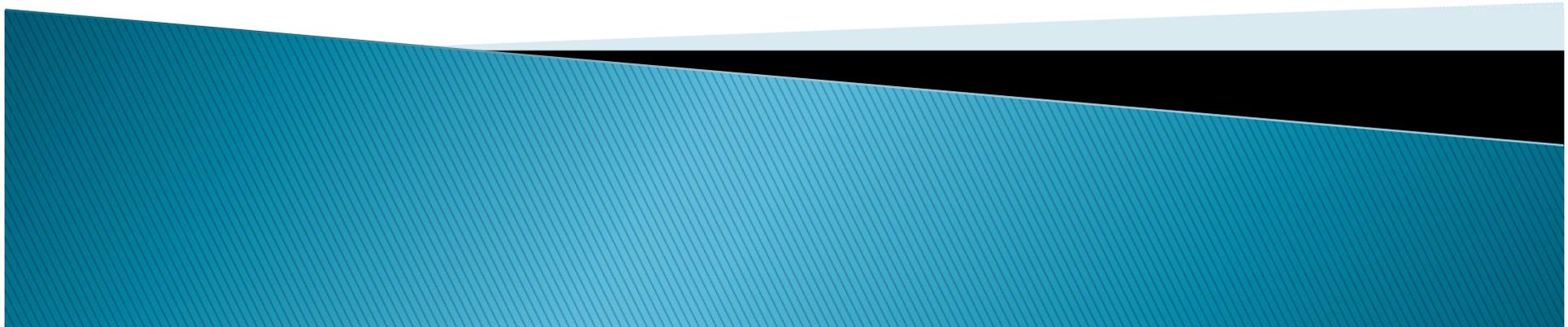


FrontISTRを用いた 地盤の動力学的破壊シミュレーション

(株)構造計画研究所, 東京大学大学院生
三橋 祐太



アジェンダ

- ▶ ① はじめに
- ▶ ② ジョイント要素の実装
- ▶ ③ 神城断層地震のシミュレーション
- ▶ ④ 不確実性のモデル化
- ▶ ⑤ 構造物＋断層の解析
- ▶ ⑥ まとめ

本資料の結果はすべてFrontISTRを用いて解析を実施しました

① はじめに

- ▶ 断層変位を受けた構造物の事例は少ないがいくつか見られる
- ▶ 例えば阪神大震災の際の塩屋谷川放水路トンネルの例

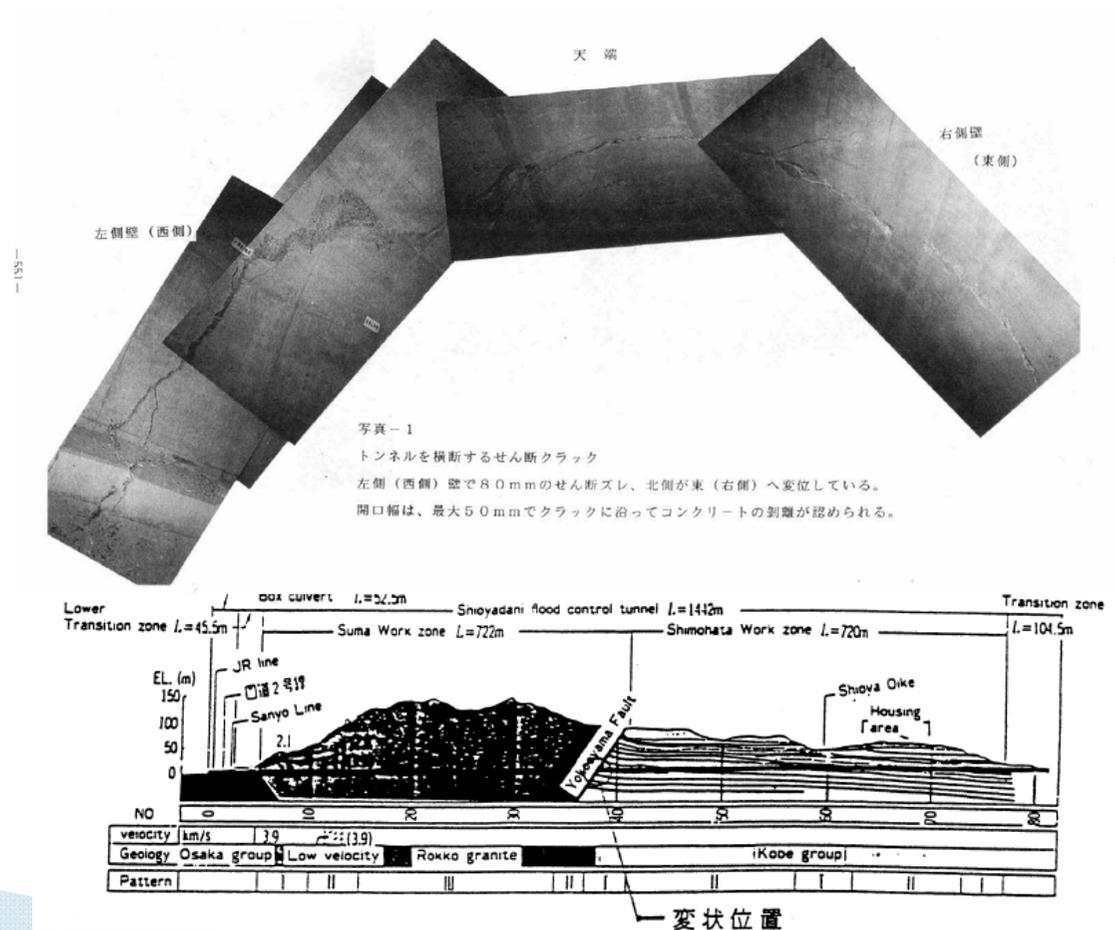
- 横尾山断層と交差する放水路トンネルが被害
 - リング状のクラック
- 通常地震による被害と異なる損傷モード

その他,

- 北伊豆地震の際の丹那トンネル
- 中越地震の際の木沢トンネル

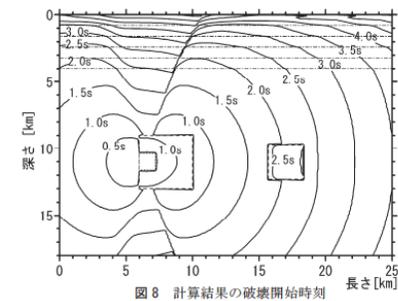
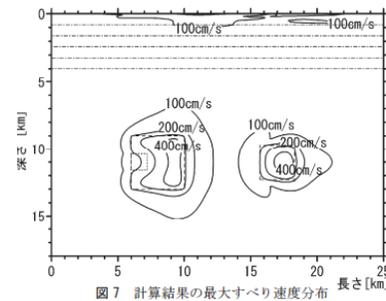
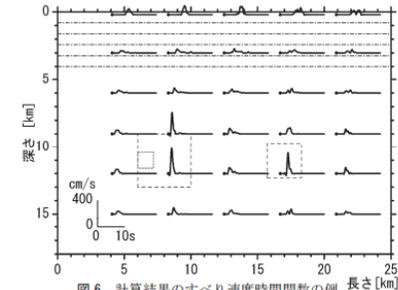
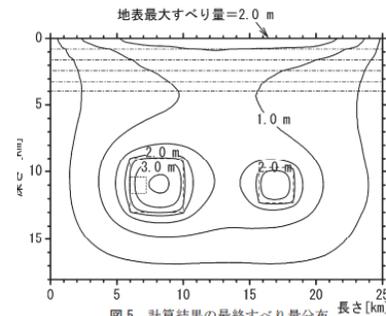
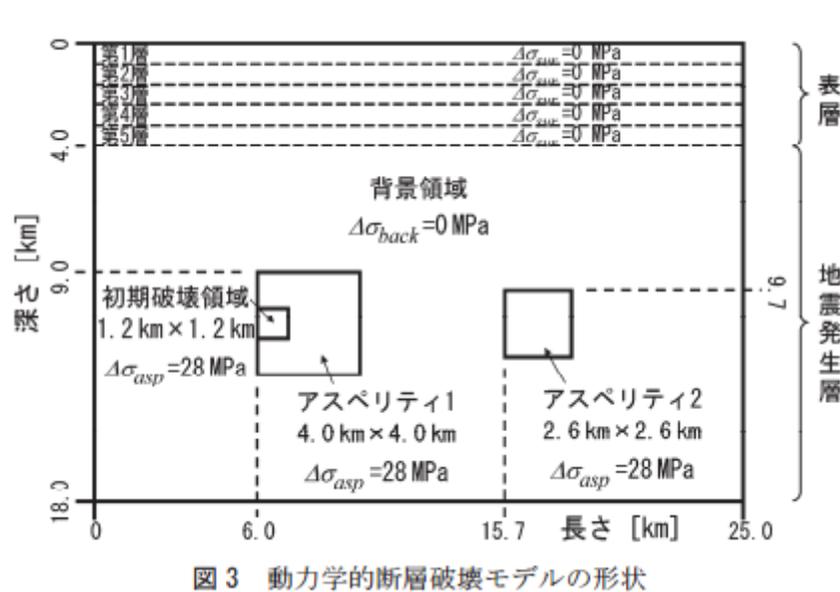
などの事例がある
(断層変位による被害と明確に判定できないものも含む)

阪神大震災調査委員会 社団法人 地盤工学会: 阪神・淡路大震災調査報告書, 資料編Vol.3, 1996.



① はじめに

- ▶ 断層の破壊過程の研究としては、動力的破壊シミュレーションなどが行われており、震源断層全体をモデル化し、震源の破壊から破壊の伝播の過程をシミュレーションする



入江紀嘉, 壇一男, 生玉真也, 入倉孝次郎: 地中震源断層と地表地震断層の断層パラメータ間の経験的關係を拘束条件とした動力的断層破壊モデルの構築-強振動予測のための運動学的断層モデルの高度化をめざして-, 日本建築学会構造系論文集, Vol.75, No.657, 1965-1974, 2010.

