

空気～水～土骨格連成有限変形解析を用いた 浸透破壊メカニズムに関する考察

Discussion on the seepage failure mechanism
by soil-water-air coupled finite deformation analysis

吉川高広¹⁾, 野田利弘²⁾, 小高猛司³⁾, 崔瑛⁴⁾

Takahiro Yoshikawa, Toshihiro Noda, Takeshi Kodaka and Ying Cui

- 1) 博(工) 名古屋大学 大学院工学研究科 助教 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町, E-mail: yoshikawa.takahiro@b.mbox.nagoya-u.ac.jp)
- 2) 博(工) 名古屋大学 減災連携研究センター 教授 (〒464-8601 名古屋市千種区不老町)
- 3) 博(工) 名城大学 理工学部社会基盤デザイン工学科 教授 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)
- 4) 博(工) 名城大学 理工学部社会基盤デザイン工学科 准教授 (〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口1-501)

A soil-water-air coupled finite deformation analysis of a seepage model test was conducted. In the model test, a sand layer with relatively higher permeability is covered with another sand layer with relatively lower permeability directly below the river levee. The analysis can well simulate time and place of the boiling phenomena, which shows the validation of the analysis. Furthermore, from the case studies, it is found that both the difference of the permeability between the layers and the head difference affect the occurrence of boiling and the deformation/failure patterns.

Key Words : Soil-water-air coupled analysis, Seepage failure, River levee

1. はじめに

洪水の継続時間が短い我が国においては、河川堤防の決壊の主因は越水であり、浸透のみによる決壊は久しく起こっていない。しかし、平成24年7月の九州北部豪雨による矢部川堤防の被災は、局所的なパイピングをきっかけとして決壊したため、“越流なき破堤”として大きな衝撃を与えた。当該被災箇所では、粘性土堤体の下に堤外地と直接連通している高透水性層が行き止まりの状態が存在していたことが報告されている^[1]。さらに、平成25年7月に発生した子吉川堤防の法すべりと梯川堤防の法崩れ^[2,3]も、高透水性の基礎地盤に起因する被災と考えられる。これまで、河川堤防は過去の被災経験に基づいて、断面形状に重きを置いた整備が行われてきた。また、堤体の浸透すべり破壊の検討にあたっては、浸透解析と円弧すべり解析という別々の解析手法を組み合わせた方法が標準となっている。しかしながら、上記のような透水性基礎地盤に起因する堤防被災をきっかけに、複雑な地盤条件、水理条件においても合理的に河川堤防の安全性照査ができる最新の地盤力学に基づく新たな解析手法の構築が求められている。

本研究では、高透水性基礎地盤を有する河川堤防の浸透破壊メカニズムの解明を目指し、透水模型実験を実施するとともに、空気～水～土骨格連成有限変形解析コード^[4]を用いた解析を実施した。本解析コードは、広範な土の力学挙動を統一的な枠組みで記述できる弾塑性構成式 SYS Cam-clay model^[5]を搭載し、静的・動的の外力形態を問わず、変形から破壊までを一貫した枠組で扱う水～土

骨格連成有限変形解析コード^[6]を、不飽和土もシームレスに扱うことができるように拡張したものである。本論文では、具体的にまず、高透水性層が行き止まりを有する透水模型実験の概要について述べた後、解析コードの妥当性の検証 (Validation) として、この実験のシミュレーションを実施し、浸潤過程およびボイリング発生箇所・時間をよく再現できることを示す。さらに、本解析コードを用いたケーススタディを実施して、高透水性層の行き止まりの有無、地盤の透水性および水位がボイリング発生の有無に加えて、浸透破壊の変形モードに影響を与えることを示す。

2. 透水模型実験の概要と解析条件

図-1は透水模型実験の概要を示す。模型の右端から透水させる実験で、地盤に透水性が高い三河硅砂3号の層を設けている。矢部川堤防の被災箇所でも報告された高透水性層の行き止まりを表現するために、三河硅砂3号の層を途中で打ち切っている。地盤の被覆土層および堤体部分には三河硅砂6号を用いている。実験結果の詳細は、次章において解析結果と比較して示す。

