析モデル

(ii) 岩盤のモデル化

岩盤はソリッド要素でモデル化した。要素高さは、25Hz までの地震動の透過能を考慮し、(3.4.2-1) 式に示す高さ以下とした。

$$\text{最大要素高さ(m)} = \frac{1}{5} \times \frac{\text{岩盤のせん断波速度(m/s)}}{25(\text{Hz})} \quad (3.4.2-1)$$

要素幅は、要素形状が極端な不等辺形状とならないよう、要素高さの3~5倍を目安とした。また、処分坑道付近では、支保工厚（高レベル放射性廃棄物処分坑道：500 mm，地層処分低レベル放射性廃棄物処分坑道：300 mm+300 mm=600 mm）以下の要素幅とした。

常時応力状態の解析に用いる岩盤の剛性は、第2次取りまとめでは線形としているが、第2次 TRU レポートでは非線形特性を考慮している。ここでは、第2次 TRU レポートと同様に電中研式モデル（本島ほか，1978）を参考に、非線形特性を考慮した。岩盤剛性の非線形モデルの概要を図 3.4.2-4 に示す。地震応答解析では、掘削により空洞周辺岩盤にゆるみ領域が生じるため、ゆるみ領域の剛性を低下させておく考え方もあるが、第2次 TRU レポートの際に実施された検討結果では、ゆるみ領域の剛性を低下させたケースより、低下させないケースの方が安全側の評価となっていたため、ゆるみ領域の剛性低下は考慮せず、岩盤の剛性は線形とした。

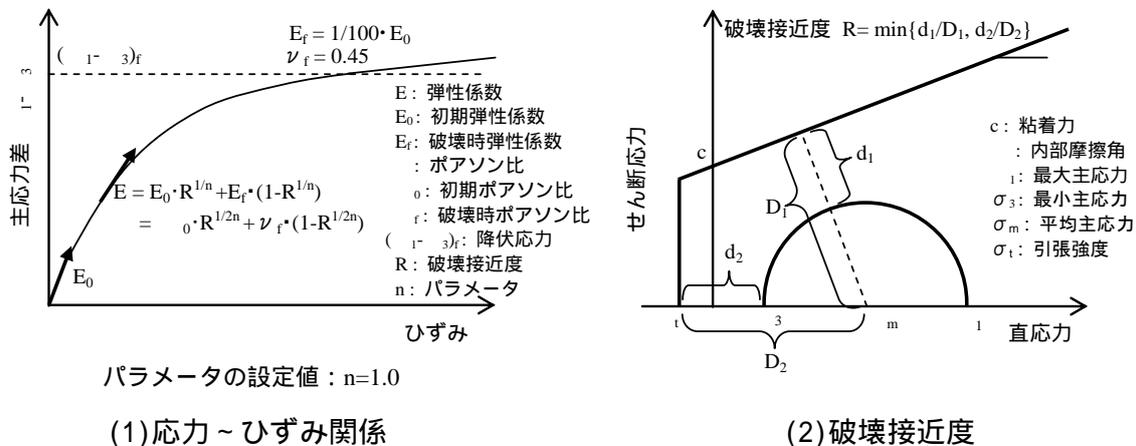


図 3.4.2-4 岩盤剛性の非線形モデルの概要

(iii) 支保工のモデル化

高レベル放射性廃棄物処分坑道の支保工については、第2次とりまとめにおける坑道の耐震安定性評価においてビーム要素としてモデル化されていることから、本検討でもこれと同様とした。一方、地層処分低レベル放射性廃棄物の処分坑道の支保工については、第2次 TRU レポートにおける評価において、曲げモーメントを負担しないトラス要素でモデル化されている。しかし、本検討では、想定している支保工厚が 300 mm と大きいことから、曲げモーメントをある程度負担するものと考え、ビーム要素でモデル化することとした。

(3) 解析ステップ

常時応力状態の解析では、地山の初期応力設定から、掘削、支保工構築までの施工ステップを再現した解析を行った。ここで、掘削時の掘削解放率は第2次取りまとめ、および第2次 TRU レポートと同様に 65 %とした。

なお、掘削解放率を用いた解析手法は、坑道掘削時の切羽の支保効果を二次元解析で表現するために用いられてきたものであり、一回の掘進長に相当する解放力を素掘りの岩盤に載荷し、次に支保工を設置した後に残りの解放力を載荷する手法である。掘削解放率は図 3.4.2-5 に示す解放率特性曲線から設定されるものであり、掘削解放率 65%は、素掘りで掘削される一掘進長は一般に 1 m 程度で、想定している処分坑道では切羽からの距離 L/D が 0.2 以下になることから、 L/D が 0.2 の場合の値として設定されたものである。

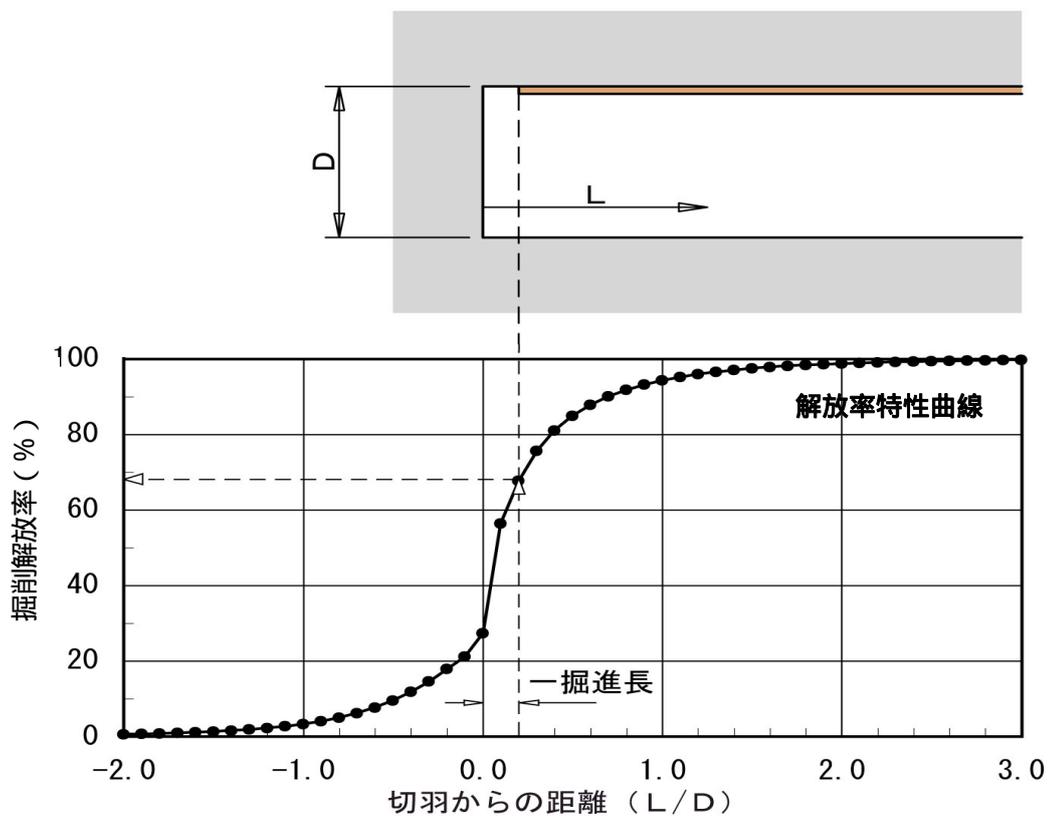


図 3.4.2-5 切羽からの距離と掘削解放率

(4) 耐震安全性評価指標

既往検討と同様に、岩盤については最大せん断ひずみおよび局所安全係数の分布を評価指標として耐震安全性を評価した。評価基準は、最大せん断ひずみが(3.4.2-2)式に示す桜井ほか(1994)の限界せん断ひずみを超える領域、および(3.4.2-4)式に示す局所安全係数が1.2以下となる領域の広さが、「NATM 設計施工指針」(日本鉄道建設公団, 1996)に規定されている坑道掘削径の20%以下であることを目安とした。

また、支保工についても既往検討と同様に、最大圧縮応力度より耐震安全性を評価した。評価基準値は、「NATM 設計施工指針」に規定される仮設構造物の許容応力度とした。

以下に、岩盤の限界せん断ひずみ、局所安全係数、支保工の最大圧縮応力度、評価基準値の算定方法を示す。

(i) 岩盤

a) 限界せん断ひずみ ϵ_0

限界せん断ひずみは下式で算定する。なお、(3.4.2-3)式は、桜井ほか(1994)が限界ひずみの上限値として設定したものである(図 3.4.2-6 参照)。

$$\epsilon_0 = (1 + \nu) \epsilon_c \quad (3.4.2-2)$$

ここで、 ν : ポアソン比

ϵ_c : 下式で定義する一軸状態での限界ひずみ

$$\log \epsilon_c = -0.25 \log E - 0.85 \quad (3.4.2-3)$$

E : 弾性係数

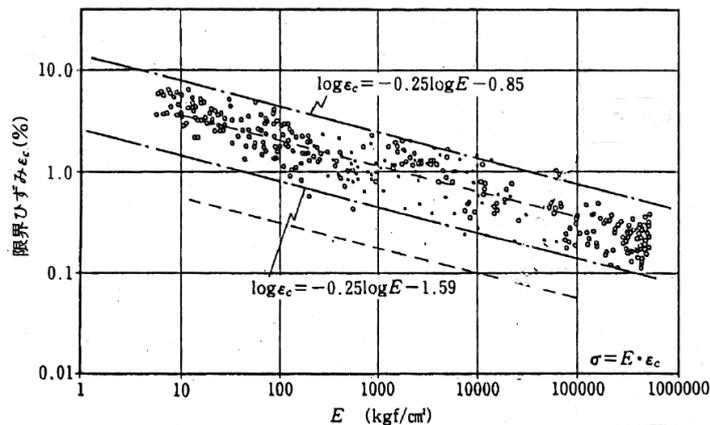


図 3.4.2-6 限界ひずみと弾性係数の関係(桜井・足立, 1988)

b) 局所安全係数 f_s

局所安全係数は下式で算定する(図 3.4.2-7 参照)。

$$f_s = \frac{1}{1 - R} \quad (3.4.2-4)$$

ここで、

R : 引張破壊およびせん断破壊に対する破壊接近度

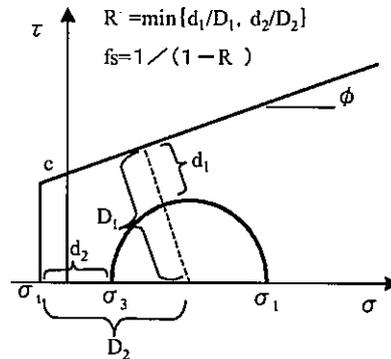


図 3.4.2-7 局所安全係数 f_s の定義

(ii) 支保工

a) 最大圧縮応力度 c

支保工コンクリートの最大圧縮応力度は下式で算定する。

$$c = N/A + M/Z \quad (3.4.2-5)$$

ここで、

- N : 解析で得られたビーム要素の軸力
- M : 解析で得られたビーム要素の曲げモーメント
- A : 部材の断面積
- Z : 部材の断面係数

b) 評価基準値 c_a

支保工コンクリートの評価基準値 c_a (kN/m²) は下式で算定する。

$$c_a = 0.85 \cdot f_{ck} / \gamma_t \quad (3.4.2-6)$$

ここで、

- f_{ck} : 設計基準強度 (kN/m²)
- γ_t : 構造物係数 (= 1.1)

3.4.3 高レベル放射性廃棄物処分施設の処分坑道の耐震性評価

(1) 最大応答値分布

地震応答解析の結果得られたモデル中心断面の最大加速度 (α_x , α_y), および岩盤の最大せん断ひずみ (γ_{max}) の深度方向分布を図 3.4.3-1, および図 3.4.3-2 に示す。これらの図には, 処分坑道がない地盤の応答と比較するため, 図 3.4.2-2 に示す岩盤モデルに対して実施した一次元波動伝播解析の結果を合わせて示す。

水平方向加速度 (α_x), 鉛直方向加速度 (α_y) とともに一次元波動伝播解析との差は小さい。また, 最大せん断ひずみ (γ_{max}) は坑道の上部および下部で一次元波動伝播解析より大きくなっているが, 他の深度では一次元波動伝播解析との差は小さい。一次元波動伝播解析との差が見られた坑道上部, および下部の γ_{max} の最大値は 5×10^{-4} 程度であり, 限界せん断ひずみ 1.34×10^{-2} と比較して十分に小さい。すなわち, 処分坑道は地震時に岩盤に追従するような挙動を示しており, 処分坑道が地盤の応答性状に与える影響は小さいことが確認された。