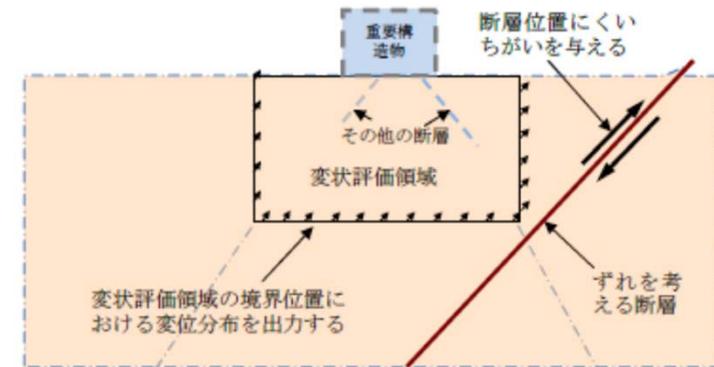
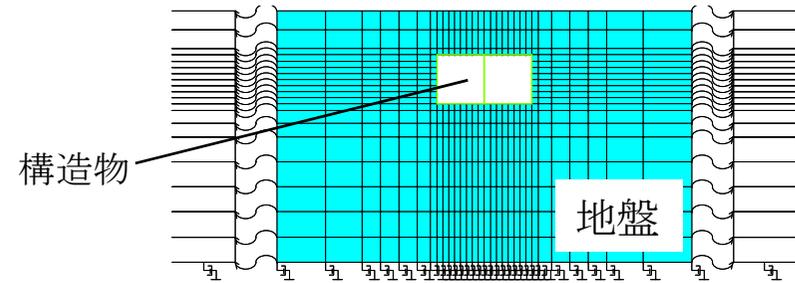
① はじめに

- ▶ 一方、地震時の構造物の健全性評価においては、構造物及びその周辺地盤をモデル化した解析が行われてきた
- ▶ 断層変位にかんする解析でも JANSI-FDE-01では静力学的アプローチが提案されている。
 - ①広域の地盤を考慮した食い違い弾性論などにより、変状評価領域境界の変位を得る
 - ②重要構造物を含め詳細にモデル化した変状評価領域モデルに①で得られた変位を静的に作用させる

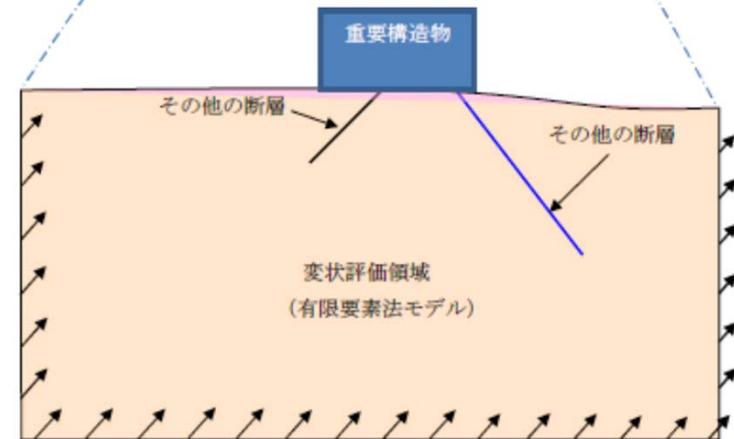
断層: 数十～数百 (km)

構造物: 数十 (m)

の規模の違いから、工学的に妥当



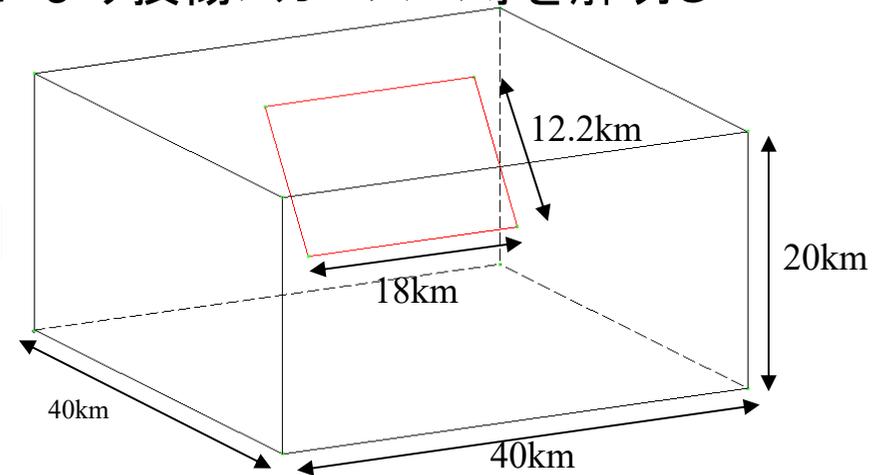
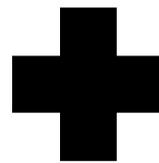
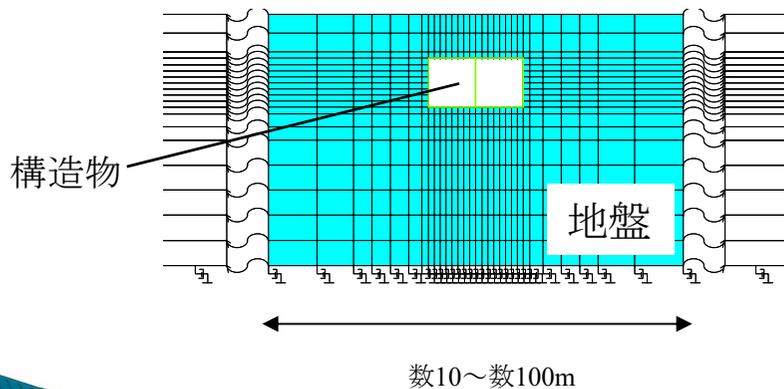
① 食い違いの弾性論により変状評価領域の境界変位を算定する
(変状評価領域内のその他の断層や建屋はモデル化しない)



② 食い違いの弾性論により算定した境界変位を変状評価領域の

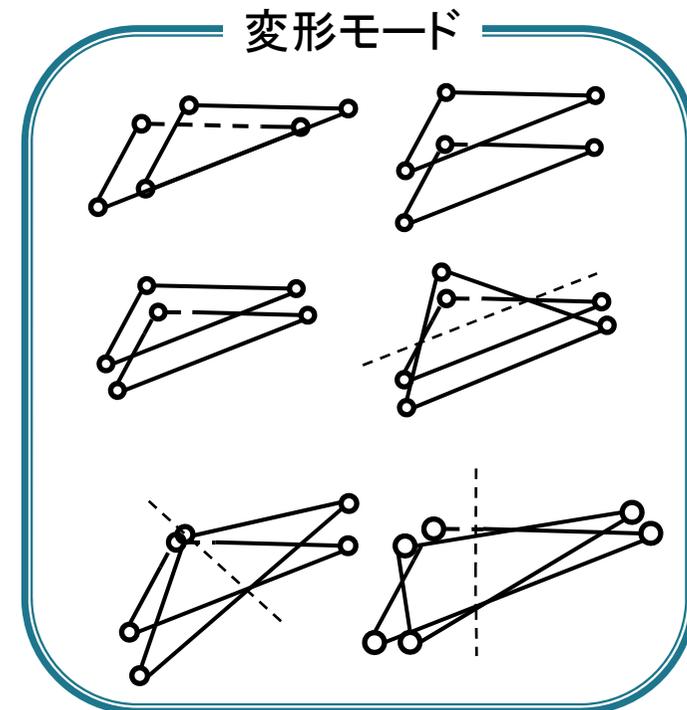
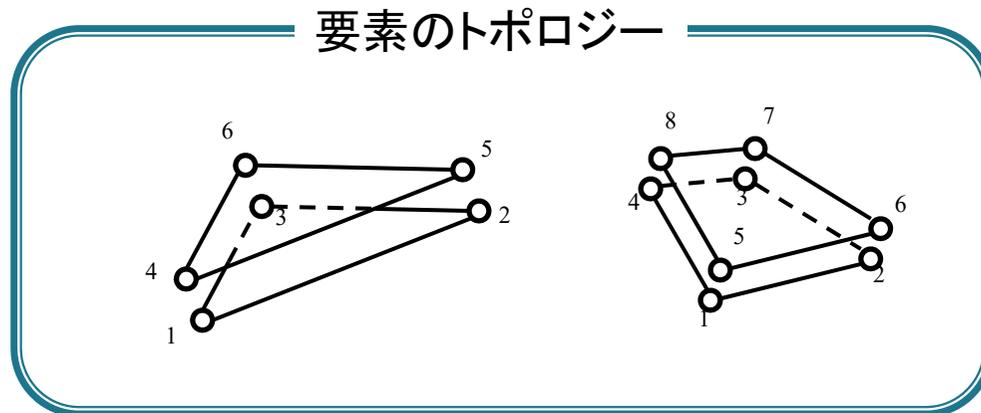
① はじめに

- ▶ 一方で、以下のような問題点も懸念される
 - 動的な挙動が考慮できない(し難い)
 - 地盤と構造物の連成(SSI)も考慮し、十分な広さの変状評価領域の妥当性
- ▶ 近年の計算機環境の向上から、断層と構造物を同時にモデル化した構造物の動学的アプローチによる検討も解析的には可能になっていくと考えられる
- ▶ 断層全体と構造物をモデル化した解析により損傷メカニズム等を解明したい



② ジョイント要素の実装 - ジョイント要素とは？

- ▶ 断層のモデル化のために、ジョイント要素をFrontISTRへ実装
- ▶ 2物体の接触／剥離を簡易に取り扱う有限要素

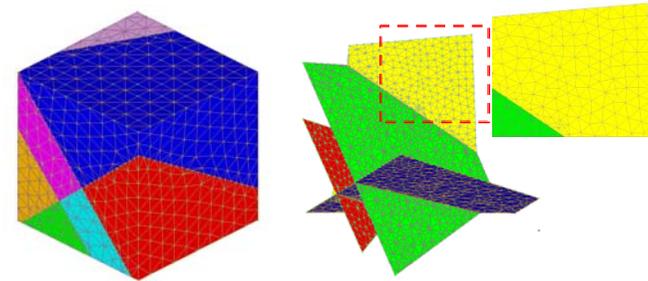


- 微小変形の仮定の下、
2物体の接触面の変形モードを仮定
- 節理や断層など岩盤の不連続面・弱層の
モデル化によく用いられる

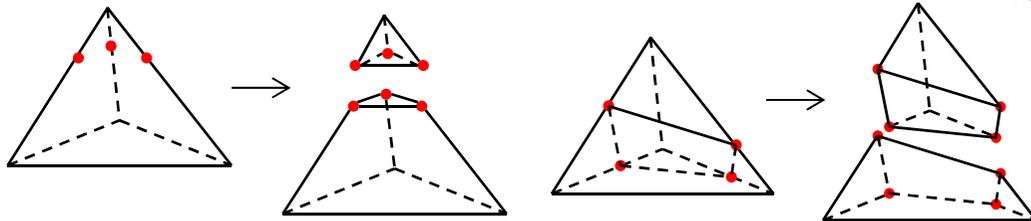
三橋祐太, 橋本学, 奥田洋司, 地盤解析のための有限要素モデリング
(拡張Goodmanジョイント要素とメッシュ生成法), 計算工学論文集, 2016.10.