解析における水と空気の境界条件は、水を浸透させる右端で全水頭420mm・非排気条件、水槽と接する下端を非排水・非排気条件、排水部である左端を浸出面・非排気条件、地表面を浸出面・排気条件とした。計算開始時のメッシュサイズは、地盤部分で10mm四方になるように設定した。堤体部分は、2分で10mm盛土をする速さで土要素を1段ずつ追加して作製した^[7]。築堤後には圧密計算

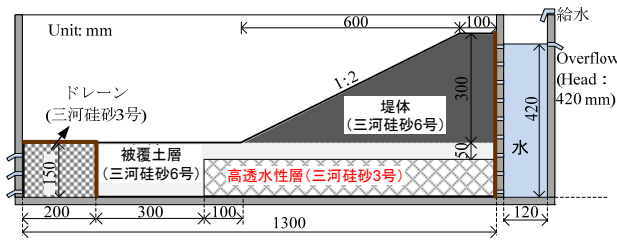


図-1 透水模型実験の概要

表-1 土骨格の構成式に関する材料定数と初期値

弾塑性パラメータ		
NCLの切片	N	1.98
限界状態定数	M	1.0
圧縮指数	$\tilde{\lambda}$	0.05
膨潤指数	$\tilde{\kappa}$	0.012
ポアソン比	ν	0.3
発展則パラメータ		
正規圧密土化指数	m	0.06
構造劣化指数	a	2.2
構造劣化指数	b	1.0
構造劣化指数	c	1.0
構造劣化指数	c_s	1.0
回転硬化指数	b_r	3.5
回転硬化限界面	m_b	0.7
初期値		
初期構造の程度	$1/R^*_0$	4.0
初期間隙比	e_0	1.0
初期応力比	η_0	0.545
初期異方性の程度	ζ_0	0.545

表-2 不飽和浸透特性に関する材料定数と初期値

おおよその物性値		
水分特性曲線		
最大飽和度 %	s_{max}^w	100.0
最小飽和度 %	s_{min}^w	0.0
van Genuchten パラメータ kPa^{-1}	α	0.28
van Genuchten パラメータ ($m' = 1 - 1/n'$)	n'	12.898
乾燥透気係数 m/s	k_d^a	8.87×10^{-3}
初期飽和度 %	s_0^w	10.6
その他の物性値		
土粒子密度 g/cm^3	ρ^s	2.65
水の体積弾性係数 kPa	K_w	2.19×10^6
空気の気体定数 $m^2/s^2/K$	\bar{R}	287.04
絶対温度 K	Θ	293.15

表-3 三河砂3, 6, 8号の飽和透水係数の値

		3号砂	6号砂	8号砂
飽和透水係数 m/s	k_s^w	4.06×10^{-3}	1.61×10^{-4}	2.21×10^{-5}

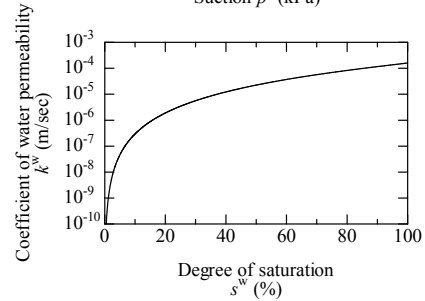
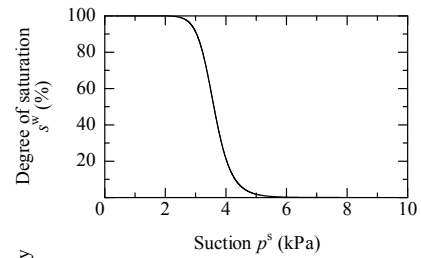