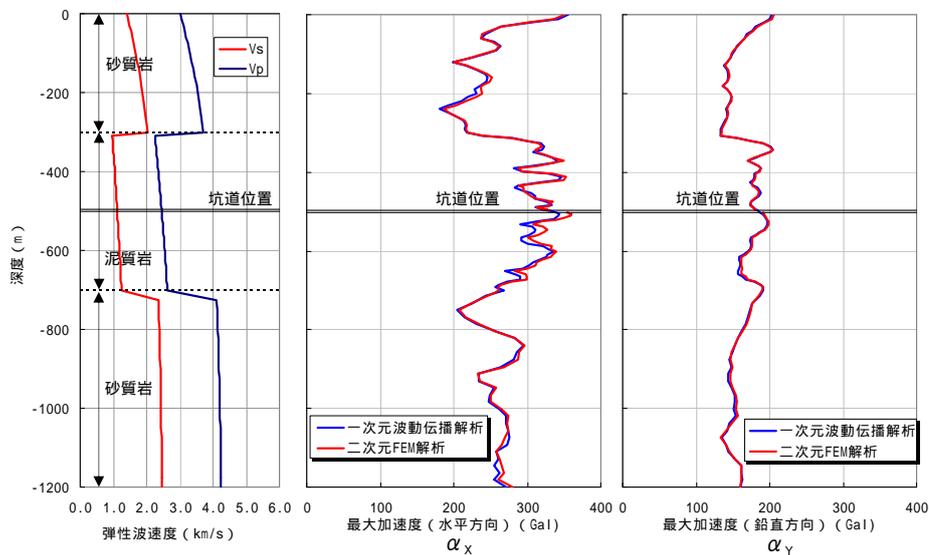


図 3.4.3-1 モデル中心断面の最大加速度の深度方向の分布

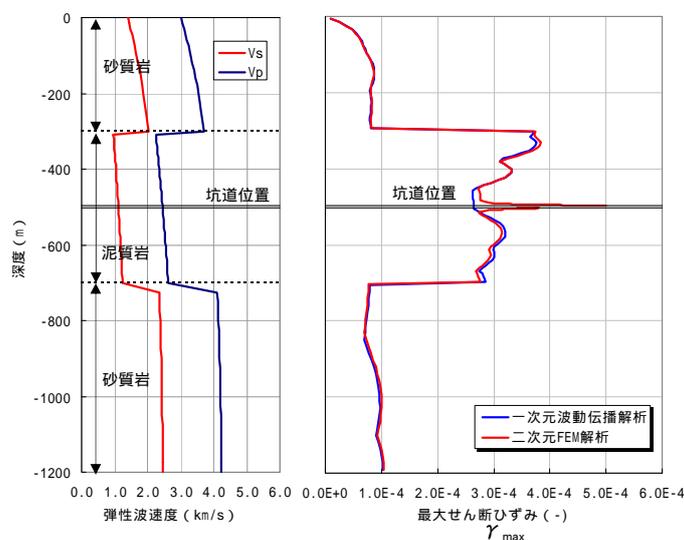


図 3.4.3-2 モデル中心断面の最大せん断ひずみの深度方向の分布

(2) 岩盤の最大せん断ひずみ

常時および地震時の坑道上下端間の相対変位（水平方向）が最大となる時刻における岩盤の最大せん断ひずみ（ ϵ_{max} ）の分布を図 3.4.3-3 に示す。常時および地震時いずれも最大せん断ひずみが限界ひずみを上回る領域広さは坑道掘削径の約 20%以下の範囲に収まっている。また、最大せん断ひずみは常時と地震時でほとんど変化が見られず、処分坑道周辺岩盤に与える地震の影響は小さいことが確認された。

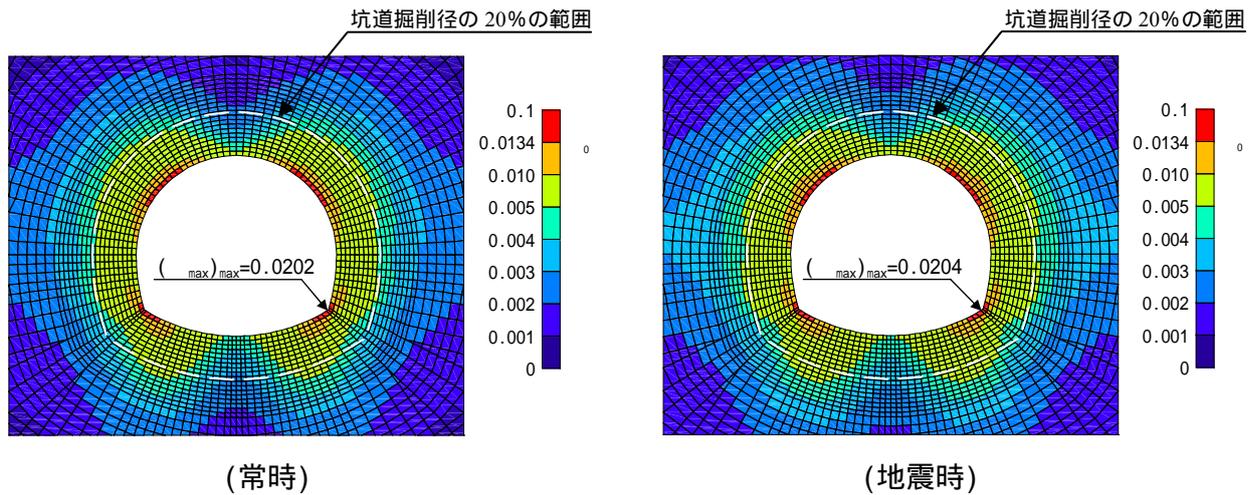


図 3.4.3-3 最大せん断ひずみの分布

(3) 岩盤の局所安全係数

常時および地震時の坑道上下端間の相対変位（水平方向）が最大となる時刻における岩盤の局所安全係数分布を図 3.4.3-4 に示す。常時および地震時いずれも局所安全係数が 1.2 を下回る領域広さは坑道掘削径の約 20%以下の範囲に収まっている。また、最大せん断ひずみと同様に、局所安全係数は常時と地震時でほとんど変化が見られず、処分坑道周辺岩盤に与える地震の影響は小さいことが確認された。

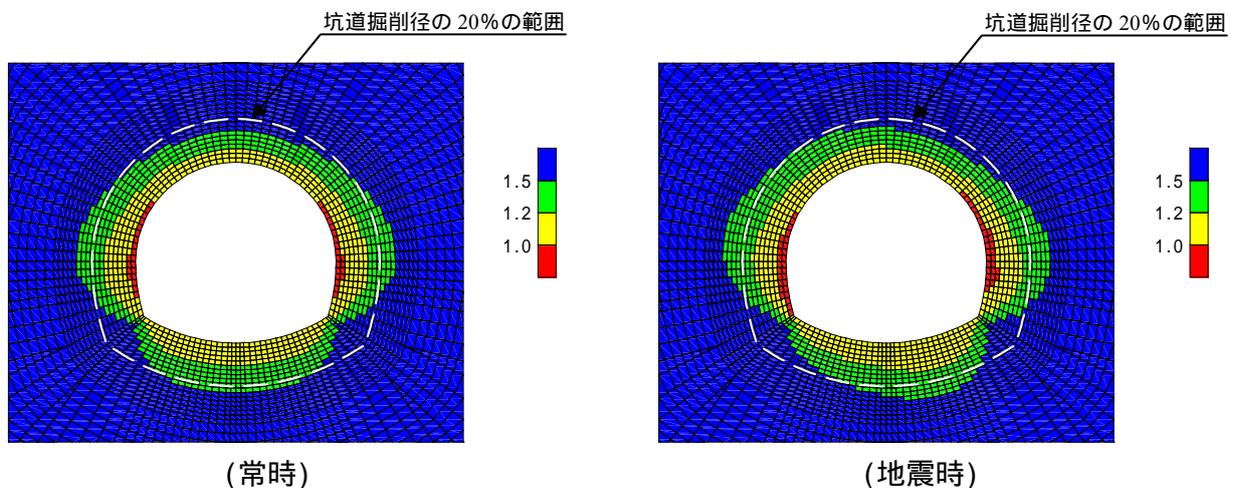


図 3.4.3-4 局所安全係数の分布

(4) 支保工の断面力

地震時の坑道上下端間の相対変位（水平方向）が最大となる時刻における坑道周辺の地震時増分変位を図 3.4.3-5 に示す。同図には支保工の変形を判りやすく示すため、変形前の支保工の形状をインバート中心位置を一致させて地震時の変形に重ねた図を合わせて示す。支保工は頂部が左側に変形しており、頂部とインバートの相対水平変位は 2.3 mm となっている。

また、この時刻における地震時増分断面力を図 3.4.3-6 に示す。アーチとインバートが剛結された支保工構造に対して図 3.4.3-5 に示す変形が生じた場合、図 3.4.3-7 に示す空洞左上から右下の対角線上では圧縮軸力および岩盤側引張の曲げモーメント，右上から左下の対角線上では引張軸力および内空側引張の曲げモーメントが発生する。図 3.4.3-6 に示す増分断面力は，このような断面力が地震応答解析でも生じていることを示している。

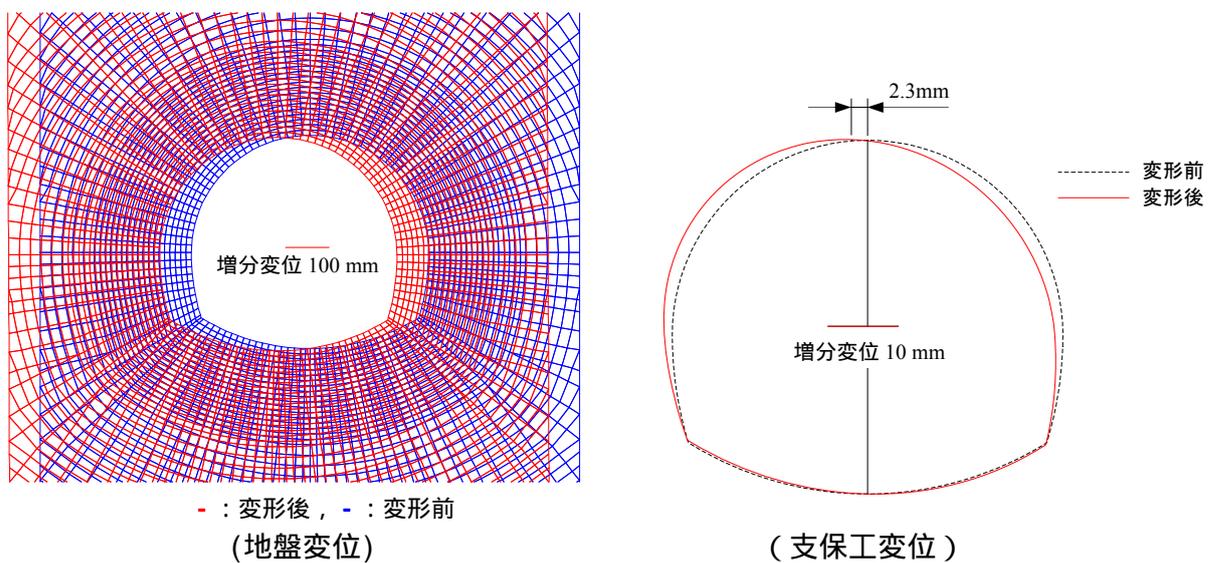


図 3.4.3-5 地震時増分変位図

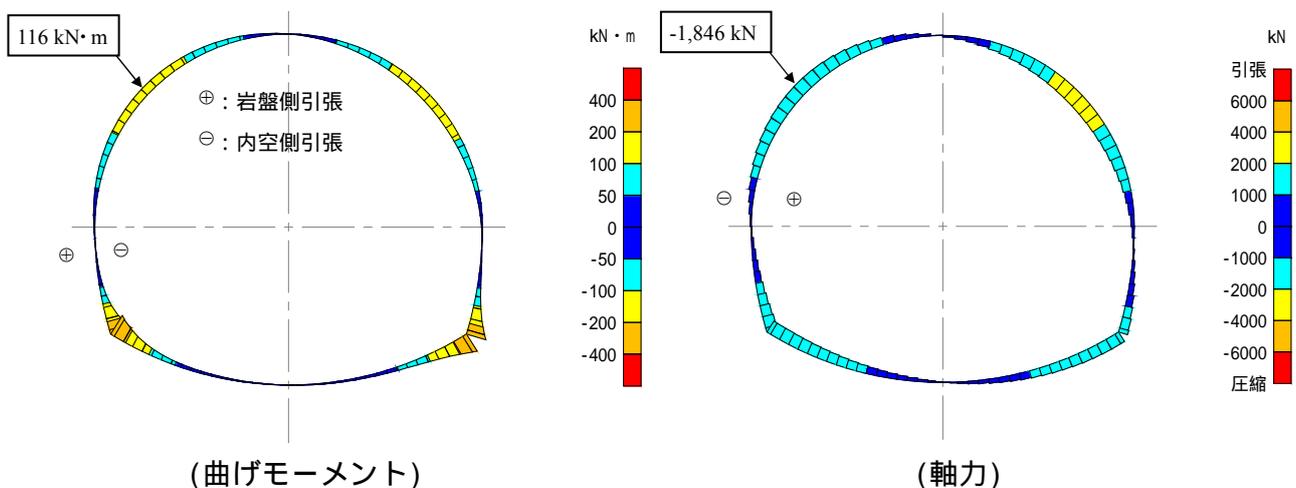


図 3.4.3-6 地震時増分断面力図

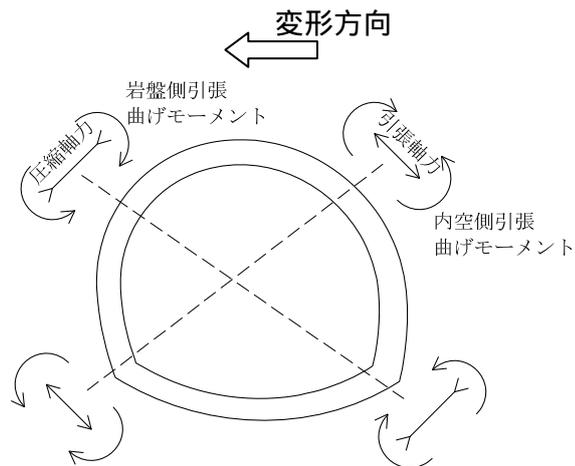


図 3.4.3-7 検討対象時刻の地震時増分断面力概念

(5) 支保工の応力度

地震時の坑道上下端間の相対変位（水平方向）が最大となる時刻における支保工の地震時増分応力度を図 3.4.3-8 に示す。図 3.4.3-6 および図 3.4.3-7 に示す断面力の発生パターンに応じ，圧縮応力度は空洞左上から右下の対角線が大きくなっているが，その値は評価基準値 $\sigma_{ca}=30,909 \text{ kN/m}^2$ に比べて十分に小さく，常時に支保工断面力に十分な裕度が確保されていれば，支保工の地震時安全性は確保できることが確認された。

