

建設技術研究開発助成制度

中間土からなる人工島・護岸構造物の耐震性能評価  
—液状化・揺すり込み変形抑止の地盤強化技術の開発—

研究代表者：浅岡 颯（名古屋大学大学院工学研究科）

1. はじめに（研究・技術開発の背景と目的）

埋立地・海上人工島は、砂でも粘土でもない「中間土」からなり、その耐震性評価には極めて曖昧な部分が多い。来るべき海洋型地震の特性も踏まえて耐震性を再評価し、強化必要箇所の抽出と強化技術の確立が必要となる。本研究開発では、①中間土地盤のモデル化、②砂から細粒分を多く含む土まで「中間土」を連続的に扱える弾塑性構成式の高度化と既存液状化判定手法の抜本的改良、③動・静的荷重のもと非排水・排水・部分排水に対応する有限変形・水～土骨格連成・地盤解析プログラムの実施を踏まえた高度化、④締固め／圧密／薬注による地盤強化と各種排水工の耐震性向上に及ぼす効果の評価、を通じて、中間土からなる人工島・護岸構造物の耐震性再評価、そして液状化・揺すり込み変形抑止の地盤強化技術の開発を行い、より災害に強い人工地盤の創生を目指すことにある。

2. 研究・技術開発の内容と成果（節番号の最初は実施年度を示す。）

1-1) 中間土の弾塑性力学特性と中間土からなる人工地盤のモデル化

砂と粘土の混合土、シルト質砂、盛土材、第三紀泥岩埋立地盤から採取した岩砕集合体など、さまざまな中間土を用いて、室内試験を実施し、構造・過圧密・異方性の三つの発展則を内蔵した弾塑性構成式（SYS Cam-Clay model）<sup>1)</sup>により、中間土の力学挙動を再現することに成功した。そして中間土からなる人工地盤として、泥岩埋立地盤を取り上げ、計算により再現された泥岩岩砕集合体の材料定数を、地盤調査結果をもとに忠実に設定し、人工地盤のモデル化を行い、モデル地盤の土要素の挙動と実際の採取試料の挙動が概ねよく一致することを確認した<sup>2)</sup>。

1-2) 液状化／揺すり込み変形解析のための有限変形・水～土骨格連成地盤解析コードの構築と検証

名大が開発した慣性力対応の水～土骨格連成地盤解析プログラム（All Soils All States All Round Geo-Analysis Integration, GEOASIA）<sup>3),4)</sup>の、3種類の地盤に対するテストランを通じて、プログラムの検証を行った。①均質砂地盤に最大加速度 100gal の減衰振動を約 10 秒間与えると、中密地盤は液状化を示した後圧密沈下（すなわち揺すりこみ沈下）が、層厚の約 5%生じた。一方、密な地盤では液状化が起こらず、その後の圧密沈下も 1/5 以下となった。②1-1)で示した泥岩埋立人工地盤（中間土地盤）についても同様の地震荷重（最大水平加速度 400gal、鉛直加速度 200gal の減衰振動）を与えたところ、液状化後、揺すりこみ沈下を起こした。図 1 に示すように、盛土直下の地盤は地震中に大沈下を示し、その後約 30

年かけて遅れ沈下が生じた。水平部についても液状化後約 20cm の揺すりこみ沈下が生じている。③旧 JH の常磐自動車道において上層に厚い砂層のある自然堆積沖積粘土地盤に対し、盛土載荷により 2 次圧密進行中の地盤を対象に、地震荷重（地震動は、②と同じ）を与えたところ、上層砂地盤が液状化し、盛土荷重を支えきれずに下層粘土層がすべり始め、盛土は大沈下を示した<sup>3)</sup>。

以上のように、代表的な 3 つの地盤の動的大変形解析を通じて、砂から中間土、粘土まで土の種類を問わず、外力条件に応じた液状化の判定が可能であること、そして地震中の液状化から地震後の揺すり込み変形・沈下まで計算が可能であることが検証された。