図-2 三河砂6号の不飽和浸透特性

を2時間行った。表-1は土骨格の構成式SYS Cam-clay model^[5]に関する材料定数と初期値を示す。表-2は不飽和浸透特性に関する材料定数と初期値およびその他の物性値を示す。表-1はNoda et al.^[6]、表-2は杉井ら^[8]の三河砂6号の値から決定した。ここでは簡単のため、3号砂と6号砂の違いは、飽和透水係数のみを変えて表現した。表-3は三河砂3, 6, 8号の飽和透水係数^[8]を示す。8号砂は4章のケーススタディで被覆土層として用い、6号砂よりも透水性が低い。3号砂と6号砂の飽和透水係数は約20倍異なり、3号砂と8号砂は約200倍異なる。図-2は三河砂6号の水分特性曲線および透水係数と飽和度の関係を示す。水分特性はvan Genuchtenモデル^[9]、透水係数と透気係数はMualemモデル^[10]を用いた。初期状態は、実験条件に合わせて決定し、初期の比体積、構造、応力比、異方性、飽和度、間隙空気圧(0kPa)および間隙水圧(水分特性曲線から計算)を地盤内で一定と仮定し、土被り圧に応じて過圧密比を分布させた。

3. 透水模型実験のシミュレーション結果

図-3は透水模型実験の結果を示す。図-4は計算結果の飽和度分布を示す。両図の比較より、計算結果は実験結果の浸潤過程をよく再現できていることがわかる。実験では浸潤開始から2分20秒経過時点で、図の赤丸で示した箇所でボイリング(噴砂・噴水)が発生した。このボイリングをきっかけとして最終的には堤体高さが半分程度になるまで崩壊するが、解析ではボイリング発生段階までを追うことができる。図-5と図-6はそれぞれせん断ひずみ分布と平均骨格応力分布^[11]を示す。計算では2分37秒経過時に、赤丸で示した法尻付近の地表面でせん断ひずみが大きく、平均骨格応力がゼロ近くまで低下している。図-7は法尻付近でせん断ひずみが最も大きい土要素の力学挙動を示す。図中の白抜き点は浸潤開始前、黒塗り点はせん断ひずみが3%を越えたときの点を示す。黒塗

