

第3章 破砕帯に対する影響評価技術

3.1 照査の前提

原子力発電所の重要施設は、地質学・地形学の観点から「将来活動する可能性のある断層等」の上には建設されない¹⁾。しかし、活動する可能性があるとして判断された断層以外の破砕帯が地中構造物と交差する場合がある。そして、地震動が入射した際に、周囲の岩盤より**軟弱**なそれらの部分で不連続な振動が生じる可能性は想定される。本章では、こうした問題を扱う場合の基本事項を整理し、解析手法の選定と応答値の算出、および耐震性能照査の方法について記述する。本編である「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル・照査例 2021」(以下、2021年版指針・マニュアルという)は開削工法によるボックスカルバートを主な対象としているが、原子力発電所にはNATM工法によるトンネルも存在するため、それらに特有の問題として破砕帯との交差を取り上げ、追補する。構造物の要求性能や目標性能については、2021年版指針に準拠する。解析や照査についても、破砕帯との交差部に係る事項以外は2021年版マニュアルによる。

3.2 基本事項の整理

3.2.1 断層変位問題との相違

図 3.2-1 (a) に示すような解析領域の端部から変位が強制される問題と、**図 3.2-1 (b)** に示すように、地震動の入射を受けて領域内の破砕帯で相対変位を生じる問題とを区別する。基本的に(a)図の問題を扱うのが「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針<別冊>断層変位に対する影響評価技術 2021」(以下、2021年版別冊という)であり、(b)図の問題を扱うのが本章である。耐震性能照査では、無作為に広い範囲を扱うことはできず、構造物周りの或る範囲が対象として切り取られる。(a)図に言う系の外からの強制変位は、2021年版別冊では調査、広域解析、統計データ等に基づく「与条件」とされている。本章では、この与条件としての断層変位をゼロとする(そうでない場合、2021年版別冊の様に独自に評価を行うことはあっても、現行の規制下で耐震性能照査の工程に進むことはない)。一方、切り取られた内側は、構造解析による挙動の推定が可能な領域である。地質学・地形学的に活動する可能性が無いと判断された破砕帯であっても、力学的に見ればそれを挟む岩盤に比して剛性や強度が小さい。そして、地震時に破砕帯が変形すればそれを挟む岩盤間には相対変位が生じる。この地震時相対変位((a)図のそれと区別するため、ここでは断層変位と称さない)が構造物に及ぼす影響に着目する。

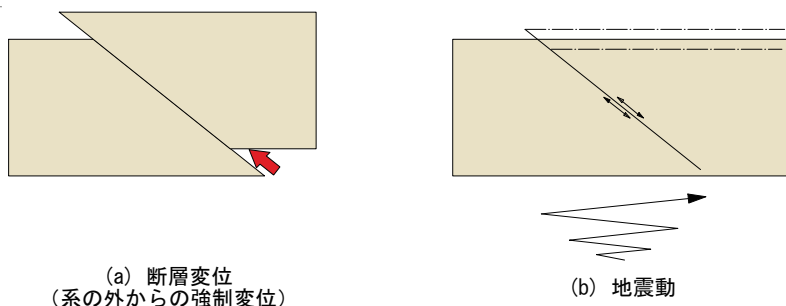


図 3.2-1 断層変位問題と破砕帯を含む系の震動問題との概念的な区分

3.2.2 着目する破砕帯の特徴

山岳トンネルにおいて破砕帯を通過する部分が弱点になりやすいことは知られている^{2), 3), 4)}。図 3.2-2 に示すように、破砕帯の厚さが構造物のスケールに比して大きい場合、健全な岩盤領域と破砕帯の剛性差によって振動モードが変化してそれらの境界付近でトンネルに負荷が掛かったり、緩んだ岩片が構造物に偏圧を与えたりすることが懸念される。一方、薄い破砕帯の場合は、両側の健全な岩盤が異なる振動をして構造物に一面せん断のような作用をもたらすのが主たる懸念要因である。ここでは、原子力発電所の施設を対象としていることを踏まえ、目安として mm オーダーから 3m 程度⁵⁾までの薄い破砕帯を想定する。また、破砕帯が発達している以上、本章で言及する地盤は相応に硬い岩盤と考える。地盤が柔らかくてトンネルが杭の様に長い区間で曲げ変形するなどの場合は別の手立てによった方がよい。

