

地震工学委員会 2026年度 第2回研究会
-令和7年度土木学会賞から学ぶ-

功績賞 受賞記念講演

令和8年7月29日

日本大学工学部

中村 晋

略 歴

- 1955年5月 青森県五戸町立病院にて出生(八戸市、盛岡市と父の転勤とともに移動、小学校2年生より仙台市)
- 1974年3月 宮城県仙台第一高等学校 卒業
- 1978年3月 東北大学工学部土木工学科 卒業
- 1980年3月 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻 博士前期課程修了
- 1980年4月 佐藤工業株式会社 土木本部設計部
- 1983年1月 佐藤工業株式会社 中央技術研究所地盤耐震部
- 1992年9月 Visiting Research Assistant Professor, Rensselaer Polytechnic Institute (～1993年8月)
- 1998年4月 日本大学工学部土木工学科 助教授
- 2005年4月 日本大学工学部土木工学科 教授(～2021年3月)
- 2004年9月 Visiting Research Professor, RWTH Aachen University (～2005年3月)
- 2021年4月 日本大学工学部 上席研究員/2026年4月から研究員

学会等における主な活動

■土木学会

➤地震工学委員会(1998年より委員)

- 2009年5月～2012年4月：耐震規準小委員会 小委員長
- 2016年5月～2021年3月：地盤・構造物の非線形地震応答解析法の妥当性確認/検証方法の体系化に関する研究小委員会 小委員長
- 2019年5月～2021年4月：地震工学論文集編集小委員会 小委員長
- 2022年6月～現在：地震防災技術普及小委員会/2023年6月～2026年3月：地盤の過剰間隙水圧上昇と消散に伴う変形の評価に関する小委員会(原子力土木委員会との合同小委員会)

➤構造工学委員会

- 2009年5月～2012年4月：土木構造物のライフサイクルマネジメント研究小委員会
- 2018年～2024年1月：示方書連絡会議(地震工学委員会 連絡委員)
- 2021年6月～2023年5月：土木構造物共通示方書改訂小委員会 委員(2016年版の性能・作用編, 2010年版の作用・荷重編担当)

➤コンクリート工学委員会

- 2006年8月～2008年12月：コンクリート構造物の信頼性設計法に関する研究小委員会 WG1 主査

➤原子力土木委員会

- 2021年7月～2025年6月：委員長（副委員長：2017年7月～2021年6月, 委員&幹事：2013年7月～2017年6月）

■他学協会

- 2005年5月～2007年7月：(公社)日本地震工学会 理事（日本地震工学論文集編集委員会 委員長）
- 2006年6月～2008年5月：(公社)地盤工学会 理事
- 2015年6月～2017年5月：(公社)地盤工学会 東北支部 支部長（現在；名誉会員）

原子力土木委員会における活動の補足

2011年東北地方太平洋沖地震以降の**改革に向けた取り組み**

■福島第一原子力発電所事故後、原子力土木委員会の3つの活動方針

①客観性・透明性の一層の確保,②社会への積極的な情報発信,③自主的な調査研究活動

- 2013年：委員会声明「原子力土木委員会の改革について」をホームページにて公開
- 2020年：5月「原子力土木に係る基本的な考え方と今後の研究の方向性について」、12月「委員会活動の客観性・公開性の確保に向けた今後の検討方針」を公開など(委員会規則・内規の改正, 利益相反マネジメントなど)

➤①の背景(国会事故調査委員会の指摘)：委託費用の全額を電力会社が負担しており、公正性に問題があること、メンバー構成として、委員・幹事等が電力業界に偏っていること、議事の公開についても不十分であることが指摘

・原子力土木委員会の作成する技術文書は規制基準に事業者が対応するための実施基準(電気協会の規格JEAC4601, 指針JEAC4601)の参照となる

■①への対応：メンバー構成について、委員会規則改定(R3.1), 内規(R3.6改訂)により、委託小委員会を除く**職域による人数等メンバー構成**, **議事録の公開**に関わる改定. 委託小委員会内で技術文書の審議を行うことの**公正性**を確保するため技術文書のカテゴリーと公衆審査を含む策定過程の明確化などを実施.

■公正性確保への対応(内規と細則：令和4年8月29日制定)

- 技術文書のカテゴリーと公衆審査を含む策定過程の明確化:**成果報告書の作成等と標準化に関わる運営内規**
- 技術文書の作成・審議体制：原案作成と審議体制を分ける:**技術文書審議タスク細則**

これまでの主要な活動

- 地震工学分野において、地盤震動、地中構造物および斜面を対象に、**被害調査・分析、実験、解析、信頼性評価**を一貫して展開
 - 地盤のモデル化、地震動特性指標、非線形解析の精度などの地盤震動に関する研究
 - 1995年兵庫県南部地震で甚大な被害を受けた地中構造物(大開駅)の耐震設計法、耐震補強技術の展開およびフラジリティ評価手法を体系的に提案し、原子力分野を含む幅広い実務領域において活用
 - 斜面崩壊挙動やアンカー補強効果に関する研究成果を原子力発電施設の地震リスク評価へ展開
 - 非線形解析の検証や妥当性確認手法の体系化を推進
- 「レベル2地震動の考え方」に関する提言や、地盤・基礎構造物への地震作用を定める国際規格 ISO 23946 の策定への貢献
- 福島第一原子力発電所事故後、原子力土木委員会の専門家集団としての説明責任と公平性・中立性の確保に向け、調査研究活動や技術文書作成に関する内規の整備・運用を主導し、委員会の活動基盤を強化

これまでの主要な活動の紹介

- 調査分析を実施した被害地震と経歴の関係
- 地盤震動に関する研究
 - ・傾斜基盤によって発生する表面波地震動の解析とその設計への応用に関する研究 (学位論文, 1989.5)
 - ・地盤のモデル化(減衰とその影響, 盛土-支持地盤など), 非線形地震応答解析の精度, 地震動の特性指標, 地盤媒質の不均質性の影響など
- 地下鉄崩壊挙動の調査/分析と耐震補強設計
- Post兵庫県南部地震への提言と国際化への対応
- 各種構造物の地震リスク評価
- 斜面崩壊挙動とリスク評価に関する研究
 - ・海底斜面の安定性評価手法の妥当性確認
- 最後に：不確実さへに向き合い地震に備える

被害調査を実施した地震 と経歴との関係

1. 学生から佐藤工業時代
2. 日本大学工学部土木工学科へ転職後
3. 地震被害調査のとりまとめ事例

学生から佐藤工業時代

- 1978年 宮城県沖地震
- 1983年 日本海中部地震
- 1989年 ロマプリエタ地震
- 1990年 フィリピンルソン島地震
- 1993年 釧路沖地震
- 1994年 北海道東方沖地震,
三陸はるか沖地震
- **1995年 兵庫県南部地震**
- 1999年 台湾集集地震
- 2000年 鳥取県西部地震
- 2003年 宮城県沖の地震,
宮城県北部地震
- 2004年 新潟県中越地震
- 2007年 新潟県中越沖地震
- 2008年 岩手・宮城内陸地震
- **2011年 東北地方太平洋沖地震**
- 2014年 長野県北部地震
- 2016年 熊本地震
- 2021年 福島県沖の地震
- 2022年 福島県沖の地震
- 2024年 能登半島地震

■ **学生時代**：1978年 宮城県沖地震：大学院1年生のゼミ中に被災

■ **佐藤工業時代(18年)**：

- 1983年 日本海中部地震：就職後、恩師と初めての秋田・青森方面の被害調査(車力村の大クレーターなどの液状化被害)
- 1989年ロマプリエタ地震、1990年フィリピンルソン島、学会調査団に同行(フィリピンルソン島では大町先生、中村豊さんの微動・ダムチームに現地同行;パンケーキコラプスを始めとする建物被害, 液状化による建物被害)
- 1993年釧路沖地震、1994年北海道東方沖地震、三陸はるか沖地震、会社の研究所チームで調査
- **1995年兵庫県南部地震**：会社の建設構造物の調査・分析と復旧対応：
地下鉄・大開駅と新幹線・高架橋の被災状況調査+学会の調査報告



日本大学工学部土木工学科へ転職後

宮城県沖地震

- 1983年 日本海中部地震
- 1989年 ロマプリエタ地震
- 1990年 フィリピンルソン島地震
- 1993年 釧路沖地震
- 1994年 北海道東方沖地震,
三陸はるか沖地震
- **1995年 兵庫県南部地震**
- **1999年 台湾集集地震**
- 2000年 鳥取県西部地震
- 2003年 宮城県沖の地震,
宮城県北部地震
- 2004年 新潟県中越地震
- 2007年 新潟県中越沖地震
- 2008年 岩手・宮城内陸地震
- **2011年 東北地方太平洋沖地震**
- 2014年 長野県北部地震
- 2016年 熊本地震
- 2021年 福島県沖の地震
- 2022年 福島県沖の地震
- 2024年 能登半島地震

■ 日本大学工学部時代(1998年～23年) :

- 土木学会による1999年台湾集集地震の調査(濱田先生のもとで報告書(和文、英文版)の作成
- 2003年 宮城県沖の地震, 宮城県北部地震, 2008年 岩手・宮城内陸地震, **2011年 東北地方太平洋沖地震** : 関係学協会+支部による調査と報告書のとりまとめ
- (2014年長野県北部地震, 2016年熊本地震, 2021年 福島県沖の地震, 2022年 福島県沖の地震 : 独自調査)
- 2024年能登半島地震 : 原子力土木委員会として調査

2003年宮城県北部地震の調査

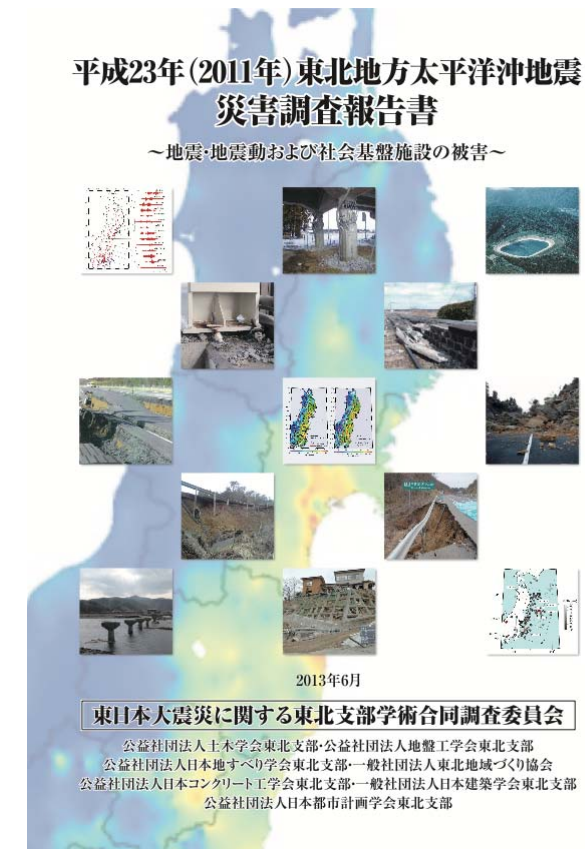
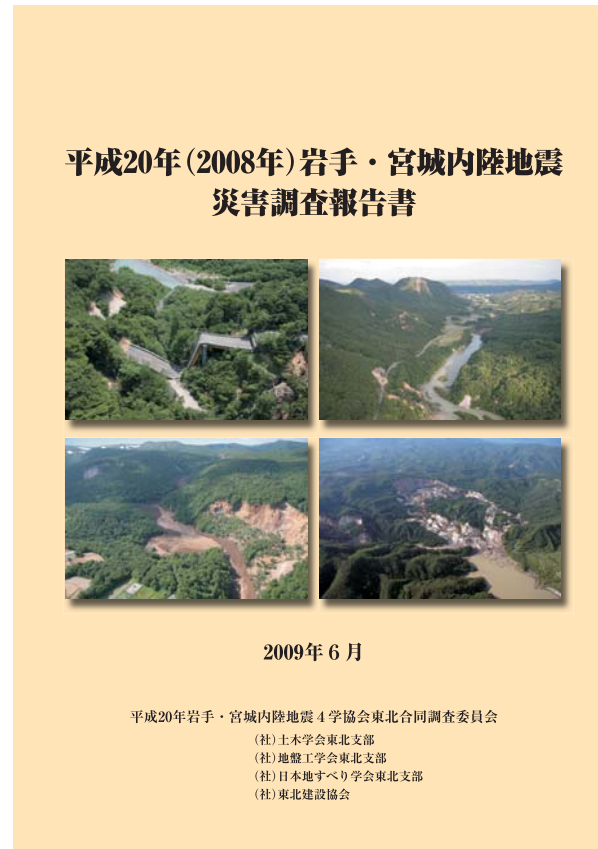
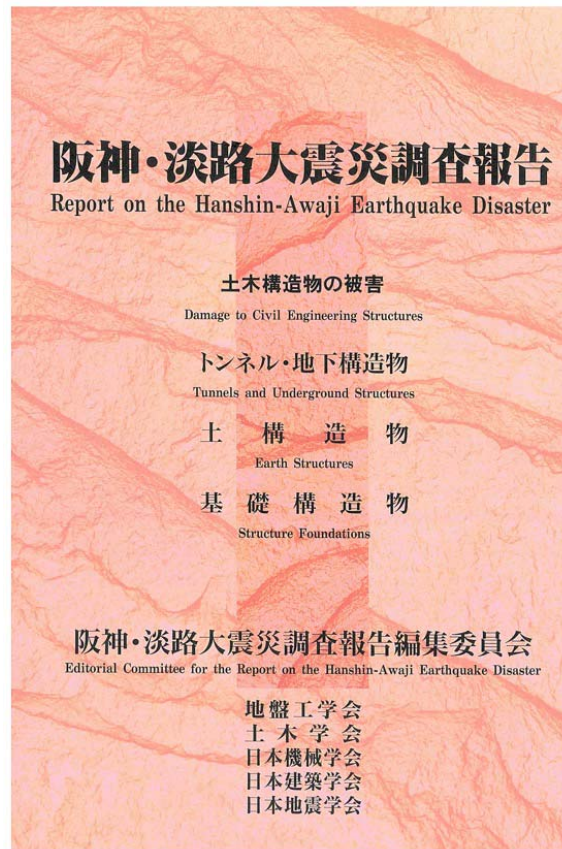


2011年東北地方太平洋沖地震
における福島県調査団



地震被害調査のとりまとめ事例

支部合同調査では被災構造物のデータベースの作成も実施



1. 中村晋, 末富岩雄, 吉田望(1990), 2.6.5 リーナ地区東西方向の微動特性と地盤構造, 日本建築学会, 1989年07月リーナ地区地震災害調査報告: 丸善, pp.99-103
2. (共)中村晋(1999), 3.7 Characteristics of seismic record observed at Taichung city, 8. LAND SLIDE, SLOPE FAILURE AND LIQUEFACTION, 土木学会地震工学委員会編, 震害調査シリーズ6, THE 1999 JI-JI EARTHQUAKE, TAIWAN -Investigation into Damage to Civil Engineering Structure-: J.S.C.E. pp.3.23-25, pp.8.1-10
3. 2003.5.26 宮城県沖の地震被害調査報告書, (社)土木学会, 土木学会および地盤工学会合同宮城県沖の地震被害調査団, <http://www.jsce.or.jp/report/20/frame.html>, 2003.9
4. 2003年三陸南地震・宮城県北部地震災害調査報告書, (社)地盤工学会, 2003年三陸南地震および宮城県北部地震震災調査委員会, 2003
5. 2003.7.26 宮城県北部地震被害調査報告書, (社)土木学会, 土木学会および地盤工学会合同宮城県北部地震被害調査団, <http://www.jsce.or.jp/report/23/report2003/>, 2004.4

地盤震動に関する研究

1. 地盤震動に関する主要な研究対象
2. 地震動の特性評価指標
3. 地盤のモデル化
 - 地盤の不均質性が地震応答に及ぼす影響
 - 盛土-支持地盤の1次元震動解析法

地盤震動に関する主要な研究対象

■堆積層表面波の生成とそれが地中構造物に及ぼす影響:

- 学位論文(1989.5): 傾斜基盤によって発生する表面波地震動の解析とその設計への応用に関する研究

■地震動の特性指標:

- 対象構造物の特性に応じた損傷などの影響を評価する指標
- 既往の地震記録を活用した地震動推定の再現性

■地盤のモデル化:

- 拡張ベース法やGAを用いた地盤のせん断波速度, 減衰特性(周波数依存、1次近似散乱減衰モデル)の同定
- 地盤の減衰特性(Rayleigh減衰)が液状化解析結果, 特に変形に及ぼす影響: 最終変位に影響を及ぼす
- 地盤の不均質性が地震応答に及ぼす影響
- 盛土-支持地盤の1次元震動解析法: 盛土の振動特性として, 支持地盤との錬成が重要
- 時間領域と周波数領域における動的変形特性の相似性を考慮した周波数領域での非線形解析法 ⇒ V&Vへ
- 解析法, 地盤特性および地震動特性に応じた非線形地震応答解析の精度 ⇒ V&Vへ