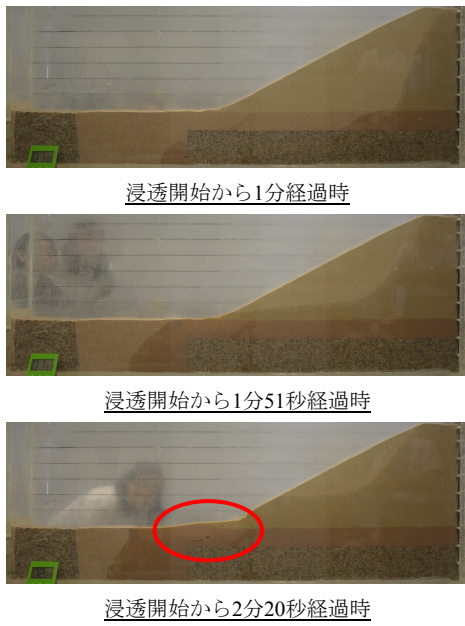


図-3 模型実験の結果



図-4 模型実験の再現解析における飽和度分布

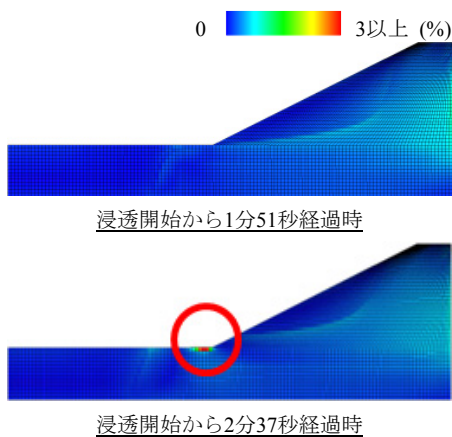


図-5 模型実験の再現解析におけるせん断ひずみ分布

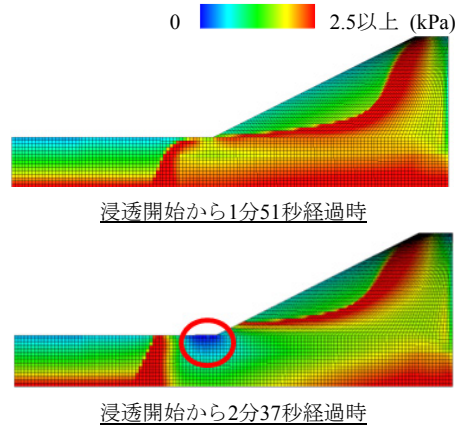


図-6 模型実験の再現解析における平均骨格応力分布

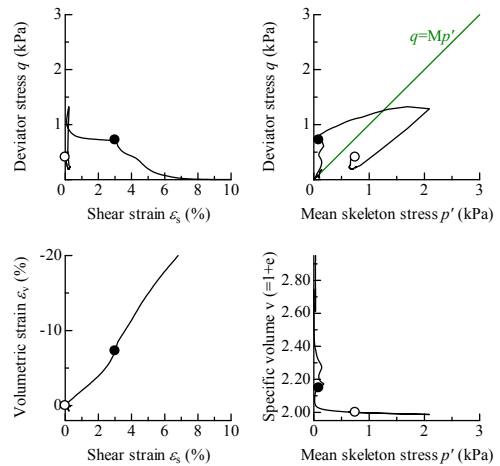


図-7 法尻付近のせん断ひずみが最も大きい土要素の力学挙動

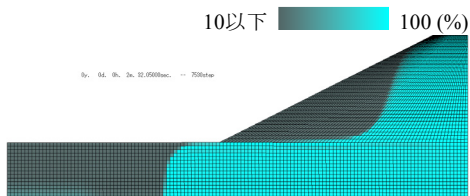
り点あたりから、吸水軟化により急激に骨格応力経路が原点に近づく。このため以後本論文では、せん断ひずみが3%以上生じ、平均化骨格応力がゼロに近づくことをボイリングと呼ぶ。

以上のように、本解析コードは、浸透によるボイリング現象を、間隙水圧の上昇に伴う骨格応力の低下として良く表現できることがわかった。

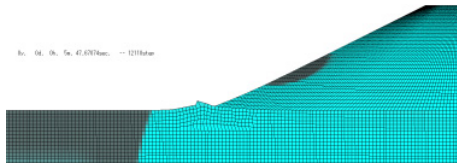
4. ケーススタディ (高透水性層の行き止まりの有無、地盤の透水性および水位がボイリング発生に与える影響)

3章の解析条件の一部を変更して、次に示す3つのケーススタディを行った。① 図-1において三河硅砂3号から成る高透水性層の行き止まりが無く、左端まで連続している場合、② 図-1において被覆土層に透水性が低い三河硅砂8号の飽和透水係数を与えた場合、および③ ②の条件で右端水位を420mmから180mmに低くした場合、の3ケースである。