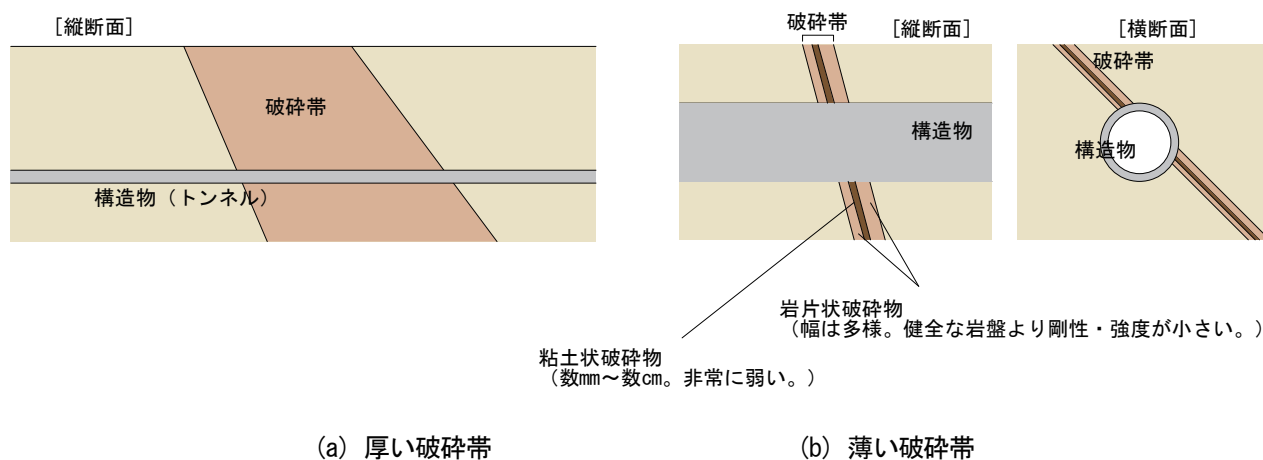


図 3.2-2 トンネルの外径と破砕帯のスケール

いま、図 3.2-3 に示すように、水平面と破砕帯の傾斜方向のなす角度を傾斜角度とする。図 3.2-4 に示すように、傾斜角度が 90° に近付くと、両側の岩盤の特性が同じであるかぎりにおいて、解析上では走向方向の振動に差が生じず、その方向のずれ量は小さくなる。一方、傾斜角度が小さくなると、相対変位は任意の方向に生じうる。技術資料 XI や 6) の解析的検討から、開口成分（法線方向の開き）は岩盤の自重の影響を受けて生じにくいと考えられるが、特に入力大きい場合は、構造物を含まない岩盤－破砕帯系の解析を行った時点で、同成分の有無を確認した方がよい。2021 年版別冊の定義にしたがって、トンネル軸が水平面上にあると仮定した上で破砕帯の走向とトンネル横断方向のなす角度を走向角度としたとき、それが 0° に近付くと（トンネル軸が破砕帯と直交すると）トンネル縦断方向に沿った挙動が問題となり、 90° に近付くと（トンネル軸が破砕帯の面と平行であると）トンネル横断面の挙動が問題となる。断面図で見たときの破砕帯の見かけの傾斜角度は、図 3.2-5 に示すように三次元空間上での傾斜角度と異なる。傾斜角度はずれの方向に顕著に影響するので⁷⁾、モデルの作成や結果の評価に際して注意する。