- 中村晋, 末富岩雄, 秋山伸一, 吉田望, 傾斜基盤の存在により生じるLove波の特性, 土木学会論文集, No.398/I-10, pp.339~348, 1988
- 中村晋, 末富岩雄, 吉田望, 傾斜基盤の存在により生じるLove波スペクトル特性の予測に関する考察, 土木学会論文集, No.404/I-11, pp.415~424, 1989
- 末富岩雄, 中村晋, 強震時における表層地盤のQ値について, 第8回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.589~594, 1990
- 中村晋, Michael O'Rourke, 地震観測記録に基づく表層地盤のせん断剛性と減衰定数について, 「地盤および土構造物の動的問題における地盤材料の変形特性-試験法・調査法及び結果の適用」に関する国内シンポジウム, 1994.1
- 中村晋, 澤田純男, 吉田望, 末富岩雄, 拡張ベース法を用い時間領域で同定された表層地盤の減衰特性, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.211-216, 2002.11
- 中村晋, 吉田望, 液状化過程の地盤震動に及ぼす入力地震動とRayleigh減衰の影響, 応用力学論文集, Vo.4, pp.493-502, 2001.8
- 中村晋, 吉田望, 周波数領域での地盤材料の動的変形特性に基づく地盤の非線形地震応答解析法の提案, 土木学会論文集, No.722/III-61, pp.169-188, 2002.12
- 秦吉弥, 中村晋, 野津厚, 本震観測記録を利用した地震動推定手法の精度とその向上策-2008年岩手・宮城内陸地震における震源域を対象として-土木学会論文集A1(構造・地震工学)(69巻2号), 186-205, 2013.5.
- 中村晋, 地震動指標の非線形増幅に及ぼす地盤特性と地震動特性の影響に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.50A, pp.449-456, 2004.3
- 中村晋, 吉田望, 周波数領域での地盤の非線形地震応答解析の精度と課題, 応用力学論文集, Vol.7, pp.823-831, 2004.8

地震動の特性評価指標(対象構造物の特性に応じた損傷などの影響)

■ 自然斜面：PGA vs アライアス強度

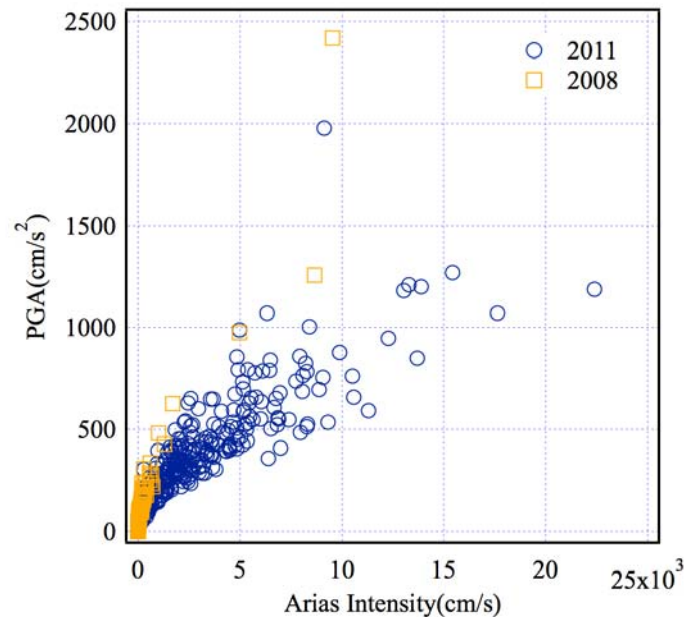


図 2011年東北地方太平洋沖地震と2008岩手宮城内陸地震で観測された地震記録より求めたアライアス強度とPGAの関係

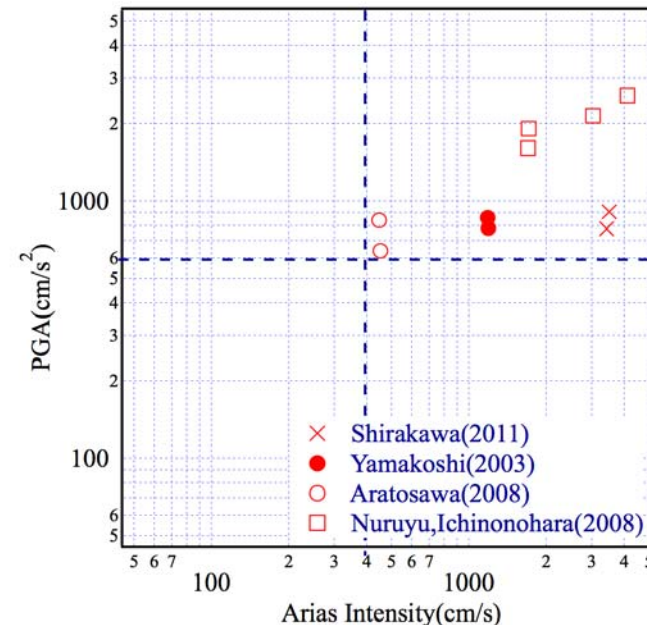
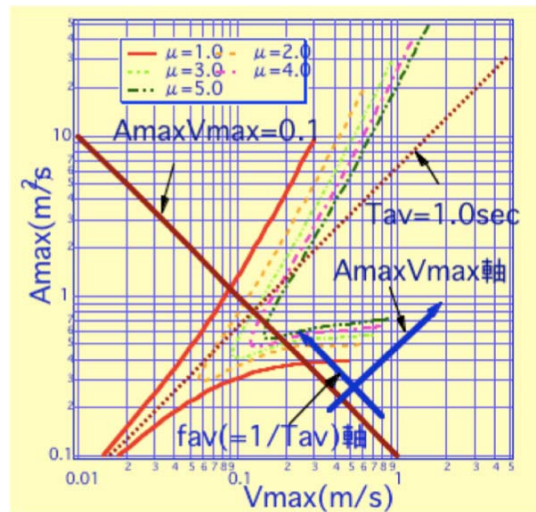


図 2011年東北地方太平洋沖地震, 2008岩手宮城内陸地震と2003年新潟県中越地震で崩壊した斜面近傍で推定された地震記録より求めたアライアス強度とPGAの関係

Susumu Nakamura, Akihiko wakai, Jun Umemura, Hiroyuki Sugimoto and Toshiya Takeshi ,Earthquake-Induced Landslide: Distribution, motion and mechanisms, Soils and Foundations, Vol.54, No.3, 544-559, 2014.9.

地震動の特性評価指標(対象構造物の特性に応じた損傷などの影響)

■橋梁, 高速道路盛土 PGA vs PGV



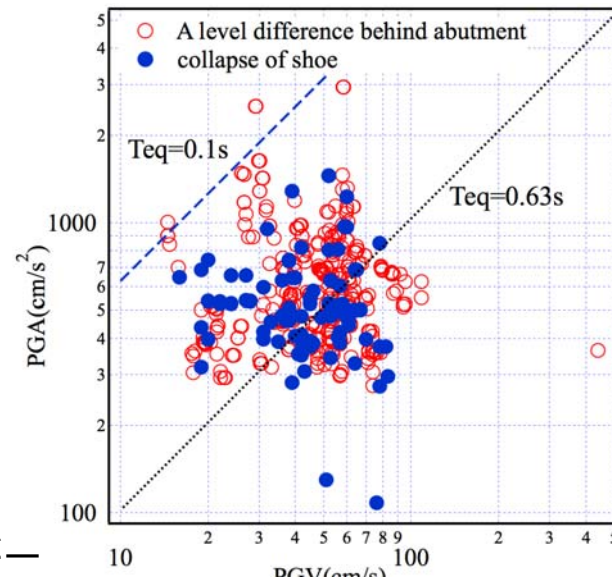
運動エネルギー ⇒ 最大速度時の運動エネルギー

$$E = \frac{1}{2} m V^2 \rightarrow \frac{1}{4\pi} m (A_{max} V_{max}) \cdot \left(2\pi \frac{V_{max}}{A_{max}} \right)$$

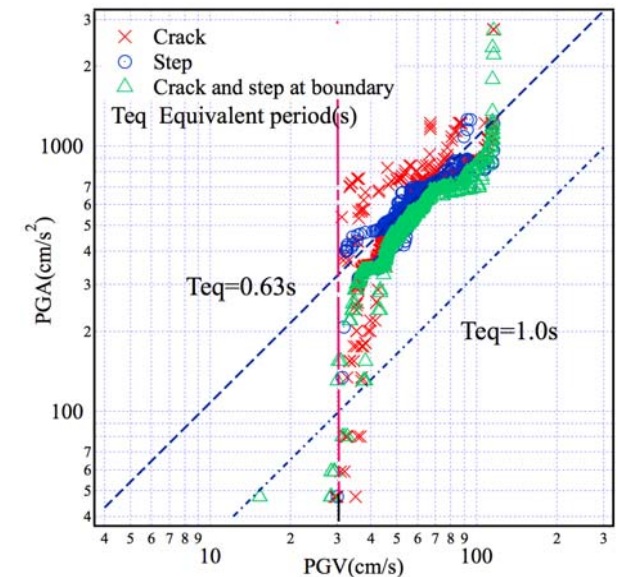
$\log V_{max}$ と $\log A_{max}$ の関係を45度反時計回りに回転すると最大速度時の運動エネルギーにおける最大エネルギー指標と等価周波数の関係が得られる

$$\begin{bmatrix} \log(A_{max} V_{max}) \\ \log(2\pi \cdot f_{av}) \end{bmatrix} = \sqrt{2} \begin{bmatrix} \cos 45 & \sin 45 \\ -\sin 45 & \cos 45 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \log V_{max} \\ \log A_{max} \end{bmatrix}$$

$$(2\pi \cdot f_{av}) = \frac{V_{max}}{A_{max}}$$



橋梁(支承, 橋台背面段差)



高速道路盛土(路面のひび割れ, 段差など)

図 2011年東北地方太平洋沖地震における被災地点のPGAとPGVの関係

1. 中村晋, 室野剛隆, 芦谷公稔, 地震動のエネルギー的評価指標に基づく非線形地震応答の推定に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.710/I-60, pp.399-412, 2002.7
2. 中村晋, 2011年東北地方太平洋沖地震により被災した国道橋梁のフラジリティ特性, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.71, No.4(地震工学論文集第34巻), pp.I_159-I_166, 2015.9.
3. 中村晋, 2011年東北地方太平洋沖地震により被災した高速道路盛土の被災形態に応じたフラジリティ特性, 第8回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム論文集, Vol.8, pp.529-534, 2015.10.

地盤の不均質性が地震応答に及ぼす影響

1次元, 2次元解析: 時間領域の非線形解析法
入力地震動: 葺合波(2E入力)

空間的変動=平均値+変動

$$F(x_i, y_j) = f_m + f(x_i, y_j)$$

変動成分のモデル:
三角級数法を用い, 相関距離を考慮
したガウス場の確率地盤モデル

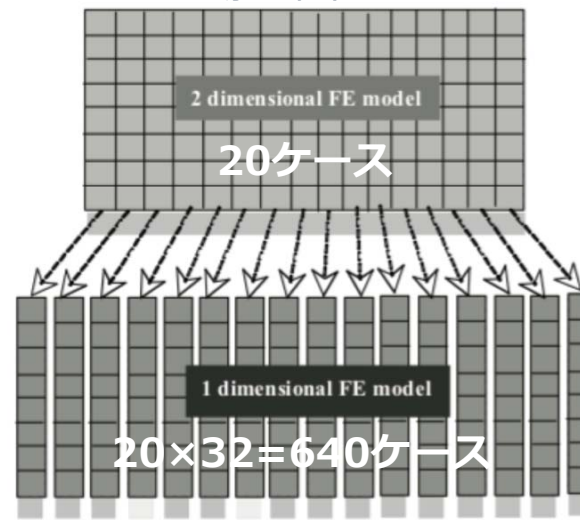
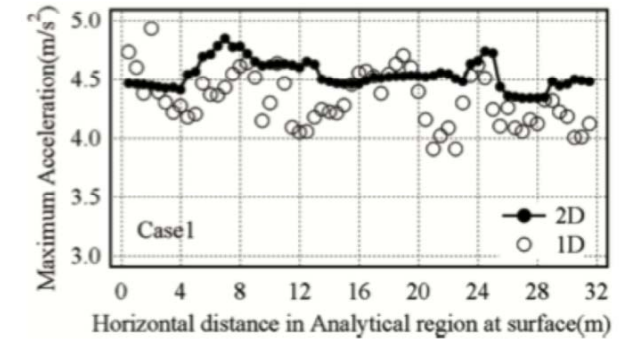
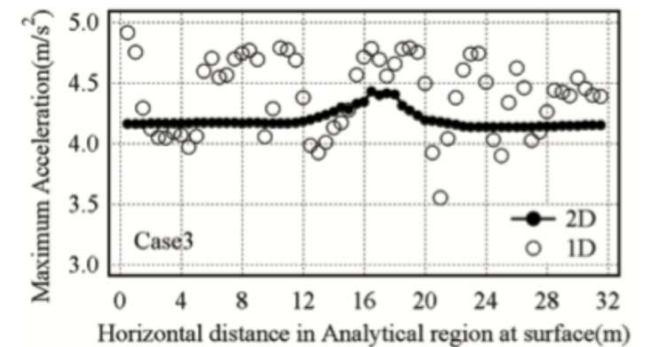


図-6 地盤物性の空間的不均質性考慮した2次元および1次元地盤モデルの考え方

1次元, 2次元解析による地表面最大加速度分布の比較



a) ケース 1



c) ケース 3

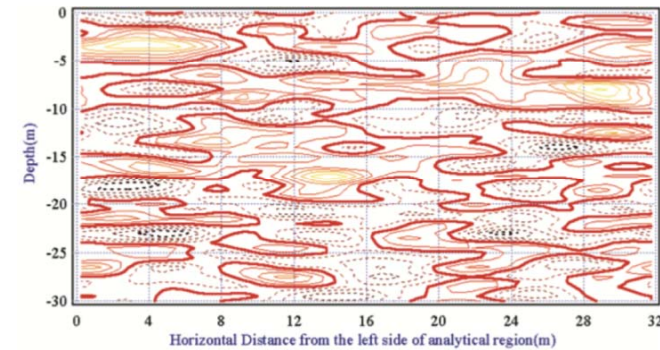
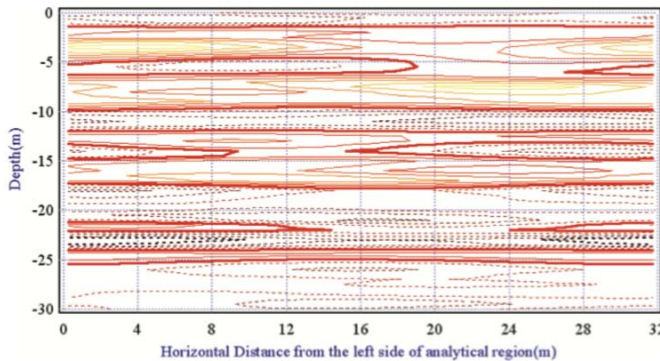


図-3(1) 検討領域におけるせん断波速度の空間分布の一例(ケース 1: 水平方向の相関距離=3m)



b) ケース 3(水平方向の相関距離=15m)

図-3(2) 検討領域におけるせん断波速度の空間分布の一例

1. 中村晋, 地盤媒質の2次元不均質性が非線形地震応答に及ぼす影響とモデル化, 第5回構造物の安全性・信頼性に関する国内シンポジウム論文集, pp.665-670, 2003.11
2. 中村晋, 澤田純男, 松本敏克, 地盤物性の不均質性な空間的のモデル化次元に応じた非線形応答性状の比較, 土木学会論文集 C部門, Vol.63, No.3, pp.711-724, 2007