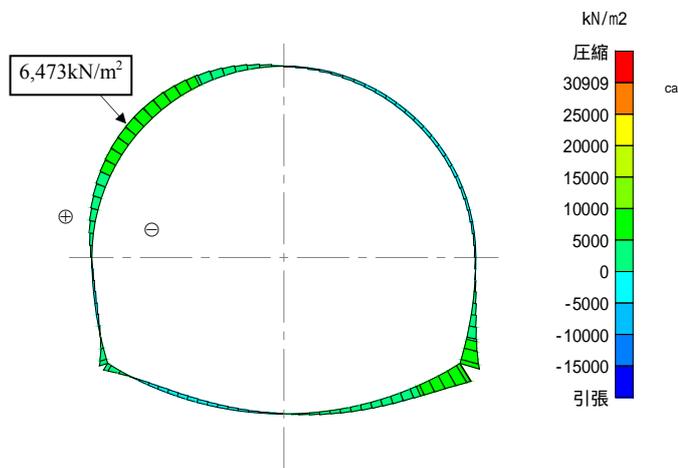


図 3.4.3-8 地震時増分応力度図

3.4.4 地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設の処分坑道の耐震性評価

(1) 最大応答値分布

地震応答解析の結果得られたモデル中心断面の最大加速度 (α_x , α_y)、および岩盤の最大せん断ひずみ (ϵ_{max}) の深度方向分布を図 3.4.4-1, 図 3.4.4-2 に示す。これらの図には、処分坑道がない地盤の応答と比較するため、図 3.4.2-3 に示す地盤モデルに対して実施した一次元波動伝播解析の結果を合わせて示す。

高レベル放射性廃棄物処分施設の処分坑道と同様に、水平方向加速度 (α_x)、鉛直方向加速度 (α_y) とともに一次元波動伝播解析との差は小さい。また、最大せん断ひずみ (ϵ_{max}) も、高レベル放射性廃棄物処分施設の処分坑道と同様に、坑道の上部および下部で一次元波動伝播解析より大きくなっているが、ほかの深度では一次元波動伝播解析との差は小さい。一次元波動伝播解析との差が見られた坑道上部および下部の ϵ_{max} の最大値は 4×10^{-4} 程度であり、限界せん断ひずみ 1.34×10^{-2} と比較して十分に小さい。すなわち、高レベル放射性廃棄物処分施設の処分坑道と同様に、地層処分低レベル放射性廃棄物処分施設の処分坑道も地震時に岩盤に追従するような挙動を示しており、処分坑道が地盤の応答性状に与える影響は小さいことが確認された。

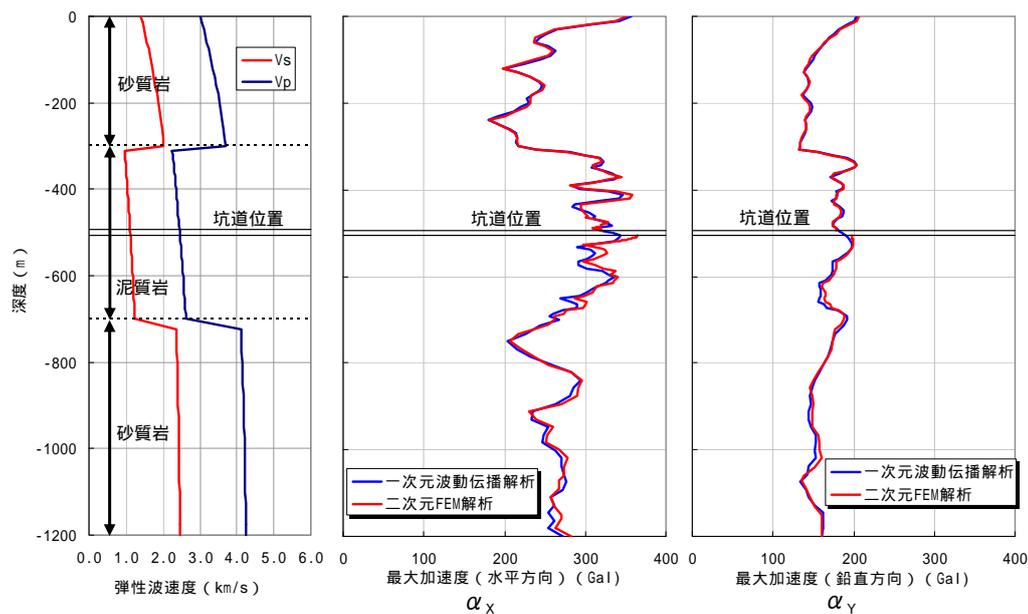


図 3.4.4-1 モデル中心断面の最大加速度の深度方向の分布

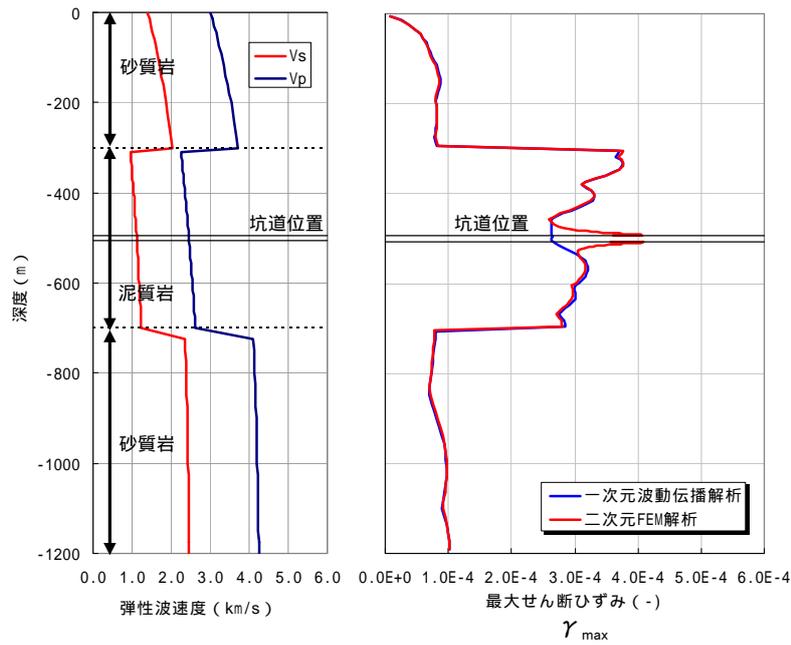


図 3.4.4-2 モデル中心断面の最大せん断ひずみの深度方向の分布

(2) 岩盤の最大せん断ひずみ

常時および地震時の坑道上下端間の相対変位（水平方向）が最大となる時刻における岩盤の最大せん断ひずみ（ γ_{max} ）の分布を図 3.4.4-3 に示す。常時および地震時いずれも最大せん断ひずみが限界ひずみを上回る領域広さは坑道掘削径の約 20%以下の範囲に収まっている。また、最大せん断ひずみは常時と地震時でほとんど変化が見られず、処分坑道周辺地盤に与える地震の影響は小さいことが確認された。

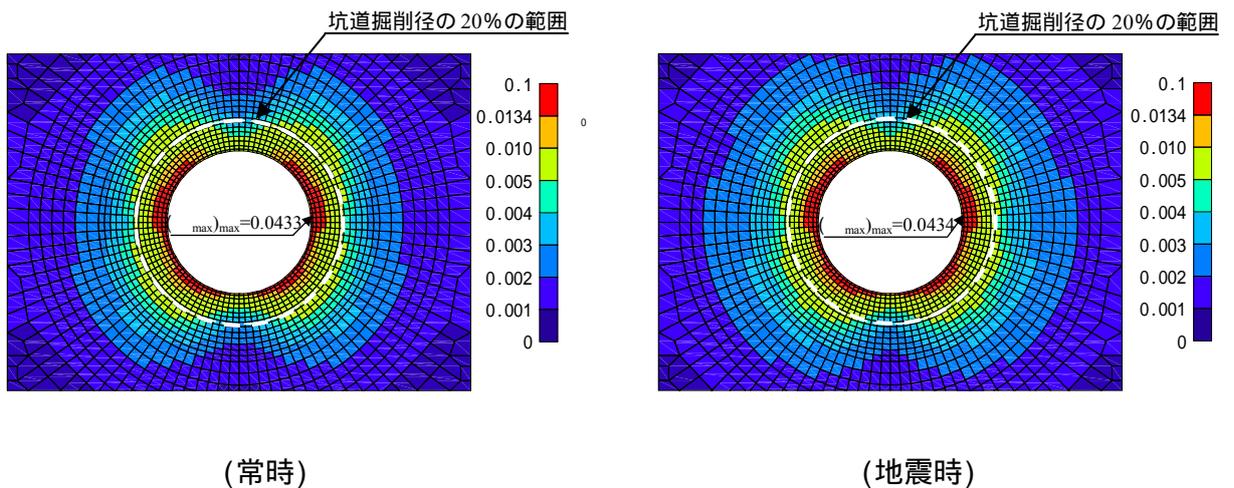


図 3.4.4-3 最大せん断ひずみ分布

(3) 岩盤の局所安全係数

常時および地震時の坑道上下端間の相対変位（水平方向）が最大となる時刻における岩盤の局所安全係数分布を図 3.4.4-4 に示す。常時および地震時いずれも局所安全係数が 1.2 を下回る領域広さは坑道掘削径の約 20%以下の範囲に収まっている。また、最大せん断ひずみと同様に、局所安全係数は常時と地震時でほとんど変化が見られず、処分坑道周辺地盤に与える地震の影響は小さいことが確認された。

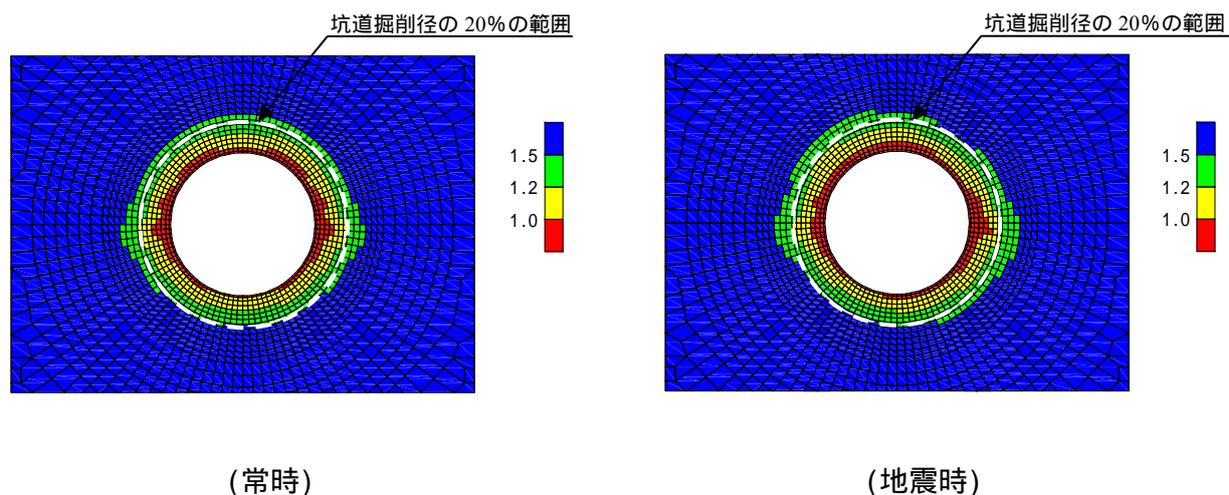


図 3.4.4-4 局所安全係数分布

(4) 支保工断面力

地震時の坑道上下端間の相対変位（水平方向）が最大となる時刻における坑道周辺の地震時増分変位を図 3.4.4-5 に示す。同図には支保工の変形を判りやすく示すため、変形前の支保工の形状を下半中央位置を一致させて地震時の変形に重ねた図を合わせて示す。支保工は頂部が左側に変形しており、上半中央と下半中央の相対変位は 5.0 mm となっている。

また、この時刻における地震時増分断面力を図 3.4.4-6 に示す。検討対象時刻は支保工が左向きに変形している時刻であり、高レベル放射性廃棄物処分坑道で示した図 3.4.3-7 の断面力発生パターンとなる。図 3.4.4-6 に示す増分断面力は、斜め 45 度方向が大きい分布となっている。

