

## 研究概要書

## 豪雨時の高速道路盛土の変状予測シミュレータの開発と防災対策への活用

菊本 統 (横浜国立大学 都市イノベーション研究院, 准教授)

小山倫史 (関西大学 社会安全学部, 准教授)

京川裕之 (鹿島建設 土木設計本部 解析グループ)

## 1. 研究の背景と目的

局地豪雨や台風, 長雨による高速道路盛土の変状が頻発している. 2005年の台風接近に伴う豪雨(最大雨量 64 mm/h, 連続 70h)では盛土法面が崩壊し(写真-1), 交通網が長期間寸断されるとともに, 尊い命が失われた. このような降雨による盛土崩壊は降雨条件や施工条件, 維持・管理, 地形・地質に起因するが, 不飽和土の浸透-変形現象は複雑で, そのメカニズムは完全には解明されていない. このため, 降雨に対する盛土の安定性は過去の実績に基づく経験的手法や極限解析により評価しているのが現状で, 豪雨に対する道路盛土の防災対策は必ずしも合理化・体系化されていない. 豪雨に対する斜面の安定性を向上させるには, 豪雨時の地盤の浸水・変形・破壊機構を的確に評価した上で, 効果的な防災対策を講じることが重要である. 本研究では, 土構造物の締固め築造過程とその後の変形・破壊挙動の締固め品質による違いを考慮できる不飽和土の構成則の定式化を試みるとともに, それに基づく土-水-空気連成の浸透・変形解析法を開発し, 土構造物の築造および浸水の数値解析を実施した.

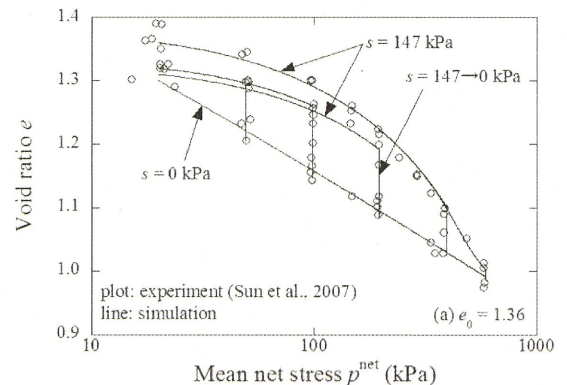
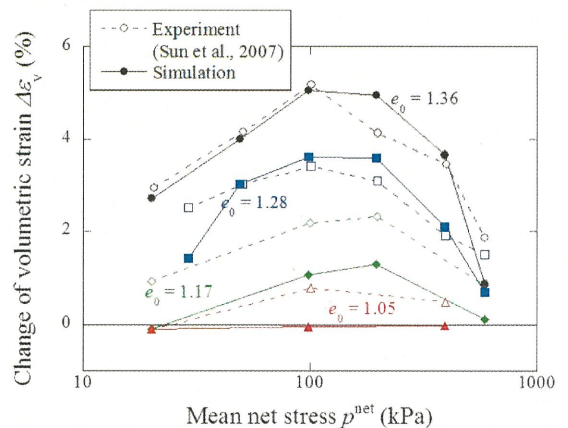
写真-1 豪雨による盛土の大規模崩壊  
(山陽自動車道, 2005年9月)

## 2. 不飽和土の弾塑性構成則と締固め・浸水現象

本研究では飽和過圧密土の構成則・下負荷面修正カムクレイをベースとして, 代表者らが提案する発展型水分特性曲線モデルと間隙比-平均有効応力-飽和度空間での限界状態面(状態変数 $\psi$ )を導入し, Bishopの有効応力を応力変数とした不飽和土の弾塑性構成モデルを定式化した.

不飽和土の要素試験との比較では, 提案モデルが排気排水圧縮時のサクシオン一定条件での体積圧縮に伴う飽和度の増加や圧縮曲線の飽和土の正規圧密線への漸近, サクシオン減少に伴う水浸とコラプス挙動など, 不飽和土の典型的な応答を精緻に捉える(図-1)とともに, 密度や拘束応力による水浸時の体積圧縮量の違いを的確に捉える(図-2)ことが示された. また, 提案モデルは異方応力下での水浸によるせん断変形と破壊をよく再現することが示された(図-3).

さらに, 提案モデルを用いて排気非排水条件下の圧縮試験の解析を実施した. この計算は, 間隙空気の排出による圧縮, すなわち締固めのシミュレーションに該当する. 提案モデルによる解析では, 従来, 解析的には記述することが難しかった含水比-乾燥密度平面で上に凸な締固め曲線や, 締固め曲線の圧縮応力(締固めエネルギーに相当)による変遷をよく再現した(図-4).

図-1 5種類の等方応力下の浸水試験  
と提案モデルによるシミュレーション図-2 初期間隙比・拘束応力が異なる不飽和土の等方応力下の浸水コラプス試験  
とシミュレーション