② ジョイント要素の実装 - メッシュ生成

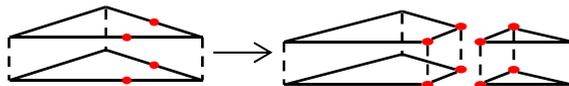
- ▶ 不連続面を挟む2物体を, 間にジョイント要素を挟むことでモデル化
- ▶ 統合的なメッシュを作成するのが煩雑
- ▶ グラフ理論を用いたメッシャーを開発



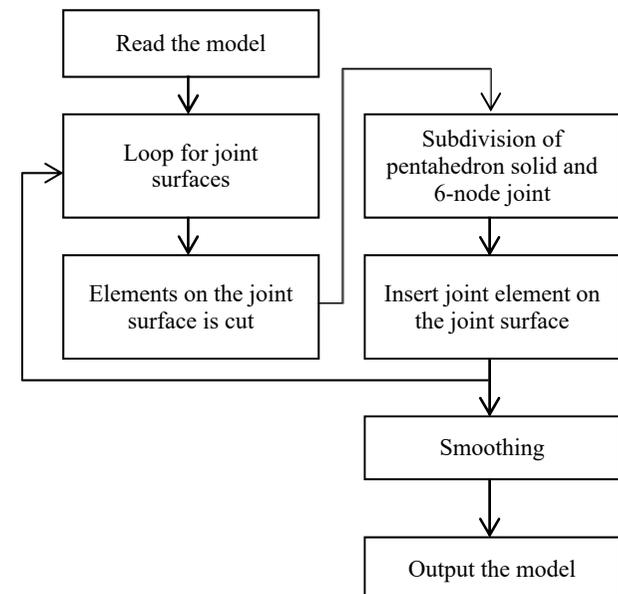
四面体ソリッド要素の細分化:



三角形ジョイント要素の細分化:



- ▶ 四面体からなるメッシュに一枚ずつ
ジョイント要素を挿入していく

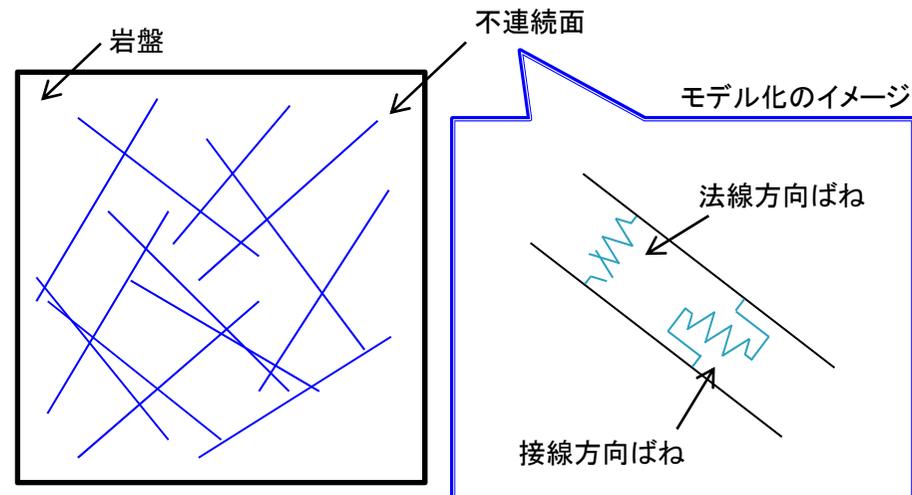


② ジョイント要素の実装 - 解析例①

- ▶ 一般的に岩盤には多くの不連続面が存在している
- ▶ 不連続面を含む岩盤のシミュレーション解析



不連続性岩盤実用研究会資料より引用

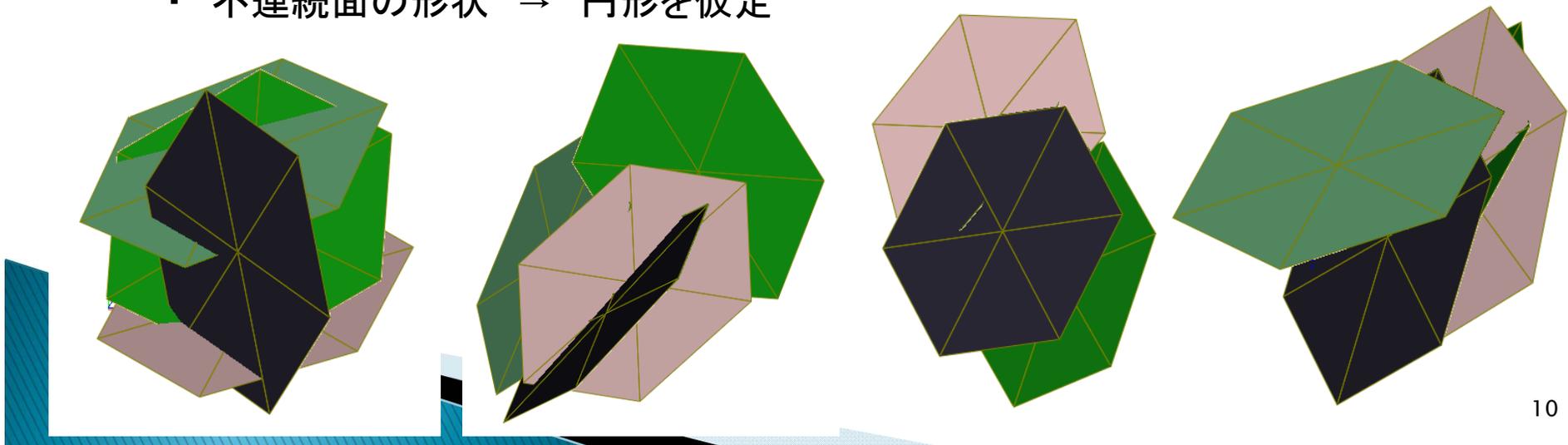


三橋祐太, 橋本学, 奥田洋司, 内山不二男, ジョイント要素を用いた不連続性岩盤の解析的検討, 平成27年土木学会全国大会, 2015.9.

② ジョイント要素の実装 - 解析例②

- ▶ 複数の不連続面を持つ岩盤の解析を有限要素法で実施
- ▶ 不連続面の分布を確定的に扱うのは現実的でないため、確率的に生成した複数の解析ケースを統計的に分析
- ▶ 確率的に扱う際のパラメータ
 - ・ 不連続面の位置 → ランダム分布
 - ・ 不連続面の角度 → フィッシャー分布 ($\kappa=10$ 傾斜60度に卓越)
 - ・ 不連続面の大きさ → 変数として整理
 - ・ 不連続面の枚数 → 4枚に固定
 - ・ 不連続面の形状 → 円形を仮定

実際に生成した
↓ 不連続面の例



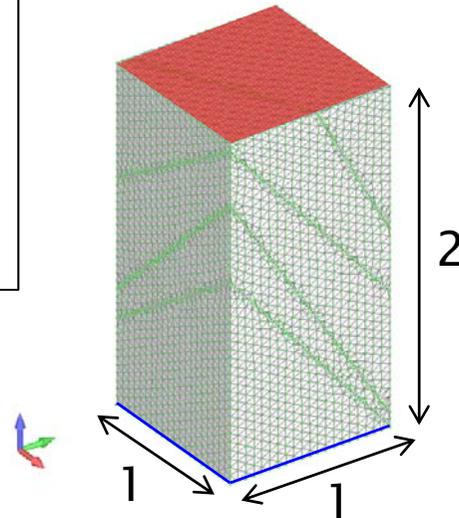
② ジョイント要素の実装 - 解析例③

<境界条件>

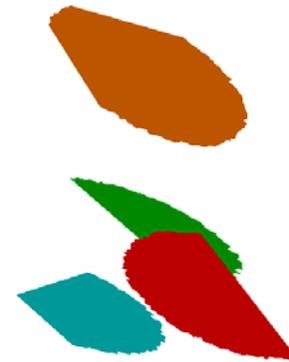
上面:鉛直方向強制変位
水平方向自由
下面:水平・鉛直固定

強制変位は正(引張)と
負(圧縮)の両方を考慮

モデル全体図



不連続面のみ抽出



<物性値>

岩盤:
ヤング係数 $E=2.0E6$
ポアソン比 $\nu=0.3$

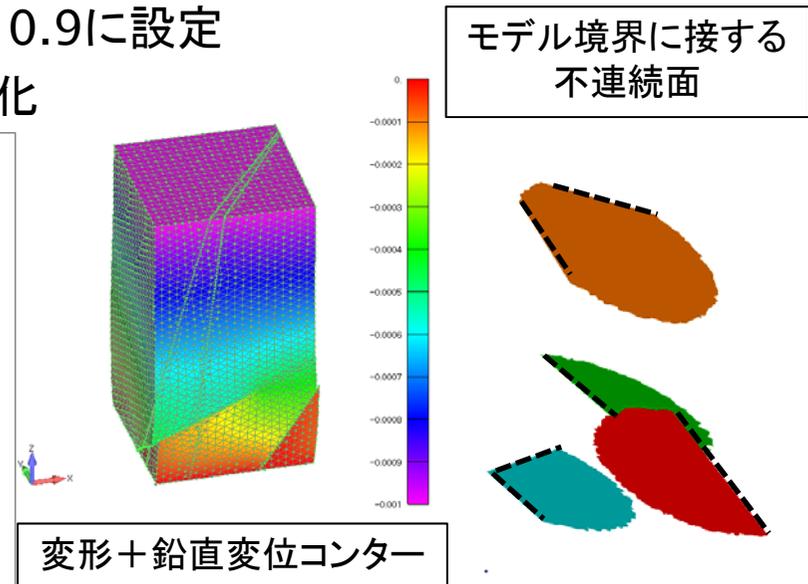
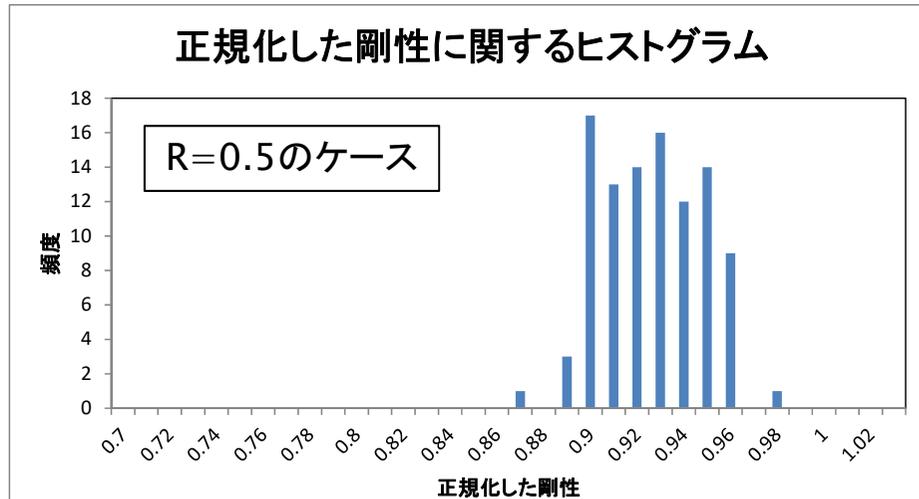
不連続面(引張):
 $k_s=k_n=0$

不連続面(圧縮):
 $k_n=2.0E8$ (剛)
 $k_s=2.0E6$
 $2.0E3$ (柔)

- ▶ 強制変位量と底面に発生する反力から等価な剛性を評価
- ▶ 境界条件は引張と圧縮の2パターン
- ▶ 圧縮に関しては、不連続面接線方向の剛性を変えた2パターン