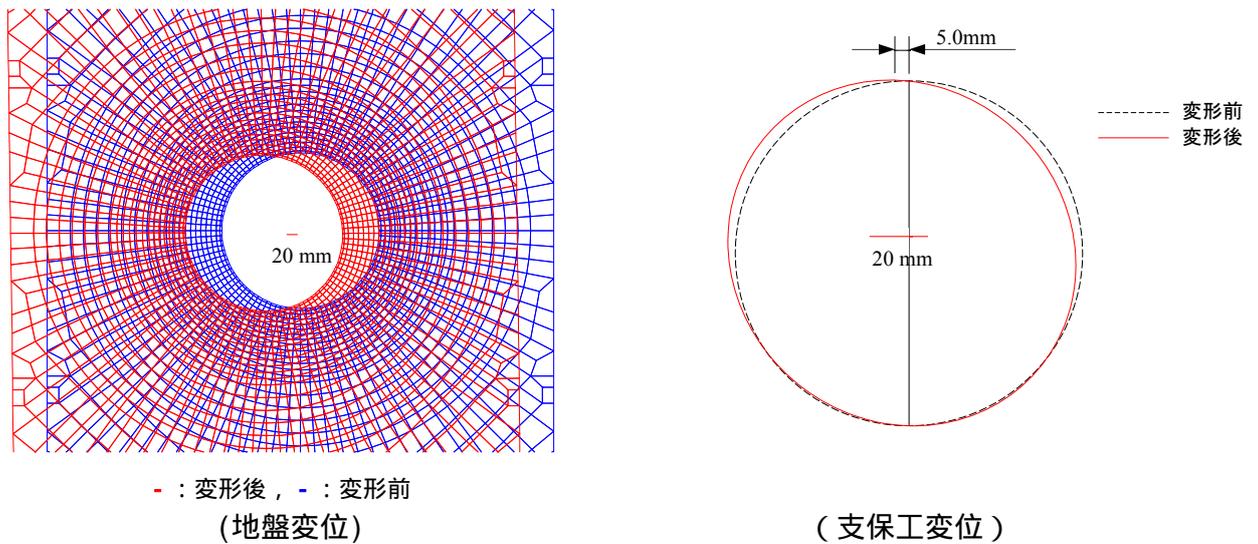


図 3.4.4-5 地震時増分変位図

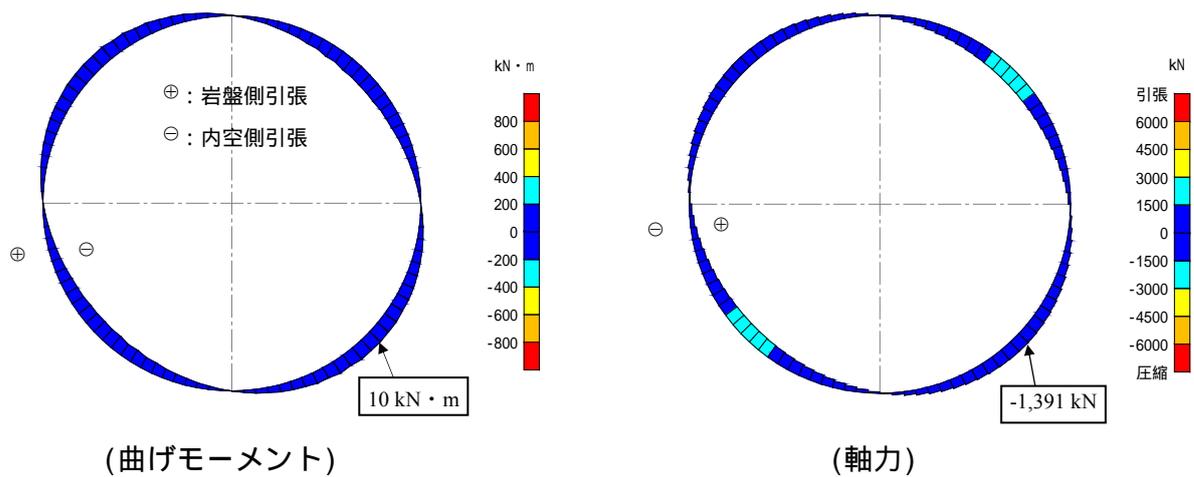


図 3.4.4-6 地震時増分断面力図

(5) 支保工応力度

地震時の坑道上下端間の相対変位（水平方向）が最大となる時刻における支保工の地震時増分応力度を図 3.4.4-7 に示す。図 3.4.4-6 に示す断面力の発生パターンに応じ、圧縮応力度は空洞左上から右下の対角線が大きくなっているが、その値は評価基準値 $\sigma_{ca}=27,818 \text{ kN/m}^2$ に比べて十分に小さい。常時に支保工断面力に十分な裕度を確保することにより、支保工の地震時安全性は確保できることを確認した。

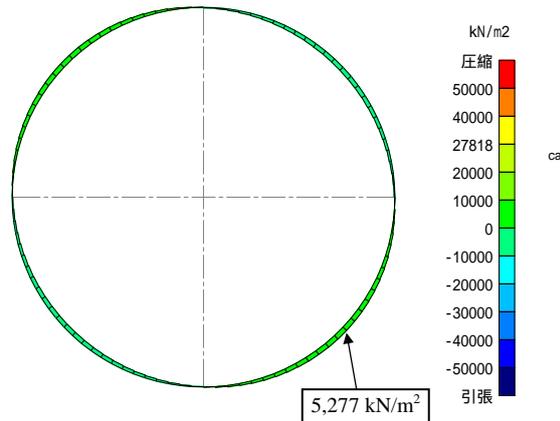


図 3.4.4-7 地震時増分応力度図

3.5 立坑の耐震性評価

3.5.1 検討条件

(1) 地盤条件

処分場のサイトが特定できない現段階では、処分坑道の耐震性評価の場合と同様に、第2次取りまとめにおいて、岩石・岩盤特性データベース（PNC，1992）などに基づいて選定された岩盤モデル（軟岩系岩盤）を検討用の地盤とした。なお、第2次 TRU レポートでは、Model-1（砂質岩 - 泥質岩 - 砂質岩の三層構造）と Model-2（泥質岩の単層モデル）の2種類の地盤モデルが設定されている。立坑の耐震性評価を行うにあたり、インピーダンス比の異なる地層境界付近の影響を把握できるように Model-1 を検討対象の地盤モデルとした。岩盤モデルおよび岩盤物性は処分坑道の耐震性評価の場合と同様である。

(2) 構造条件

第2次取りまとめと同様の坑道諸元（断面形状，支保工，深度）を設定した。ただし，立坑槽設備などの基礎となる坑口部の範囲は，第2次取りまとめでは G.L.-50 m までとされているが，坑口部として補強が必要となる範囲は一般的に 10 m 以内であることから，G.L.-10 m までに変更した。坑道諸元を表 3.5.1-1 に示す。支保工の弾性係数は，掘削時には若材齢強度に基づく値を，地震時には材齢 28 日強度に基づく値を設定した。

表 3.5.1-1 立坑の諸元

項目		諸元		設定根拠 (出典)
断面形状	坑口部 (G.L.-10 m 以浅)			<p>第2次取りまとめ 処分場の設計に関する検討 p. -252 より設定 坑口部の範囲は,実績を考慮して-10m に変更</p>
	本体部 (G.L.-10 m 以深)			
支保工仕様		坑口部: 覆工コンクリート, t=1.5 m 本体部: 覆工コンクリート, t=0.5 m		
設計基準強度 f_{ck} (kN/m ²)		40,000		
弾性係数 E(MPa)		4,000 (若材齢) 31,000 (材齢 28 日)		第2次取りまとめ 処分場の設計に関する検討 p. -260 表 4.2.2-27 より設定
ポアソン比 ν		0.20		
密度 (Mg/m ³)		2.3		
減衰定数 h		0.05		第2次 TRU レポートを参照し, 一般的なコンクリート構造物の値として設定
深度		500 m		第2次取りまとめ 処分場の設計に関する検討 p. -252 より設定
支保工の評価基準値 c_a (kN/m ²)		30,909		第2次 TRU レポートを参照し, NATM 設計施工指針 (日本鉄道建設公団, 1996) の仮設構造物の許容応力度より設定

3.5.2 検討方法

(1) 検討手順

周辺地盤と立坑をモデル化した三次元モデルを用い、三次元動的 FEM 解析を行い、立坑周辺岩盤の地震時増分ひずみ、および支保工の地震時増分断面力、圧縮応力度を算定した。なお、支保工の圧縮応力度の評価対象時刻は、処分坑道では支保工の断面応力度が最大となる坑道上下端間相対変位最大時刻に対して実施していたが、立坑は鉛直方向の地盤の応答の相違が大きいため、上端から下端の全域に対して一つの検討対象時刻を特定しづらい。このため、全時刻のそれぞれの最大値に対して検討を行った。また、動的 FEM 解析は、処分坑道と同様に、最新知見を反映して水平動、および鉛直動を同時に入力した地震応答解析を実施した。

(2) 解析モデル

解析モデルは、以下の考え方にに基づき設定した。立坑の解析モデル図を図 3.5.2-1 と図 3.5.2-2 に示す。

(i) モデル化領域・境界条件

水平方向のモデル化領域は立坑に境界条件の影響が及ばない十分な領域として幅を 80 m とした。鉛直方向のモデル化領域は地震応答解析を実施することから第 2 次 TRU レポートと同様に、地表面から G.L.-1,200 m の範囲とした。

地震応答解析での境界条件は、立坑の場合、地盤中に単独、もしくは単独と見なせるほど十分な離間距離を確保して設置されるため、底面境界と側方境界のいずれも粘性境界とした。

(ii) 岩盤のモデル化

岩盤はソリッド要素でモデル化する。要素高さは、25 Hz までの地震動の透過能を考慮し、(3.4.2 -1) 式に示す高さ以下とした。また、岩盤要素の剛性は、処分坑道の耐震性評価における地震応答解析の場合と同様に線形とした。

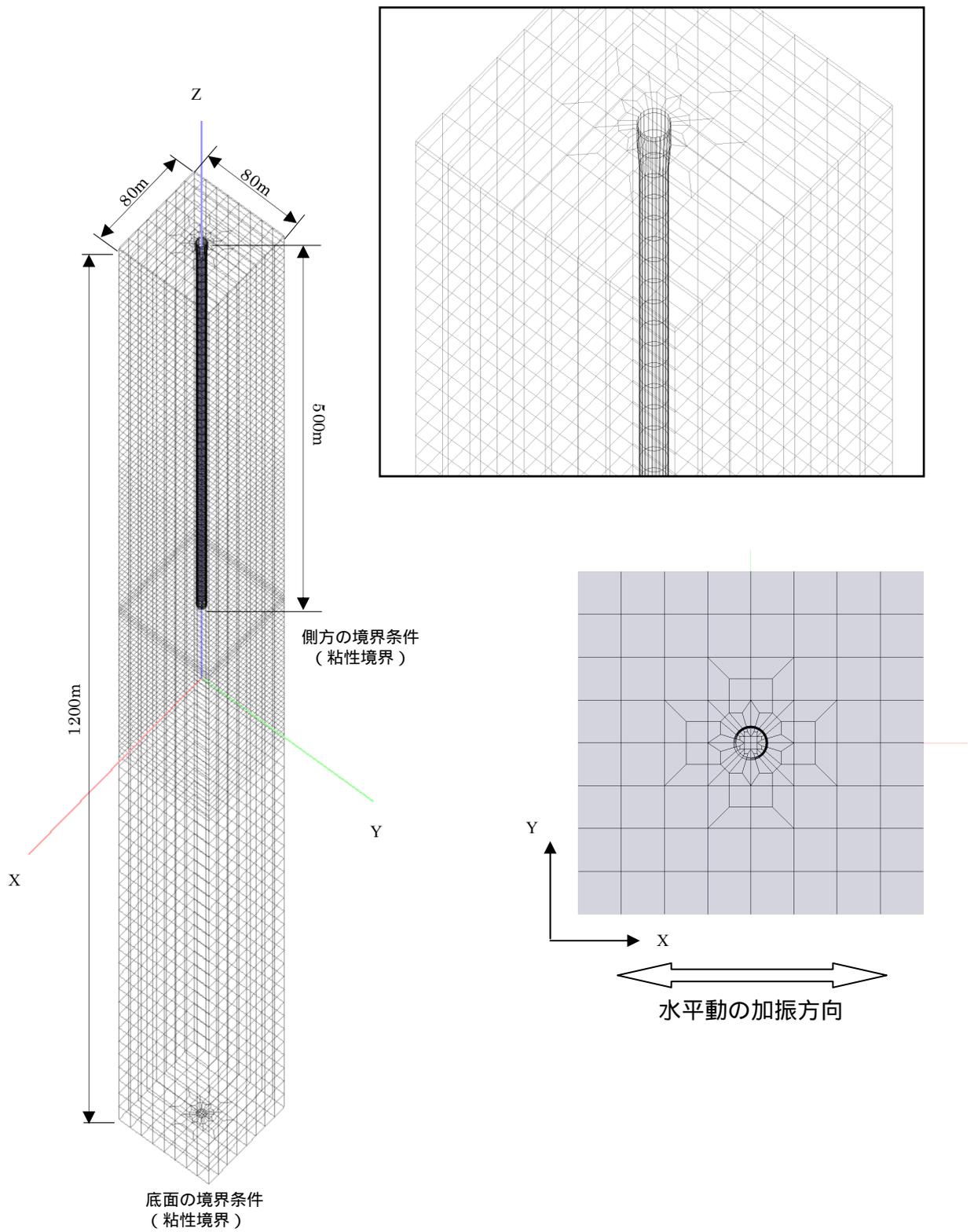


図 3.5.2-1 立坑解析モデル図(1)