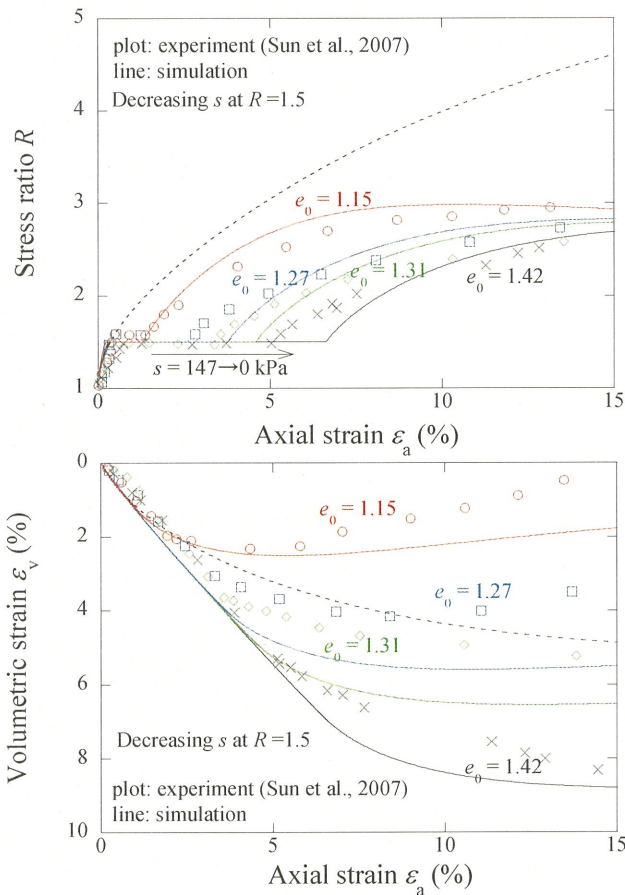


図-3 異方応力下の浸水試験と提案モデルによるシミュレーション

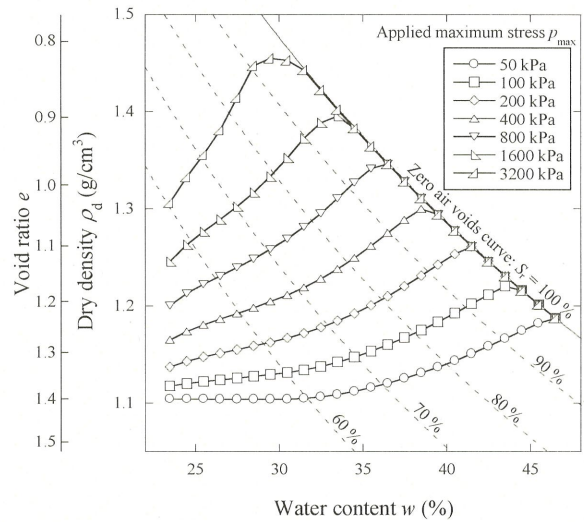


図-4 提案モデルによる締固め曲線の記述 (Pearl clay)

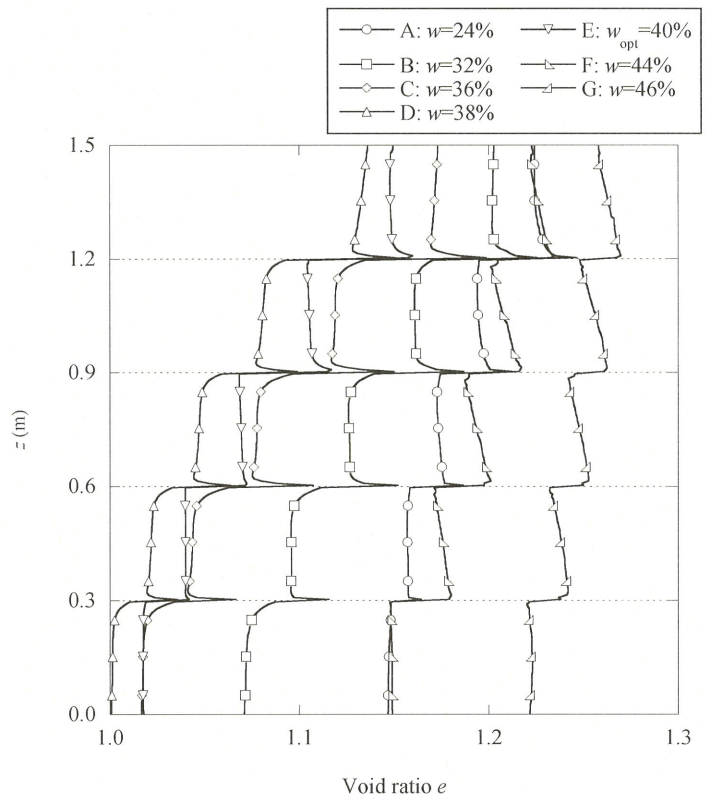


図-5 5層の一次元締固め築造過程のシミュレーション (7種類の締固め含水比での築造完了時の間隙比分布の違い)

### 5. 水土空気3相系の浸透-変形連成有限要素解析

開発した不飽和度の構成モデルを組み込んだ数値解析により、土構造物の締固め築造過程をシミュレートした。解析は土水空気3相系の支配方程式（釣合式、各相の質量保存則）を Sandhu の手法に倣って有限要素法により空間離散化し、後退差分により時間離散化して実施した。

1.5m の高さの土構造物の築造を想定して、一層 30cm で計 5 層の締固め過程を 1 次元圧縮問題としてシミュレートした。締固め過程は排気非排水の境界条件を与えて、各築造過程で地表面に 200kPa の上載圧を与えた。図-5 は 5 層を締固めた後の築造

完了時の間隙比分布であるが、30cm の層ごとに完成時の間隙比が異なる様子や要素シミュレーションで得られた最適含水比  $w_{opt} = 40\%$  よりも実際の築造過程での最適含水比はやや低く 38% 程度であることがわかった。

### 6. まとめと今後の課題

不飽和度の構成則を定式化し、締固め現象とその後の浸水変形・破壊現象をシミュレートできることを示した。また、提案モデルを組み込んだ数値計算により、土構造物の締固め築造過程を再現した。現在は、築造後の浸水による変形・破壊挙動のシミュレーションを試みている。

参考文献 1) 京川・菊本他：応用力学論文集 12, 2009. 2) Sun et al.: *Can. Geotech. J.* 44, 99.41-54, 2003.