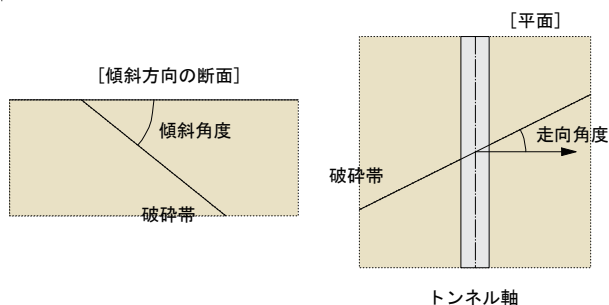


図 3.2-3 傾斜角度と走向角度

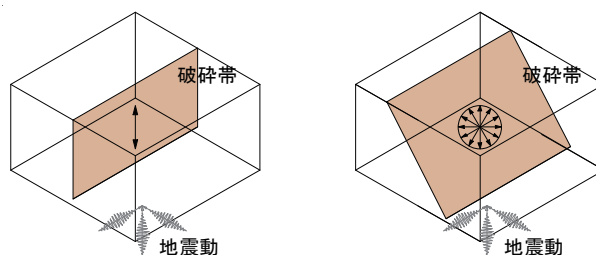


図 3.2-4 発生しうるずれの方向

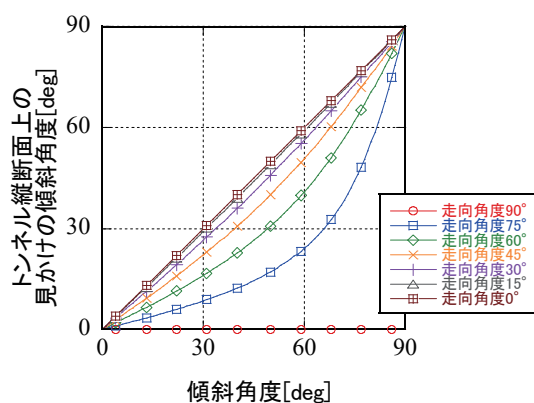
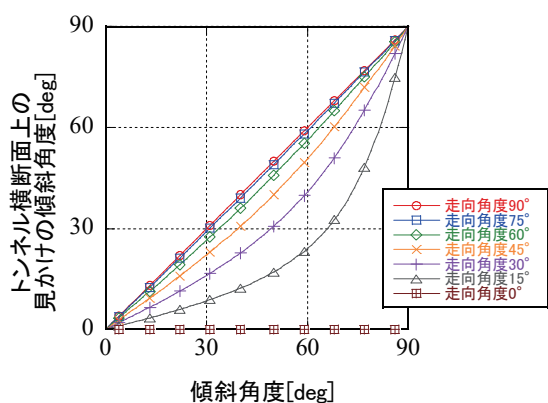


図 3.2-5 実際の傾斜角度と断面上の見かけの傾斜角度

3.3 解析モデルの作成と応答値の算出

以降の節では、以下の3通りの照査手法（地震応答解析手法と照査指標・限界値の組み合わせ）について述べる。

- A. 岩盤—破碎帯系の動的応答解析のみに基づく照査
- B. 岩盤—破碎帯系の動的応答解析+構造物近傍モデルの静的強制変位解析に基づく照査
- C. 岩盤—破碎帯—構造物系の動的応答解析に基づく照査

Aが簡易に安全側の判定を行う組み合わせ、Cが詳細かつ合理的な判定を行う組み合わせとなっていて、Aでスクリーニングを行った後、B、Cを適用するといった運用ができる。応答値の算出過程、限界値の設定と照査の過程には、各照査手法で共通する部分と固有の部分とがあるので、まず3.3節では解析モデルについて、3.4節では照査指標と限界値について整理する。その後、3.4節後半で改めて上記の組み合わせの内容を示す。

3.3.1 解析モデルの作成

(1) 破碎帯の物性設定とモデル化

構造物の性能照査を主題とする本マニュアルにおいて地盤の調査は前提であって、ここでは深く言及しないが、できるかぎり考慮する破碎帯の範囲とその構成材料の特性の把握に努める(8)、(9)など参照)。例えば、一口に破碎帯と言っても、ごく薄い粘土状の破碎領域と、厚さが様々な岩片状の破碎領域とから成り^{10)、11)}、それぞれの領域の材料特性を取得して解析モデルに反映すれば解析精度の向上が期待できる。破碎帯は、厚い場合はソリッド要素、薄い場合はジョイント要素でモデル化するのが順当であるが、文献5)では、弱層の厚さが3m以下であればど

これらの要素でも発生するせん断応力に差がほとんど生じないという結果が報告されている。

(2) 解析領域および境界条件

破砕帯の水平方向や下方の端が既知であれば、それを内包する岩盤の解析領域を確保することを基本とする。一方で、破砕帯の端部の設定が難しい場合には、境界条件を慎重に設定する必要がある。

傾斜方向と鉛直方向のなす断面の解析によって得られるのは、破砕帯の水平方向への無限延長を仮定した場合の同断面に平行する成分の挙動であるが、先述のように、一般に破砕帯近傍における相対変位は走向成分も有する。破砕帯の水平方向の端が未知のとき、例えば、**図 3.3-1** に示すように、ソリッド要素の岩盤モデルの走向方向端部の節点を結んで周期境界にする、平面要素モデルの奥行方向に当たる走向方向にも自由度と剛性を与えるなどの方法により、計算負荷の増大を抑えて走向成分を考慮することができる。最近では、自由地盤でなく、破砕帯を含む二次元断面と解析領域との間をダッシュポットとばねで結ぶ粘性境界を用いた研究もある¹²⁾。

破砕帯の下端は往々にして明らかでなく、解析領域下端に合理性のある境界条件を設定することは難しい。現時点における選択肢は、(破砕帯を含まない) 一般的な問題でよく用いられる粘性境界や固定境界であるが、いずれも下端の相対変位を合理的に説明するものではない。よって、動的解析のモデルでは、解析領域をできるだけ下方に広く取る。粘性境界と固定境界とを比較した場合、下端近傍では節点の拘束されていない粘性境界の方が大きな相対変位を生じるものの、下端から離れると相対変位の差異は小さくなる⁶⁾。下端境界の影響を受けにくくするためにも、構造物と解析領域下端との間は十分な離隔を取った方がよい。