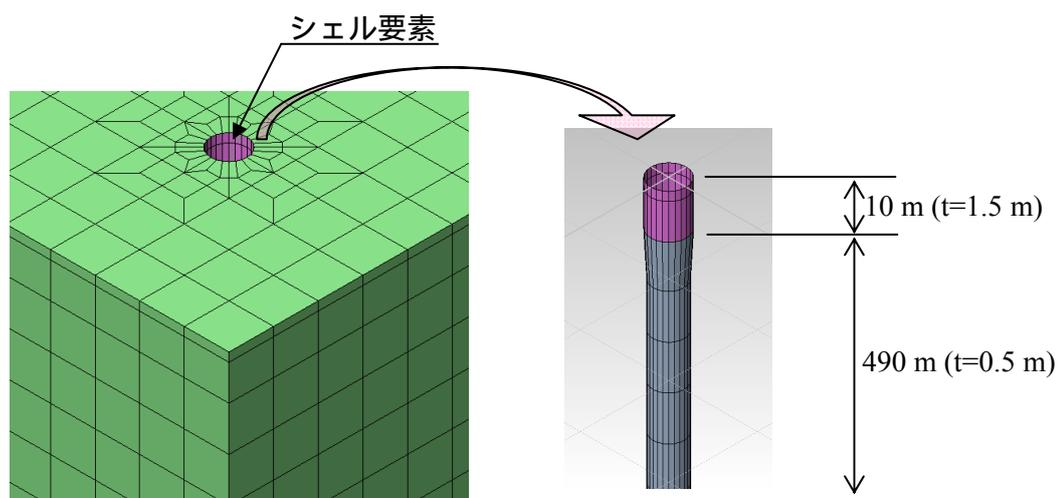
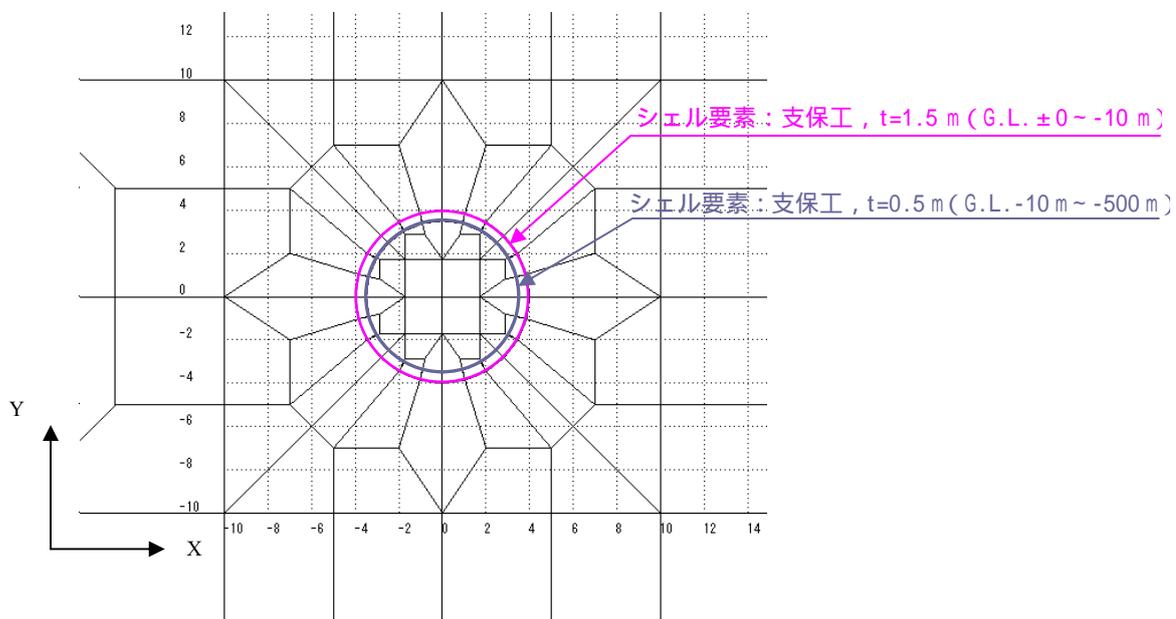


図 3.5.2-2 立坑解析モデル図(2)

(iii) 支保工のモデル化

支保工をシェル要素でモデル化した。シェル要素の局所座標系，および出力される断面力の定義を図 3.5.2-3 に示す。

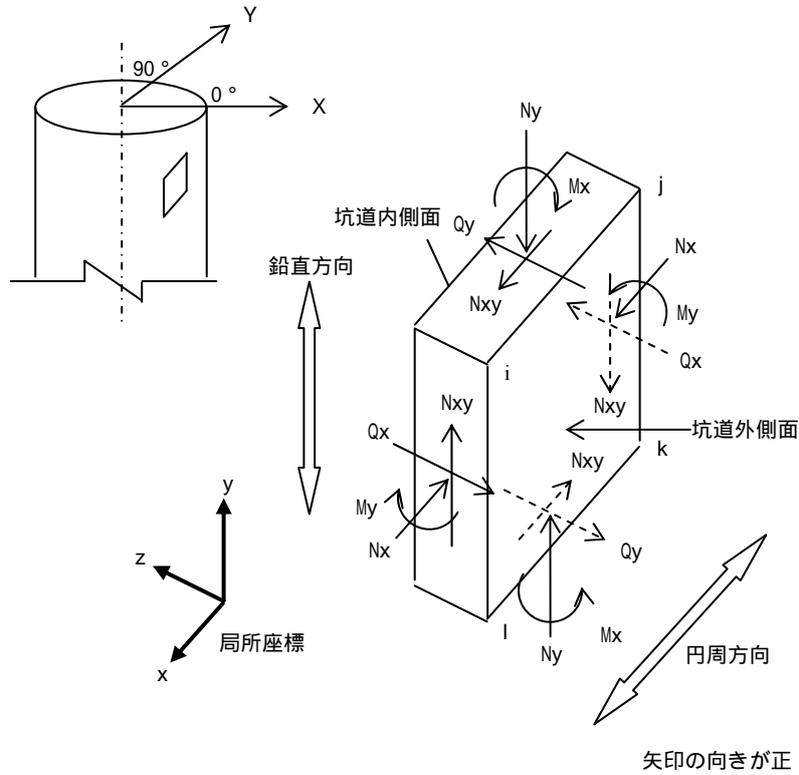


図 3.5.2-3 シェル要素の局所座標系および断面力の定義

(3) 耐震安全性評価指標

(i) 空洞周辺岩盤

処分坑道と同様，最大せん断ひずみ，および局所安全係数を評価指標とすることが考えられるが，三次元解析結果から局所安全係数を算定する方法は必ずしも統一されたものではなく，JEAG4601（日本電気協会，2008）など原子炉施設に関する指針類にも記載されていない。このため，本検討においては，立坑円周方向，および軸方向に発生する最大せん断ひずみが十分に小さいことを確認することとした。

(ii) 支保工

立坑円周方向 x および軸方向 y の支保工の最外縁の圧縮応力 σ_{cx} および σ_{cy} を(3.5.2-1)，(3.5.2-2)式により算定する。評価基準値は，処分坑道と同様，(3.5.2-3)式に示される「NATM設計施工指針」に規定される仮設構造物の許容応力度 σ_{ca} (kN/m^2)とした。

・支保工の最大圧縮応力度 σ_{cx} ， σ_{cy}

$$\sigma_{cx} = N_x/A_x + M_y/Z_y \quad (3.5.2-1)$$

$$\sigma_{cy} = N_y/A_y + M_x/Z_x \quad (3.5.2-2)$$

ここで，

N_x ：解析で得られた部材の局所 x 軸方向の軸力

N_y ：解析で得られた部材の局所 y 軸方向の軸力

M_x ：解析で得られた部材の局所 x 軸回りの曲げモーメント

M_y ：解析で得られた部材の局所 y 軸回りの曲げモーメント

A_x ：部材の局所 x 軸に直交する断面の面積

A_y ：部材の局所 y 軸に直交する断面の面積

Z_x ：部材の x 軸回りの断面係数

Z_y ：部材の y 軸回りの断面係数

・支保工の評価基準値 σ_{ca}

$$\sigma_{ca} = 0.85 \cdot f_{ck}^2 / \gamma_t \quad (3.5.2-3)$$

ここで，

f_{ck}^2 ：設計基準強度(kN/m^2)

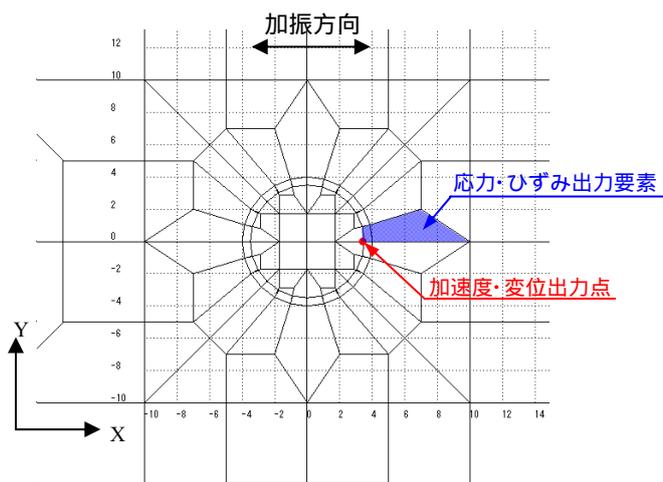
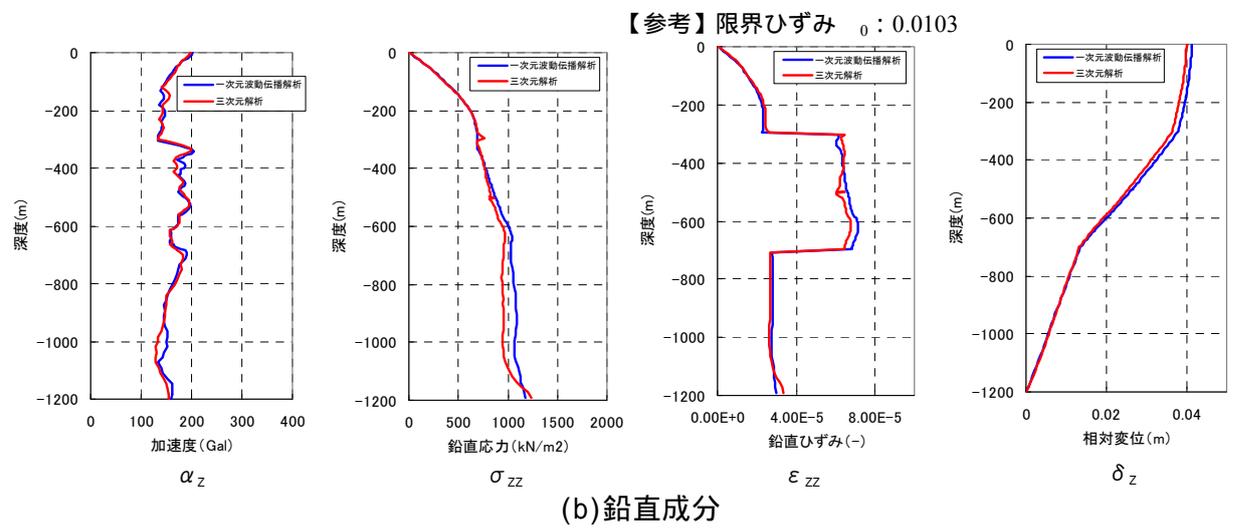
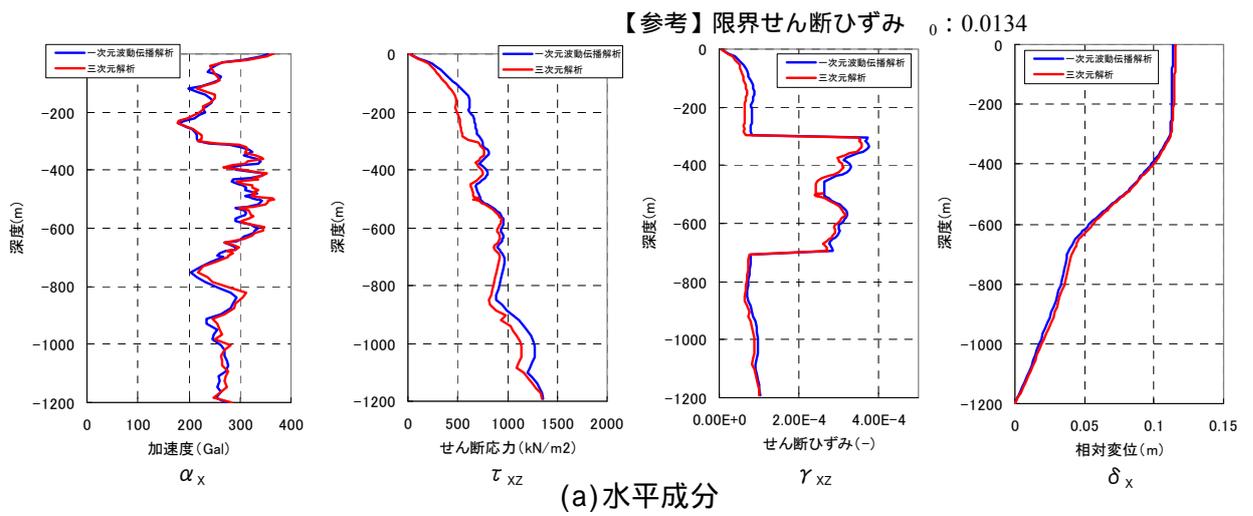
γ_t ：構造物係数 (= 1.1)

3.5.3 検討結果

(1) 最大応答値分布

地震応答解析の結果得られた最大加速度(\ddot{x} , \ddot{z}),モデル下端との最大相対変位(x , z),および岩盤の地震時増分最大応力(σ_{xz} , σ_{zz}),地震時増分最大ひずみ(ϵ_{xz} , ϵ_{zz})の深度方向分布を,立坑がない地盤の応答である次元波動伝播解析による結果と比較して図 3.5.3-1 に示す。深度方向の各種応答値の分布は,立坑がない地盤の応答値の分布と概ね等しく,立坑が地盤の応答性状に与える影響は小さいことが確認された。

