

6. 今後の課題

6.1 委員会で取り扱ったテーマに対する今後の課題

第1期(平成25年～平成27年)の本委員会のWG活動を通して整理された課題を以下に列記する。

6.1.1 岩盤の動的物性

軟岩や断層・弱層については、動的な物性はPS検層および三軸試験から設定されている。しかし、硬岩(不連続性岩盤)については、通常、岩盤を弾性体と仮定しているため、PS検層の結果しか用いられていない。しかしながら、東北地方太平洋沖地震を経験し、設計用地震動が大きくなり、岩盤でも破壊を前提とした評価が必要になってきている。このためには、解析用の岩盤モデル・解析用物性の設定方法の高度化、岩盤の動的解析手法の実用化が必要であるが、以下のような課題がある。

- ① 不連続性岩盤では、せん断剛性 G や減衰定数 h のひずみレベル依存性を未考慮
- ② 特に、減衰定数 h については、調査方法が確立されておらず、慣用値を使用
- ③ 静的な強度・変形特性ですら別々の試験で求めており、ポアソン比も実験値ではなく慣用値を使用
- ④ 岩盤の引張り強度や動的な強度を評価する方法が確立されておらず、物性値は保守的に設定
- ⑤ 岩石や岩盤の試験はある程度実施されているものの、岩盤不連続面の試験は、実務でほぼ未実施
- ⑥ 不連続面の影響を考慮した解析手法を適用しようとしても、不連続面の動的な実験データがほとんどない評価の高度化が困難
- ⑦ 不連続面を対象とした動的試験の標準化とその結果を用いた評価方法の体系化

6.1.2 地震動の発生機構

強震動の推定は、統計的グリーン関数法等の半経験的手法が主体であり、レシピに基づけば比較的容易に強震動の評価が可能であるが、地震が発生する場所や規模、破壊伝播速度や破壊が停止する場所などを過去の事例をもとに統計的に判断して仮定して算定している。また、地表面断層変位や断層近傍の強震動特性などは評価できない。本来地震現象は、地殻に蓄えられた歪みエネルギーが断層に沿った動的せん断破壊によって解放される現象であり、地震発生過程を理解するには物理学的な評価が不可欠であり、断層の動力学モデルに基づく地震動予測が望まれている。そのためには、以下のような課題がある。

- ① 岩石の破壊と摩擦則に基づく動学的なアプローチによるモデル化および検討手法の確立
- ② 岩石の不連続面のせん断試験やスティックスリップ実験等の実施と、これに基づく断層運動のメカニズムの検討
- ③ 過去の断層運動の再現解析による各種解析手法、構成則の適用性比較と課題の整理
- ④ FEM等の理論的手法による精度向上の取り組み
- ⑤ 地質系および理学系技術者との協働による取り組み

6.1.3 岩盤構造物

(1) 岩盤トンネル

これまで、岩盤中の地震動が小さく、周辺が岩盤で支持されている山岳トンネルは耐震性に富むと漠然と考えられてきたが、新潟県中越地震の被害により必ずしもそうではないという事実が分かってきた。しかしながら、線状構造物である山岳トンネルは、どのような地質条件下にあり、覆工の現状や背後の状況を調査等によって明らかに耐震性を評価することは現実的に不可能である。また、地震時の定量的な評価手法も確立できておらず、未だ多くの解明すべき課題が残されている。

したがって具体的な被害予測(耐震性評価)を行った上で実施すべき耐震性向上のための対策工、

例えば、どの区間をどのような材質のどれ位の厚さのシートで補強するのか？などを決定することは現時点では難しい。これを可能とするためには、以下の項目が必要と考えられる。

- ① 耐震補強区間の抽出方法の確立（断層との関係、地質不良区間、背面空洞の存在などの評価）
- ② トンネルの地震時挙動に関する様々な観点からの解析的あるいは実験的研究を積み重ねる。
- ③ これまであまり実施されてこなかった岩盤の不連続性に着目したトンネルの地震時挙動の解明
- ④ 岩盤の不連続性の評価・モデル化方法の確立

(2) 岩盤斜面

一般の斜面安定工・地すべり対策工事では地震時の検討をすることは少ない。また、ダム・宅地・鉱滓処理場などでは各種基準・指針のなかで地震時の安定計算法が示されているが、静的に地震力を作用させる震度法により検討されており、原子力のように動的解析による検討はほとんどされていない。この震度法については、以下のような問題点がある。