実際の破砕帯は大小の凹凸を有し、それによって地震時の抵抗機構は平滑な場合と異なるはずであるが、解析モデル上では平滑と仮定せざるをえない場合が多いと推察される。この仮定は、安全側と考えられるものの、相対変位の過大評価や構造物への過剰な応力集中につながる可能性がある。破砕帯の凹凸を調査する技術とそれを解析モデルに反映させる技術の発展が望まれる。

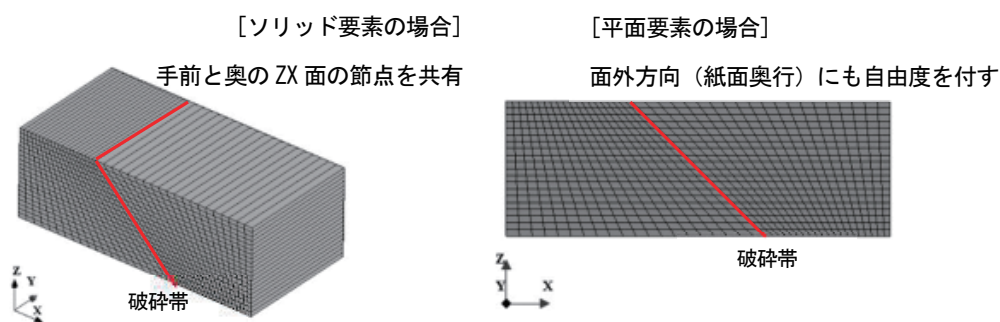


図 3.3-1 岩盤—破砕帯系の解析モデル例

(3) 構造物の解析モデル

周辺岩盤が硬く、交差位置でのせん断作用が卓越するという目下の問題に対しては、鉄筋とコンクリートの材料非線形性を考慮したソリッド要素で構造物をモデル化するのが望ましい。また、構造物と岩盤との接触面にすべり・剥離を考慮する非線形ジョイント要素を設けることも交差部近傍の挙動を解析するために重要である。シェルモデルの解析から得た応力を許容応力と比較する方法は安全側であるが、シェル要素は基本的に面外せん断に対して弾性を仮定するため、過度に厳しい結果を導くことは容易に想像される。ただし、梁やシェルのモデルで十分挙動を表せる問題においてそれらの使用を妨げるものではない。要素分割について、**技術資料 XI, X** では、壁厚方

向3分割程度で**技術資料 VIII**の実験結果を追跡できている。トンネル状の構造物では、フランジ相当部の面外破壊とウェブ相当部の面内破壊が平行して進行し、かつウェブ相当部の荷重負担が大きいので、壁厚方向の分割は過度に細かくしなくてもよい。破碎帯交差部近傍では、トンネル軸方向の分割が粗くならないように注意する。

3.3.2 主な応答解析手法

(1) 岩盤—破碎帯系の動的応答解析

岩盤と破碎帯のみのモデルは、トンネル軸を気にすることなく、破碎帯の走向とそれに直交する軸方向に基づいて座標系を設定できるので比較的作成しやすい。動的地震応答解析を行い、構造物との交差位置に生じる相対変位の最大値とその方向を得る。

(2) 岩盤—破碎帯系の動的応答解析+構造物近傍モデルの静的強制変位解析

構造物と近傍の岩盤から成るモデルを作成し、破碎帯を挟んだ片方の岩盤ブロックに(1)で得た方向への強制変位を与える。構造物に直接作用している荷重、および構造物のひずみを応答として得る。ここでいう構造物近傍モデルは、切り取った領域内の岩盤のひずみの時間的・空間的分布を再現するものではなく、交差位置における破碎帯の相対変位の時刻歴最大値を構造物に**作用させる**ことに特化したモデルと位置付けられる。切り出す範囲を決定する際は、与えようとしている変位が、破碎帯や入力点近傍の岩盤に吸収されないように配慮する。そのため、このモデルに限っては、無闇に解析領域を広げることは適切でない。破碎帯部分に敢えて要素を設けず空隙にすることも有効である。

(3) 岩盤—破碎帯—構造物系の動的応答解析

破碎帯まで含む連成系モデルに地震波を入力し、従来(2021年度版マニュアル)の材料非線形解析を用いた応答解析に準じて応答値の算出を行う。一般に傾斜角度、走向角度は 0° や 90° といった切りのよい値ではないため、モデル作成や境界条件の設定が難しいが、文献(7)、(12)、(13)といった幾つかの研究事例がある。