② ジョイント要素の実装 - 解析例④

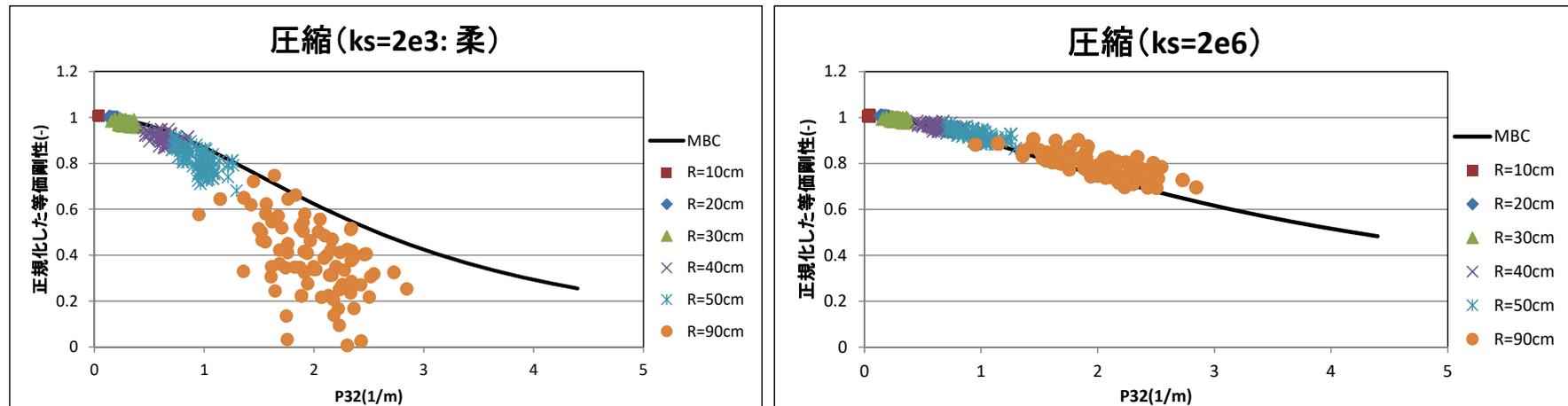
- ▶ 不連続面の大きさごとに100ケースの解析を実施
 - ・不連続面の半径Rを0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.9に設定
 - ・剛性は不連続面がない場合の剛性により正規化



- ▶ 不連続面が解析モデルからはみ出るので各モデルで面積が異なる
- ▶ 不連続面の統計処理で用いられる P_{32} で整理
(P_{32} = 領域内の不連続面の面積の総和 / 領域の体積)

② ジョイント要素の実装 - 解析例⑤

- ▶ P_{32} で整理した等価剛性を、マイクロメカニクスに基づく連続体モデル(MBC)による理論式と比較



- ▶ 不連続面のせん断剛性が大きいケースではFEMの結果はMBCによる連続体モデルの数値とよく一致している
- ▶ せん断剛性の小さいケースでは、 P_{32} の大きい部分でかい離が生じる
→ FEMの解析は不連続面が少なくMBCの統計的仮定が適用しにくいのでは

ここまでのまとめ

- ▶ FrontISTRにジョイント要素を実装した
- ▶ 適用性の検討として、不連続面を含む岩盤の剛性評価を実施した
- ▶ 不連続面の配置をパラメータとし、モンテカルロ的に解析を実施し不連続面の分布を統計的に扱った数値モデル(MBCモデル)の結果と比較した
- ▶ 両者はよく一致するが、不連続面の密度等によりかい離が生じる

- ▶ 以下、断層をジョイント要素でモデル化した数～数10kmスケールのお話を議論するが、岩盤中の微小クラック(数cm)スケールの問題にも適用可能
- ▶ マルチスケールの問題に適用できる



③ 神城断層地震のシミュレーション - 地震とは①

- ▶ 地震は断層の破壊によって引き起こされる
- ▶ 断層の破壊は震源から開始し、ある速度をもって広がっていく
- ▶ その破壊により地震動が生成され、地盤中を伝播する



Fig. Rupture propagation of 2011 Tohoku earthquake
(NIED, 2011)

③ 神城断層地震のシミュレーション - 地震とは②

- ▶ 断層の破壊パターンは大きく3つに分類される
- ▶ 正断層・逆断層・横ずれ断層

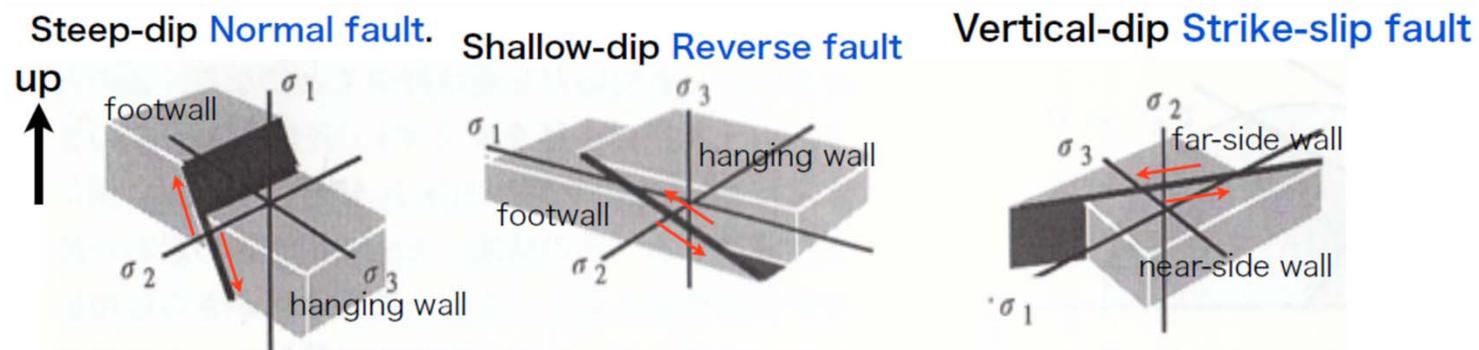


Fig : Kano [1998] "Structural Geology"

- ▶ それぞれ，断層が滑る方向により分類される



③ 神城断層地震のシミュレーション - 地震とは③

- ▶ 断層の破壊は、微視的にみると断層が静摩擦係数から動摩擦係数に移行することと解釈できる
- ▶ 静摩擦から動摩擦に移行する際に解放された応力 (Stress drop) により、まわりの断層の破壊が引き起こされる。それが断層面に広がっていくのが震源断層の破壊である。

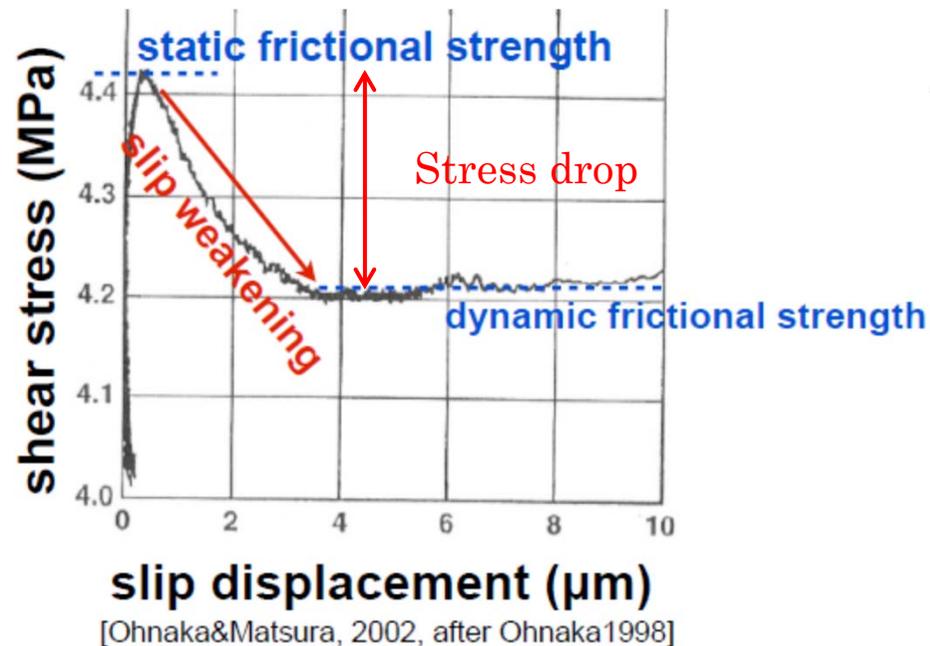
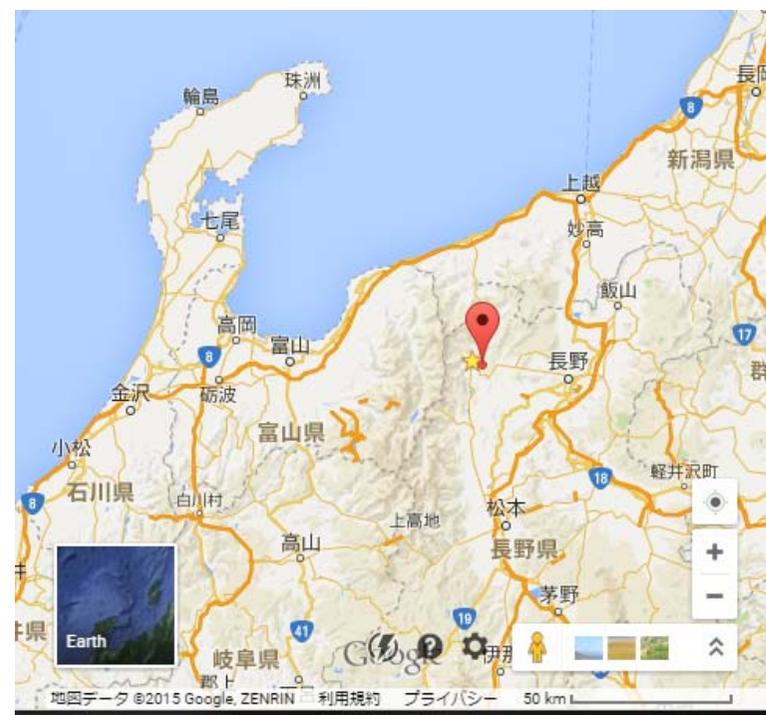
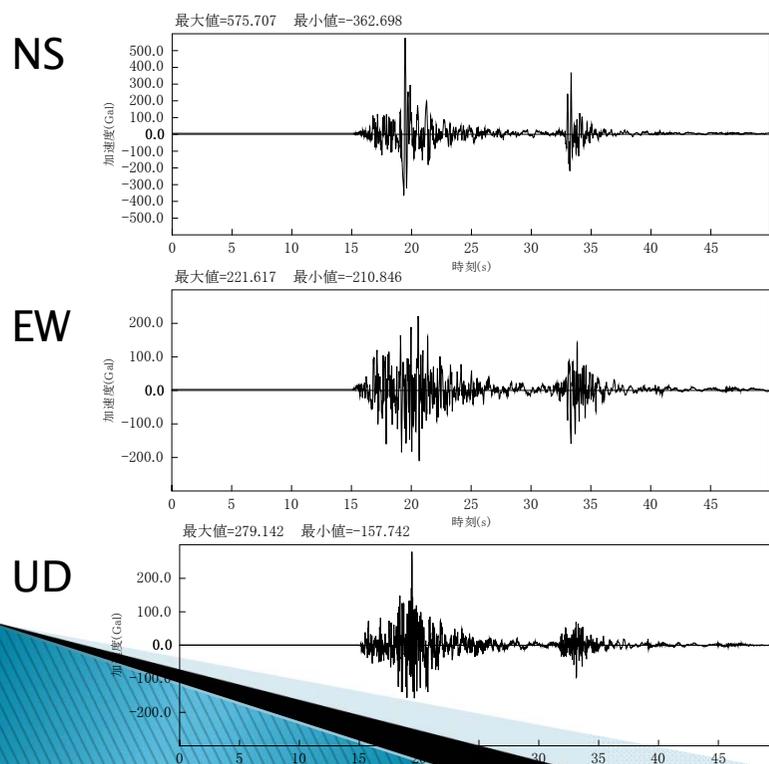


Fig. slip-shear stress relation of fault (experiment)