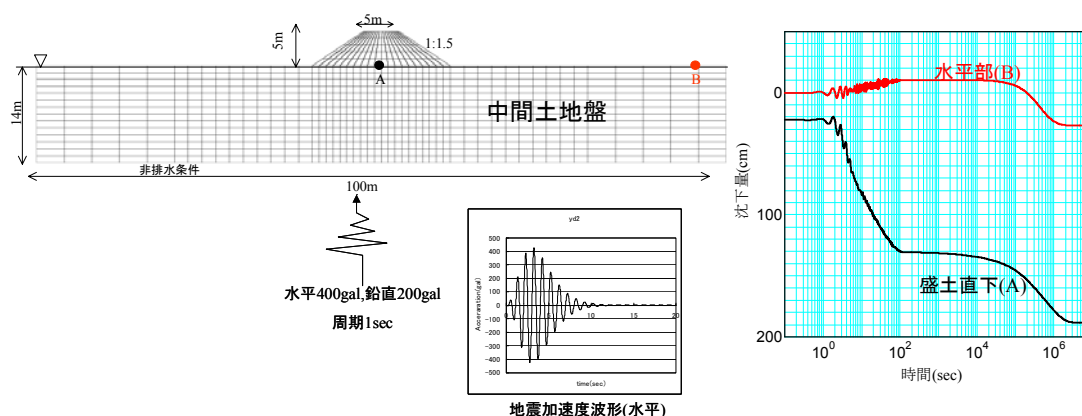


図-1 泥岩埋立地盤の地震応答解析条件と地震後の沈下挙動

### 2-1) 中間土の力学特性把握と GEOASIA の適用 (その 1、土構造物と地盤の連成挙動)

各種室内試験に基づく 2004 年中越地震による崩壊盛土から採取した中間土の室内試験による力学特性の把握と、実際の K-net 小千谷の観測波形をもとに決めた内陸地震波を入力して盛土-地盤連成系の被災形態の解析的検証を行った。この結果、実際の被災形態に類似して、地盤条件（硬さ・傾斜）に応じた地震中／地震後の連成系の変形・破壊挙動（図-2）が得られ、中間土からなる盛土の軟化挙動の把握の重要性等が明らかになった<sup>5)</sup>。

### 2-2) 中間土の力学特性把握と GEOASIA の適用 (その 2、盛土の耐震性評価と対策検討)

三重県国道一号線（国土交通省所管）拡幅工事の仕様・工法等の検討に伴い、現地の比較的細粒分の多い砂（中間土）と粘土の室内試験による力学挙動の把握と、水平堆積互層地盤および盛土のモデル化、さらに想定東南海・東海運動型の海溝型地震波入力時の現存盛土の耐震性評価、盛土嵩上げ・撤去時を含む周辺地盤の影響評価、地震時盛土変形抑止のためのシートパイル工の効果把握等、各種性能照査を実施した<sup>6)</sup>。この結果、当該地点では地震中の周辺地盤への影響が比較的大きいと予想されたことから、主要盛土の全撤去・アーチカルバート工適用等が決定され、シートパイルの周辺地盤影響低減効果（図-3）等が明らかになった。

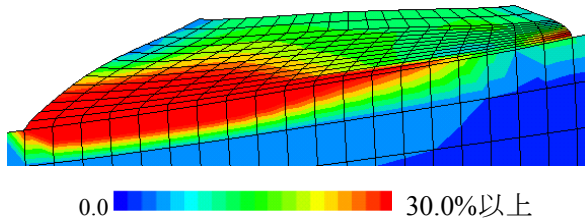


図-2 傾斜地盤上盛土の地震直後のせん断ひずみ  
(地震発生から約7時間後)

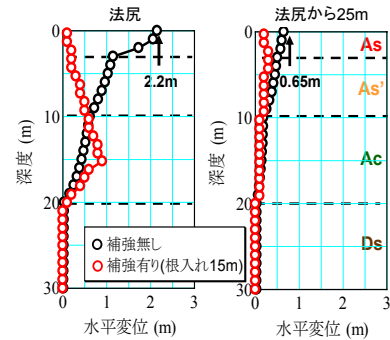


図-3 周辺地盤の変形抑止効果  
(側方変位)