盛土-支持地盤の1次元震動解析法

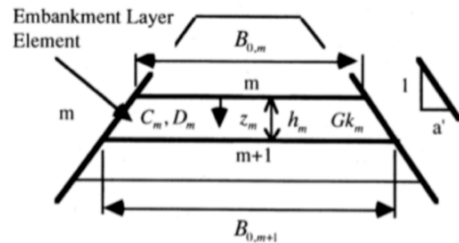


図-2 層要素(層)の上(m)・下(m+1)面の関係

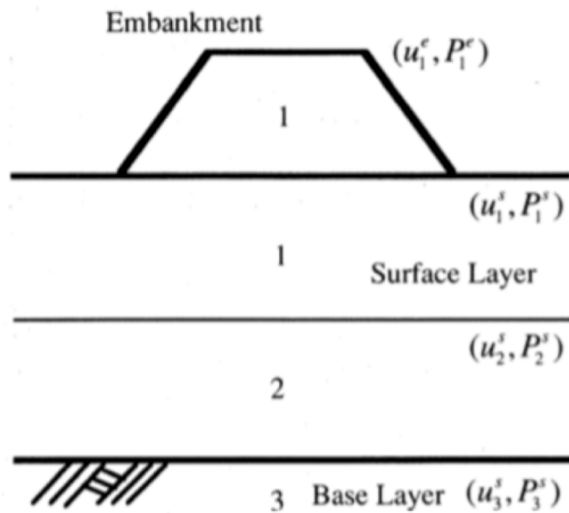
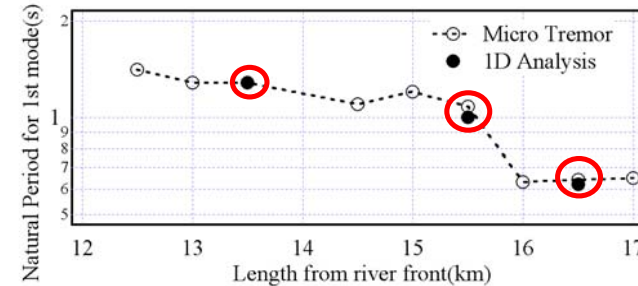
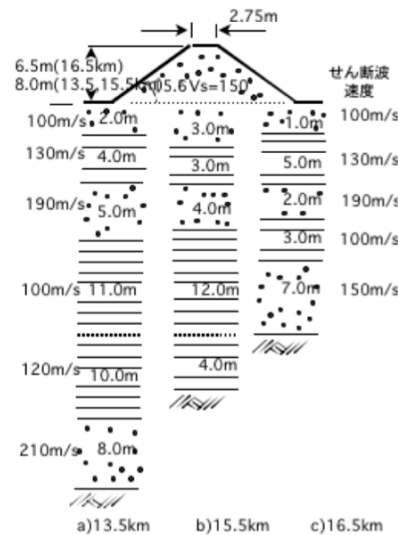
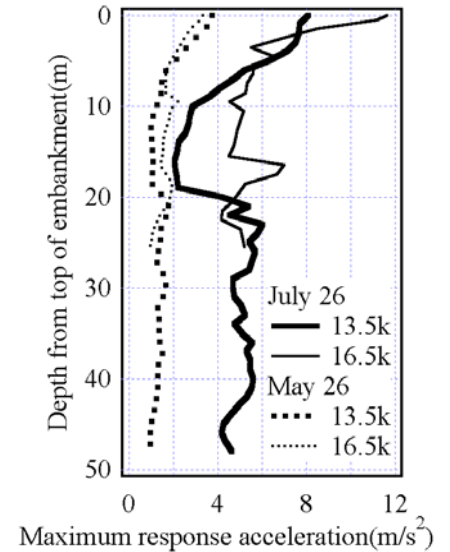
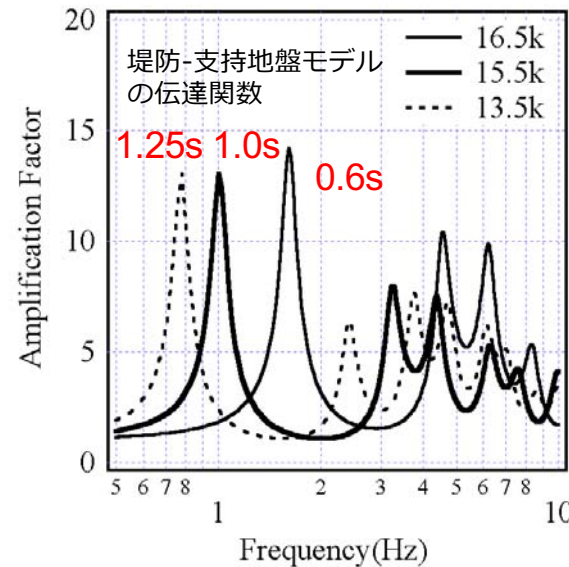


図-3 盛土-支持地盤モデル

2003年宮城県北部地震
で被災した鳴瀬川木間
塚周辺の河川堤防-支
持地盤モデル



微動H/Vスペクトルの
卓越周期と堤防-支持地
盤モデルの1次卓越周
期との比較



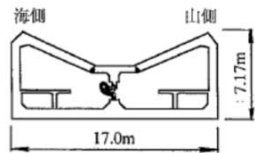
1. 中村晋, 風間基樹, 層マトリックス法による盛土-支持地盤系の1次元震動解析法, 応用力学論文集, Vo.5, pp.501-508, 2002.8
2. 中村晋, 風間基樹, 側方地盤との動的相互作用を考慮した盛土-支持地盤系の1次元震動解析法, 応用力学論文集, Vo.6, pp.723-730, 2003.8
3. 中村晋, 河川堤防で観測された2003年宮城県北部地震の強震記録に基づく堤防の震動性状と地盤特性および地震動の関係, 日本地震工学会論文集, 第4巻, 5号, pp.5-18, 2004

地盤震動に関する今後の課題： 合理的な地盤のモデル化と地震動特性指標

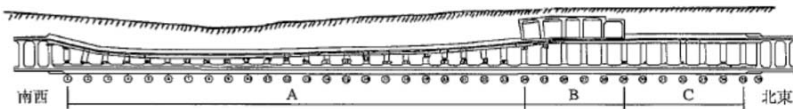
- 地盤構造や地盤物性の空間的な不均質性の合理的なモデル化手法（過度の安全性を排除できる方法）
- 対象構造物の特性に応じ，損傷などの影響を評価できる地震動特性指標
- 高度化する地盤の非線形地震応答解析への入力情報と解析モデルの作成の考え方と正確度や信憑性評価の考え方 ⇒ 合理的なマニュアルの整備とV&V

地下鉄崩壊挙動の調査/分析と 耐震補強設計

- 1.地下鉄大開駅の崩壊挙動の
調査/分析(1995年兵庫県南
部地震)
- 2.耐震補強設計
(地下構造物のフラジリティ
評価 ⇒ 各種構造物の地震リ
スク評価)

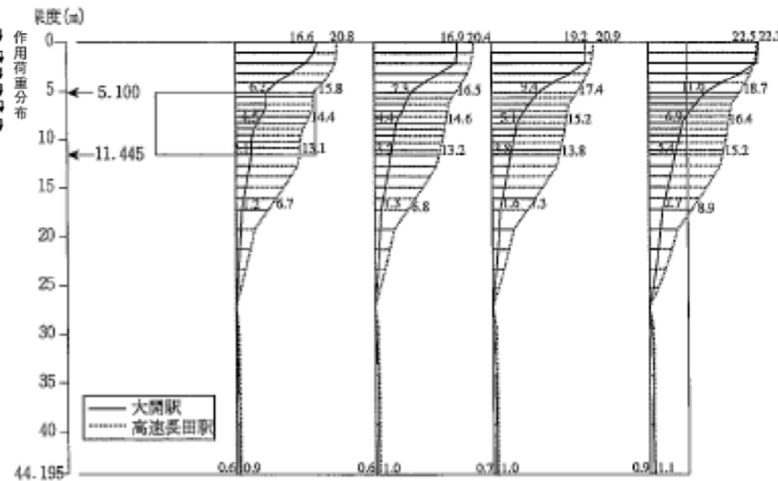
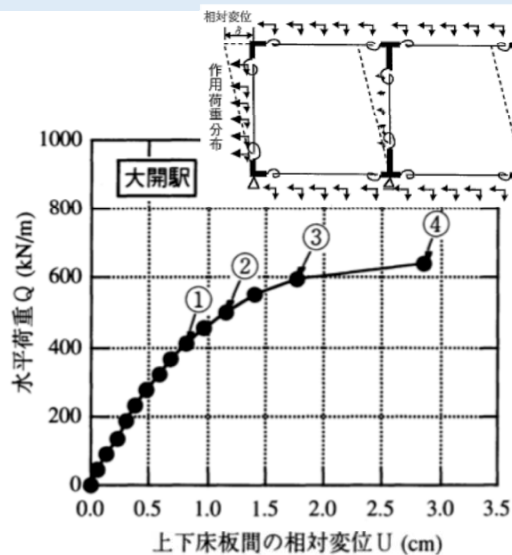


地下鉄大開駅の崩壊挙動の調査/分析(1)



限界値：節点力(動的解析)を静的に作用した静的弾塑性解析によるプッシュオーバー解析

応答値：周辺地盤のデータや構造実験に基づいた解析等価線形解析による大開駅-周辺地盤の2次元地震応答解析

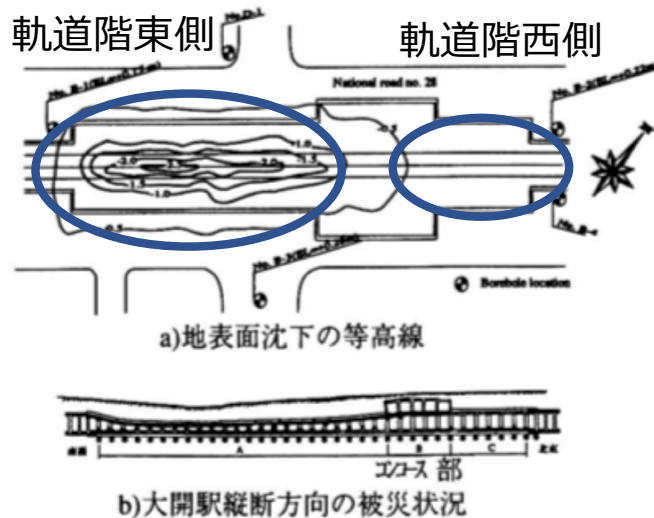


- 被災状況を詳細に調査/周辺地盤PS検層、動的変形特性等の調査を実施(1)
- 中柱の被災状況/構造実験(3)に基づく損傷モード：高軸力下での曲げせん断破壊

■ 応答の評価指標として上・下床版間の相対変位を考慮

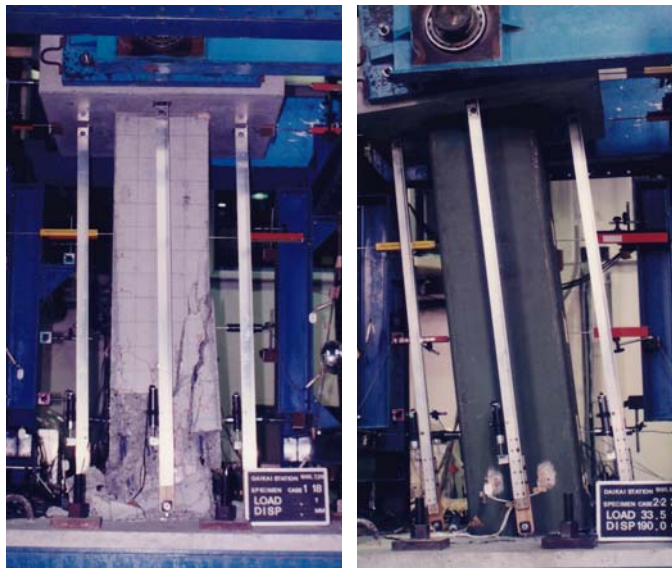
■ 解析より、応答値3.85cmに対して限界値2.85cmと大きく、中柱の崩壊は曲げせん断破壊と確認

1. 廣戸俊男, 梅原俊男, 青木一二三, 中村晋, 江崎順一, 末富岩雄, 兵庫県南部地震による神戸高速鉄道・大開駅の被害とその要因分析, 土木学会論文集, No.537/I-35, pp.303-320, 1996,4
2. 中村晋, 神戸高速鉄道・大開駅周辺地盤における基盤地震動の推定, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.1901-1906, 1998
3. 中村晋, 地震被害程度の差異に基づく地下鉄の被害要因分析, 土木学会論文集, No.654/I-52, pp.335-354, 2000.7



地下鉄大開駅の崩壊挙動の調査/分析(2)

- 軌道階の西側は中柱の損傷は見られるものの上床版の崩壊はみられない原因の考察：軌道階の**東側**は駅軸方向に長く、軸直交断面の**2次元적挙動が卓越**，**西側は袖壁，中柱，上・下床版を含む立体構造の挙動**により、中柱が損傷して上床版が上載荷重を支える耐荷性能を保持
- ・ **地中構造物の中柱が高軸力下での耐荷性能を保持しなければならないという特性**を示し、被災状況の確認と復旧柱(鋼管を外壁とするRC柱)の変形・耐荷性能を確認するための実験を実施
- **上・下床版間の層間変位を指標とし、応答値，限界値を簡易に評価する地中構造物の耐震設計法を提案**



既設中柱の破壊状況 復旧中柱の変形状況

1. 中村晋，青木一二三，梅原俊男，柳瀬高人，神戸高速鉄道・大開駅の既設および復旧柱の耐力および変形性能，第18回コンクリート工学年次論文報告集，pp.1996
2. 中村晋，層間変形に基づく地中構造物の横断方向の耐震設計法の提案，土木学会論文集N0.605/I-45，pp.217-230，1998.10

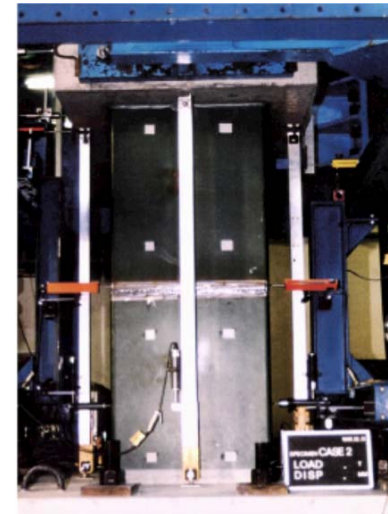
耐震補強設計

- 地下鉄RC柱の耐震補強設計 (1,2)
 - 地下という重機等の機器搬入の困難な施工環境における補強工法
 - 中柱のせん断耐力と靱性向上による補強工法

中柱自体のせん断耐力と靱性向上により損傷を防ぐ

中柱自体が損傷しても、上床版を支える
⇒ロバスト性(危機耐性的構造)

地下鉄の駅構内のみならず、
それを含む地下空間の安全と
機能維持のための確認と必要
に応じた補強方法



ボルト接合の鋼板
巻立て工法(3)



添え柱工法(3)

- 1.(財)鉄道総合技術研究所，地下鉄炭素研究会，炭素繊維シートによる地下鉄RC柱の耐震補強設計・指針，山街堂，1997.1
- 2.小野定，小山幸則，佐藤豊，中村晋，倉石謙司，出羽克之，高軸力を受けるRC柱の炭素繊維シートによる耐震補強法，「コンクリート系構造物の耐震技術」に関するシンポジウム論文集，pp.181-188，1997.4
- 3.コンクリート工学協会，耐震補強の評価に関する研究委員会 報告書・論文集，2000.6

Post兵庫県南部地震への提言と国際化への対応

■土木構造物の耐震設計法に関する第3次提言と解説 (2000年6月)

- 土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会/第一WG:主査 大町達夫, 副査 佐藤忠信, メンバー: 石川裕, 江尻譲司, 瀬瀬一起, 澤田純男, 杉戸真太, 武村雅之, 中村晋, 原田隆典, 山崎文雄
- 4.1.2 用語説明: レベル2地震動とは構造物の耐震設計に用いる入力地震動で、現在から将来にわたって当該地点で考えられる最大級の強さをもつ地震動である。
- 4.1.3 レベル2地震動設定における基本方針
- 4.1.4 震源断層を想定した地震動の評価
- **4.1.5 レベル2地震動の下限基準:** 対象地点およびその周辺に活断層が知られていない場合でも、レベル2地震動の設定に当たってはマグニチュード6.5(M6.5)程度の直下地震が起きることに配慮するものとし、これをレベル2地震動の下限とする。
- 4.1.6 地震動評価における不確定性
- 4.1.7 残された課題
- (1)レベル1地震動の明確化,(2)深部地下構造の探査と評価,(3)活断層の分布や活動度の工学的評価,(4)震源過程の解明と予測



最新の知見を踏まえた**下限基準**の確認

ISO23469 (Seismic action on geotechnical works ; 地盤基礎構造物への地震作用) は2002.1に正式に承認された後に活動を開始し, 2005年に制定された。学会における技術推進機構内にISO対応特別委員会/TC98/SC3/WG10対応小委員会 (井合進先生をWG10のコンベナー) とそこに設置された地震動分科会(主査: 澤田純男, メンバー: 森伸一郎, 安中正, 石川裕, 武村雅之, 中村晋, 野津厚, 林康裕, 本田利器) の活動成果が反映された。



作用の概念と手順の明確化: 参照地震動、作用因子-作用効果

各種構造物の地震リスク評価

1. RC橋脚/地下構造物/盛土のリスク比較
2. 地下構造物のフラジリティ評価
3. 盛土の不均質性を考慮したフラジリティ評価

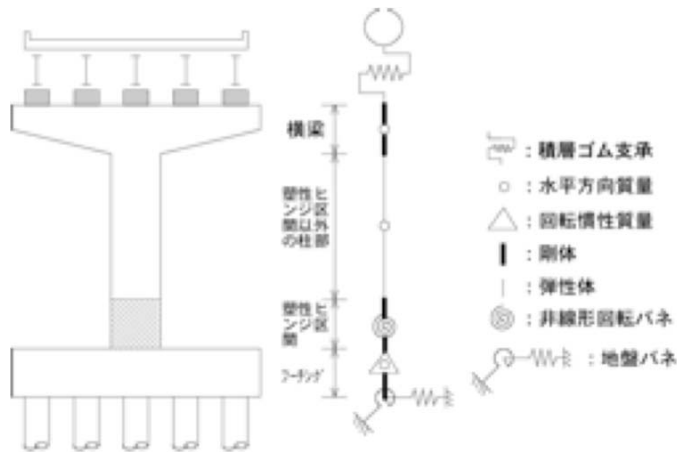
亀田弘行, 高田毅士, 蛭澤勝三, 中村晋、原子力災害の再発を防ぐ(その3)-地震工学分野から原子力安全への提言-原子力学会誌「アトモス」(54巻9号), 29-37, 2012.9.の中から
「個別のプラント要素の設計値に対する実耐力、すなわち余裕性能を与える耐震裕度は、設計点と残余のリスクをフラジリティの概念を介して結びつける。これにより、決定論的設計と確率論的評価は同一の土俵で整合性を持って議論できる。両者が相補的な役割を果たすことにより、プラント全体の耐震安全性の定量評価が行われる。」