③ 神城断層地震のシミュレーション - 概要①

- ▶ 神城断層地震(2014年長野県北部地震)
2014年11月22日に発生した神城断層の一部とその北方延長を震源断層とする逆断層型の地震(Mj6.7/Mw6.2)
- ▶ 断層近傍のK-NET観測点(K-NET白馬)において、最大600Gal程度の加速度が観測されている(NS方向)



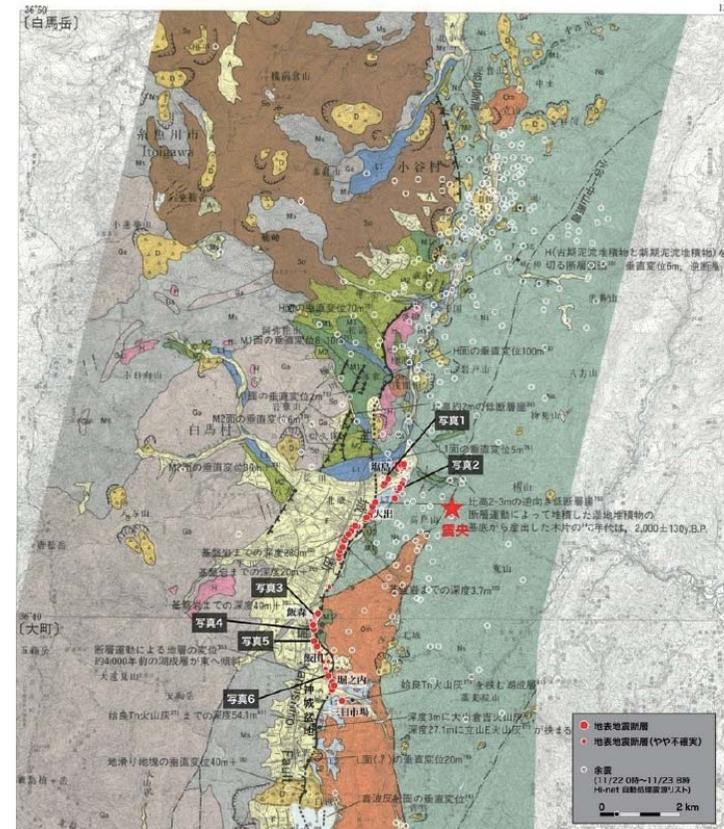
③ 神城断層地震のシミュレーション - 概要②

- ▶ 総延長9km程度に渡って地表面変位が観測されている
- ▶ 最大上下変位1m程度



写真1 白馬村塩島集落にみられる地表地震断層。写真は北東へ向かって撮影。廣内ほか（2014）により、西側低下の上下変位約90cmが報告されている。

産業技術総合研究所 地質調査総合センター
GSJ地質ニュースVol. 4 No. 1より引用



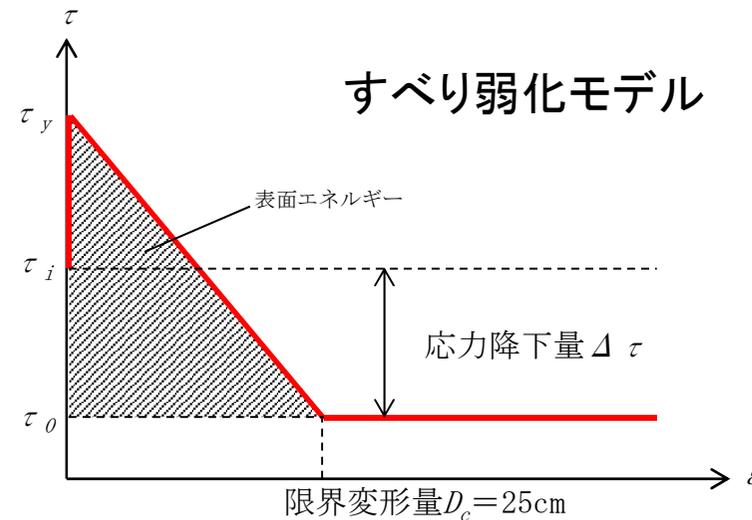
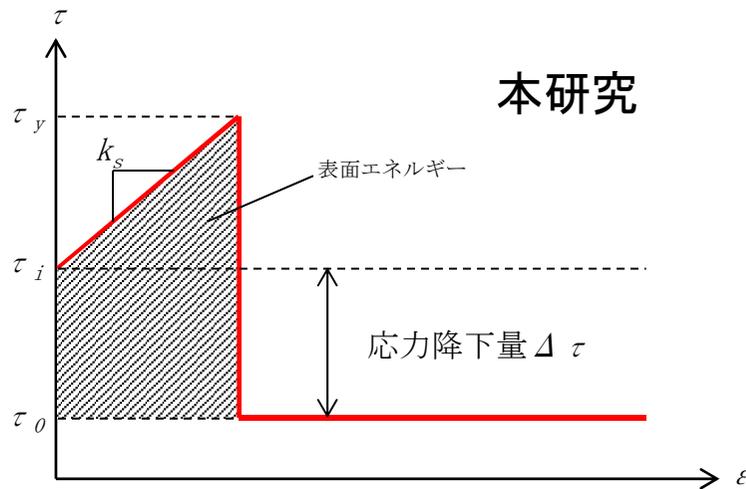
第1図 長野県北部の地震に伴う地表地震断層の分布。基図は、下川ほか（1995）による糸魚川-静岡構造線活断層系ストリップマップ。図中に写真1～6の撮影地点を示す。なお、写真6は地質標本館に展示されている断層剥ぎ取り標本が採取されたトレンチ調査地点にあたる。

本地震を対象として動力学的シミュレーションを実施した

③ 神城断層地震のシミュレーション - モデル化①

▶ ジョイント要素の応力変位関係

- ✓ すべり方向(せん断方向)の応力変位関係



- ✓ $\tau_0 = 0$ (MPa)として、 $\Delta\tau$ により地震モーメントを実際の地震に合わせこむ
- ✓ 表面エネルギーが等しくなるように初期剛性 k_s を調整
- ✓ 鉛直剛性 k_v は線形で十分剛な値とする

Yuta MITSUHASHI, Gaku HASHIMOTO, Hiroshi OKUDA, Fujio UCHIYAMA, Fault Displacement Simulation Analysis of the Kamishiro Fault Earthquake in Nagano Prefecture Using the Parallel Finite Element Method, Model Design and Simulation Analysis, Communications in Computer and Information Science 603, p102-109, 2016.

③ 神城断層地震のシミュレーション - モデル化②

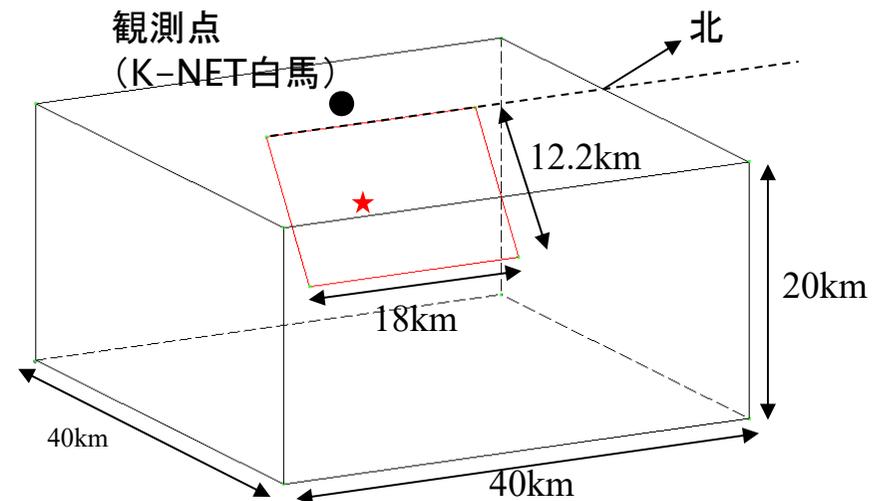
▶ 解析モデル

- ✓ 断層の大きさ: 長さ18km × 幅12.2km (深さ10.0km)
- ✓ せん断弾性係数 $\mu=30\text{GPa}$ (地殻で一般的な値)
- ✓ ポアソン比 $\nu=0.25$ (ポアソン媒質)
- ✓ 単位体積重量 $\gamma=2.5$ (t/m³)
- ✓ 震源位置: 深さ5.0km

断層パラメータ

断層幅	W	12.2	km
断層長さ	L	18.0	km
走向角	θ	12	度
傾斜角	δ	50	度
応力降下量	$\Delta\tau$	1.00	MPa
断層せん断剛性	k_s	1.20E+04	kN/m/m ²
断層鉛直剛性	k_v	1.20E+07	kN/m/m ²

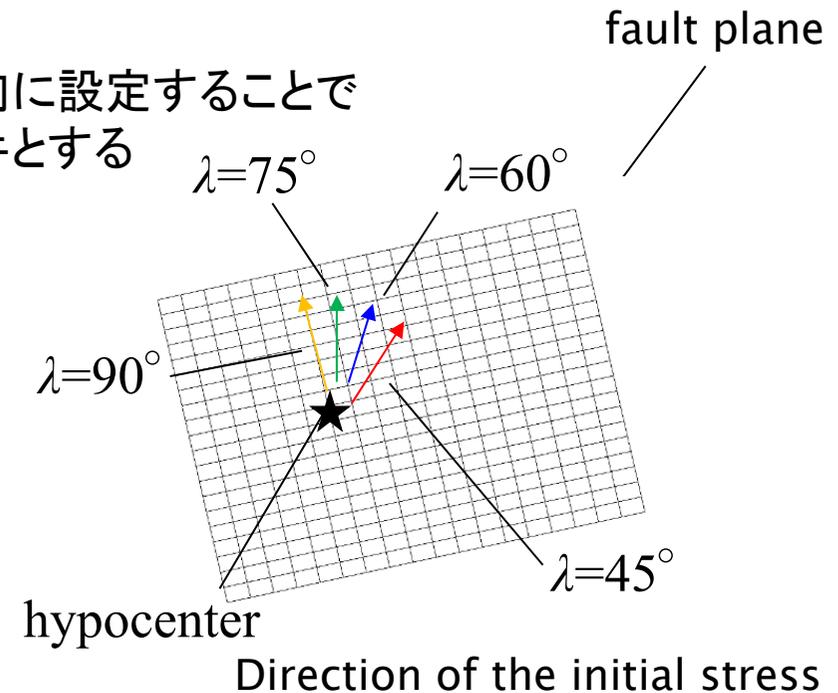
- ✓ 積分刻み $\Delta t=0.01$ (s)