### 2-3) GEOASIA の適用 (その 3、架設構造物の耐震性評価)

橋梁設置時等に用いられる仮設構造物の耐震性評価を行った。既存の土質調査をもとに、細粒分を含んだ中間土を含む砂と粘土の堆積地盤をモデル化し、(海溝型の) 東海地震発生時、地盤上の架設構造物の安定性を評価した。その結果、上部に液状化層がある場合は転倒の危険性が高いこと、架設構造物が転倒する閾値となる高さとの関係があること、さらに設置面積の広い鉄板敷設の架設構造物転倒防止の有効性等が明らかになった。

### 3-1) 盛土材 (中間土) の力学特性把握と GEOASIA の適用 (その 4、傾斜地盤上の土構造物と地盤の連成挙動)

2007 年能登半島地震における傾斜地盤上の崩壊盛土から採取した中間土の不攪乱試料と突き固め試料を用いた各室内試験と SYS Cam-clay model により盛土の弾塑性性状を把握し、実測波形をもとに決めた地震波の入力により盛土-地盤連成系の被災形態を検証した。この結果、地震後に顕著になる盛土崩壊過程 (図-4) が示され、盛土材の一部が ( $p' \sim q$  空間) で地震中に示す限界状態上側での硬化挙動の重要性等が明らかになった<sup>7)</sup>。

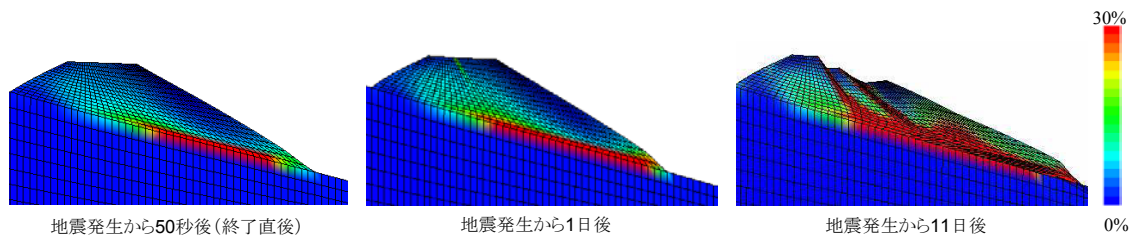


図-4 盛土崩壊過程におけるせん断ひずみ分布

### 3-2) GEOASIA の適用 (その 5、補強盛土構造物の耐震性向上)

想定東南海・東海連動型の海溝型地震波を入力し、盛土に補強材を敷設した場合の耐震性を評価した。この結果、補強盛土は盛土耐震性向上に有効であるが、盛土直下に軟弱な粘土層がある場合はこの粘土を乱し長期沈下に繋がる可能性があることを示した<sup>8)</sup>。

### 3-3) GEOASIA の適用 (その 6、杭基礎を有する重量構造物の耐震性評価)

砂と粘土の互層堆積地盤をモデル化し、羽田シナリオ波を入力して杭基礎を有する重量構造物の耐震性評価を行った。その結果、堅い層まで打設された杭基礎がロッキングを示しつつ、重量構造物の転倒防止に大きく貢献することを示した。(図-5)

### 3-4) GEOASIA の適用 (その 7、人工埋立地盤・護岸構造物の耐震性評価)

想定東海・東南海・南海連動型地震を入力し、伊勢湾沿岸域に位置し浚渫土による人工埋立地盤の耐震性を検討し、弱点箇所(補強・改良の必要箇所)を抽出した。(図-6)

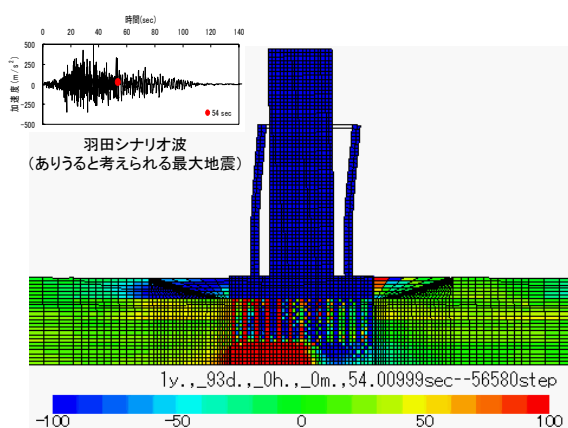


図-5 重量構造物の耐震性 (過剰水圧分布)