また,支保工に接する岩盤要素の,XZ 平面の地震時増分せん断ひずみ(ϵ_{xz}),XY 平面の地震時増分せん断ひずみ(ϵ_{xy})の最大値発生時刻における分布図と変形図を図 3.5.3-2,図 3.5.3-3 に示す。岩盤の変形は,せん断波速度が小さい GL.-300 m から GL.-700 m の範囲で大きく,せん断波速度の大きい GL.-700 m 以深および GL.-300 m 以浅で小さい。このため,立坑の鉛直方向の変形は GL.-300 m で曲率が大きくなっている。一方,立坑周辺の水平断面のひずみ分布から,立坑に接する岩盤のせん断ひずみは ϵ_{xz} が 10^{-4} オーダー, ϵ_{xy} が 10^{-5} オーダーと小さく,立坑はほぼ真円を保ったまま岩盤と一体となって挙動していることが確認された。



(c) 応答値出力位置

図 3.5.3-1 最大応答値の深度分布

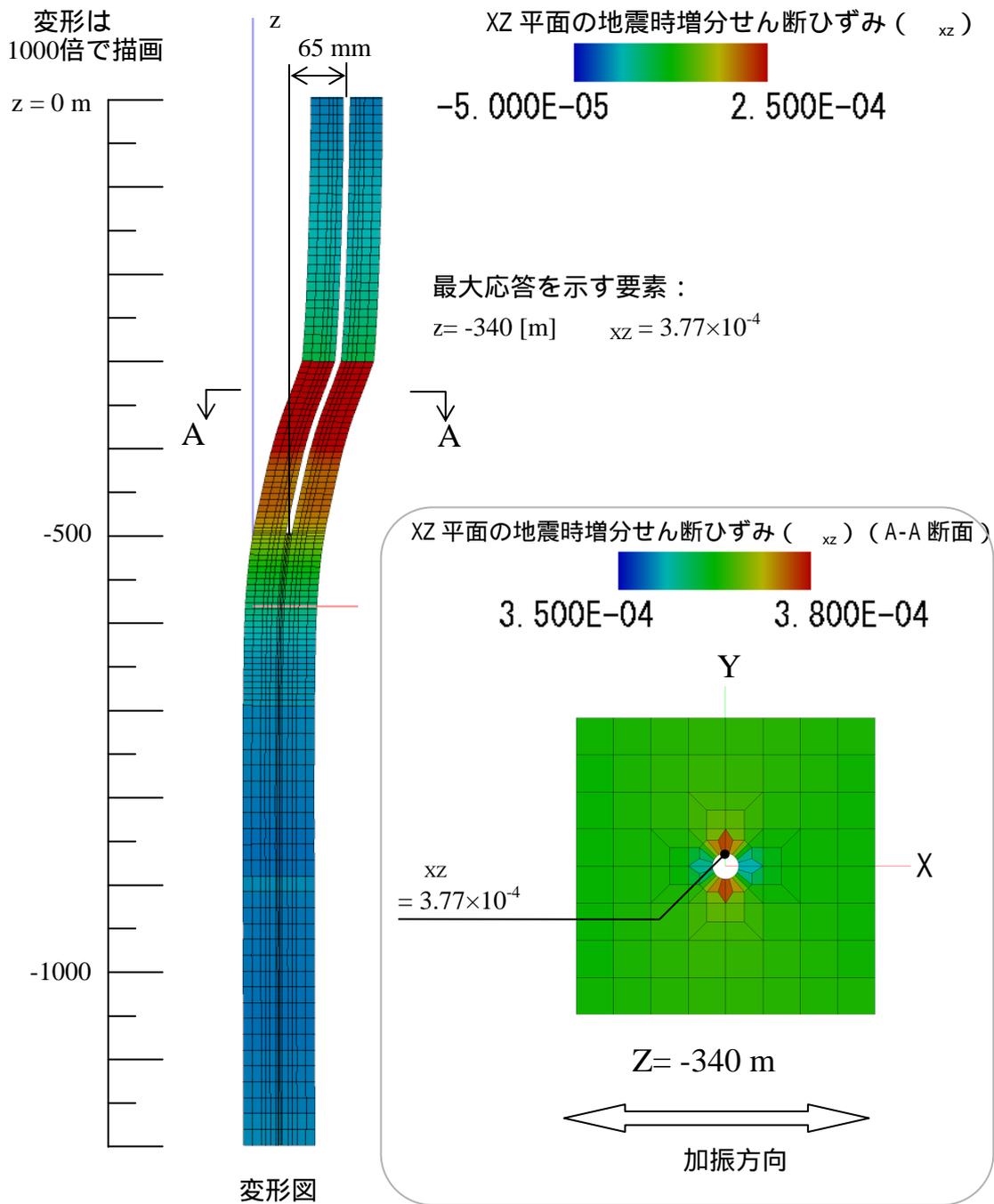


図 3.5.3-2 XZ 平面の地震時増分せん断ひずみ (ϵ_{xz}) 分布図と変形モード

変形は1000倍で描画

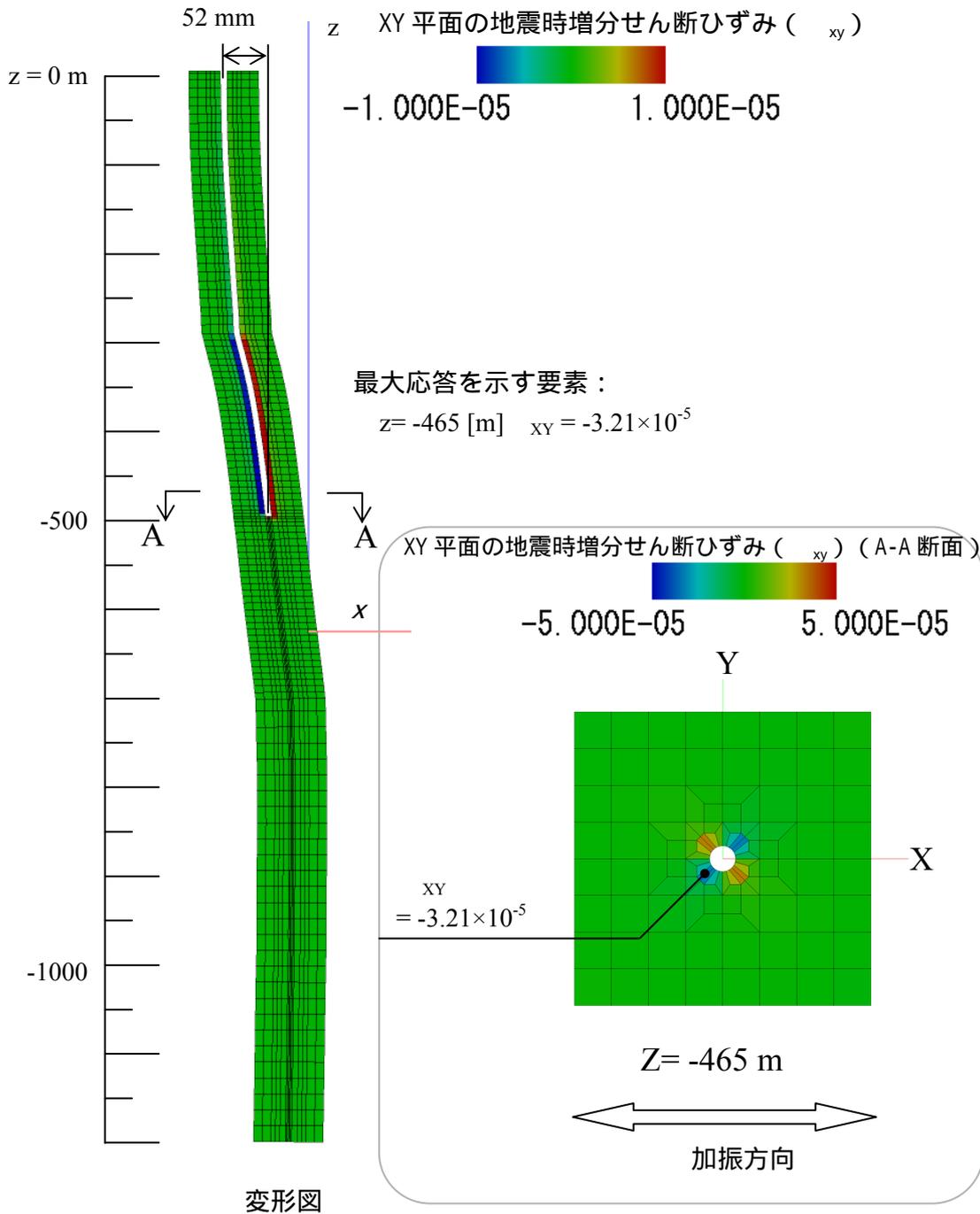


図 3.5.3-3 XY 平面の地震時増分せん断ひずみ (ϵ_{xy}) 分布図と変形モード

(2) 支保工断面力

立坑のような鉛直軸に対して軸対称形状である構造物に、水平荷重、および鉛直荷重がそれぞれ作用する場合の断面力の発生パターンを表 3.5.3-1、表 3.5.3-2 に示す。

水平荷重が作用する場合における円周方向断面力は、軸力 N_x は載荷方向に対して 180 度方向で最大、0 度方向で最小、90 度方向で 0 となる分布、曲げモーメント M_y は 180 度方向で最大、0 度方向で最小、90 度方向で 0 となる分布、面外せん断力 Q_x は 0 度方向と 180 度方向で 0、90 度方向で最大となる分布で発生する。鉛直方向断面力は、軸力 N_y 、曲げモーメント M_x が 0 度方向で最大、180 度方向で最小、90 度方向で 0 となる分布、面内せん断力 N_{xy} が 0 度方向と 180 度方向で 0、90 度方向で最大となる分布で発生する。

鉛直荷重が作用する場合、円周方向断面力の軸力 N_x と鉛直方向断面力の軸力 N_y が円周方向に等分布で発生する。

以上の断面力の発生パターンを踏まえ、立坑の挙動について考察する。

表 3.5.3-1 立坑断面力の発生パターン（円周方向）

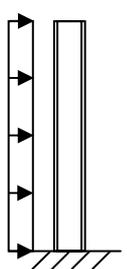
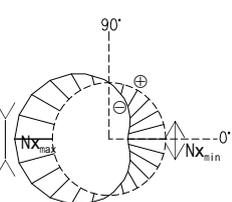
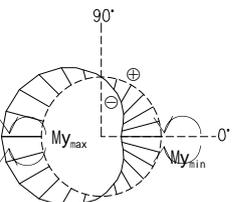
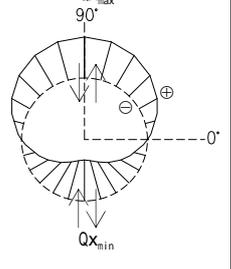
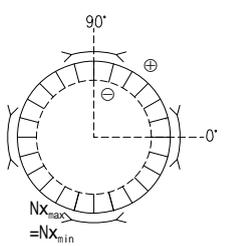
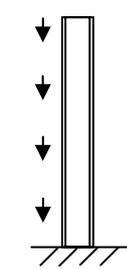
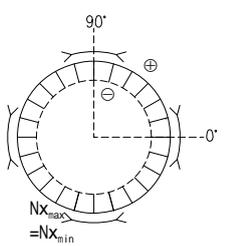
作用する荷重		N_x	M_y	Q_x
水平荷重				
			-	-
鉛直荷重			-	-

表 3.5.3-2 立坑断面力の発生パターン（鉛直方向）

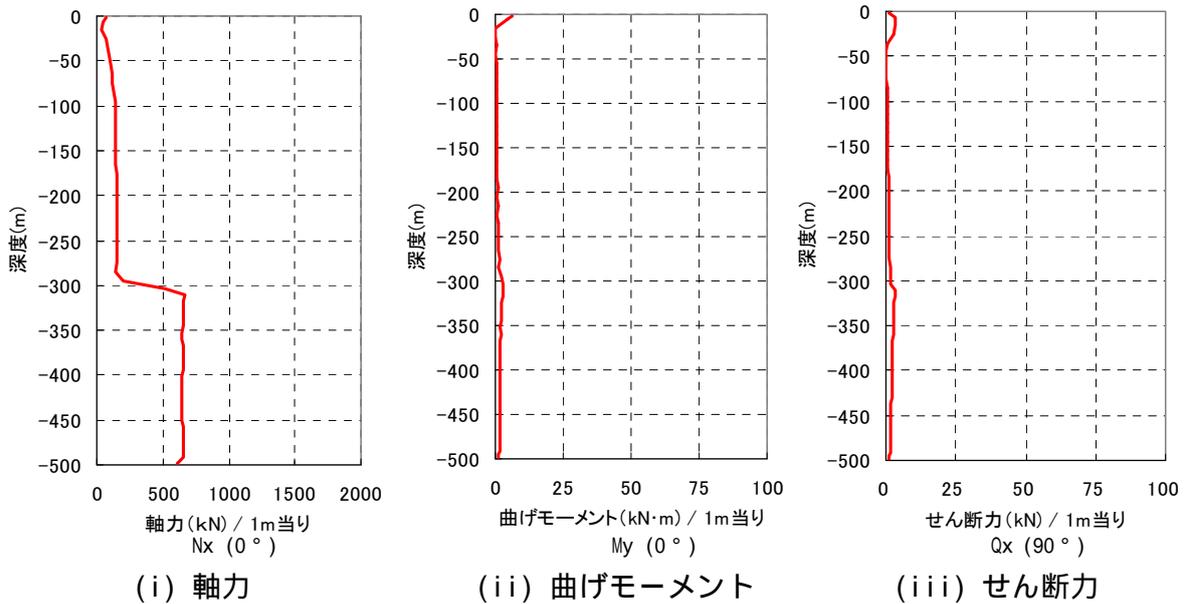
作用する荷重		Ny	Mx	Qy	Nxy
水平荷重					
			-	-	-
鉛直荷重			-	-	-