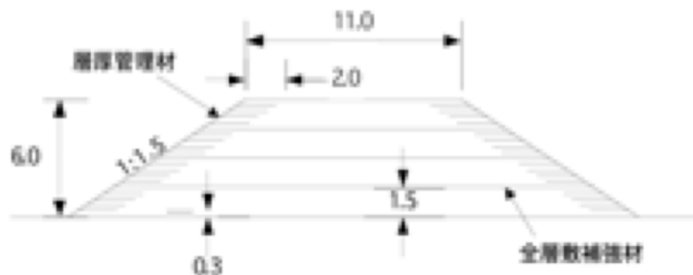
種々の構造形式で構成される構造物の性能評価結果に含まれる耐震裕度を合理的に評価し、**ネットワークとして危機耐性に備える**ためにはフラジリティやリスク評価などの**リスク情報の有効活用**が必要

RC橋脚/地下構造物/盛土のリスク比較：対象

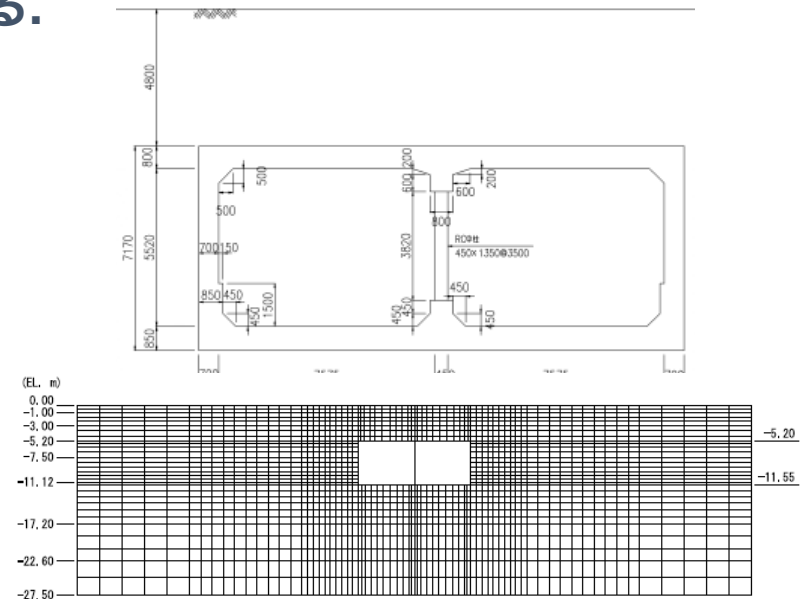
杭基礎を有するRC単柱橋脚：平成8年の道路橋示方書に準拠した橋脚



鉄道盛土の鉄道構造物等設計標準・同解説における適合みなし仕様の試計算で用いられた形状を参考に設定した（盛土高さ6.0m，勾配1:1.5とし，長さ2.0mの層厚管理材と高さ1.5mおきに全層に補強材を敷設）



地下鉄の駅舎構造物(大開駅モデル)：常時，レベル1地震動の使用状態，さらにレベル2地震動に対しても曲げ破壊先行型となるように，せん断補強筋が十分に配置されている。



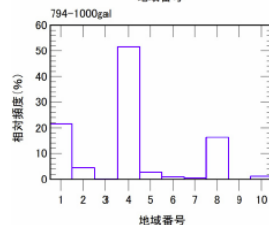
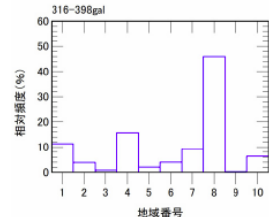
- 土木学会，コンクリート技術シリーズ，No.83，コンクリート構造物の信頼性設計法に関する研究小委員会(336委員会)成果報告書，2008
- 鈴木基行，秋山充良，中村晋，中村秀明，公開ハザード情報を用いたコンクリート構造物の信頼性評価-コンクリート委員会336委員会活動-，コンクリート工学，pp.21-27,Vol.47,No.4.2009.4

RC橋脚/地下構造物/盛土のリスク比較：地震ハザードと生起確率付き地震動群

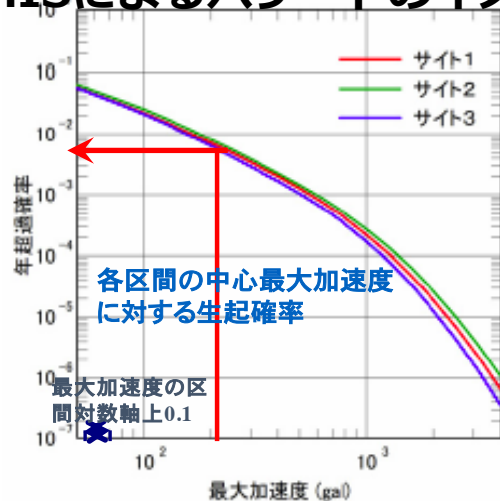
ハザード解析に用いる震源域
(神戸の例)

地域番号	活動域
1	有馬－高槻断層帯
2	中央構造線断層帯
3	大阪湾断層帯
4	六甲・淡路島断層帯
5	上町断層帯
6	山崎断層帯
7	南海トラフ
8	内陸地殻内
9	フィリピン海プレート
10	その他断層帯

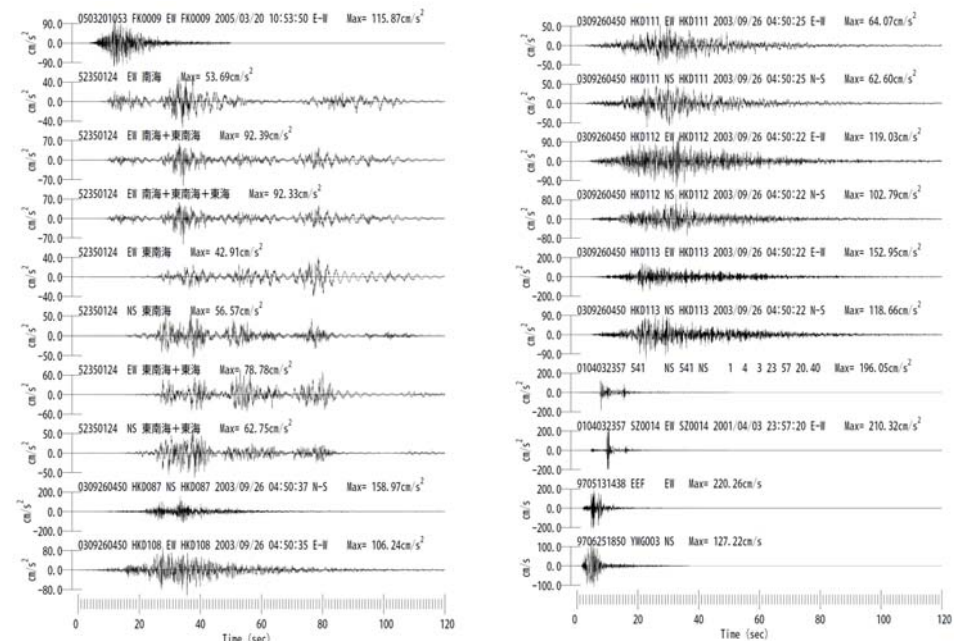
震源域別貢献度



(J-SHISによるハザードのイメージ)



- 震源特性に応じた観測記録などの地震動群の評価
- 各対象地点工学基盤における最大速度のハザード曲線(J-SHIS)**
- 最大加速度の区間毎に、想定地震別の貢献度に基づきi)の波形から検討に用いる波形を20波選定
- 選定した波形の最大速度を区間の中央値に振幅調整し、各波形の年発生頻度をとすることにより**生起確率付地震動群を設定**



選択された基準地震波群の例(355gal)

RC橋脚/地下構造物/盛土のリスク比較：試算結果の比較

■限界状態

- **RC橋脚**：RC橋脚の応答変位が軸方向鉄筋のはらみ出し点(曲げ破壊)となる終局変位となる状態.
- **地下鉄**：中柱が曲げ降伏後の降伏荷重維持限界となる層間変形角
- **補強盛土**：Newmark法により算出した盛土の地震時変形量が盛土の斜面崩壊による地震時変形限界(0.5m) となる状態

表 異種構造物の信頼性指標の比較

	解析対象地点	
	神戸	高知
RC橋脚	2.57	2.02
地下構造物	4.09	3.34
盛 土	3.00	2.54

- 1.信頼性指標の大きさは、地下構造物、盛土、RC橋脚の順
- 2.南海トラフ沿いの巨大地震が懸念される高知において、構造物毎の信頼性指標の大きさ関係は変わらないが、全体として神戸より小さい値となっている

地下構造物の fragility 評価

日本原子力学会の地震PRA標準で例示されている fragility 曲線の評価手法

地盤の1次元解析に基づく層間変形角の応答のばらつきの評価フロー

隔壁などの曲げ破壊、せん断破壊に関する fragility 曲線

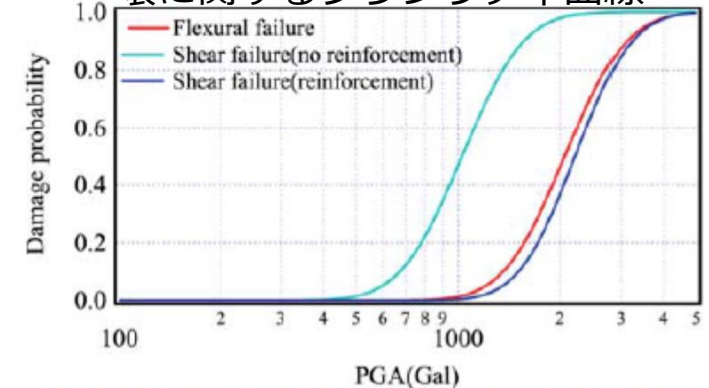
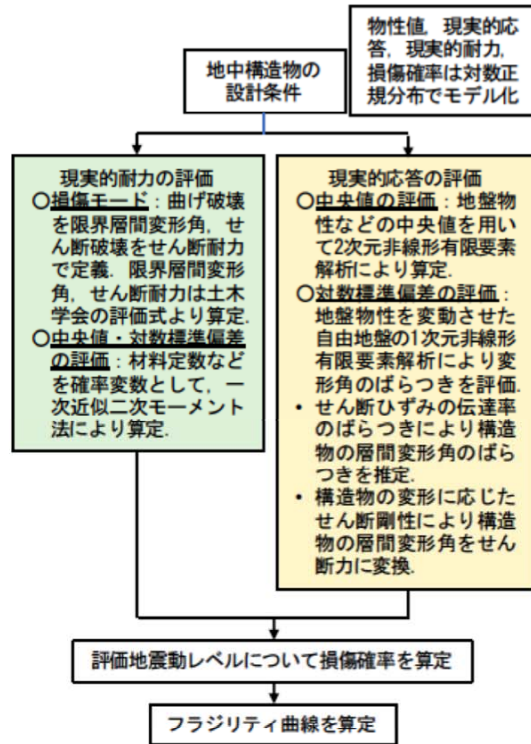


図-12 損傷モードに応じたコンポジット・ fragility 曲線

評価フロー



自由地盤の非線形地震応答解析
→ γ_{gr} , G_g

せん断ひずみ伝達率(式5)による
 γ_g と G_g の関係の推定

$$\alpha = \frac{\gamma_g}{\gamma_{gr}} = \frac{2(G_g/G_r)}{(G_g/G_r)+1}$$

両方の γ_g と G_g 関係の一致点

構造物の γ_g の推定値

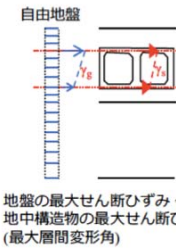


図-3 地中構造物の最大層間変形角の評価フロー

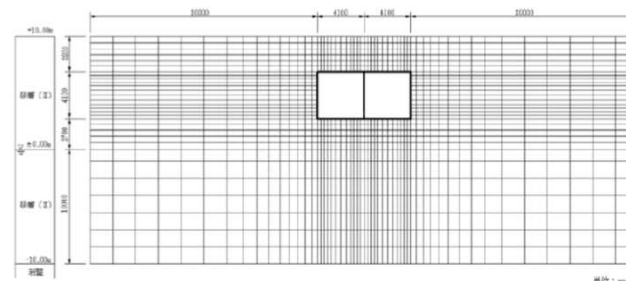


図-5 有限要素解析モデル

海水管ダクトの2次元有限要素モデル

現実的応答(層間変形角)の特性

表-2 最大層間変形角の中央値および各不確実さ

PGA (Gal)	Median (Evaluation time: s)	Field ζ_{gr}	Shear strain γ_{gr}	deformation angle β_{gr}
300	4.11×10^{-4} (14.04s)	0.145	0.042	0.152
600	1.02×10^{-4} (9.02s)	0.134	0.042	0.141
900	2.64×10^{-5} (10.50s)	0.149	0.058	0.160
2000	1.55×10^{-2} (19.99s)	0.142	0.043	0.120

限界層間変形角の中央値および各不確実さ

PGA (Gal)	Median	Alcatory uncertainty β_{ac}	Epistemic uncertainty β_{ec}
300	1.73×10^{-2}	0.023	0.22
600	1.70×10^{-2}	0.025	
900	1.67×10^{-2}	0.027	
2000	1.58×10^{-2}	0.036	

- 堤英明, 蛭沢勝三, 中村晋, 原子力施設における地中構造物の実用的な損傷確率評価手法の提案, 土木学会論文集, A 部門, Vol.63, No.3, pp.704-715, pp2007
- 松本敏克, 澤田純男, 坂田 勉, 中村 晋, 地中構造物の地震時損傷度評価における荷重強度指標に関する一考察, 構造工学論文集, Vol.54A, pp.959-970, 2008.3
- 中村晋, 松本敏克, 坂下克之, 丹羽三郎, 複数の損傷モードを考慮した fragility 評価手法の提案, 土木学会論文集, Vol.77, No.2, pp.271-286, 2021.8.20

盛土の不均質性を考慮したフラジリティ評価

■ 地盤物性の空間的な不均質性の考慮

- 従来：単一の円弧すべり面上のブロック毎に強度定数をばらつかせる
- 提案：Baker&Garberの強度の不連続性を有する地盤の変分問題の解「各層のすべり面形状は対数らせんとなり，形状を現す定数は異なるものの各層の対数らせんの極は共通である」

■ 盛土への地震作用：従来は盛土内の増幅を考慮せず一様の震度、提案：盛土内の増幅を考慮

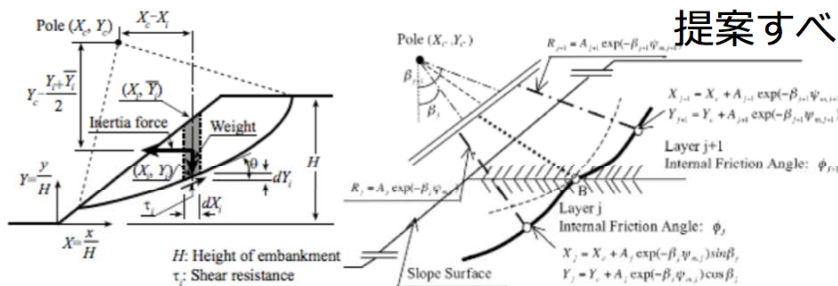


図-3 従来法によるすべり土塊に作用する力

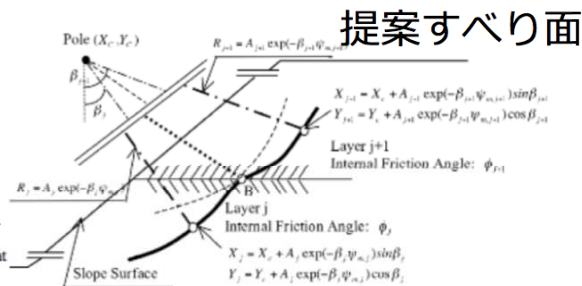


図-4 強度特性の異なる2層とその境界でのすべり面形状

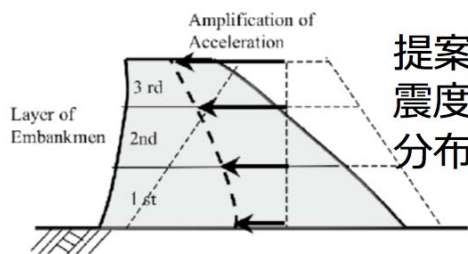


図-1 地盤構造モデルと地震作用モデル

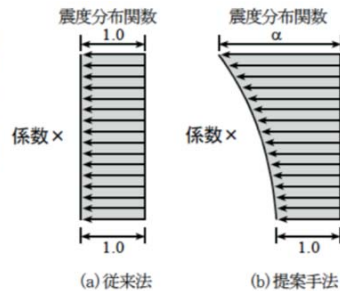
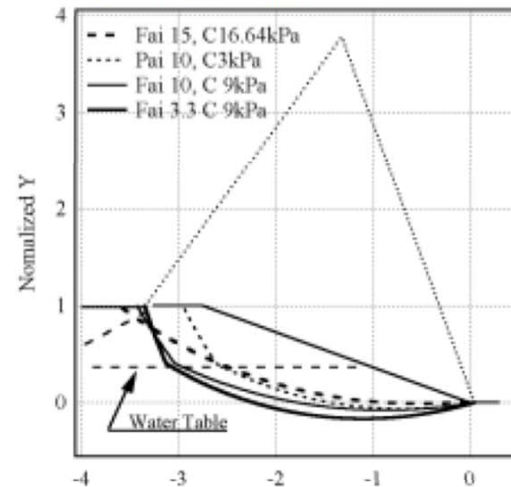
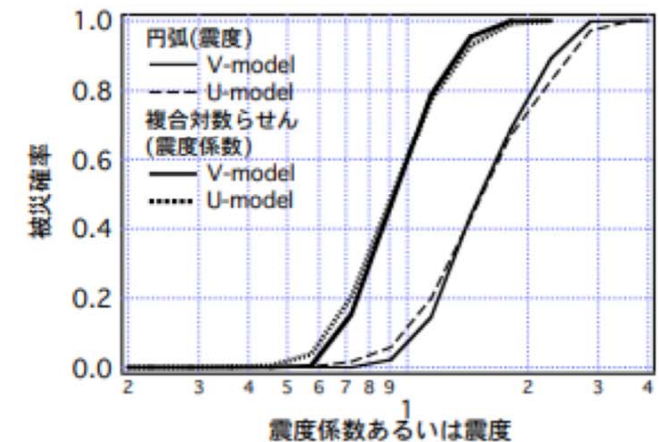