- ① 地震の継続地震は極めて短いため、すべり安全率が低下する時間はごく短時間であり、地盤に発生する変形も極めて微小である。しかし、それが繰り返されることにより変形が累積する。
- ② 地震時安定性評価はすべり安全率により評価され、所要安全率を下回ると崩壊とみなされる。しかしながら、現実的に崩壊するほどの変形が生じているかは疑問。
- ③ 計算に使用する地盤の強度は静的なそれを使用することが多い。しかし、繰り返す震動を考慮した動的強度を使用する必要がある。
- ④ 斜面の地震に対する挙動を考えるにあたっては、斜面の特性によっては地震動増幅という現象が発生する。
- ⑤ 実際の地震動は正負の交番力であるのに対し、震度法では一方向に作用させている。

(3) 基礎岩盤

今回文献調査等を行った範囲では、基礎地盤の破壊により構造物に被害が生じたものは、斜面崩壊・すべりにより基礎が崩壊したケースや、地表面断層変位や液状化等による地盤の変形により崩壊したケースでは確認されたが、水平な基礎岩盤が滑り等により崩壊したケースは確認できなかった。

これまで、基礎岩盤の地震時安定性については、岩盤はひずみが小さく、堅硬であり、地震動も小さいことから破壊しないものと仮定して、弾性体でモデル化されてきた。しかしながら、近年の設計用地震動の増大に伴い、構造物の破壊を考慮したL2地震動による性能照査が求められるようになってきたが、岩盤は依然として弾性体として扱われている。このため今後は、岩盤不連続面を考慮した地震応答の算定や安定性評価が必要になるものと思われるが、以下の項目が課題であり、実用化に向けた様々な検討が必要である。

- ① すべり安全率による安定性評価から変形量照査への移行と評価基準値（許容変位量）の設定
- ② 適切な岩盤物性値の設定（動的強度、引張強度の導入）
- ③ 減衰定数の評価
- ④ 岩盤の特性（不連続面の挙動）を考慮した岩盤のモデル化
- ⑤ 破壊後の挙動を評価できる解析手法の確立と検証
- ⑥ 検証のための基礎地盤の破壊事例の収集や振動模型実験の実施

また、断層変位に対しては、断層変位量をいかに評価するか、変位を受けた場合の構造物の挙動や安全性の評価方法や評価基準値についても課題が残されている。

(4) 石積み構造物

石積み構造物は、個々の石を積み上げた構造を形成しており、耐震性や挙動のメカニズムが未だ十分に解明されていない。このような背景の中、石積み構造物の保存・補修に向けた力学的安定性に関する静的、動的挙動を実験、解析の両面から検討が行われており、基本的特性が把握されつつあるが、今後さらに取り組むべき課題を以下に示す。

- ① 国内外における石積み構造物の地震時被害調査と分析
- ② 石積み構造物の動的挙動を明らかにする振動模型実験（実物大実験を含む）の実施
- ③ 石積み構造物の動的挙動を予測する解析手法の確立
- ④ 石積み構造物の耐震診断手法の検討（形状把握，地盤状況，力学的安定性評価，長期モニタリングなど）

(5) 立坑

立坑の地震被害はこれまで報告されておらず，耐震性評価法も明確には定められてはいない．しかし，重要構造物へとつながる大深度立坑については，地下構造物周辺の地盤をFEMでモデル化し，応答震度法により構造物と地盤の相互作用を考慮した解析が行われている事例もある．耐震設計を行う上での課題としては，以下の項目が挙げられる．

- ① 大深度地下における地震動の設定方法
- ② 少ない地質情報をもとにした地盤モデルの作成
- ③ 立坑および周辺岩盤の健全性評価方法
- ④ 立坑の耐震性評価法の体系化

6.1.4 岩盤構造物の数値解析

岩盤・岩石の振動や波動伝播を扱った解析事例の文献の収集を行った．しかしながら，これらは総じて開発段階のものが多く，実問題への適用には課題も多い．以下に主な課題を列記する．

- ① 破壊規準を構成則にどのように取り込むのか．
- ② 減衰定数の取り扱い
- ③ 不連続面の導入方法
- ④ 境界条件の設定
- ⑤ 岩盤のモデル化および物性値の設定方法

6.1.5 全体の総括

地震動WGで扱った地震発生機構に関するものを除くと，第1期で得られた岩盤動力学における主たる課題は，以下の3点であった．

- ① 岩盤不連続面を考慮した地震時安定性評価手法が体系化されていない（静的or動的，等価連続体or不連続体，安全率or変形）
- ② 評価に用いる物性設定方法が体系化されていない（不連続面の試験方法，物性の評価・設定方法の基準化がされていない）
- ③ 不連続性岩盤をどのようにモデル化するのか