(i) 円周方向

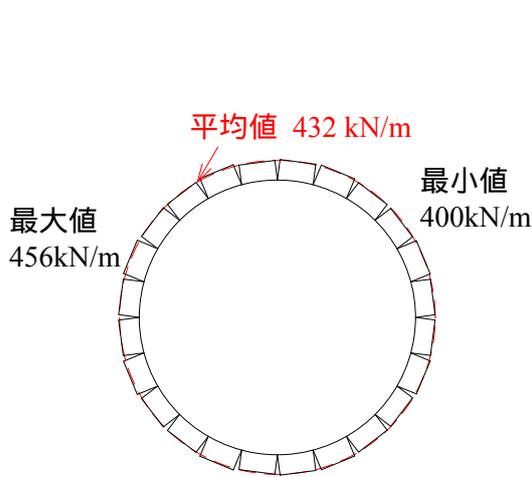
地震時増分断面力の最大値深度分布,および鉛直方向の曲げモーメント M_x の最大値発生時刻における地震時増分軸力 N_x の円周方向の分布を図 3.5.3-4 に示す。

岩盤の水平断面のひずみ分布において立坑はほぼ真円を保ったまま岩盤と一体となって挙動していることが確認されたが,曲げモーメント M_y ,およびせん断力 Q_x が僅かであること,軸力 N_x が円周方向にほぼ等分布であることから,その傾向が確認できる。

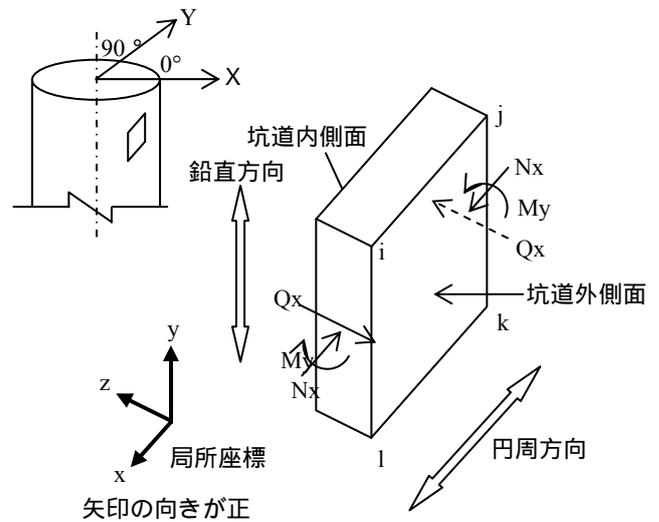
軸力 N_x が円周方向にほぼ等分布であることは,その発生には水平動ではなく,鉛直動の寄与が支配的であることを示している。軸力 N_x の深度分布は,岩盤のせん断波速度が変化する GL.-300 m を境に,せん断波速度の小さい GL.-300 m 以深が以浅よりも若干大きくなっており,せん断波速度が小さい GL.-300 m 以深で岩盤の鉛直方向軸ひずみ ϵ_{zz} が大きいことと整合している。



(a) 地震時増分断面力の最大値深度分布



(b) 地震時増分軸力 N_x の円周方向の分布形状 (G.L. -300 m)



(c) 断面力の符号

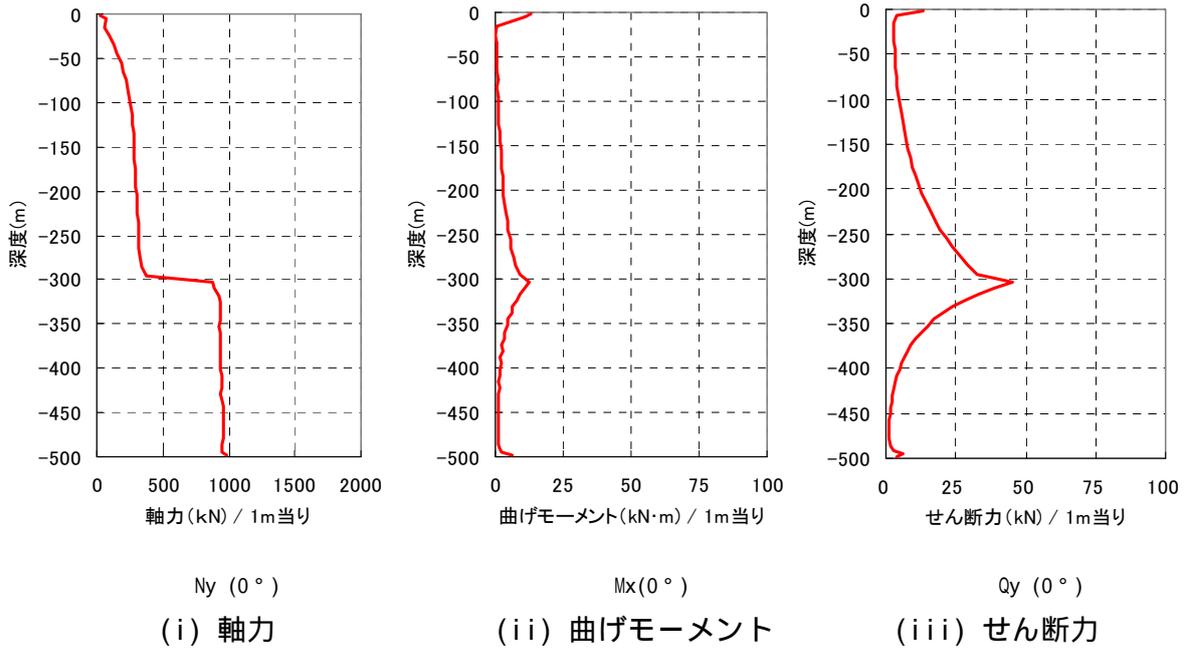
図 3.5.3-4 円周方向の地震時増分断面力

(ii) 鉛直方向

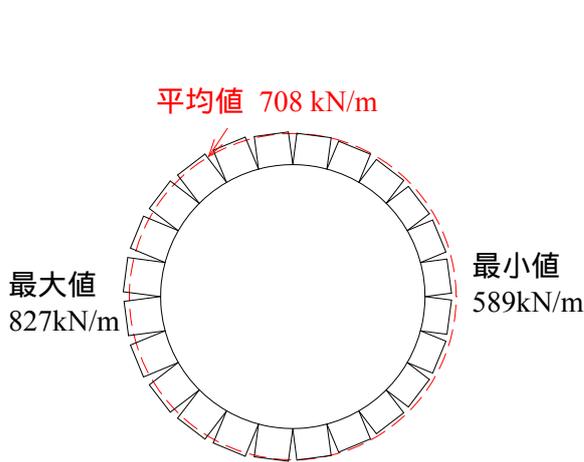
地震時増分断面力の最大値深度分布, および鉛直方向の曲げモーメント M_x の最大値発生時刻における地震時増分軸力 N_y の円周方向の分布を図 3.5.3-5 に示す。

曲げモーメント M_x , およびせん断力 Q_y の深度分布は, 立坑上下端レベルと岩盤のせん断波速度が変化する G.L.-300 m 付近で大きくなっており, 軸力 N_y の深度分布は, 岩盤のせん断波速度が変化する G.L.-300 m を境に, せん断波速度の小さい G.L.-300 m 以深が以浅よりも若

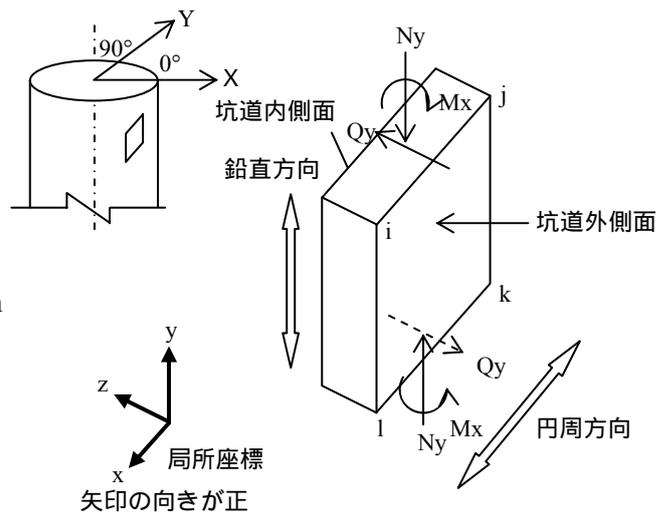
干大きな分布形状となっている。曲げモーメント M_x , およびせん断力 Q_y の深度分布は , G.L.-300 m の立坑の曲率が大きくなっていた図 3.5.3-2 , 図 3.5.3-3 の変形図と整合している。軸力 N_y が円周方向にほぼ等分布であることは , 軸力 N_y は円周方向の N_x と同様 , その発生には水平動ではなく , 鉛直動の寄与が支配的であることを示している。岩盤のせん断波速度が変化する層境界付近で立坑の鉛直方向の曲率は大きくなるが , その変形が立坑の軸方向応力度に与える影響は小さいと言える。



(a) 地震時増分断面力の最大値深度分布



(b) 地震時増分軸力 N_y の円周方向の分布形状 (G.L. -300 m)



(c) 断面力の符号

図 3.5.3-5 鉛直方向の地震時増分断面力

(3) 支保工応力度

地震時増分最大応力度を図 3.5.3-6 に示す。地震時増分応力度は、円周方向、鉛直方向いずれも評価基準値 $\sigma_{ca}=30,909 \text{ kN/m}^2$ に比べて十分に小さく、常時に支保工断面力に十分な裕度が確保されていれば、支保工の地震時安全性は確保できることが確認された。

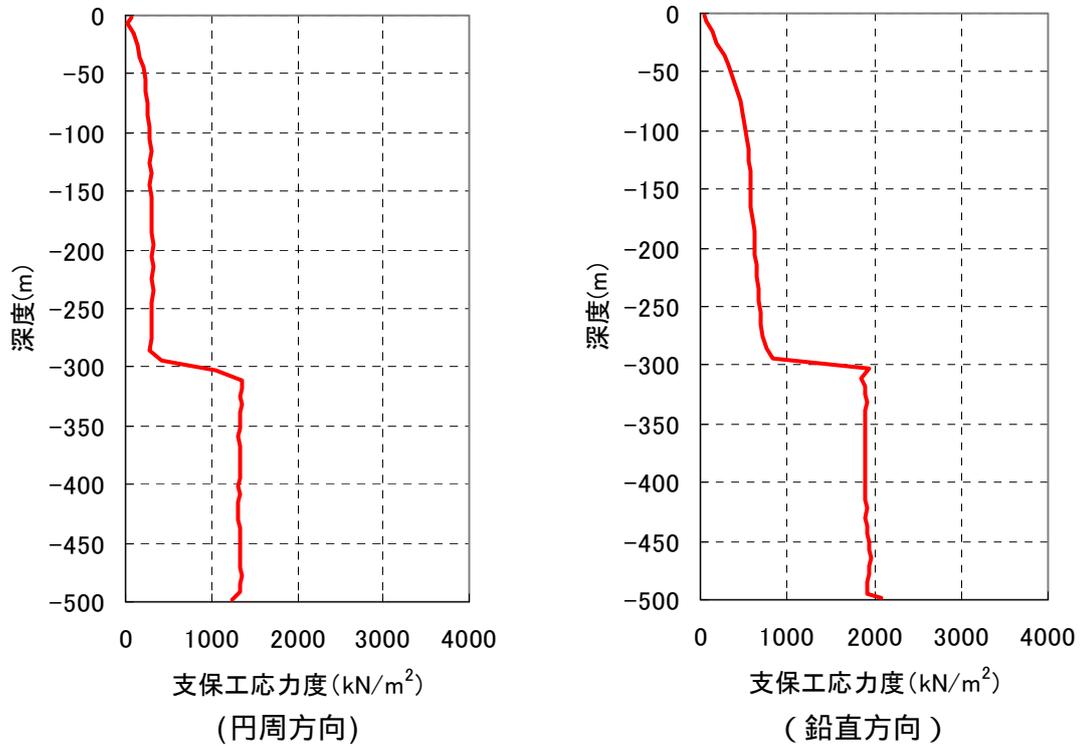


図 3.5.3-6 地震時増分最大応力度図

4. まとめ

地震が多く発生するわが国では、地層処分施設の耐震安全性の確保は極めて重要である。地層処分施設の設計・建設までには10～20年程度の時間を要するため、中・長期的な検討スケジュールを踏まえた上で、段階的かつ戦略的に検討・開発を進めていく必要がある。

近年の強震動記録の集積により、地震動および地震動評価に関するさまざまな知見が集積されるとともに、その成果は新耐震指針などの国の動向にも反映されていることが確認された。また地層処分施設の耐震検討には、これまでの原子力施設での検討とは異なる要素が存在することが解析検討で確認された。これらから、地層処分施設の地震影響については、詳細な地盤調査や地震観測結果の高度な分析に加えて最新の知見を取り込んだ地震動評価が不可欠であることが確認された。

また、このような最新知見を踏まえ、2006年9月に改訂された「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」に基づき、地下施設に与える影響が大きいと考えられる地震動を設定し、操業期間中における地下施設が、その空間を安定に保持するという観点から耐震性について評価を行った。