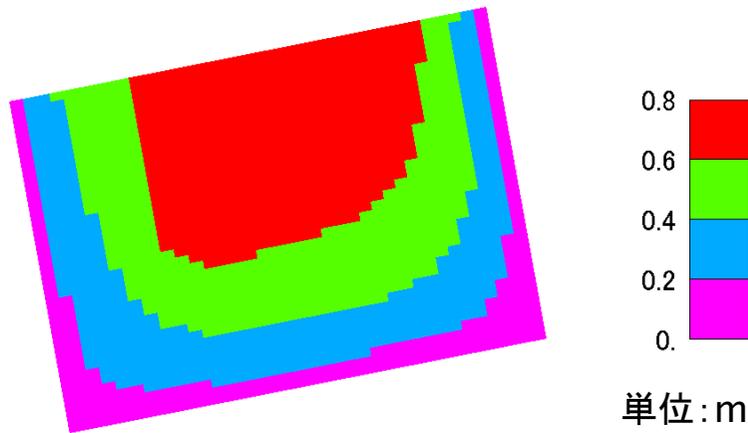
③ 神城断層地震のシミュレーション - モデル化③

▶ 断層モデル

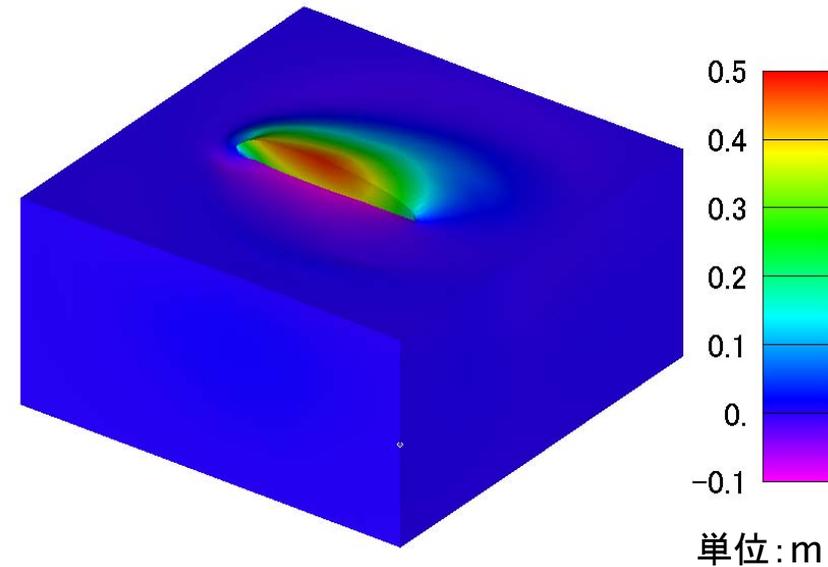
- ✓ 震源位置の τ_y を大きく設定し、設定した τ_y を超える初期応力を縦ずれ方向に設定することで解析開始と同時に破壊が始まるような条件とする
- ✓ 地震モーメントMwが観測と解析で等しくなる条件として $\Delta\sigma=1.0\text{MPa}$ をパラメータスタディにより求めた
- ✓ τ_y はAndrewを参考にして次式により設定
$$\tau_y = 1.6\Delta\sigma$$



③ 神城断層地震のシミュレーション - 解析結果①



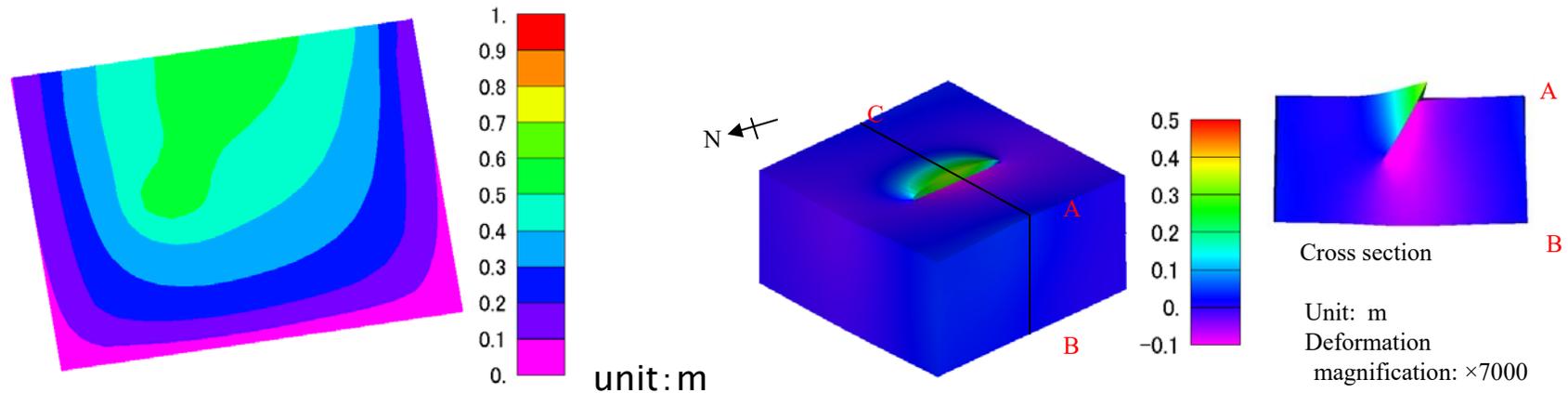
ジョイント要素の食い違い量(最終時間断面)



変形図+鉛直変位コンター図(最終時間断面)

- ✓ 最終的な食い違い量は90cm程度であり、現地で観測されている最大地表面上下変位1mと比較して近い値となっている
- ✓ 食い違い量から計算した $M_w=6.2$ (実際の地震と同じ値)
($M_0=2.94 \times 10^{18} \text{N}\cdot\text{m}$ / 実際の地震 $M_0=2.98 \times 10^{18} \text{N}\cdot\text{m}$)

③ 神城断層地震のシミュレーション - 解析結果②



Amount of slip (last time)

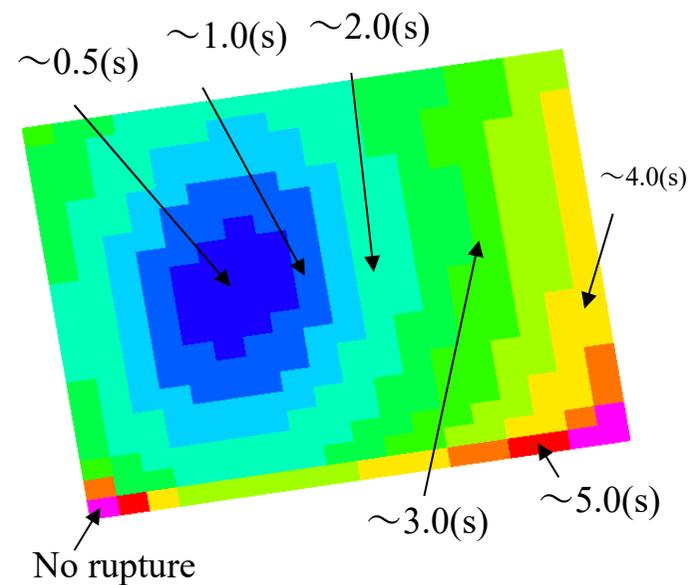
deformation + vertical contour (last time)

- ✓ 計算による $M_w=6.2$ (実際の地震と同じ値)
($M_0=2.94 \times 10^{18} \text{N}\cdot\text{m}$ / actual $M_0=2.98 \times 10^{18} \text{N}\cdot\text{m}$)
- ✓ 最終時刻における地表面の応答変位はおおよそ62cmあった. 実際には鉛直方向に最大90cmの変位が観測されている.



③ 神城断層地震のシミュレーション - 解析結果③

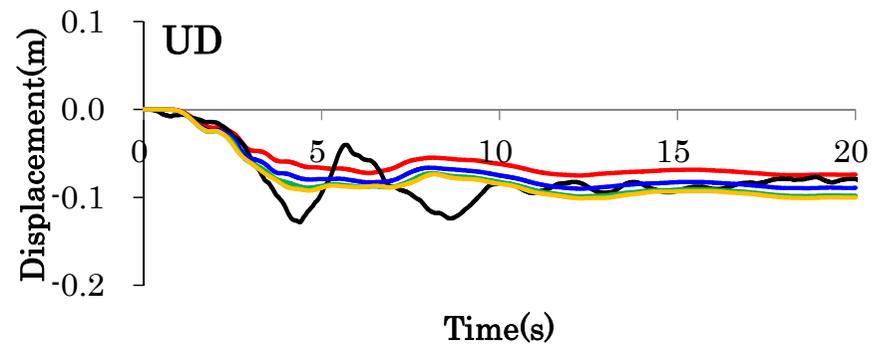
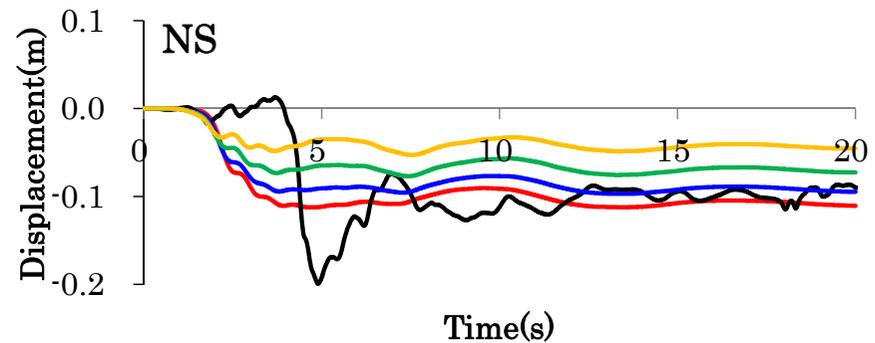
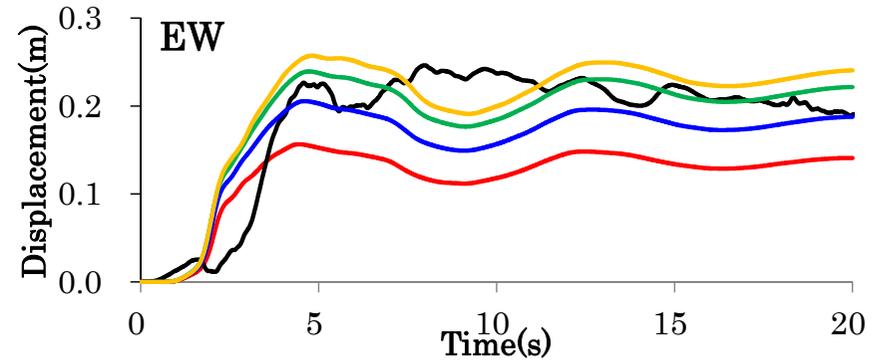
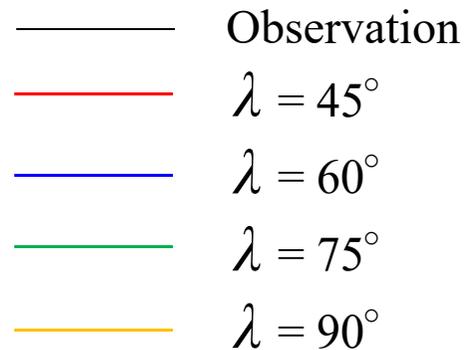
- ▶ ジョイント要素の破壊時刻 ($\lambda = 60^\circ$ のケース)
- ✓ 破壊速度 $V_r \sim 3.0(\text{km/s})$
- ✓ $V_r / \beta = 0.87$
(せん断波速度 $\beta = 3.46(\text{km/s})$)
一般的に0.72~0.80といわれている