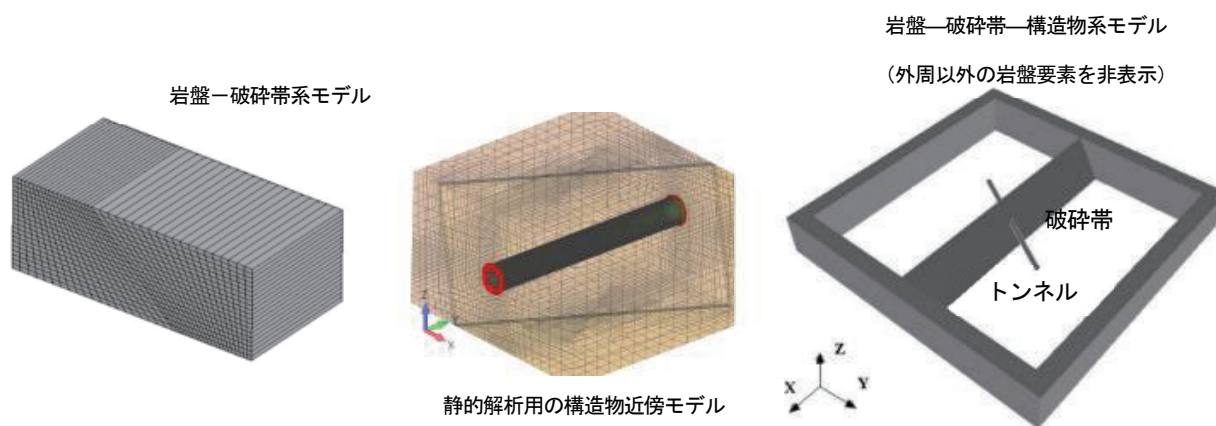


図 3.3-2 代表的な応答解析手法

3.4 耐震性能照査

3.4.1 損傷モードの確認

照査に先立ち、変形図、ひずみコンターなどを通して損傷モードを確認する。以下に述べる指標は**図 3.4-1**左に示すように、破碎帯に沿ったずれ損傷を主な対象としていて、同図右のように、トンネル軸方向

に引っ張られた場合に全周に生じる軸方向の開口や、曲げ変形が卓越した場合の曲げ引張縁の開口（これも結局は軸方向の開口である）を照査する内容でないことに注意する。軸方向の開口は、トンネルに力学的な意味で支障をもたらすモードではないものの、地下水の流入経路、内容水の流出経路になるので、止水性に期待しているなどの場合は流出入量を推定し評価する。

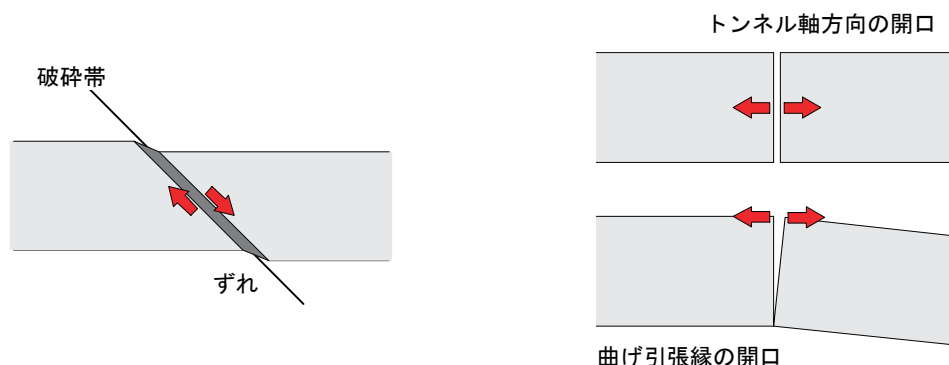


図 3.4-1 損傷モード (左) 破裂帯に沿ったずれ[本章の照査の対象] (右) トンネル軸方向の開口[対象外]

3.4.2 主な照査指標とその限界値

基本的にトンネルの抵抗力が最大となる点を限界状態とする。(1)はそれを直接参照するもので、(2)は応答解析法によってトンネルの抵抗力が陽に出力されない場合の代替として用いることが出来る。

(1) 破裂帯の相対変位

破裂帯と構造物との交差位置に生じる相対変位を指標とし、それと同じ方向の構造物の抵抗（荷重）が最も大きくなるときの値を限界値とする。この限界値を得るには、基本的には構造物近傍モデルの静的強制変位解析が必要となる。しかし、多くの交差部があるなどの場合、逐一モデルを作成するのは難しいので、解析によるパラメータスタディの結果を整理した評価式を**技術資料 X**に示した。