地下施設の耐震性評価の結果、岩盤の最大せん断ひずみや局所安全係数の地震時増分、および支保工応力度の地震時増分は小さく、処分場建設時（常時）において各坑道の力学的安定性が確保されていれば、坑道の地震時健全性は確保できることが確認された。

なお、本報告書を取りまとめていた最中である2011年3月11日に、マグニチュード9.0というわが国の観測史上最大規模の東北地方太平洋沖地震が発生し、東京電力株式会社福島第一発電所の事故が発生した。この事故の影響の甚大さに鑑み、原因究明や安全対策については、今後、国、電力会社、学会などにより詳細に調査・検討が行われると考える。本報告書は、このたびの震災を踏まえた検討は含まれていないが、NUMOとしては、上述の調査結果を踏まえながら、このたびの震災や事故の教訓を踏まえた技術的検討を早急に実施していく予定である。

参考文献

- 青井真，功刀卓，藤原広行，森川信之，鈴木亘（2010）：2008年岩手・宮城内陸地震の地震動の特徴 - 非対称な地震動とトランポリン効果 - ，防災科学技術研究所 主要災害調査第43号。
- Boatwright, J., et al.(1988): The seismic radiation from composite models of faulting ,Bulletin of the Seismological Society of America; v. 78; no. 2; p. 489-508.
- Chiou and Youngs (2006) : PEER-NGA Empirical Ground Motion Model for the Average Horizontal Component of Peak Acceleration and Pseudo-Spectral Acceleration for Spectral Periods of 0.01 to 10 Seconds Interim Report for USGS Review June 14.
- 壇一男，渡辺基史，佐藤俊明，石井透（2001）：断層の非一様すべり破壊モデルから算定される短周期レベルと半経験的波形合成法による強震動予測のための震源断層のモデル化，日本建築学会構造系論文集，545，51-62.
- David M. Boore and Gail M. Atkinson (2007) : NGA Ground Motion Relations for the Geometric Mean Horizontal Component of Peak and Spectral Ground Motion Parameters.
- 電事連・JNC（電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構）（2005）：TRU 廃棄物処分技術検討書 - 第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ - ，JNC TY1400 2005-013.
- 土木学会（2007）：活褶曲地帯における地震被害データアーカイブスの構築と社会基盤施設の防災対策への活用法の提案，科学技術振興調整費成果報告書。
- 独立行政法人 建築研究所（2010）：長周期地震動に対する超高層建築物等の安全対策に関する検討，建築研究資料，No.127.
- 原子力安全・保安院（2005）：女川原子力発電所における宮城県沖の地震時に取得されたデータの分析・評価および耐震安全性評価について，平成17年度 総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会耐震・構造設計小委員会（第1回），配布資料，資料1 - 5.
- 原子力安全・保安院（2008）：新潟県中越沖地震を踏まえた原子力発電所等の耐震安全性評価に反映すべき事項について。
- 原子力安全・保安院（2009）：志賀原子力発電所原子力安全・保安院による海上音波探査N I - 0 1，N I - 0 4 測線の交点付近で認められた変形構造について（その2），総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会耐震・構造設計小委員会 地震・津波、地質・地盤合同WG第24回Aサブグループ会合，配布資料，合同A 2 4 - 2 - 2.
- 原子力安全・保安院（2010）：駿河湾の地震において浜岡原子力発電所5号機の観測記録が他号機に比して大きかったことの要因分析等に係る審議状況の整理について，総合資源エネルギー調査会原子力安全・保安部会耐震・構造設計小委員会報告書。
- 原子力安全・保安院，JNES(2007):安全評価関係パンフレット「新しい耐震設計審査指針」，
<<http://www.jnes.go.jp/kouhou/pamphlet/hyouka/shishin/book1/#page=1>>
- 原子力安全委員会（2006）：発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針。
- 原子力安全委員会（2010）：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。
- I. M. Idriss (2007) : EMPIRICAL MODEL FOR ESTIMATING THE AVERAGE HORIZONTAL VALUES OF PSEUDO-ABSOLUTE SPECTRAL ACCELERATIONS GENERATED BY CRUSTAL EARTHQUAKES.

- 入倉孝次郎 (2004) : 強震動予測レシピ 大地震による強震動の予測手法 , 京都大学防災研究所年報第 47 号 , A , 25-45.
- 入倉孝次郎 , 倉橋奨 (2008) : 2008 年岩手・宮城内陸地震の震源モデルと強震動-なぜ 4000 ガルの強震動が生成されたのか?-, 日本活断層学会 2008 年度秋季学術大会 シンポジウム「活断層からの地震発生予測の諸問題~岩手・宮城内陸地震を例として~」.
- 地震調査研究推進本部 (2004) : 確率論的地震動予測地図の試作版 (地域限定 - 西日本) , 地震調査委員会報告書.
- 地震調査研究推進本部 (2008) : 付録 震源断層を特定した地震の強震動予測手法 (「レシピ」) , 地震調査委員会報告書.
- 地震調査研究推進本部 (2009a) : 付録 3 震源断層を特定した地震の強震動予測手法 (「レシピ」) , 地震調査委員会報告書.
- 地震調査研究推進本部 (2009b) : 長周期地震動予測地図 2009 年度試作版 , 地震調査委員会報告書.
- 地震調査研究推進本部 (2009c) : 全国地震動予測地図 , 地震調査委員会報告書.
- JNC (核燃料サイクル開発機構) (1999) : 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 - 分冊 2 地層処分の工学技術 , JNC TN1400 99-022.
- JNES (原子力安全基盤機構) (2004) : 震源を特定しにくい地震による地震動の検討に関する報告書 , 05 解部報-004.
- Kanamori, H. and Anderson, D., L. (1975) : Theoretical basis of some empirical relations in seismology , Bulletin of the Seismological Society of America; October 1975; v. 65; no. 5; p. 1073-1095.
- Kanno, T., Narita, A., Morikawa, N., Fujiwara, H., Fukushima, Y., (2006) : A New Attenuation Relation for Strong Ground Motion in Japan Based on Recorded Data, Bulletin of the Seismological Society of America, 96, 3, 879-897, Seismological Society of America.
- 片岡正次郎 , 佐藤智美 , 松本俊輔 , 日下部毅明 (2007) : 短周期レベルをパラメータとした地震動強さの距離減衰式 , 土木学会論文集 62(4), 740-757, 20070120.
- 加藤研一 , 宮腰勝義 , 武村雅之 , 井上大榮 , 上田圭一 , 壇一男 (2004) : 震源を事前に特定できない内陸地殻内地震による地震動レベル - 地質学的調査による地震の分類と強震観測記録に基づく上限レベルの検討 - , 日本地震工学会論文集 , 4 , 4 , 46-86.
- Kenneth, W. C. and Bozorgnia, Y. (2007) : NGA Ground Motion Relations for the Geometric Mean Horizontal Component of Peak and Spectral Ground Motion Parameters.
- 国土交通省住宅局建築指導課 (2010a) : 超高層建築物等における長周期地震動への対策試案について.
- 国土交通省住宅局建築指導課 (2010b) : 観測データに基づく設計用長周期地震動の作成について.
- 高知大学理学部・東京大学地震研究所・大分大学教育福祉科学部・広島工業大学環境学部・西日本技術開発 : 博多湾警固断層の地震履歴、地震予知連絡会会報 75 巻 555-559.
- Madariaga, R. (1979) : On the Relation Between Seismic Moment and Stress Drop in the Presence of Stress and Strength Heterogeneity , JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 84, NO. B5, PP. 2243-2250.

- 松田時彦(1975):活断層から発生する地震の規模と周期について,地震,第2輯,28,269-283.
- 宮腰研,関口春子,岩田知孝(2001):すべりの空間的不均質性の抽出,平成12年度科学振興調整費「地震災害軽減のための強震動予測マスターモデルに関する研究」研究成果報告書,99-109.
- 本島睦,日比野敏,林正夫(1987):岩盤掘削時の安定解析のための電子計算プログラムの開発,電力中央研究所報告, No.377012.
- 永野正行(1998):地盤の不整形性を考慮した地震波動伝播特性と構造物応答に関する研究,早稲田大学学位請求論文.
- 日本電気協会(2008):JEAG4601-2008 原子力発電所耐震設計技術指針.
- 日本鉄道建設公団(1996):NATM 設計施工指針.
- Noda, S.,Yoshiro, K., Takahashi, K., Takemura, M., Ohno, S., Tohdo, M., Watanabe, T.(2002):RESPONSE APECTRA FOR DESIGN PURPOSE OF STIFF STRUCTURES ON ROCK SITES, OECD-NEA Workshop on the Relations between Seismological Data and Seismic Engineering Analysis, Oct. 16-18, Istanbul.
- Norman, A. A. and Walter, J. S.(2007):NGA Ground Motion Relations for the Geometric Mean Horizontal Component of Peak and Spectral Ground Motion Parameters.
- 大野晋,高橋克也,源栄正人(2001):カリフォルニア強震記録に基づく水平動・上下動の距離減衰式と日本の内陸地震への適用,日本建築学会構造系論文集(544),39-46,20010630.
- 大崎順彦(1996):建築振動理論,彰国社,157-158.
- 太田陽子,廣内大助(1998):福井地震による被害と地震断層(福井地震50周年:比較的最近明らかになったこと),自然災害科学,17(1),3-7.
- PNC(動力炉・核燃料開発事業団)(1992):高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書-平成3年度-,PNC TN 1410-92-081.
- 桜井春輔,川嶋幾夫,大谷達彦,松村真一郎(1994):トンネルの安定性評価のための限界せん断ひずみ,土木学会論文集 No.493 / -27, pp.185-188.
- 桜井春輔,足立紀尚(1988):都市トンネルにおける NATM,鹿島出版会.
- 産業技術総合研究所(2006):2005年福岡県西方沖地震余震域において地震質調査総合センター(旧地質調査所)が1985年に実施した音波探査記録について,地震予知連絡会会報,74巻,510-513.
- 産業技術総合研究所(2011):高橋雅紀氏ホームページ
<<http://staff.aist.go.jp/msk.takahashi/Subsurface.html>>,2011年1月情報取得.
- 産業技術総合研究所,海洋研究開発機構,東京大学地震研究所,防災科学技術研究所,北海道大学(2007):新潟県中越沖地震に関する緊急調査研究,科学技術振興調整費成果報告書.
- Somerville, P. G., Irikura, K., Graves, R., Sawada, S., Wald, D., Abrahamson, N., Iwasaki, Y., Kagawa, T., Smith, N., and Kowada, A.(1999):Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, Seismological Research Letters, 70, 59-80.
- 末富岩雄,石田栄介,福島康宏,磯山龍二,澤田純男(2007):地形分類とボーリングデータの統合処理による地盤増幅度評価と2004年新潟県中越地震における地震動分布の

- 推定，日本地震工学会論文集，第7巻，第3号。
- 耐特委（原子力安全委員会耐震安全性評価特別委員会）（2008a）：活断層等に関する安全審査の手引き。
- 耐特委（原子力安全委員会耐震安全性評価特別委員会）（2008b）：新耐震指針に基づく既設原子力施設の耐震安全性の評価結果に対するワーキング・グループとしての検討のポイントについて。
- 耐特委（原子力安全委員会耐震安全性評価特別委員会）（2009）：「耐震設計審査指針の改訂に伴う東京電力株式会社 福島第一原子力発電所5号機 福島第二原子力発電所4号機 耐震安全性に係る中間報告の評価について」に対する見解（案）。
- 耐特委（原子力安全委員会耐震安全性評価特別委員会）（2010）：発電用原子炉施設の耐震安全性に関する安全審査の手引き（案）。
- 武村雅之（1990）：日本列島およびその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係，地震，第2輯，43，257-265。
- 武村雅之（1998）：日本列島における地殻内地震のスケーリング則 - 地震断層の影響および地震被害との関係 - ，地震，第2輯，51，211-228。
- 東北大学総合学術博物館：ホームページ資料 地震のかたち 第2部「内陸直下型地震と活断層のすがた」，
<http://www.museum.tohoku.ac.jp/past_kikaku/earthquake/frameset/tenji2.htm>
- 東京電力株式会社（2008）：平成19年新潟県中越沖地震を踏まえた柏崎刈羽原子力発電所の基準地震動の策定について，原子力安全委員会 耐震安全評価特別委員会，第7回会合，第7-2-2号。
- 東京大学地震研究所：ホームページ資料 2003/07/26 宮城県北部の地震 特集ページ，
<<http://www.eri.u-tokyo.ac.jp/topics/MIYAGI030726/index-j.html>>
- 内山泰生，翠川三郎（2006）：震源深さの影響を考慮した工学的基盤における応答スペクトルの距離減衰式，日本建築学会構造系論文集（606），81-88，20060830。
- 内 文朗，古川 信雄，春日 茂，平野 憲雄，西上 欽也，見野 和夫，天池 文男，川部 喜朗，河野 芳輝，貞広 太郎（1983）：福井地震断層の位置と規模を定めるための探査，地震予知連絡会会報，30巻，368-375。
- 宇佐美龍夫（2003）：最新版日本被害地震総覧「416」-2001，東京大学出版会。
- 宇津徳治，嶋悦三，吉井敏尅，山科健一郎（1987）：地震の事典，朝倉書店。
- ZHAO, J. X., ZHANG, J., ASANO, A., OHNO, Y., OOUCHI, T., TAKAHASHI, T., OGAWA, H., IRIKURA K., THIO, H. K., SOMERVILLE, P. G., FUKUSHIMA, Y., FUKUSHIMA, Y. (2006) : Attenuation Relations of Strong Ground Motion in Japan Using Site Classification Based on Predominant Period, Bulletin of the Seismological Society of America, 96, 3, 898-913, Seismological Society of America.