破壊時刻コンター図

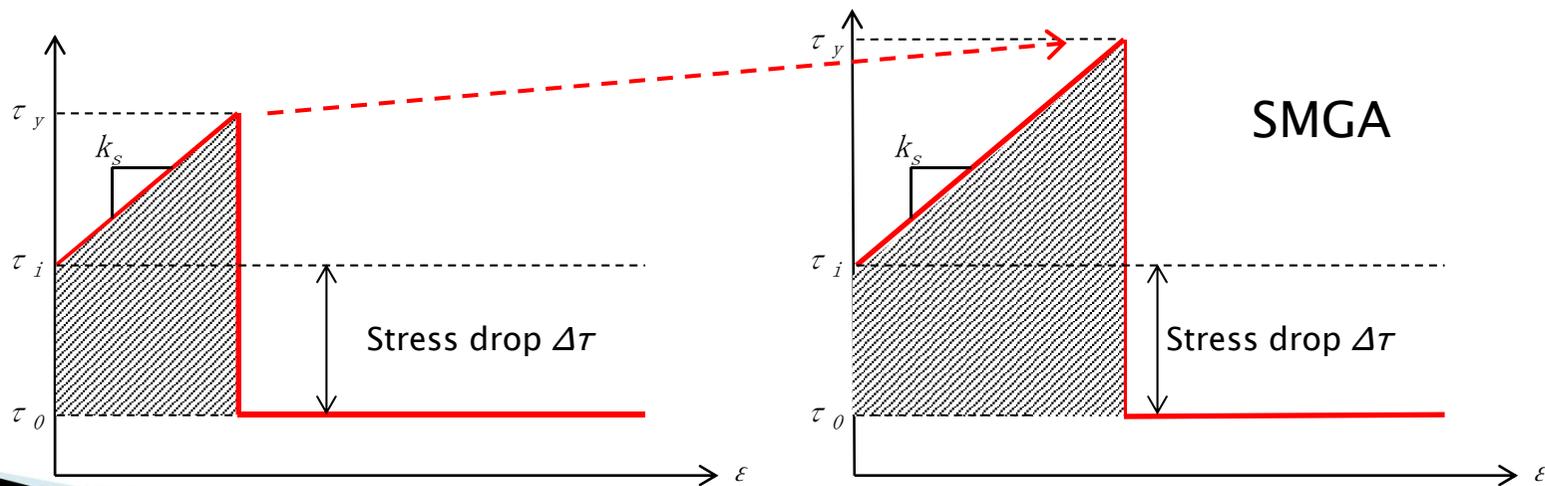
③ 神城断層地震のシミュレーション - 解析結果④

- ▶ k-NETの観測位置の応答変位時刻歴を, 解析結果の応答変位時刻歴と比較した
- ▶ 初期応力の方向を60度に設定したケースで, 解析結果は最も観測記録に整合した



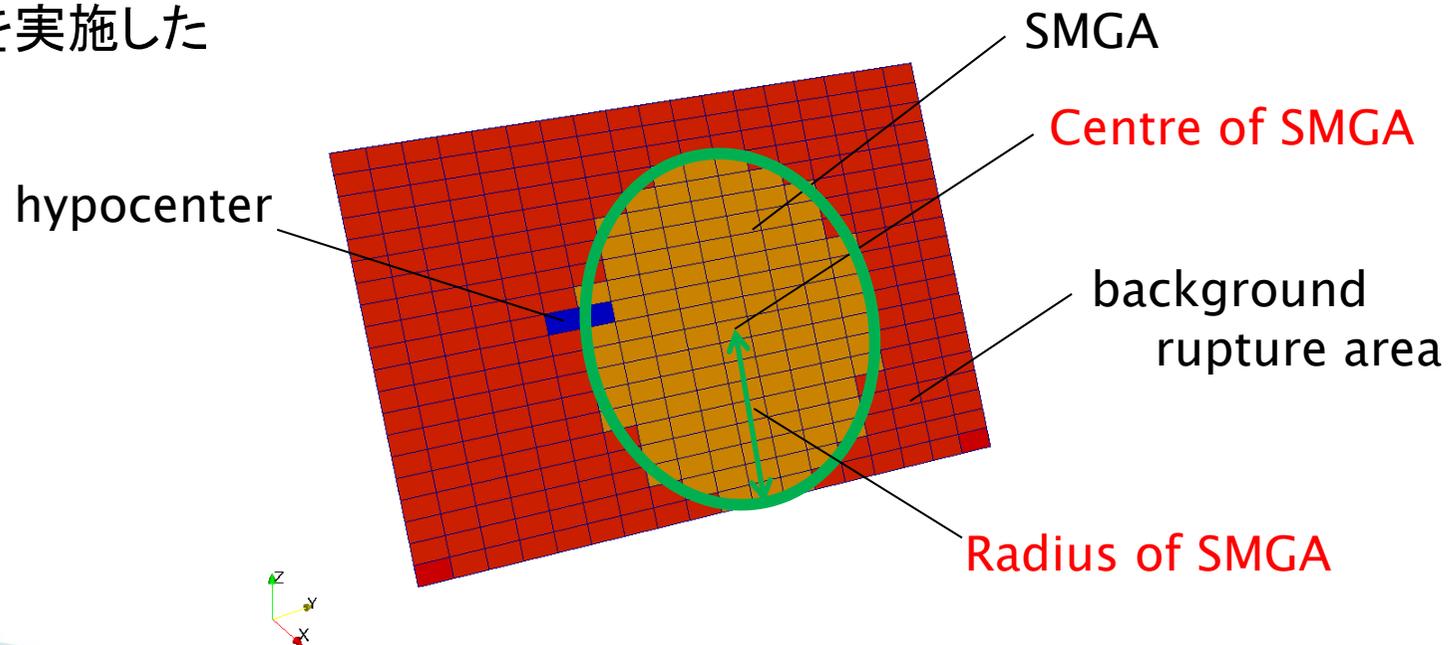
④ 不確実性のモデル化 - SMGAとは

- ▶ 強震動生成域 (SMGA; Strong Motion Generation Area) は断層の不均質性のモデル化として多く採用されている
- ▶ SMGAはStress Dropの大きな領域であり, 大きなパルス的地震動を生成するといわれている



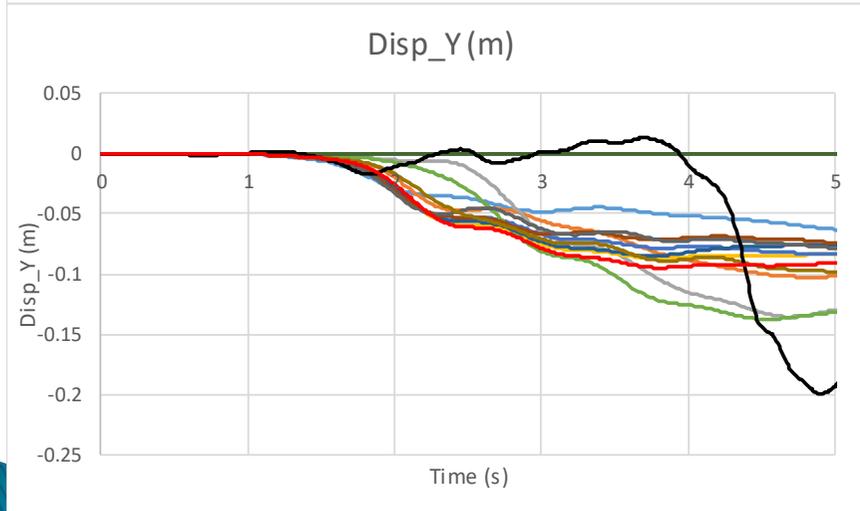
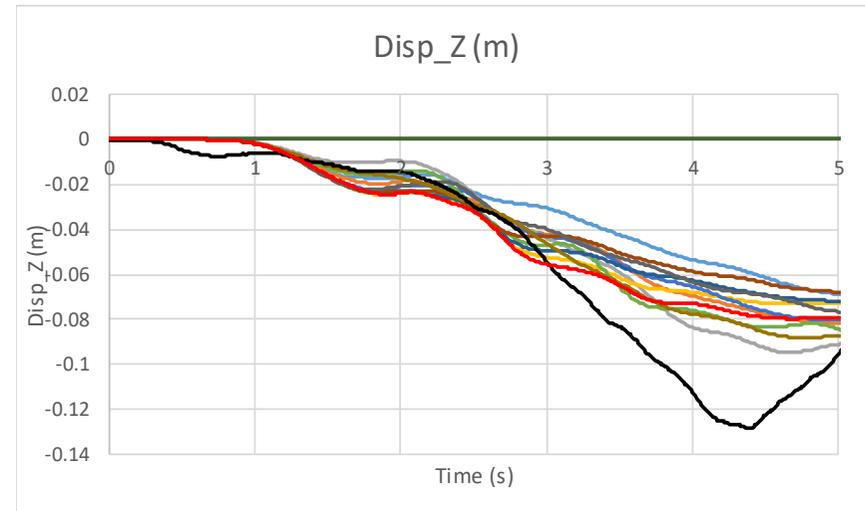
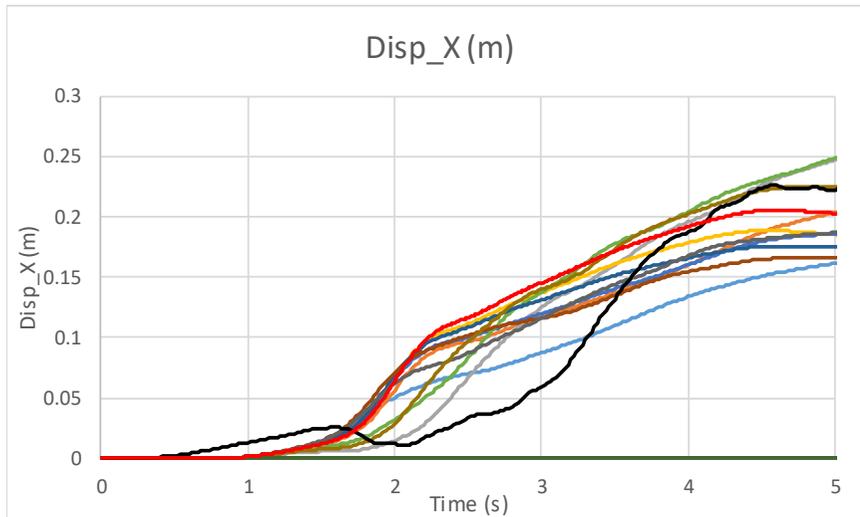
④ 不現実性のモデル化 - SMGAのモデル化

- ▶ 一様断層のモデルに対して、SMGAを周囲に比べStress Dropの大きな領域としてモデル化しただけでは、地震の大きさが変わってしまい比較することが難しい。そこで、地震の大きさが等しくなるように背景領域のStress Dropは小さく設定する
- ▶ 本研究では、SMGAを円形に仮定し、その位置と半径をパラメータとした検討を実施した



Yuta MITSUHASHI, Gaku HASHIMOTO, Hiroshi OKUDA, Fujio UCHIYAMA, Fault Displacement Simulation of the Kamishiro Fault Earthquake Using the Stress Drop Distribution of the Source Inversion, WCCM XII, 2016.