(2) コンクリートの最小主ひずみ

2021年度版マニュアルの2.3.2(2)、4.3.2(2)、および**技術資料 IX, X**の検討を踏まえ、**参照長さ 300mm のコンクリート要素の最小主ひずみ**に対して-0.01を限界値とする。**技術資料 IX, X**の検討は、円形断面のトンネル構造物において、局部的にこのレベルのひずみが発生する状態と、ずれと同じ方向の構造物の抵抗（荷重）が最も大きくなる状態とが対応することを示している。その典型的な結果を技術資料から抜粋して**図 3.4-2**に示す。

ひずみの急変部たる損傷領域では、要素のひずみが要素寸法の影響を受けやすいことに注意する。要素ひずみは、平たく言えば、変位を分子、要素寸法を分母とする指標であるから、同じ状態に着目していても、本来の損傷領域より小さい要素を用いると解析上で損傷が集中（局所化）して過大な値が出力されやすく、逆に本来の損傷領域より大きい要素を用いると、損傷している部分としていない部分の変形の入り混じるなまった値が出力されやすい。ゆえに上記の参照長さより小さい要素において-0.01を限界値とすることは安全側である。逆に大きい要素を用いる場合は限界値を低減する（**技術資料 X**）。

なお、**技術資料 VIII, IX, X**では、トンネル内表面に生じる段差（内面段差）も損傷指標として取り上げており、0.5mmの内面段差が生じた時点と構造物の抵抗（荷重）が最も大きくなる状態もまたよく対応することを実験・解析の両面から確認している。実際に損傷した実構造物や試験体の評価を行う場面、DEM、RBSMなどの不連続体解析を適用した場面で有効と考えられる。

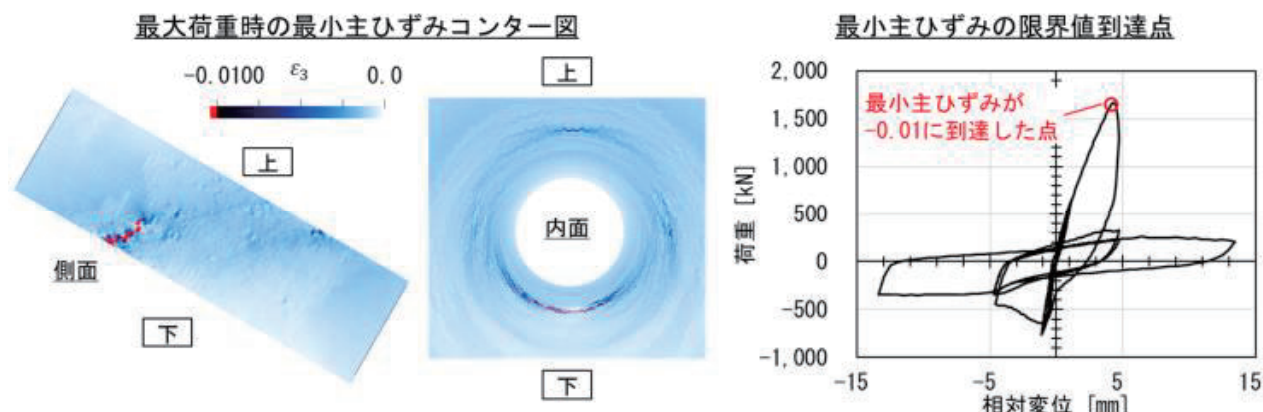


図 3.4-2 最大荷重時の相対変位と最小主ひずみの例（技術資料 IX より Case 1）

3.4.3 応答解析手法と照査指標の組み合わせ

ここまでに記した解析モデルや照査指標・限界値の種類を踏まえて、改めて3通りの照査手法について述べる。いずれによった場合も、2021年版マニュアル3.3.1に示した安全係数の主旨を適切に考慮する。なお、A、Bについては、照査例IVにおいて詳細な手順を記す。

A. 岩盤－破碎帯系の動的応答解析のみに基づく照査

岩盤－破碎帯系の動的地震応答解析を行い、破碎帯と構造物の交差位置に生じた相対変位の破碎帯平行成分（ここではずれと称する）を、**技術資料 X**の式による限界ずれ量と比較して判定する。複数の交差箇所があるときの優先度の決定や、構造物のソリッドモデルが必要なレベルの問題であるか否かの確認（スクリーニング）において有用である。ただし、同式は、相対変位が有意な開口成分を持たないことを適用条件としている。安全係数は、本編でプッシュオーバー解析を通じた照査を行う場合、すなわち2021年版マニュアル4.3.2(3)に準じ、かつ**技術資料 X**で整理された式の導出過程におけるばらつきを加味する（結果的に限界値係数は2.0以上となる）。破碎帯と交差しない区間の耐震性能照査は従来の方法によって別途行う。