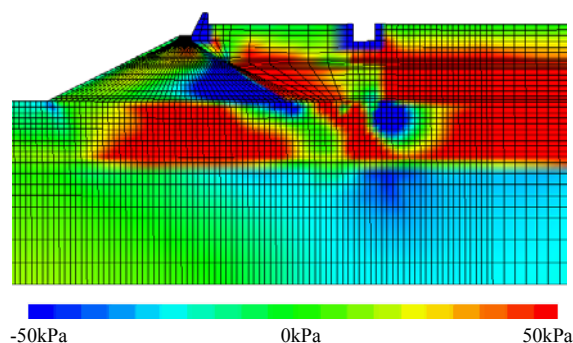


図-6 護岸構造物の耐震性 (過剰水圧分布)

### 3-5) GEOASIA の適用 (その 8、SCP 改良中間土埋立人工地盤の耐震性評価)

サンドコンパクション (SCP) を打設し改良した粉碎泥岩 (中間土) 埋立人工地盤の耐震性評価を行った。この結果、SCP 改良効果は沈下・側方変位の抑制として大きく現れ、これは密な砂杭の塑性膨張硬化による応力集中に起因することを示した (図-7) <sup>9)</sup>。

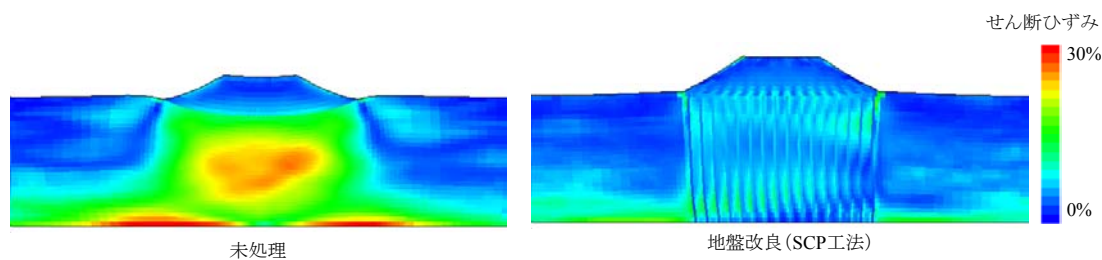


図-7 SCP 打設による耐震性改良効果 (せん断ひずみ分布)

### 3-6) GEOASIA の適用 (その 9、既設構造物下部改良地盤の耐震性評価)

既設構造物下部のシルト分を多く含む中間土地盤に薬液注入を行うと、注入改良が離散的になる傾向が認められる。このような地盤の改良程度の違いによる耐震性効果の違いを系統的に調べた。この結果、既往の実験結果と同様、改良程度の変形抑止効果が得られる

ことを示した。

### 3-7) GEOASIA の適用 (その 10、深層混合処理工法を用いた地盤強化技術の検討)

深層混合処理工法を用いた筒状の改良ブロック壁を離散的に配置し、液状化層の地震中・地震後の変形抑止効果を三次元的に調べた。この結果、ブロック壁内部のみならず、壁間で正の過剰水圧の上昇が抑えられるとともにその消散が早く、離散設置した場合も応分の沈下抑制効果があることを示した (図-8)