図-2 一般化された震度の空間分布のイメージ

2003年宮城県北部地震による河川堤防の崩壊分析：下部は間隙水圧の上昇による強度低下考慮



段差50cmを限界状態とし，Newmark法により求めた従来法，提案法による崩壊フラジリティ曲線の比較



1. 中村晋，澤田純男，吉田望，多層構造を有する斜面の地震時永久変形の簡易評価手法とその適用性，土木学会論文集 C部門，Vol.62、No.2，pp.269-284，2007
2. 中村晋，澤田純男，吉田望，地震時における盛土の被災程度に応じたフラジリティ曲線の評価に関する一考察，土木学会論文集，C部門，Vol.65，No.4，pp.977-988，2009

各種構造物のリスク評価に関する今後の課題： 合理的な性能評価からシームレスな防災へ向けて

- 各種構造物の損傷確率の算定に際して地震ハザードは公開ハザード情報(J-SHIS), フラジリティー曲線は生起確率付き地震動群を用いたMCSにより評価
- ・公開ハザード情報および既往の地震観測記録を活用したフラジリティー評価用地震動(生起確率付き地震動群)は震源特性, 波形形状や周波数特性などの種々の不確定性の影響に配慮した優れた考え方である
- ・課題: 合理的なフラジリティー評価手法の構築, 地点間の耐震性能の差異, 様々な形式の公共構造物の耐震性能差異, 構造物間の限界状態の等価性
- フラジリティー曲線の評価における不確定性の評価について:
 - ・地盤物性の空間的な不均質性の合理的な評価とモデル化方法
 - ・認識論的不確定性を含む不確定性の合理的な評価とモデル化手法(原子力発電施設(参考5,6)を除き認識論的不確実さが考慮されていない場合が多い)

1. 中村晋, 秋山充良, 澤田純男, 安中正, 西岡勉, 土木構造物の被災度と関連づけられた損傷確率の評価手法に関する一考察, 応用力学論文集, Vol.8, pp.823-831, 2005.9
2. 中村晋, 秋山充良, 澤田純男, 安中正, 西岡勉, 被災度と関連づけたRC橋梁の損傷確率の評価手法とその適用, 日本地震工学会論文集, 第6巻, 2号, pp.17-34, 2006
3. 中村晋, 安中正, 秋山充良, 篠田昌弘, 鈴木基行, インフラを構成する異種構造物の損傷確率の比較, JCOSSAR, pp391-396, 2011

斜面崩壊挙動とリスク評価に関する研究 (2009～2016：原子力安全基盤機構，原子力規制庁プロジェクト)

1. 設計地震動の増大に対するより現実的な安定限界の評価方法の検討
2. 斜面崩壊後の土塊，岩塊の挙動が施設に及ぼす影響の評価
3. 海底斜面の安定性評価手法の妥当性確認



「日本地震工学会：原子力発電所の地震安全に関する地震工学研究の研究ロードマップ，亀田弘行・委員長，2011」における4.5 地盤斜面

- ・ 斜面安定の耐震裕度評価法
- ・ 地盤の調査方法と試験方法
- ・ 地盤-基礎相互作用系の応答解析法
- ・ 力の釣り合いと変形を包括できる安定・変形解析法

設計地震動の増大に対するより現実的な安定限界の評価方法の検討

1. 1995年後，2006年改訂の設計地震動の増大に対するより現実的な安定限界の評価方法の検討

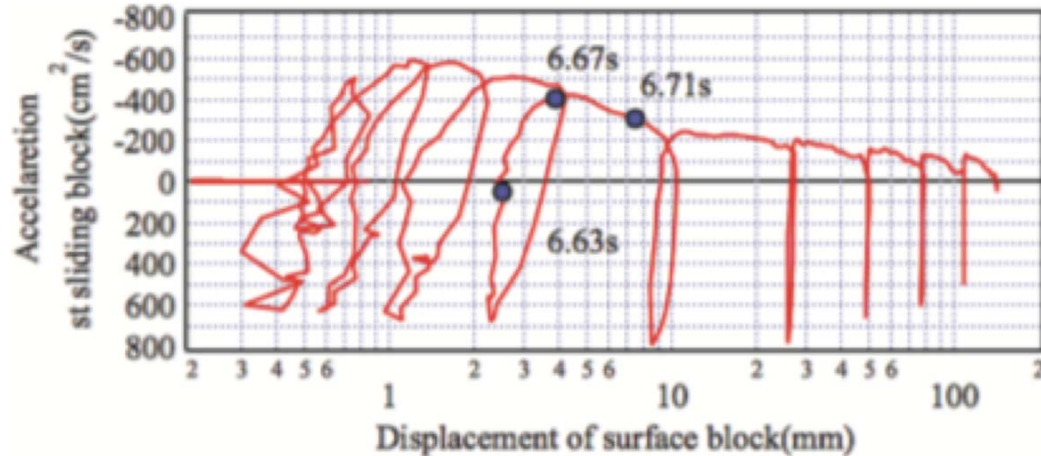
- 1G場での振動実験(小型模型:高さ1.0m, 中型模型:高さ2m)による滑り面の形性から崩壊挙動の分析・シミュレーション技術
 - 画像分析による亀裂やひずみの進展過程の可視化
 - 粒子法(MPM, MPS, SPH) やDEMの適用性の確認
 - すべり形態は滑動型崩壊, 複合方崩壊と滑落型崩壊の3つに大別されるが, 影響という観点では滑動型崩壊と滑落型崩壊2つに大別される.
- ニューマーク法による安定限界評価への適用性検討
 - 地震時における斜面の安定性評価として, 地震時に変状が生じる(不安定化)が, 地震後に安定化するかどうかの評価にNewmark法が適用できるか? ⇒ 滑落型崩壊の判別が重要

2. 対策工の効果確認

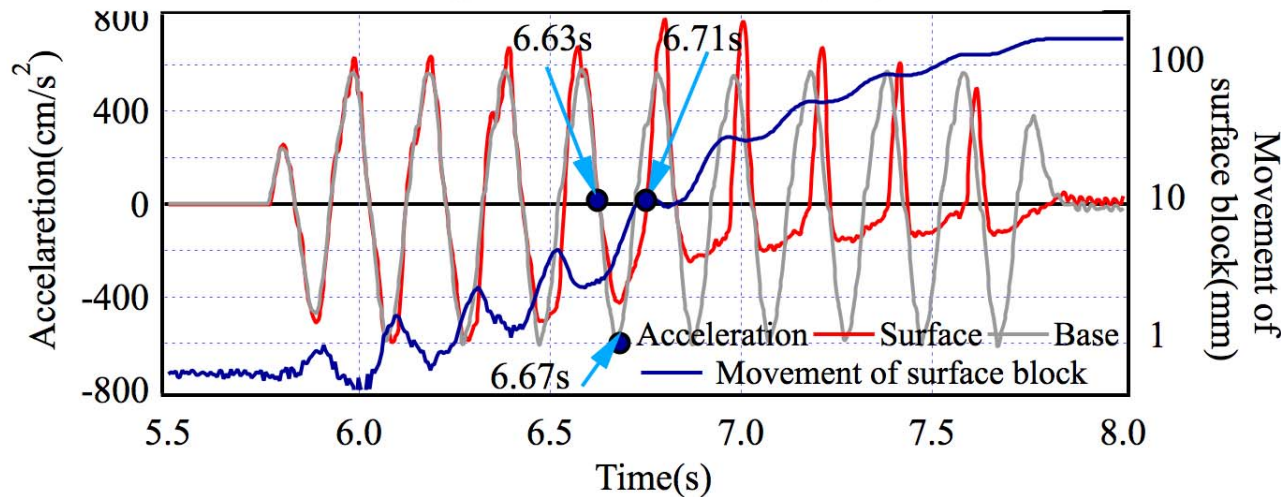
- 1G場での振動実験(小型模型、中型模型), 遠心振動実験にアンカー工法の限界状態の確認と挙動のモデル化

すべり面の形成過程：滑動型崩壊

すべり土塊への作用加速度と土塊の変位



斜面の変形が進行し，せん断亀裂の進展によるすべり面の形性時にはすべり面上の土塊の応答加速度はピーク加速度より低下している



すべり面の形性過程

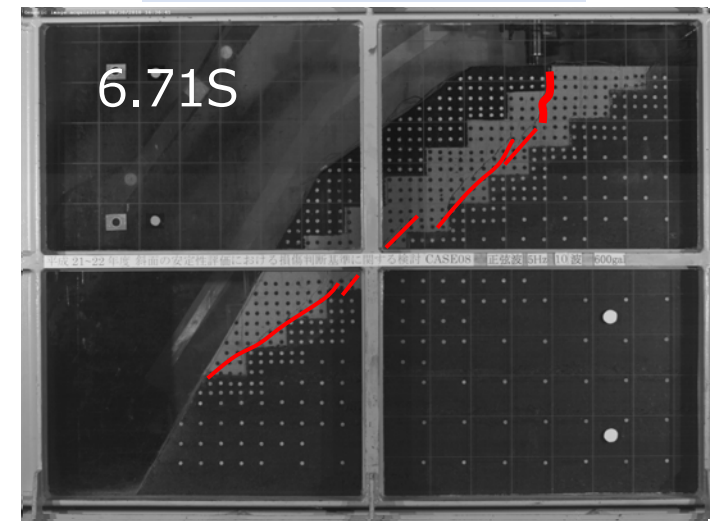
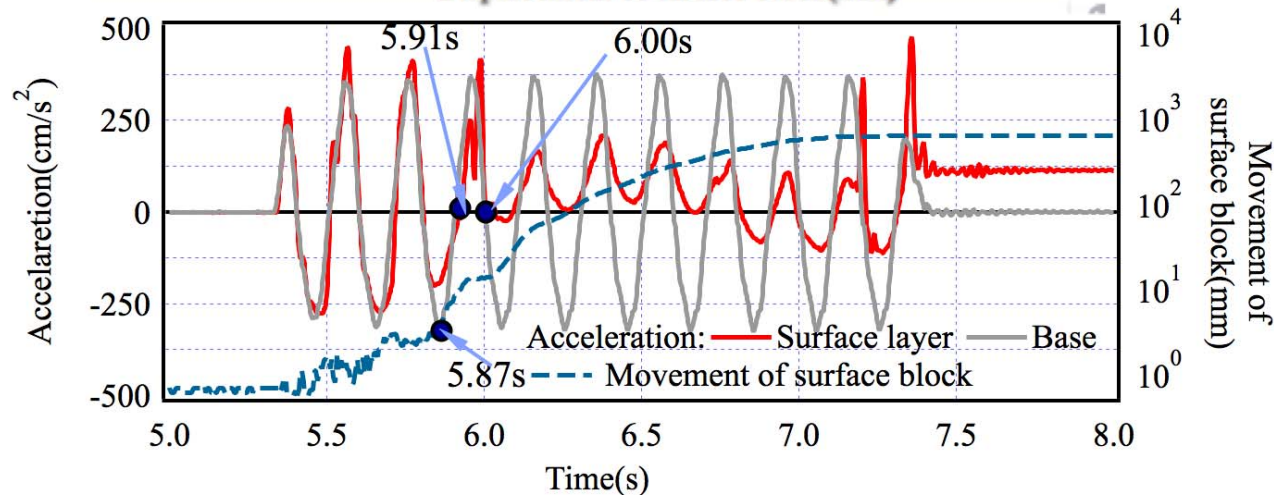
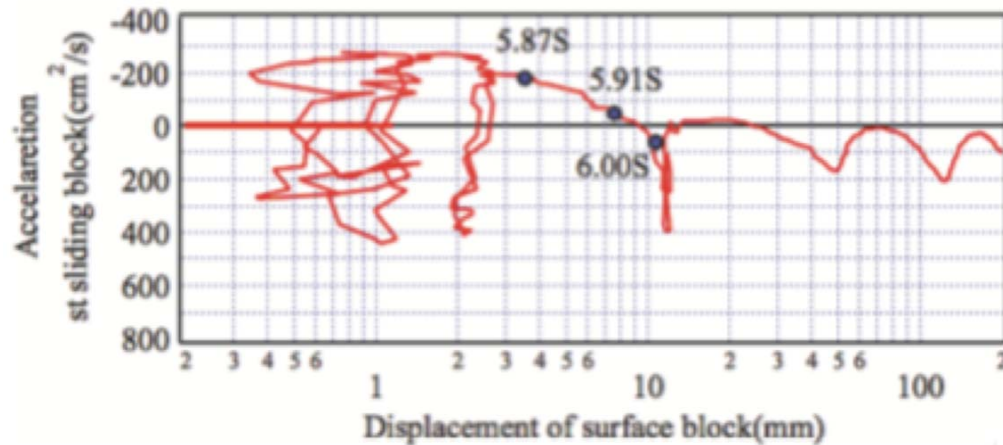


写真. 弱層内の亀裂の発達過程

図. すべり土塊の移動変位，すべり土塊と底面位置における加速度の時刻歴

すべり面の形成過程：滑動型崩壊

すべり土塊への作用加速度と土塊の変位



斜面の変形が進行し，せん断亀裂の進展によるすべり面の形性時にはすべり面上の土塊の応答加速度はピーク加速度から0に低下している

すべり面の形性過程

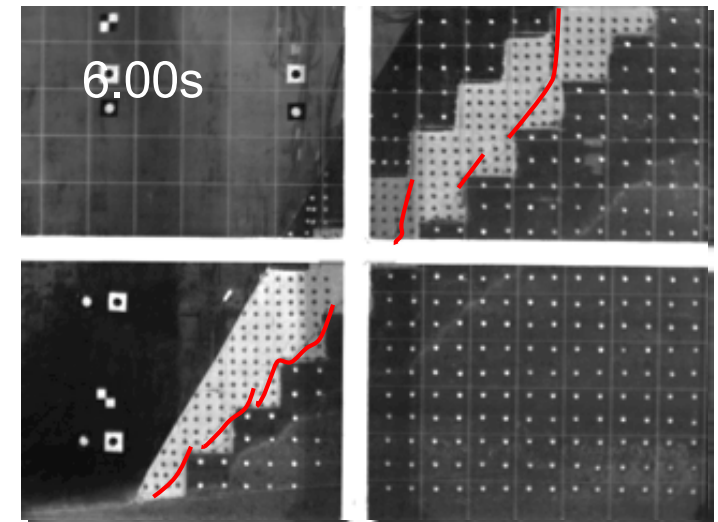


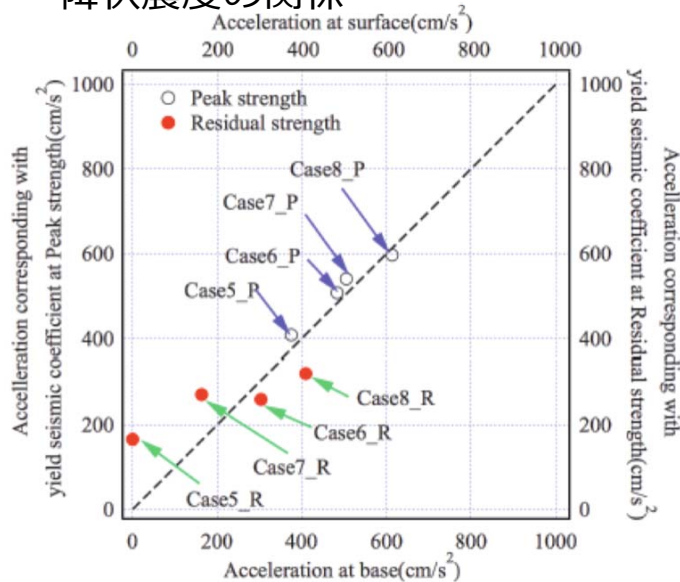
図.すべり土塊の移動変位,すべり土塊と底面位置における加速度の時刻歴

写真.弱層内の亀裂の発達過程

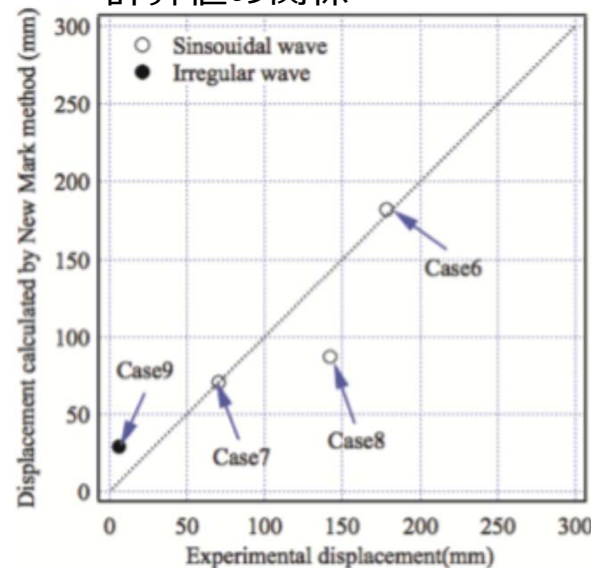
Newmark法の適用性：

- すべり面を形成する際の作用加速度と安定解析にてすべり安全率1.0を与える降伏震度が概ね対応している。降伏震度相当の作用に達したのち、変形の増大、亀裂の発達の後、すべり面の形成に至る。
- 作用や地盤特性の不確定性により、残留変位量にばらつきはあるものの、一定の範囲での評価は可能である。その原理とすべり面の発達過程が異なるため残留変位の増加過程の評価は難しい
- 滑動型破壊の判定への適用については、弱層の勾配によらず破壊形態が異なるなど、地盤作用や地盤物性の不確実性の影響もあり、困難である。必要条件としてのすべり安全率1.0については確認