しかしながら，岩盤不連続面の分布と構造物スケールとの関係により岩盤のモデル化と解析手法は異なる．**図6.1**にみられるように，構造物のスケールに比べて不連続面が非常に多い場合や，非常に少ない場合は等価な連続体解析が適しており，その中間に当たる不連続面分布では不連続体モデルが適しているといわれている．また，岩盤物性値の評価も，不連続面のモデル化に応じて適切な調査，試験方法を選定する必要がある．このように考え方は従来からあるが，調査，試験，設計・解析，施工までを体系的に整理した事例はほとんどない．

また，岩盤動力学では，地震動の大きさによっても挙動が異なるものと考えられる．比較的小規模な地震に対しては弾性体と扱えるかもしれないが，地震動が大きくなると不連続面の非線形特性により応答が異なるものと考えられることから，対象とする地震動の大きさによっても評価方法が異なってくる．

実務への適用を考えると，できるだけ簡易な方法で評価できる手法が望まれる．そこで，現時点でどこまでなら評価でき，何ができないかを整理したうえで，動力学的な検討の必要性の有無や，検討方法も静的or動的，評価方法も安全率or変形量など，条件によって何をしなければいけないのか，

またはしなくて良いのかを整理する必要があると考えている。

しかしながら、不連続性岩盤の動的安定性評価方法を体系化が進まない最大の理由は、評価方法の妥当性や適用性を検証するためのデータが少ないことにある。実際に地震で崩壊した事例や模型による振動崩壊実験が少なく、実際の崩壊事例で、地質状況や不連続面の物性まで調査・試験している事例は非常に少ない。体系化を進めるうえで、振動模型実験や実際に地震で崩壊した事例の調査等は不可欠であり、併せて実施する必要がある。

地震動 WG で扱った地震発生機構に関しては、岩盤動力学に基づく断層変位および地震動の予測法の確立が望まれると同時に、主断層から派生して発生する分岐断層の発生予測も重要な課題である。また、地震動や断層変位が構造物に与える影響については、不連続性岩盤内の地震動伝播や変形挙動の把握、断層変位が構造物に作用した場合の構造物の破壊メカニズムの解明と、設計への適用も課題である。断層運動のシミュレーションやこれに伴う構造物の挙動を評価するためには、3次元モデルによる評価が必要となるが、大規模な解析を行うためには計算機の処理能力向上や、スパコンの活用等も必要となる。

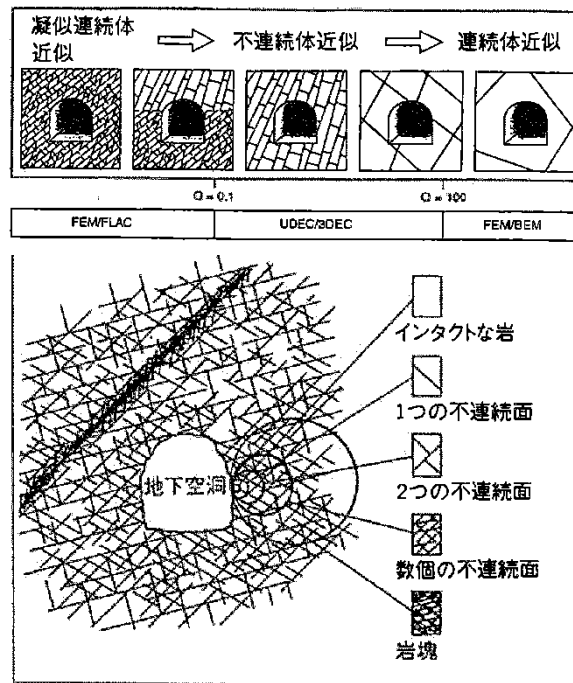


図 6.1 不連続面の分布と構造物スケールの関係による岩盤のモデル化と解析手法 (Barton, 1995)

6.2 その他のテーマに対する今後の課題

岩盤動力学分野で扱うべきものは、第1フェーズで取り扱ったものだけでなく、岩石、岩盤および岩盤構造物の破壊（例えば、山はね、スポーリング、陥没、すべり、トップリングなど）、発破、地球物理探査、非破壊法、衝撃なども含まれる。そこで以下では、第1フェーズで取り扱えなかったテーマについて今後の課題を列記する。