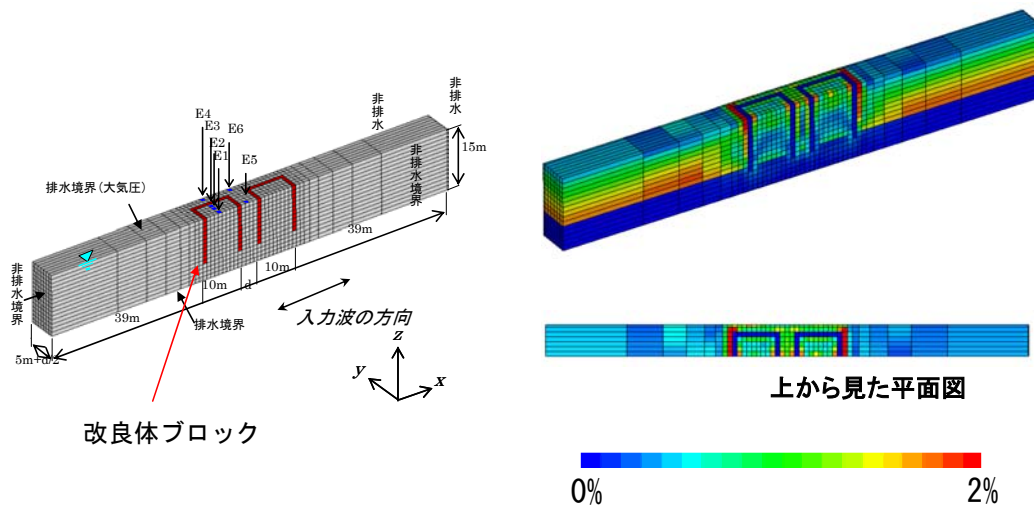


図-8 三次元有限要素メッシュとせん断ひずみ分布

### 3. おわりに

参考文献には実施実証した地盤解析コード自体に関する文献と、本補助金による主たる研究成果論文を中心に記載した。最終年度を終え、総括的な講演は文献 7)を通じて行った。

本地盤解析コードは、本補助金で整備したプレ・ポストプロセッサを通じて使用性が向上している。今後は、本解析コードを自在に操りしかも解釈できる多くの技術者の育成を引き続き積極的に図ることにより、来るべき海洋型地震の特性も踏まえて、砂でも粘土でもない「中間土」からなり埋立地・海上人工島や土構造物などの耐震性再評価の強化必要箇所の抽出と液状化・揺すり込み変形抑止などの地盤強化技術の検討に一層役立てたい。

### 参考文献

- 1) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M. (2002): An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, 42(5), 47-57.
- 2) Nakano, M., Yamada, E. and Noda, T. (2008): Ground improvement reclaimed land by compaction through cavity expansion of sand piles, *Soils and Foundations*, 48(5), 653-671.
- 3) Asaoka A. and Noda, T. (2007): All soils all states all round geo-analysis integration,

International Workshop on Constitutive Modelling - Development, Implementation, Evaluation, and Application, Hong Kong, China, 11-27.

- 4) Noda, T, Asaoka, A. and Nakano, M.(2008):Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, to be submitted.
- 5) T. Noda, M. Nakano, A. Asaoka, E.Yamada, K. Itabashia and M. Inagaki (2009): Numerical analysis on deformation/failure patterns on embankments observed in 2004 Chuetsu earthquake, Proc. Int. Symp. on Prediction and Simulation Methods for Geohazard mitigation, IS-Kyoto 2009, May 25-27, Kyoto, Japan, to be submitted.
- 6) Noda, T., Asaoka, A, Nakano, M. Nakai, K. and Takeuchi, H.(2007): Effects of embankment rigidity on behavior of naturally deposited soils during/after earthquakes, Proc. of International Workshop on Earthquake Hazards and Mitigations, Dec. 7-8, Guwahati, India, 249-256.
- 7) 浅岡顕(2008): 粘土の圧密と砂の締固め／液状化－構造概念を中心にして－, 第 57 回理論応用力学講演会講演論文集, 日本学術会議, 1-10.
- 8) 竹内秀克, 野田利弘(2007): 補強盛土～砂・粘土互層地盤系の地震中／地震後挙動の影響, 地盤力学における大変形の予測とシミュレーション法に関するシンポジウム論文集, 73-80.
- 9) Takeuchi, H., Noda, T. and Asaoka, A. (2009): Coseismic and postseismic behavior of intermediate soil ground improved by sand compaction pile method, Proc. Int. Conf. on Performance-Based Design in Earthquake Geotechnical Engineering — from case history to practice —, IS-Tokyo, Tsukuba, Japan, June 15 - 18, 掲載決定.