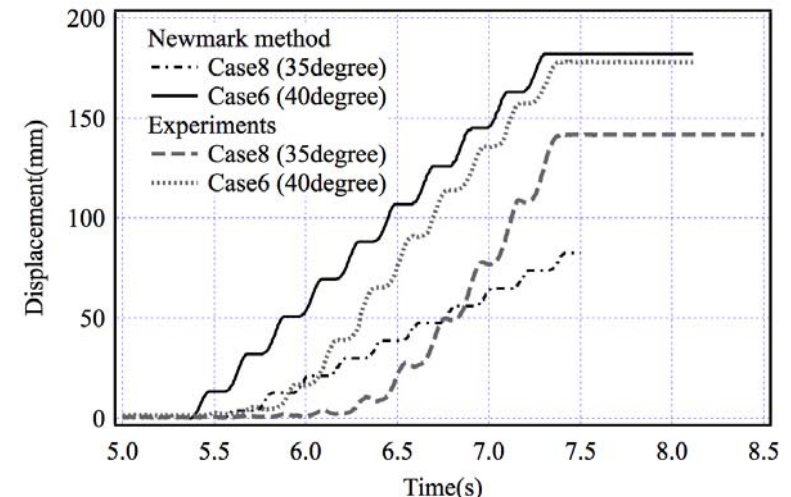
すべり面形成時の作用加速度と降伏震度の関係



土塊の残留変位の実験値と計算値の関係



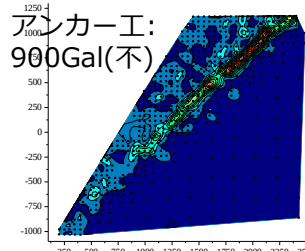
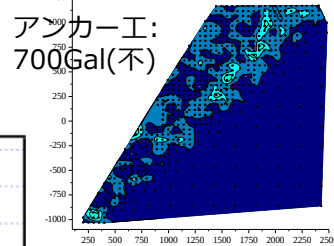
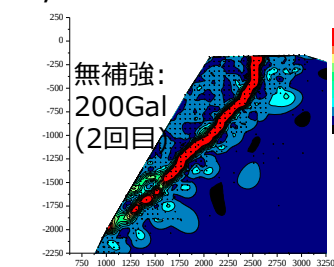
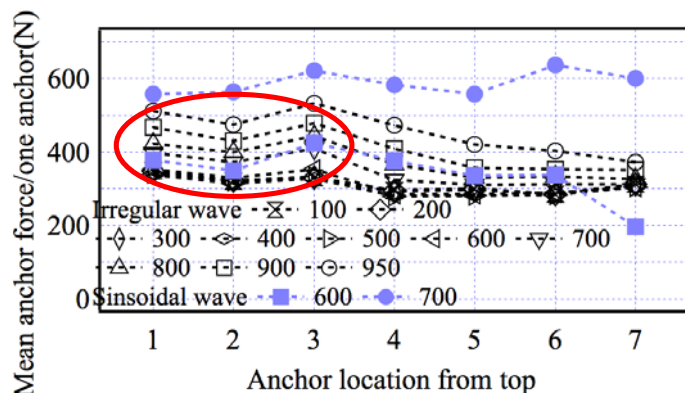
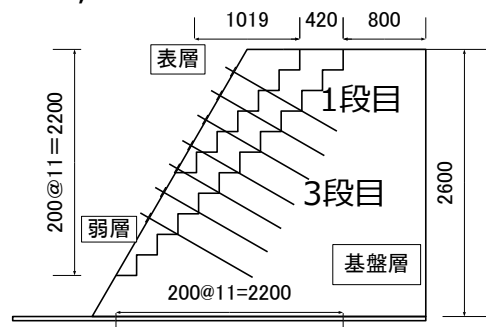
土塊の残留変位の時間変化に対する実験と計算値の関係



中村晋, 佐名川太亮, 阿部慶太, 渡辺健治, 篠田昌弘, 河井正, 1G場での振動実験に基づく斜面模型の崩壊挙動の分析とNewmark法の適用性, 土木学会論文集C(地圏工学)(75巻2号), 167-183, 2019.5.

対策工(アンカー工)の効果の確認と設計(中型模型の例)

■**崩壊機構**：離散的なせん断亀裂が発生し、それが連なり、すべり面が形成される。その過程でアンカー張力の緊張力が低下し、動的な応答が増大し、アンカー工の耐力に達し、崩壊が生じる。



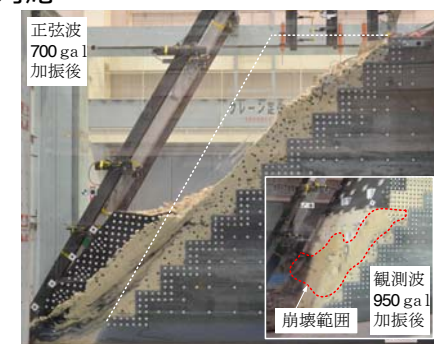
無補強斜面：降伏震度0.15,実験による崩壊時の正弦波換算震度0.134(最大加速度200Gal)とほぼ同じ



■**補強効果**：

- **締め付け効果**：動的状態においては初期緊張力に依存。表層の移動によりアンカーに発現される動的なアンカー張力は地盤の抵抗力の増加をもたらしていない。
- **引き止め効果**：均質な斜面，弱層を有する斜面に対して，動的状態においても効果を有している

補強斜面：降伏震度0.7，実験は不規則波950Gal後の正弦波700Galと対応



1. 中村晋, 中島進, 阿部慶太, 渡邊健治, 篠田昌弘, アンカー工により補強された斜面模型の振動実験による補強効果の検証, 土木学会論文集C(地圏工学)(76巻1号), 76-92, 2017.2.
2. 中島進, 長尾洋太, 成田 浩明, 佐名川 太亮, 阿部 慶太, 渡辺 健治, 篠田 昌弘, 中村晋, グラウンドアンカーの補強効果に着目した急勾配斜面の大型振動台実験とNewmark 法による検証解析, 土木学会論文集C(地圏工学)(74巻1号), 1-19, 2018.2
3. 浅野 翔也, 成田 浩明, 中島 進, 篠田 昌弘, 中村晋, グラウンドアンカーの抵抗・破壊メカニズムを考慮した斜面の地震時残留変位量評価法の提案, 土木学会論文集C(地圏工学)(74巻4号), 439-458, 2018.10. ⇒ 土木学会論文賞

斜面崩壊後の土塊，岩塊の挙動が施設に及ぼす影響の評価

■崩壊後の滑落挙動の確認実験とシミュレーション技術

➤土砂/岩塊の滑落挙動のシミュレーションと到達距離や堆積量の評価

- 土砂や砂礫の挙動に対してMPM，岩盤崩壊による岩塊の挙動に対して質点解析やDEMの有効性を確認

■衝突挙動の確認実験と衝撃作用のモデル化

➤実験による土砂・岩塊の衝突/衝撃力の評価

- 衝撃作用の運動量に基づくモデル化は応答解析が必要な対象に対して有益

■リスク評価 ⇒ 日本原子力学会の地震PRA標準に反映

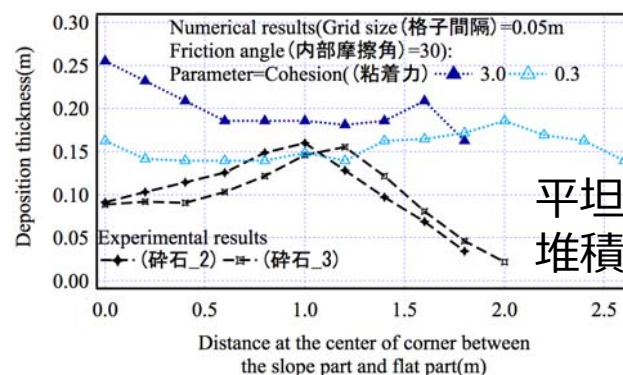
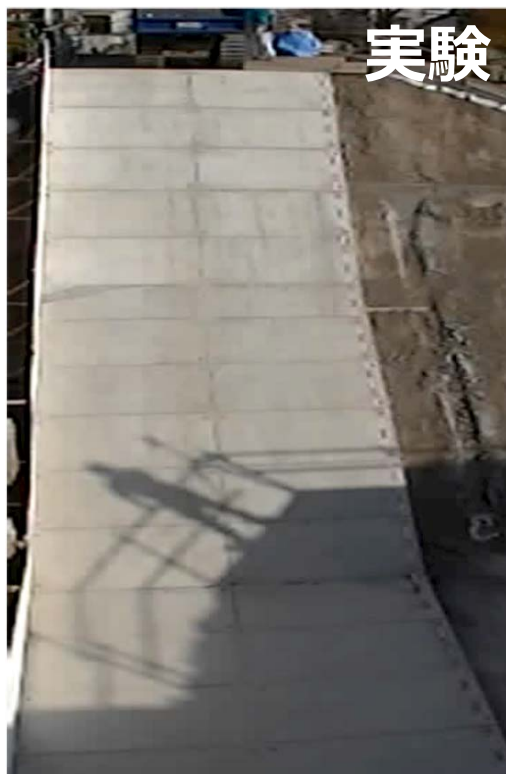
➤地震による斜面の安定限界に基づく条件付き確率として，崩壊土砂/岩塊の到達限界，損傷限界を求める．

- RC壁などの衝撃作用による押し抜きせん断耐力の評価は高度化が必要

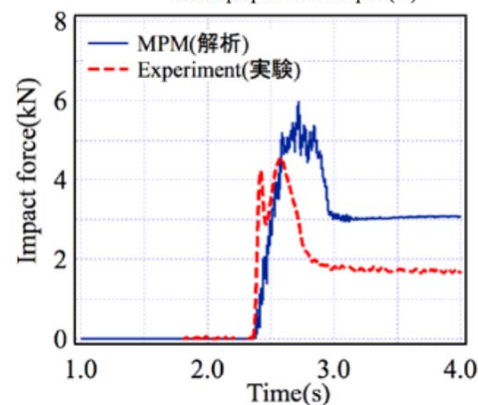
➤道路土工構造物技術基準の制定に対して有益な技術：その基準にある切り土斜面に対する崩壊土砂の到達限界等の設計上の取り扱いとして，直接それらを求める場合には不確定性への配慮が重要であり，現時点で確率論的な評価とそれに基づく意思決定が必要

1. 中村晋，阿部慶太，渡辺健治，中島進， 実験による崩壊土の流下挙動と衝撃作用の分析およびMPMによる再現解析，土木学会論文集C(地圏工学) (74巻3号)， 259-274， 2018.7.
2. Susumu Nakajima, Keita Abe, Masahiro Shinoda, Susumu Nakamura, Hidetaka Nakamura, Kazunori Chigira, Dynamic centrifuge model tests and material point method analysis of the impact force of a sliding soil mass caused by earthquake-induced slope failure, Soils and Foundations, Vol.59, No.6, pp.1813-1829, 2019.12.
3. Susumu Nakajima, Keita Abe, Masahiro Shinoda, Susumu Nakamura, Hidetaka Nakamura, Experimental study on impact force due to collision of rockfall and sliding soil mass caused by seismic slope failure, Landslides, 2020.7.

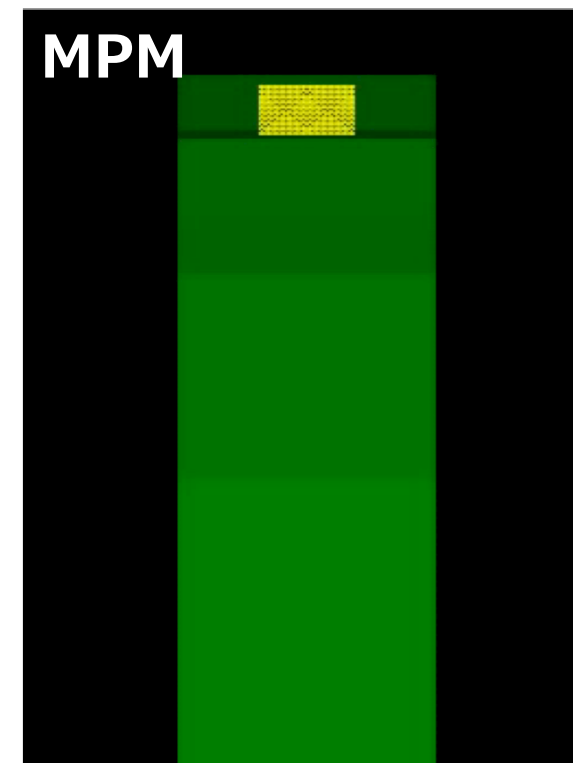
崩壊後の滑落挙動の実験とシミュレーション(MPM)の比較



平坦部における
堆積高さの比較



衝撃力の比較
(碎石:1m³)



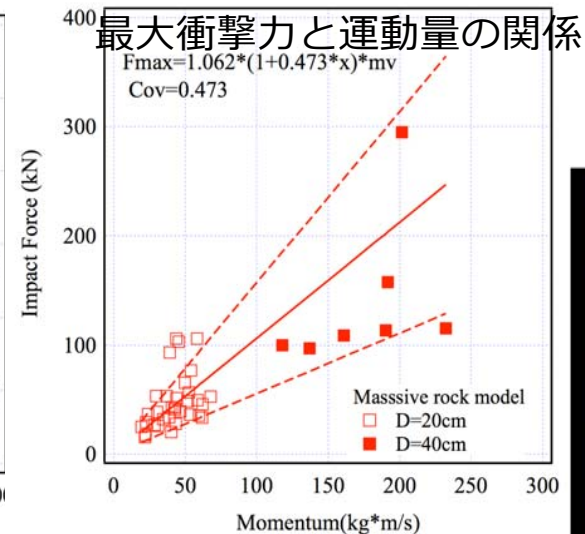
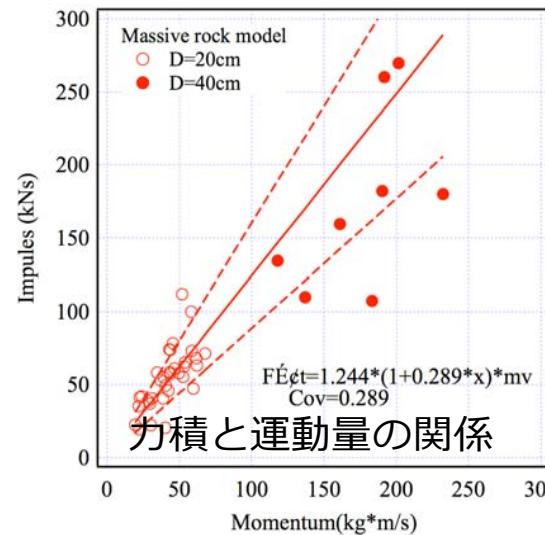
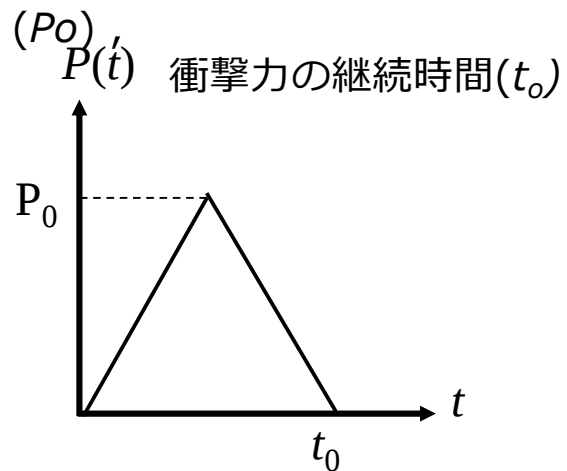
衝突挙動の確認実験と衝撃作用のモデル化：岩塊の衝撃作用