B. 岩盤－破碎帯系の動的応答解析＋構造物近傍モデルの静的強制変位解析に基づく照査

構造物近傍モデルに与えた変位と、構造物に直接作用している同方向の荷重との関係を生出力できる場合、最大荷重点に達したか否かで判定する。荷重は、具体的には、破碎帯をはさむ一方の岩盤ブロックとトンネルの境界面の応力を合算する、破碎帯と交差するトンネル断面の応力を合算するなどの方法によって得られる。破碎帯部分を空隙にしたモデルであれば、変位を入力した節点の反力を合算するという方法もある。陽な荷重の出力が難しい場合は、最小主ひずみを指標として照査する。材料非線形性を考慮したソリッド要素で構造物をモデル化するので、2021年版マニュアル3.3.2に即したモデルの調整を行い、解析プログラム、解析者、解析モデルに起因する耐力の過大評価傾向がある場合それを抑制する。安全係数は、Aと同じく2021年版マニュアル4.3.2(3)に準じることを基本とするが、繰返し作用を考慮する限界値係数の割増しは1.0～1.2とする（後述の3.4.4(2)で補足する）。破碎帯と交差しない区間の耐震性能照査は従来の方法によって別途行う。

C. 岩盤－破碎帯－構造物系の動的応答解析に基づく照査

岩盤－破碎帯－構造物系モデルを用いて動的地震応答解析を行い、最小主ひずみおよび部材厚増分の2つの指標による照査を行う。2021年度版マニュアルでは、破碎帯との交差部でない一般の区間に対して「材料非線形解析に基づく照査」を適用する場合、最小主ひずみと部材厚増分の2つの指標による照査を行うこととしている。そ

いて、追補に当たっての検討により、破碎帯と交差する部分については、最小主ひずみを指標として照査できるとの知見を得た。すなわち、前者による照査は後者による照査を包含している。本編で材料非線形解析による動的地震応答解析を通じて照査を行う場合に準じて安全余裕を確保する。具体的には、2021年版マニュアル 3.3.2 に即してモデルの調整を行うとともに、同 3.3.1(2)に準じて安全係数を設定する。三次元モデルを用いた場合、破碎帯との交差部でない一般の区間がモデルに含まれていることから、破碎帯と交差しない区間の耐震性能照査を兼ねることができる。

3.4.4 耐震性能照査時の留意点

(1) 破碎帯近傍の変形・損傷に及ぼす周辺岩盤の変形・損傷の影響

破碎帯と交差しない一般の区間は、二次元横断面に着目して耐震性能照査が行われることが多く、そこでクリティカルになる領域を取って三次元的に表すと図 3.4-3 の斜線部のようにトンネル軸方向に延びる格好となる。一方、破碎帯の相対変位に起因する損傷は、濃灰色の帯のように破碎帯との交差面に沿って生じる。トンネル軸と破碎帯の走向が平行で、なおかつ横断面内で負荷の大きい位置が合致するのが最も不利な状況と考えられるが、それは相当特殊である。よって、実用面での便も考慮して、照査手法 A, B では 2 つの現象を独立と捉えてそれぞれ解析・照査することとした。ただし、相互の影響を無視できる条件は十分明らかとはいえないので、A, B を選択するに当たっては、破碎帯を含まない一般区間の照査結果を前もって確認した方がよい。そこで特に余裕が無い場合は C の手法で精査するなど配慮する。

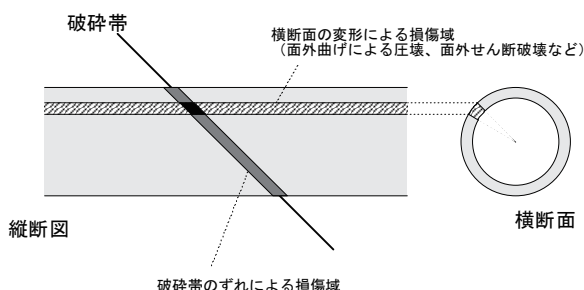


図 3.4-3 横断面の変形・損傷と破碎帯でのずれによる変形・損傷の相互影響

(2) 安全係数に関する補足

3.4.3 節で述べた安全係数について補足する。2021年版マニュアルの安全係数の中には 1.2 という応答値係数があり、A~C の手法を問わず適用する。ただし、この値は、2005年版技術資料 V の中で「自由地盤変位の精度が担保されている場合、ボックスカルバート横断面の層間変形角が±20%程度の精度で評価できる」という検討結果に基づく値である。本章の問題の不確定性や照査指標を反映したものではないが、ボックスカルバート横断面の耐震問題に比して知見の蓄積が浅く、不確定性まで検討できる段階に達していないことから、上記の値を援用することとした。また、破碎帯については、3.3.1(2)で言及した境界条件への配慮および平滑性の仮定が、現時点で取り得る安全側の措置となっている。