(1) 試験法と岩盤の構成則

岩石の動的特性を評価するためにスプリット・ホプキンソン棒(Split Hopkinson Pressure Bar : SHPB)法が採用されている。この試験法は、衝撃荷重を作用させて高速変形（高ひずみ速度）が生じる際の応力-ひずみ特性や引張強度を求める方法であるが、異なる荷重条件において物性値を評価できないなどの課題がある。また、動的な繰り返し载荷試験方法（片振りor両振りなど）についても課題が残

されている。

岩盤の構成則は試験結果をもとに設定されるが、現状では土質力学で使用されている構成則を流用している。しかしながら岩盤は、不連続面が分布する非均質な材料であり、この挙動を考慮した構成則を設定する必要がある。

(2) モニタリング技術

岩盤が破壊する際には、振動、破壊音、電磁波、熱、光、電気抵抗の変化などが生じることが知られている。従来の変位やひずみの計測に、これらの計測結果を加味した多重パラメータ計測を行うことで、岩盤の破壊状況をより精度よく把握することができるようになると考えられる。これらの発生のメカニズムは、岩盤の破壊力学的観点から評価すべきものであり、岩盤動力学の範疇に入る。

これらを計測するためのセンサーの開発や計測技術の向上、何をどのように計測し、組み合わせることによって、非破壊により岩盤の状態を評価するための調査法を確立することも岩盤動力学におけるテーマである。

(3) 山はね

山はねは、硬質岩盤からなる地山において、高地圧・偏圧条件下で掘削壁面が瞬間的に、あるいは爆発的に崩壊する現象であるが、メカニズムは十分に解明されていない。今後、リニア新幹線等の高地圧下で掘削工事も計画されており、動的な破壊現象である山はねのメカニズムの解明が望まれる。

(4) 発破

発破による応力波の伝播、発破孔の破壊とそれに伴い形成される亀裂の進展、また、発破に伴う飛石の発生機構やその到達距離など、動的な破壊力学に基づくメカニズムの解明が十分になされておらず、評価・解析手法の確立など多くの課題が残されている。

(5) 衝撃

発破も衝撃であるが、落石等の飛来物の衝突による岩盤の破壊や亀裂の進展、衝撃波の伝播と衝撃荷重の評価も対象となる。メカニズムの解明や、解析手法の確立などの課題も多い。

(6) 低土被り状態の地下空洞などの特殊条件下の構造物の挙動

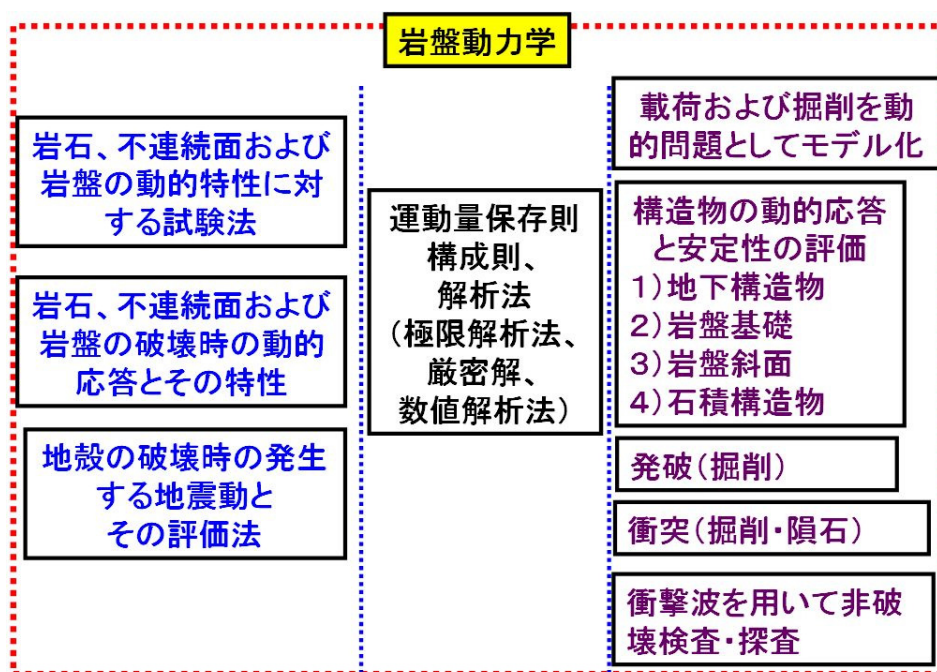
坑口部や破碎帯などの弱層付近を除くと、比較的堅硬な岩盤内に建設されたトンネルや地下空洞は地震に強いと考えられている。しかしながら、土被りが小さい場合には、地震時に地山が不安定となり地下空洞が崩落することがある。第1フェーズで取り扱えなかった低土被り状態などの特殊条件下での地下空洞の安定性についても、崩壊事例の再現等を踏まえて評価・解析方法を確立していく必要がある。