■衝撃作用のモデル化

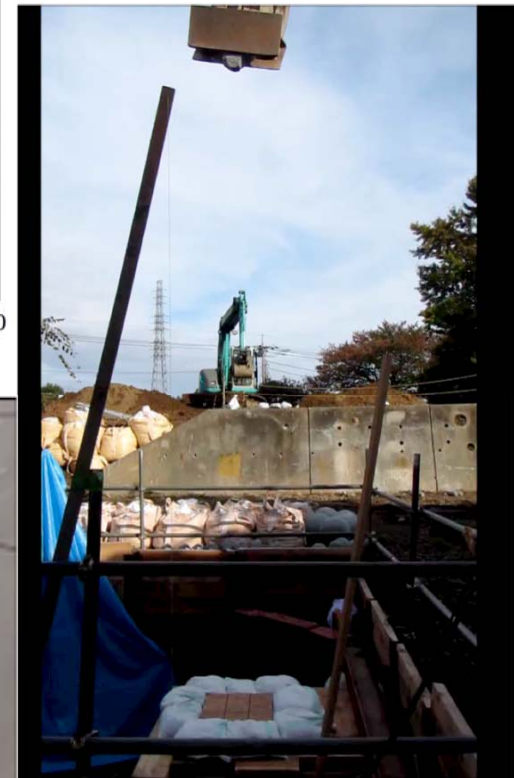
- 衝撃力を時間変化にモデル化
- パラメータを正規分布としてモデル化

➤時間関数モデル:

- 時間関数：2等辺三角形
- パラメータ：最大衝撃力



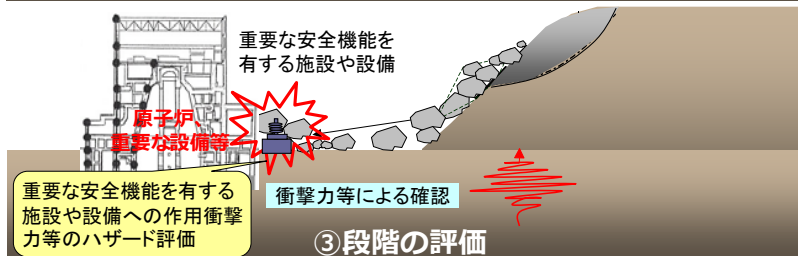
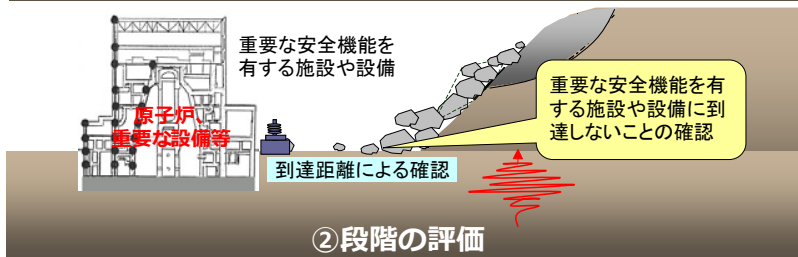
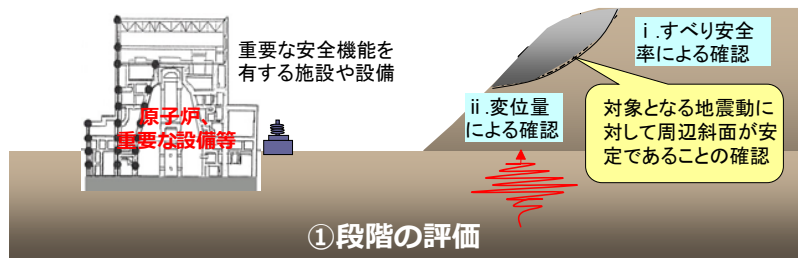
岩塊模型の斜面滑落実験



岩塊模型の自由落下実験

限界状態に応じたフラジリティ曲線の評価の基本方針

動的応答から崩壊，滑落挙動まで一貫した解析に基づくことが好ましいが，現行の評価体系を拡張し，限界状態毎に評価する。



■ **安定限界**(間接的な機能喪失限界)：有限要素法や粒子法などによる動的解析による崩壊領域と安定性の評価(ex. すべり安全率が1.0となる状態)

➤ **斜面の崩壊確率** = $P(E_1)$

- 安定限界のフラジリティ曲線：地震動強さと崩壊発生確率の関係
- 斜面の崩壊確率：地震ハザードと安定限界のフラジリティ曲線との合積

■ **到達限界**：設定した崩壊領域内の土塊や岩塊が自重崩壊するとして、質点解析，DEM，粒子法などによる流下・堆積挙動解析により評価

➤ **到達確率**： $P(E_2) = P(E_2|E_1^*) * P(E_1^*)$

- 条件付き到達確率 $P(E_2|E_1^*)$ ：到達ハザード(到達速度と条件付き累積到達確率の関係)より崩壊領域毎に求める(at ex 到達速度=0m/s).

■ **損傷限界**：設定した崩壊領域より崩壊した土塊，岩塊が施設に衝突することによる施設の損傷を衝突解析などにより評価

➤ **損傷確率** $P(E_3) = P(E_3|E_1^*) * P(E_1^*)$

- 条件付き損傷確率 $P(E_3|E_1^*)$ ：衝突解析より得られた崩壊により生じる条件付き損傷確率と到達岩塊などの運動量との関係と崩壊領域応じた衝突ハザード(到達時の運動量と条件付き累積到達確率の関係)より求める。

適用事例[ある施設の壁(厚さ20cm)への衝突を想定]： 地震動ハザード曲線，各限界状態のフラジリティ曲線と発生確率の試算

- 到達限界の評価に際して，**到達速度が0m/sを到達限界**としたため斜面の崩壊と到達に関するフラジリティ曲線，それぞれの発生確率は同一となった。
- 損傷限界のフラジリティ曲線は，安定限界，到達限界に対するAmと100Gal程度異なる。
- 安定限界，到達限界の発生確率に対して，**損傷限界の発生確率は約1/300と小さな値となっている。**

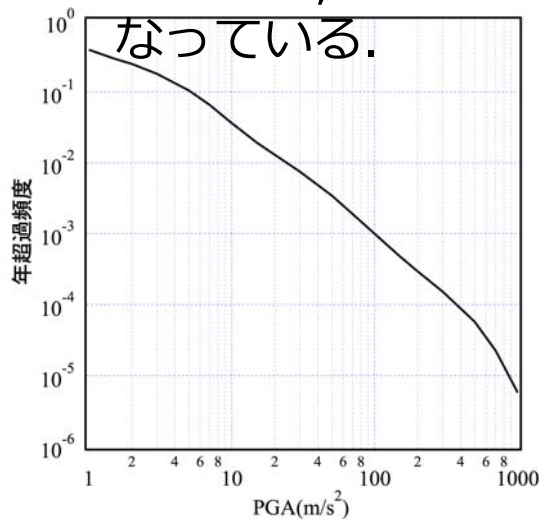


図 地震ハザード曲線

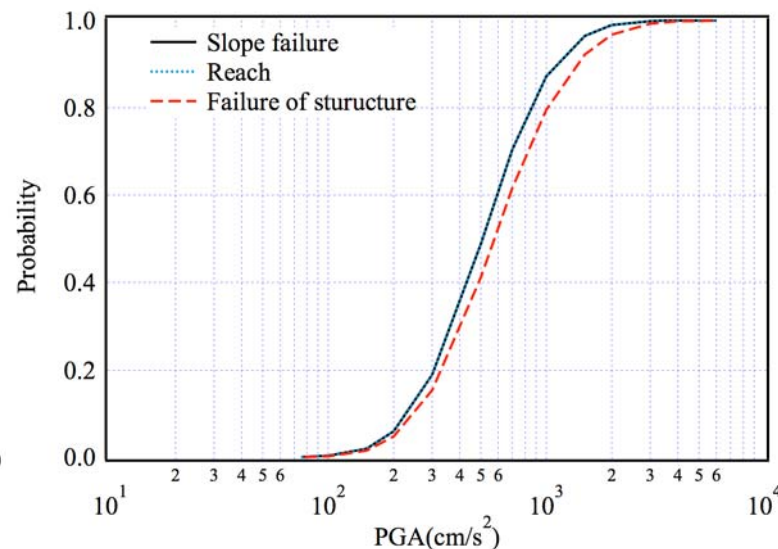


図 各限界状態のフラジリティ曲線

表 各限界状態の発生確率の比較

限界状態	発生確率
損傷限界	4.6×10^{-5}
到達限界	1.4×10^{-2}
安定限界	1.4×10^{-2}

Susumu Nakamura, Ikumasa Yoshida and Masuhiro Beppu, Approach to Assess Influence of Earthquake-Induced Slope Collapse on Nuclear Power Plant Facilities, Journal of Earthquake and Tsunami, 1841011-1-1841011-20, 2018.8.

原子力発電所に対する地震を起因とした確率論的リスク評価に関する実施基準：2024（日本原子力学会標準）

■ 8.2.3 損傷モード及び部位の抽出

- **c) 地盤** 地震動による敷地地盤の不安定化、または沈下などの変状が施設の機能喪失に及ぼす間接的び直接的な影響に関する地盤状態のうち、評価対象地盤に応じた適切な地盤状態に対する施設の損傷モード及び部位を抽出する。間接的び直接的影響に関する地盤状態の例を以下に示す。
- **間接的な影響に関する地盤状態の例**：周辺斜面の崩壊が生じる状態、基礎に液状化が生じる状態
- **直接的な影響に関する地盤状態の例**：崩壊土塊が原子炉建屋や屋外の重要機器や設備に到達する状態、対象施設に堆積する状態、施設に到達した崩壊土塊の衝撃作用により損傷が生じる状態、地盤の沈下や水平移動により地下埋設設備の損傷や建屋間相対変位を生じさせる状態

■ 8.2.4 損傷評価の指標の選定

- **3) 地盤** 対象とする地盤に応じ、**3.1)**から**3.5)**に示した損傷評価のための指標を適切に選定する。
- **3.1) 基礎地盤の不安定化に係わる損傷評価指標**は、地盤の安定性にかかるすべり安全率（すべり面の抵抗力／作用せん断力）、施設の支持力、又は地盤の変形に伴う基礎底面の沈下量、傾斜角、水平変位量などを用いる。津波防護施設の基礎地盤に関する損傷評価指標は、施設転倒の安全率及び支持力などを用いる。
- **3.2) 周辺斜面の不安定化に係わる損傷評価指標**は、**斜面の安定性にかかるすべり安全率**（すべり面の抵抗力／作用せん断力）、又は斜面内の**不安定化した土砂、土塊・岩塊の流下による到達位置、堆積量、さらに施設への衝突による衝撃力、衝撃作用**などを用いる。
- **3.3) シビアアクシデント対策設備及び機器に影響を及ぼす地盤の損傷評価指標**としては、地盤の支持性能にかかる支持力、施設の安定性並びに機能にかかる**施設及び機器下面の沈下量、傾斜角、水平変位量**などを用いる。**搬入路**に対しては、車両の走行性にかかる**路面を支持する地盤の沈下量及び段差、周辺斜面の崩壊による路面上の土塊・岩塊の堆積量**などを用いる。
- **3.4) 津波防護施設、またはシビアアクシデント対策設備および機器などの基礎の沈下などの変状のうち液状化に起因した変状に係わる損傷評価指標**には、対象施設や設備の安全並びに機能にかかる施設や設備の沈下量、傾斜角又は水平移動量などを用いる。その沈下量は、地震中に発生する地盤の最大せん断ひずみ、累加せん断ひずみ、又は地盤の過剰間隙水圧の発生に係わる正規化累積損失エネルギーを用いて評価してもよい。
- **3.5) 地震起因の地殻変動に起因した地盤変状に対する損傷評価指標**は、施設及び機器位置における地盤の傾斜角、建屋間の相対傾斜角などを用いる。

■ 8.4.2 現実的耐力の評価法

• 8.4.2.3 地盤

- A) **基礎地盤の現実的耐力** ***
- B) **周辺斜面の現実的耐力** ***
- C) **シビアアクシデント対策設備及び搬入路** ***
- D) **地殻変動に起因した地盤変状** ***

■ 8.5 現実的応答

- 基礎地盤、周辺斜面及びシビアアクシデント対策設備の搬入路の損傷評価指標（①から④）及び施設への作用（⑤）は下記に示すものが挙げられる。
- ① 基礎地盤及び周辺斜面の力の釣り合いに基づくすべり安全率、② 土砂、土塊、岩塊の到達位置、③ 土砂、土塊、岩塊の堆積量、④ 基礎地盤の沈下、または水平移動量、⑤ 作用として土塊・岩塊の衝撃力など
- **損傷評価指標①**については、損傷評価のための指標を適切に算定することができ、**地盤の形状及び非線形性、不確実さ要因などを適切にモデル化できる応答解析手法を用いて現実的応答**を評価する。なお、スクリーニング解析などの目的で簡易評価する場合には、地盤安定性解析に用いられるすべり面法などの慣用法を用いてもよい。
- **損傷評価指標②、③**については、**地盤の不安定化から崩壊後の応答を連続して評価できる応答解析法、または、不安定化後に対する挙動を評価できる応答解析法のいずれを用いて現実的応答を評価してもよい。**
- **損傷評価指標④**については、**地盤の非線形性及び有効応力変化が評価できる応答解析法、又は地盤の非線形性が考慮できる全応力場での応答解析法のいずれを用いて現実的応答**を評価してもよい。後者の手法では、応答解析で得られたせん断応力比に基づく液状化強度、または正規化累積損失エネルギーより評価式を用いて評価する。
- **損傷評価指標⑤**については、損傷評価指標②の現実的応答評価で得られた**衝撃力、また衝撃作用に対する対象施設の損傷を評価できる解析手法**により現実的応答を評価する。
- これら応答解析の適用事例をに示す。なお、新たな解析法を用いる場合には、実験データに対して十分な検証が必要である。

海底斜面の安定性評価手法の妥当性確認

■海底斜面の崩壊に起因した津波のリスク評価への修正フェレニウス法の適用性の確認⇒**遠心場での静的・動的実験/解析により確認**

- 降伏震度を与えるすべり面形状：実験より安定解析法による面位置が若干深いが、同程度のすべり面を与える
- すべり面が形成される降伏震度：ばらつきはあるものの実験結果と対応
- **降伏震度等の不確かさの定量評価**

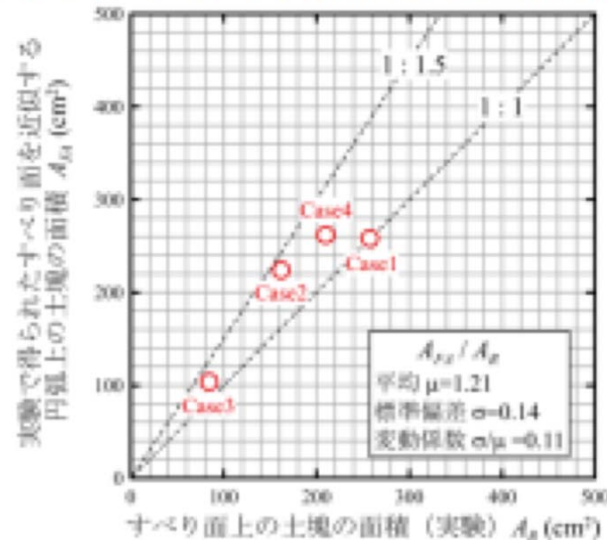
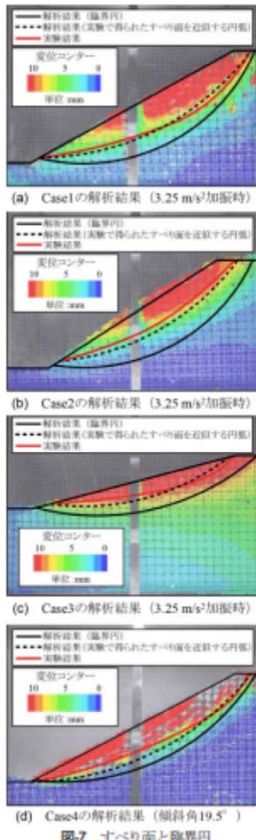


図8 実験と解析のすべり面上の土塊の面積の比較

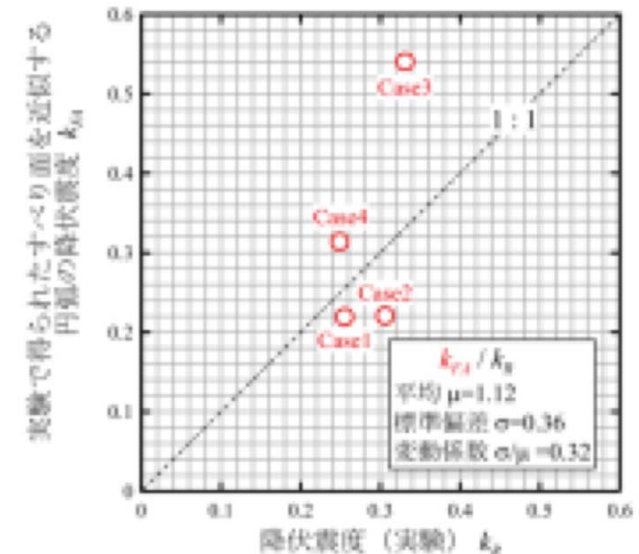


図10 実験と解析の降伏震度の比較

- 1.仙頭紀明, 海野寿康, 中村晋, 海底地盤を模擬した斜面モデルの作成およびその安定性評価, 土木学会論文集B3(海洋開発)(73巻2号), I-306-I-311, 2017.8.
- 2.齋藤和寿, 仙頭紀明, 中村晋, 動的な遠心載荷実験に基づく海底斜面の地震時安定性評価, 土木学会論文集B3 (海洋開発) (76巻2号), I_1043-I_1048, 2020.9.
- 3.中村晋, 仙頭紀明, 齋藤和寿, 海底斜面の地震時における安定解析の不確かさに関する一考察, 日本地震工学会論文集, 25巻, 4号, pp.51-61, 2025.