B を選択した場合の限界値係数は、基本値 1.3 に繰返し作用を考慮した割増しを適用することとなる。しかし、ここで取り上げている破碎帯とトンネルの交差部は、ボックスカルバートの横断面とは破壊の様相やメカニズムが異なる。技術資料 X の解析的検討では、正負の繰返しによる耐力およびそれを発揮する時点の変位の低下は生

じない（逆に増大する場合もある）という結果が得られた。また、**技術資料 VIII** の載荷実験を見ると、本章の扱う問題において構造物の抵抗が最も大きくなる手前とは、外観上の損傷が非常に軽微な状態に対応する。まだ議論の余地はあるものの、これら今回の検討結果を踏まえ、繰返し作用を考慮した割増しを 1.0~1.2 とした。1.2 より小さい値を設定する場合は、損傷モードおよび荷重-変位曲線を通じて、最大荷重点が顕著な塑性変形を伴う状態でないことを確認する。また、**近傍モデルの解析において所定の変位を正負に与えることも有効である。安全係数の適正化に向けては、今後、不確定性を定量化するだけの実験や解析の事例の蓄積が必要である。**

(3) 今後の合理的な評価に向けて

技術資料 VIII の試験体の破壊の様相を見ても分かるように、破砕帯に沿ったせん断作用に対して最大荷重点を超えたとしても、必ずしも構造的に崩壊機構が形成されるわけではない。例えば水路トンネルならば、通水性の確保が要求されている機能であり、最大荷重点を契機として顕著になり始めるひび割れの開きやコンクリート片の剥落といった損傷がそうした機能を阻害するレベルであるかという観点から照査を行えばより合理的である。今後、そうした非常時に求められる機能に応じた使用性についての議論と研究が必要である。

参考文献

- 1) 原子力規制委員会：敷地内及び敷地周辺の地質・地盤構造調査に係る審査ガイド，2013. 6.
- 2) 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. 9.
- 3) 吉川恵也，朝倉俊弘：トンネルにおける破砕帯の諸問題，応用地質 22 巻 1 号，pp. 145-159，1981.
- 4) 野城一栄，小島芳之，深沢成年，朝倉俊弘，竹村次朗：地質不良区間における山岳トンネルの地震被害メカニズム，土木学会論文集 C，Vol. 65，No. 4，pp. 1045-0161，2009. 12.
- 5) 五月女敦，高尾誠，金戸俊道，金谷守：弱層の試験法及びモデル化に関する検討，電力土木，No. 311，2004. 5.
- 6) 宮川義範，山野井悠翔：地震時に地盤中の弱層に生じる相対変位の解析と一考察，土木学会第 78 回年次学術講演会講演概要集，2023. 9.
- 7) Miyagawa, Y., Nagata, S. and Yamanoi, Y.: Seismic Response Analysis and Damage Evaluation of RC Tunnels Crossing a Weak Layer in Ground, *18th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE 2024)*, 2024. 7.
- 8) 日本電気協会 原子力規格委員会：原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG4601-2021，2023. 1.
- 9) 土木学会原子力土木委員会：原子力発電所の基礎地盤及び周辺斜面の安定性評価技術<技術資料>，2009. 2.
- 10) 木村敏雄：断層，とくに断層破砕帯の見方，考え方，応用地質 22 巻 1 号，pp. 4-16，1981.
- 11) 西好一，江刺靖行：断層破砕帯材料の力学的特性，電力中央研究所報告，研究報告 3840233，1985. 9.
- 12) Jiao, H., Du, X., Zhao, M., Huang, J., Zhao, X. and Ouyang, W.: Nonlinear Seismic Response of Rock Tunnels Crossing Inactive Fault under Obliquely Incident Seismic P Waves, *Journal of Earth Science*, Vol. 32, No. 5, pp. 1174-1189, 2021. 10.
- 13) Rajasekharan, S., Sun, H., Mitsuhashi, Y., Shimabuku, J., Noguchi, H., Maruta, M., Hashimoto, G. & Okuda, H.: A study on the seismic behavior of underground tunnels, considering dynamic fault rupture, through large-scaled finite element analysis, *Proceedings of the 2019 rock dynamics summit*, Okinawa, Japan., 2019.