参考文献

Barton, N. 原著, 伊藤淳訳, (1995): ノルウェートンネル工法(NMT)の概要(1), トンネルと地下, 第26巻, 第10号, pp. 39-46

あとがき

岩盤動力学のスペクトルは大変広く、岩石、岩盤および岩盤構造物の破壊（たとえば、山はね、スポーリング、陥没、すべり、トップリングなど）、発破、地球物理探査、非破壊法、岩盤の工学とその科学および衝撃（隕石の落下など）を含んでいます。本小委員会は1名のオブザーバーを含む16名の委員構成で3年間の活動を通して、岩盤力学を中心として地震工学などの分野における知見も併せて、現状とその問題点、解決すべき課題等を明らかにすることを目指しました。また、岩盤力学および岩盤工学の新たな発展と学問として、岩盤動力学の体系化を目指しました（下図参照）。



学問として体系化した岩盤力学の基本概念

本小委員会で設立した各ワーキング・グループは、設立趣旨にしたがって活動に取り組みました。各ワーキング・グループの具体的な活動内容は下記の通りです。

- 1) 岩盤動物的物性値 WG は、岩盤の動的挙動を地震応答の観点から現状を整理し、課題を抽出し、岩盤の動的特性に関する試験・実験の結果（既往研究）を取りまとめ、問題点と今後の課題を整理しました。
- 2) 地震動 WG では、強震動と断層運動に伴う永久変形の予測、評価方法を整理し、現状の問題点と今後の取り組むべき課題を明らかにしました。特に、断層運動による強震動および永久変形に着目し、不連続面を有する岩盤の地震伝播、永久変形による地盤変形、構造物への影響について検討を行いました。
- 3) 岩盤構造物 WG は、各種岩盤構造物に地震動に被害例を収集し、現状の設計・解析法を整理し、今後の取り込み方向を提案することが目的でした。このため、国内外の文献調査を行い、今まで提案および利用されている各種の設計法・解析方法と評価レベルの現状を整理し、その問題点と今後の課題をまとめました。しかしながら、構造物の範囲は広いため、地下構造

物、岩盤斜面、岩盤基礎および石積構造物・遺跡のサブ・ワーキング・グループを構成して活動しました。

- 4) 解析技術・手法 WG は、岩盤動力学における解析技術について現状を整理し、今後の取り込み方向を提案することを目的とし、国内外の文献調査を行い、今まで提案および利用されている各種の解析技術の現状を整理し、その問題点と今後の課題をまとめました。

地震動 WG で扱った地震発生機構に関するものを除くと、この第 1 フェーズで岩盤動力学における主たる課題は、以下の 3 点でした。

- ① 岩盤不連続面を考慮した地震時安定性評価手法が体系化されていない
- ② 評価に用いる物性設定方法が体系化されていない
- ③ 不連続性岩盤をどのようにモデル化するのか

上記の課題を解決するために、具体的に下記のテーマを対象として引き続き研究活動を実施する予定です。

- a) 岩盤動力学立場から各種の数値解析手法を用いて地震断層を考慮した地震動の推定法の比較および妥当性の検証
- b) 動的解析用室内試験法の提案およびその基準化
- c) 岩盤構造物 WG は引き続き活動を進めて内容を深め、具体的に地震で被害を受けた各種構造物について選択した事例に対する詳細な検討
- d) 数値解析 WG は、地震動 WG、実験 WG および構造物 WG と一体化した形で各種数値解析手法の妥当性およびその適用性に関して引き続き活動
- e) 実務に向けて各種岩盤構造物の動的設計法の検討

本小委員会が岩盤動力学に関してまとめた本報告書は詳細な執筆物であり、本小委員会のメンバーの努力の成果です。この報告書が、岩盤動力学の今後の発展に関してマイルストーンになることを期待するとともに、関連する分野の方々の議論に資することができれば幸いです。

研究成果報告書

2016年10月吉日 発行

編集・発行 (公社)土木学会 岩盤力学委員会
岩盤動力学に関する研究小委員会