最後に:不確実さへに向き合い 地震に備える

1. 想定外を正しく認識し, 危機耐性に備える
2. 様々なレベルの数値解析コードの妥当性確認の適正化
3. リスク情報を耐震設計, 維持管理や防災に活用
4. 地盤構造に応じた工学的基盤の設定に基づく地震動推定

想定外を正しく認識し，危機耐性に備える：経緯

■2011年東北地方太平洋沖地震津波による被害や原子力発電所の事故などの被害

⇒「**想定外**」への対応について様々な議論が行われ，「**危機耐性**」という減災なども包括する安全性を拡大された性能が提案（**原子力発電所の耐震・耐津波性能のあるべき姿に関する提言，土木学会，2013**）

- ・ **定義**：「安全性」が損なわれるということは構造物に重大な損傷が発生することを意味するが，そのような場合でも緊急手段の実行を可能とし，原子力発電所のシステム全体として危機的な状況に至る可能性を十分に小さくする性能を定義し，導入することを提案する.この性能の名称は，「危機耐性(anti-catastrophe)」とする.

■地震工学委員会/耐震規準小委員会にて定義などの検討が行われた.

➤各社会基盤施設の性能評価へ反映

- ・ 土木構造物共通示方書，土木学会，2016，2023
- ・ 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，鉄道総合技術研究所，丸善出版，2012
- ・ 日本水道協会:水道施設耐震工法指針・解説 2022 年版，2022. 6
- ・ (港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，2018.5)

想定外を正しく認識し，危機耐性に備える

■「2023年制定 土木構造物共通示方書」

➤ **危機耐性**(用語の定義)：想定外の事象が発生し，それにより社会に及ぼす影響が破局的な状態に至る可能性が十分に小さいという状態に対応する性能

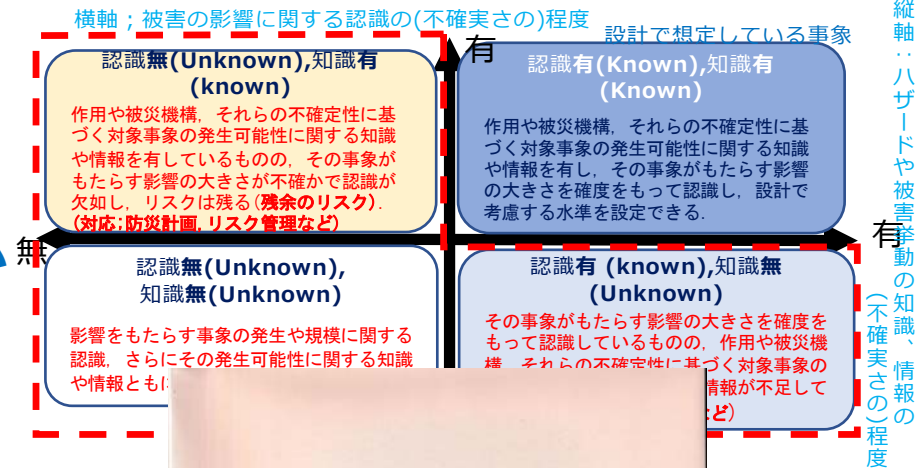
➤ **4.7 想定外の事象と危機耐性**：作用などの**不確実さ**から要求性能を満足できなくなる**想定外の事象が発生**に対して，構造物には**頑健性**や**冗長性**を高める対応。社会的に重要度の高い構造物には，**構造計画時に危機耐性への対応を実施**，性能評価においては，**危機耐性への対応の効果を定量的に評価**することが望ましい。

➤ **設計で想定している事象**：(第一象限：known-known)

➤ **危機耐性で対象となる想定外の事象**：認識は有るが知識が十分ではない**第4象限(known-unknown)**

⇒例えば，主に低頻度で高影響をもたらす偶発作用に起因した事象

■ **7.5 想定外の事象に対する危機耐性への対応**：社会に及ぼす影響が**破局的となるリスクを低減(シナリオの設定，事後対応についても事前に，リスク評価手法を活用)**



2023年制定
土木構造物共通示方書

- 過剰な安全要求とならないように，総合的に評価する。
- 現状の知識，経験レベルで仮想が可能な範囲のものであることに留意
- 不断の点検や見直しを行い，安全性の向上に努めること。

様々なレベルの数値解析コードの妥当性確認の適正化

- 1995年以降、性能評価へ非線形地震応答解析が活用されている
 - 非線形地震応答解析結果の応答値としての性能評価における要求が必ずしも適切に確認されていない
- ⇒ 入力情報や解析結果に含まれる**様々な不確実さ**を認識し、対応する考え方が必要
- 2016年～現在：「地盤・構造物の非線形地震応答解析法の妥当性確認/検証方法の体系化に関する研究小委員会(2016～2021)」，地震防災技術普及小委員会(2021～現在)による講習および**ガイドライン第2版の作成中**(和文版は近日、地震工学委員会HPで公開予定；その後英文化し公開予定)
- **妥当性確認における再現性(正確度)や予測性能(信憑性)への認識と定量化**
 - Best estimate modelを作成できるマニュアルの整備と更新（地盤や構造物の適切なモデル化に必要な知見も含む）
 - 関連する実験データ/文献集の収集と開示

リスク情報を耐震設計，維持管理や防災に活用

■地震被災情報の収集・活用

■不確実さの定量化

- 不確実さ、特に認識論的不確実さの定量化：EuroではHazus Project(米国)の被災度曲線の不確実さを(偶然的不確実さ+認識論的不確実さ)として活用
- 対象構造物に応じた被災度曲線/フラジリティ曲線の高度化

■より現実的な耐力などの限界値の評価が必要

- 近年の災害を踏まえ，作用が見直されているにもかかわらず，限界値の評価は保守的に行われている場合が多く，現存している実耐力などを踏まえた評価が必要

不確実さの定量化

専門家を活用した方法(SSHAC)による耐力(面外せん断耐力)に関する不確実さ評価例：ロジックツリー,フラジリティ,参考文献3

すべり安全率評価(修正フェレニウス法)に関する不確実さ：実験ですべりが発生した時点の降伏震度に対応するすべり安全率,参考文献2

PS検層によるせん断波速度推定の不確実さ：地震記録に基づく同定値との比較, 参考文献1

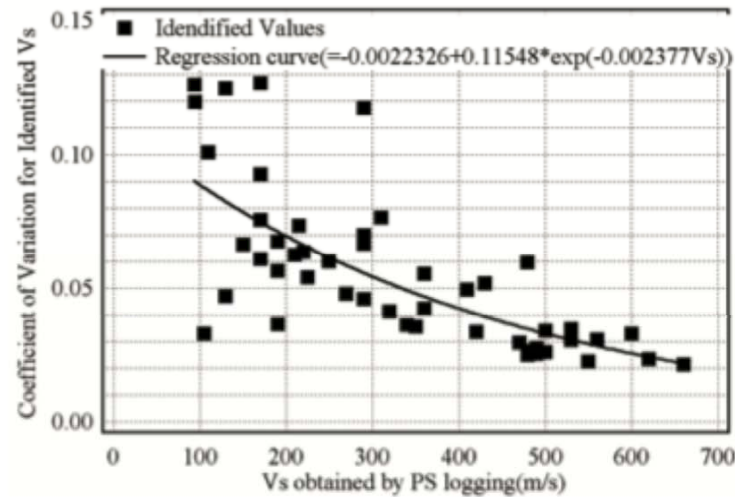
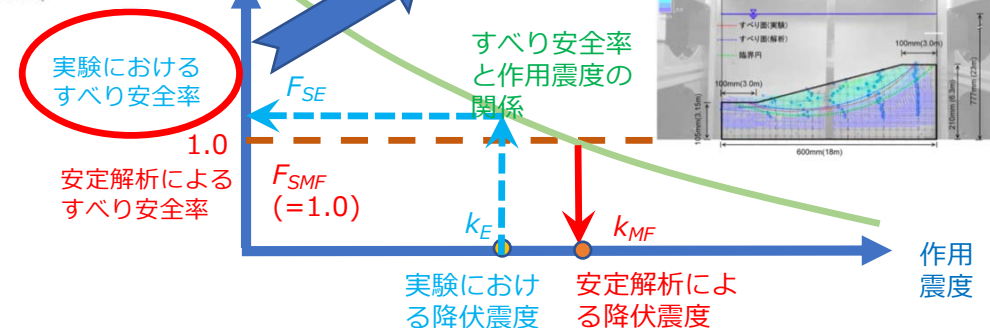
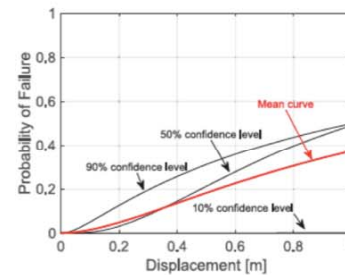


図-1 PS 検層によるせん断波速度と同定されたせん断波速度の変動係数の関係(参考文献 5)の図-12を使用)

Failure criteria	Capacity model		
	Reference test data to estimate mean & CoV	Mean	CoV
Local failure of base mat along fault line	Column	W=0.6 1.38xMILT	0.17
		W=0.4 1.45xAJ	0.25
		W=0.0 3.77xACI	0.50
	Base mat	W=0.55 1.15xMILT	0.08
		W=0.35 1.59xAJ	0.20
		W=0.1 3.15xACI	0.19

MILT: Shear Strength Criterion proposed by MILT (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, 2015)
AJ: Shear Strength Criterion proposed by AJ (Architectural Institute of Japan, 1997)
ACI: Shear Strength Criterion proposed by ACI (American Concrete Institute, 2019)

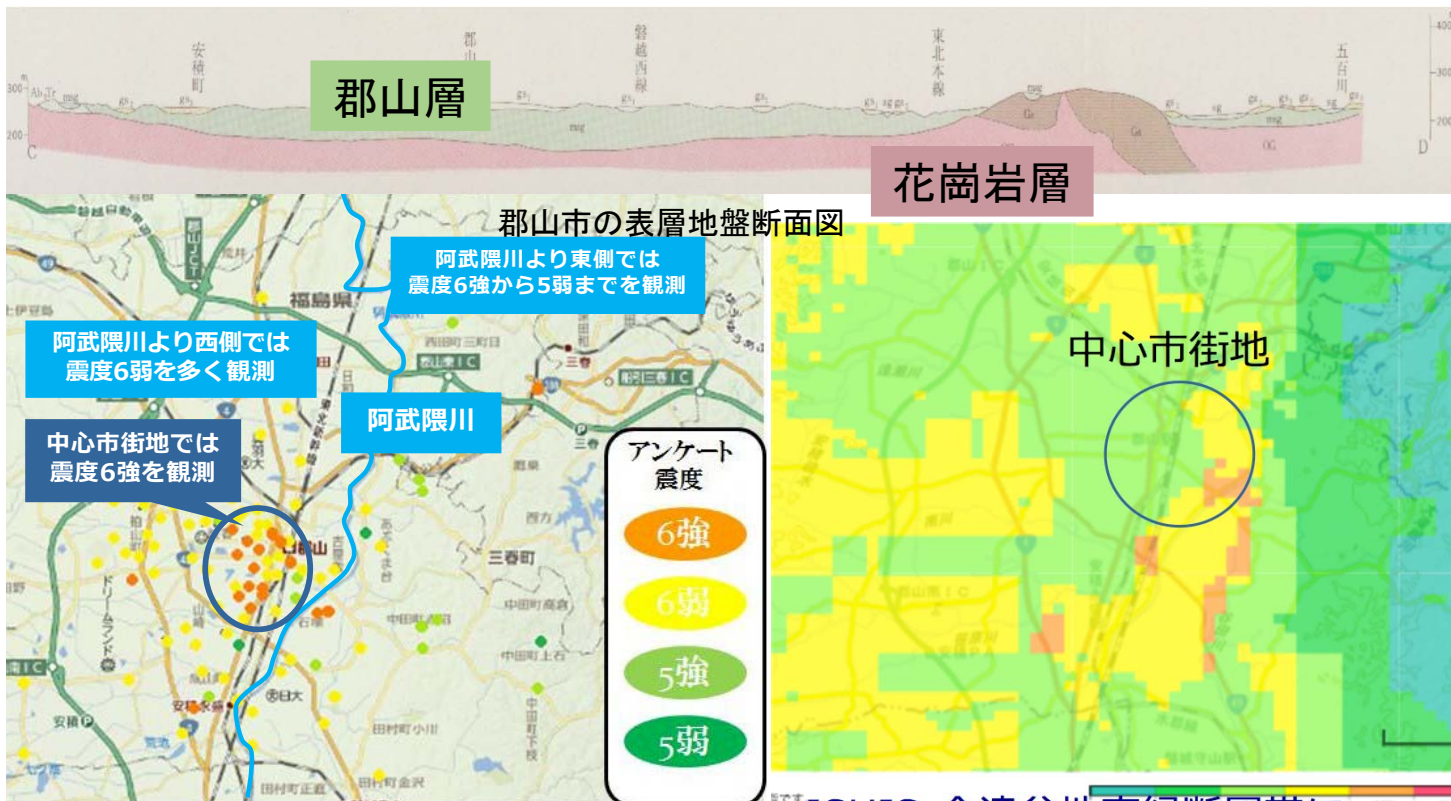


1. 中村晋, 澤田純男, 松本敏克, 地盤物性の不均質性な空間的モデル化次元に応じた非線形応答性状の比較, 土木学会論文集 C 部門, Vol.63, No.3, pp.711-724, 2007
2. 中村晋, 仙頭紀明, 齋藤和寿, 海底斜面の地震時における安定解析の不確かさに関する一考察, 日本地震工学会論文集, 25巻, 4号, pp.51-61, 2025.
3. Tatsuya Itoi, Susumu Nakamura, Ryusuke Haraguchi, Toshiaki Sakai, Katsumi Ebisawa, Yoshinori Mihara, Yuji Nikaido, Developing a fragility assessment procedure for fault displacement based on SSHAC level 2 process, Nuclear Engineering and Design, 444, 114402, 2025

地盤構造に応じた工学的基盤の設定に基づく地震動推定

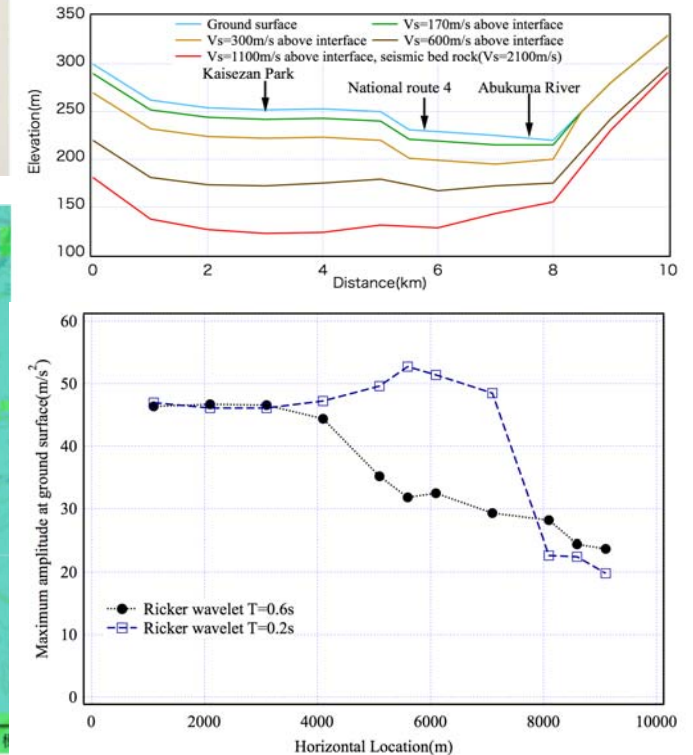
郡山市内の東北地方太平洋沖地震の際の震度空間分布

- J-SHIS：特定震源に対する郡山市の震度分布はアンケート震度と中心市街地の震度が異なっている。
- 郡山市の表層地質は洪積台地なので工学的基盤に対する増幅は大きい。
- 防災に必要な地震動推定において、郡山市の様に工学的基盤が浅く、地震基盤も数百mの地盤構造の影響は反映されていない：**比較的工学的基盤が浅い地域における地震動増幅や地震動推定の見直し。**



アンケート震度調査分布

JSHIS;会津盆地東縁断層帯に対する想定震度分布



郡山市東西断面へのRicker波(周期0.2s, 0.6s)に対する地表面最大応答

ご静聴ありがとうございました。

- 地震で起きたことの分析し，調査/実験などで確認するという現場第一主義の下で調査研究活動を実施してまいりました。
- 先人，先輩から，調査や研究に取り組む姿勢や成果から多くを学び，今日に至っており，改めて耐震工学，地震工学に携われた諸先輩がたに感謝申し上げます。
- ここで示した調査・実験・研究の実施に際して，ご指導，ご支援いただいた多くの研究者，技術者の皆様，また本日示しきれなかった調査・実験・研究にてご指導，ご支援いただいた研究者，技術者の皆様に改めて感謝申し上げます。
- 皆様とともに，地震工学，地盤地震工学がのますます発展し，社会の安全・安心に貢献できることを祈念させていただきます。