④ 不確実性のモデル化 - 解析結果①

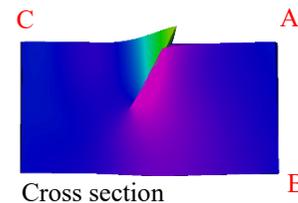
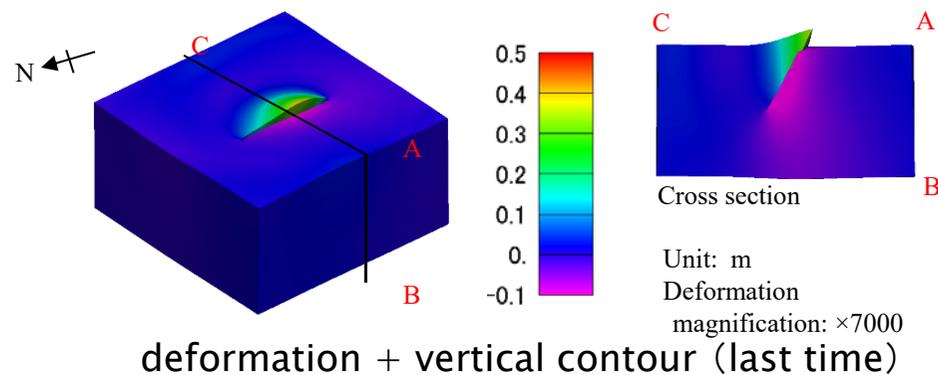


— Obs. — Prev. study

- ✓ SMGAをモデル化することで、地震動の立ち上がりの時間が変化する
- ✓ 特にNS方向に差が生じるのに対して、UD方向には影響が小さく、SMGAのモデル化により方向の差異が見られた

④ 不確実性のモデル化 - 解析結果②

- ▶ GAにより500ケース程度の解析を実施した
- ▶ 得られたSMGAのモデルは, 別の解析より得られた池田らの結果と近い傾向が得られた (Ikeda et al., 2016)



Unit: m
Deformation
magnification: $\times 7000$

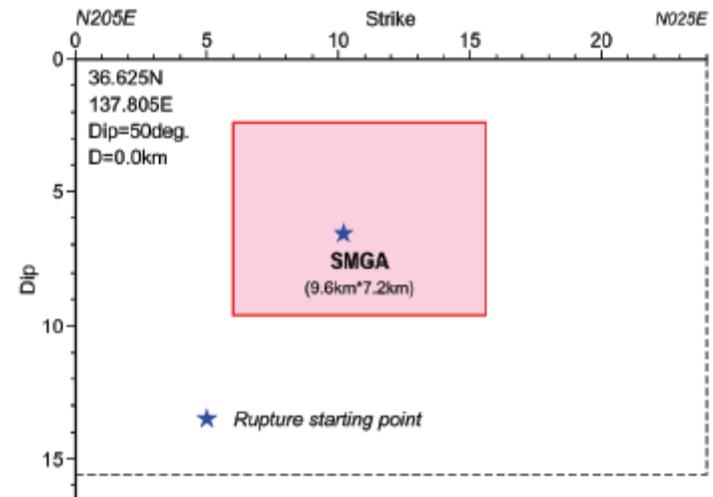
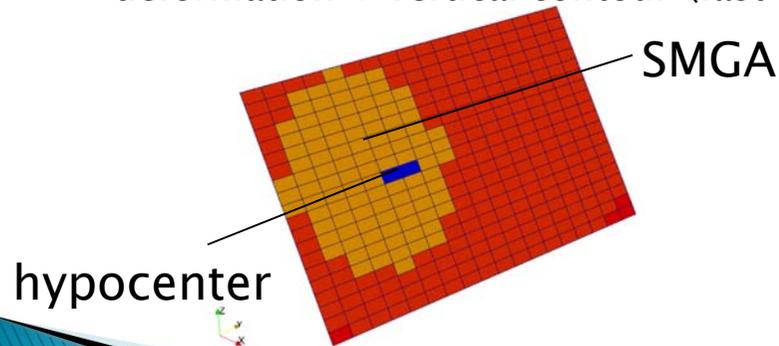
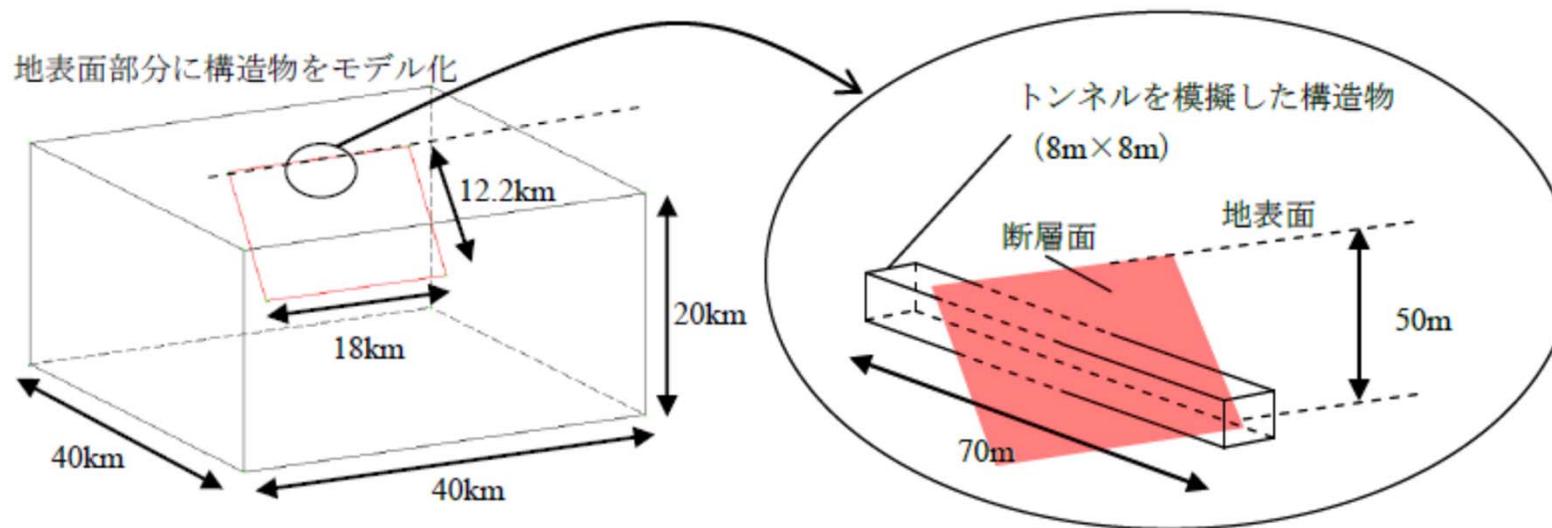


Fig. The Fault Model of 2014 Kamishiro-EQ.
(Ikeda et al., 2016)

Fig. The Fault Model obtained by GA

⑤ 構造物＋断層の解析 -解析モデル

- ▶ シミュレーション解析により得られた断層モデルを用いて、簡易にトンネルをモデル化することで、断層の破壊を受ける構造物の検討を実施する
- ▶ 原子力発電所の地中構造物の例では、震源断層と構造物が交差することは想定されないが、本検討では簡便のために震源断層とトンネルが交差するものとする
- ▶ トンネルは横断面 2×2 要素、長さ方向十数要素のモデル化でかなり粗い



三橋祐太, 橋本学, 奥田洋司, 内山不二男, 並列有限要素法を用いた断層変位を受ける地中構造物の解析的検討, 平成28年地盤工学研究発表会, 2016.9.

⑤ 構造物＋断層の解析 -解析ケース

- ▶ 以下の4ケースを設定したパラメータスタディを実施

	周辺岩盤のせん断弾性係数	周辺岩盤の非線形性	断層モデル
ケース1	30GPa	線形	一様断層モデル
ケース2	3GPa	線形	一様断層モデル
ケース3	3GPa	非線形(R-O)	一様断層モデル
ケース4	30GPa	線形	SMGA考慮モデル

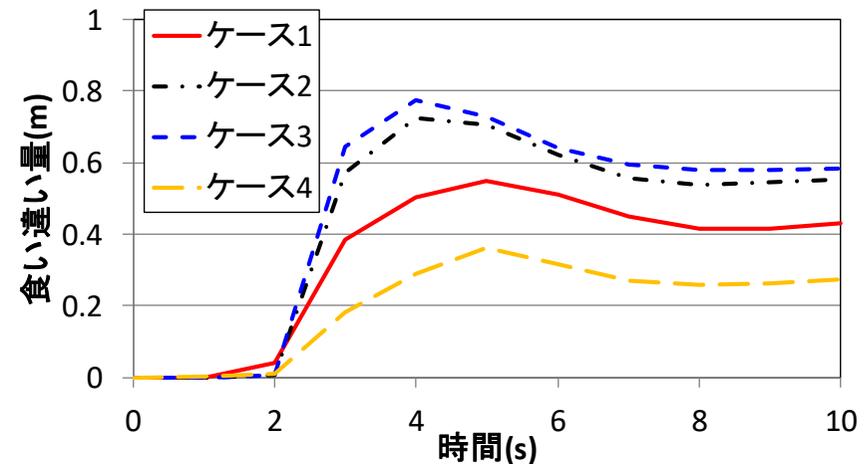
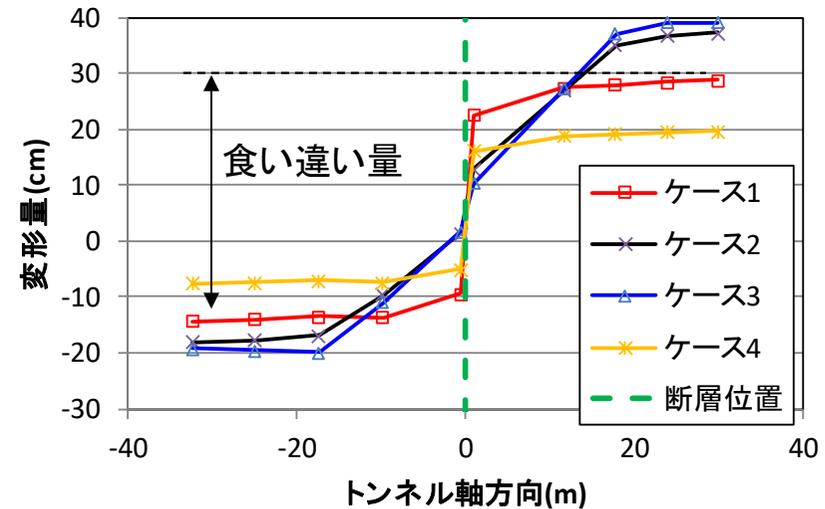
周辺岩盤の物性による影響検討

断層モデルによる影響検討

- ▶ 構造物に生じる変形と食い違い量をケースごとに比較した

⑤ 構造物十断層の解析 -解析結果

- ▶ 地盤が柔らかい方が食い違い量は大きくなるが、構造物のひずみ量としては小さく評価される
- ▶ SMGAを考慮することで構造物に生じる応答が変化する
- ▶ 定常状態を静的な結果と考えると、動的効果により最大の食い違い量をより大きく評価し得る



⑥ まとめ

- ▶ FrontISTRにジョイント要素を実装した
- ▶ ジョイント要素を用いて神城断層地震の動力学的破壊シミュレーション解析を実施した
- ▶ 断層の不均質性を再現するために、SMGAを遺伝的アルゴリズムにより推定する解析を実施した
- ▶ 断層全体をモデル化し、断層をまたがる構造物の解析を実施した

今後の展望

- ▶ 大規模解析に対応できるFrontISTRの特徴を生かして、構造物を詳細にモデル化した検討を実施
- ▶ SMGAの最適化手法のより詳細な検討