①に関しては図を省略するが、行き止まりが無い場合はボイリング発生までの時間が長くなる。さらに、水位を210mmまで下げると、行き止まりが有る場合はボイリ

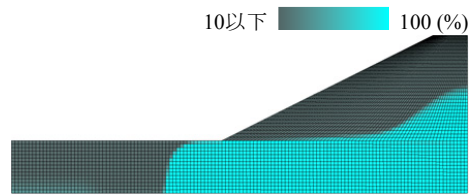


浸透開始から2分32秒経過時

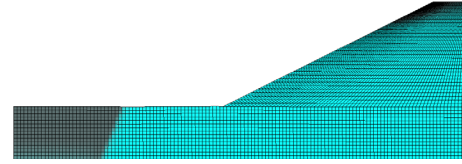


浸透開始から5分47秒経過時

図-8 被覆土層が8号砂の（透水性が低い）場合の飽和度分布

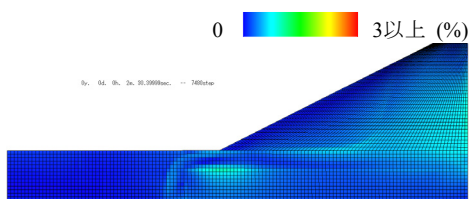


浸透開始から3分56秒経過時

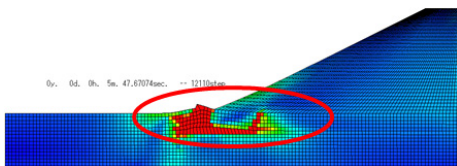


浸透開始から24分30秒経過時

図-11 被覆土層が8号砂（透水性が低い）かつ水位が180mm（低い）場合の飽和度分布

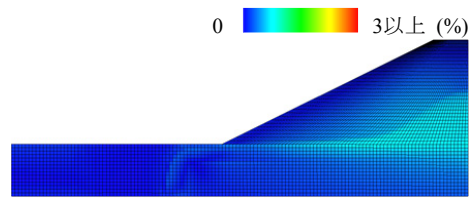


浸透開始から2分32秒経過時

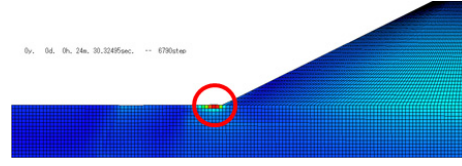


浸透開始から5分47秒経過時

図-9 被覆土層が8号砂の（透水性が低い）場合のせん断ひずみ分布

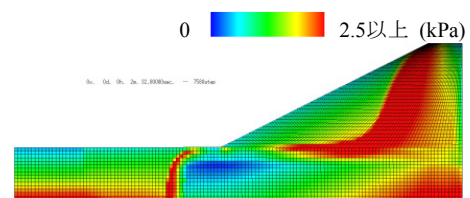


浸透開始から3分56秒経過時

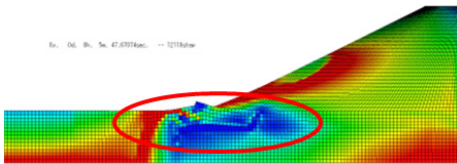


浸透開始から24分30秒経過時

図-12 被覆土層が8号砂（透水性が低い）かつ水位が180mm（低い）場合のせん断ひずみ分布

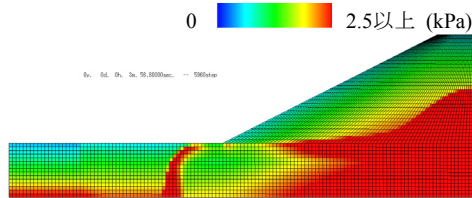


浸透開始から2分32秒経過時

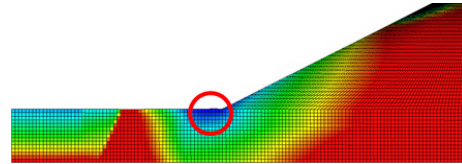


浸透開始から5分47秒経過時

図-10 被覆土層が8号砂の（透水性が低い）場合の平均骨格応力分布



浸透開始から3分56秒経過時

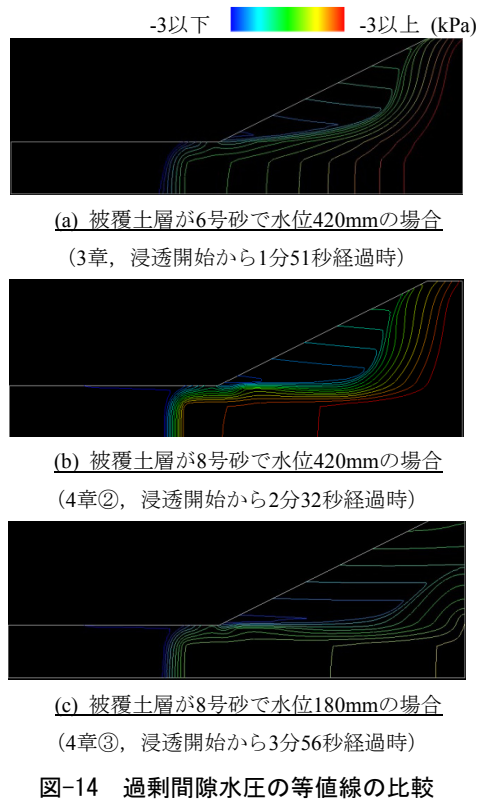


浸透開始から24分30秒経過時

図-13 被覆土層が8号砂（透水性が低い）かつ水位が180mm（低い）場合の平均骨格応力分布

ングが発生したが、無い場合はボイリングしなかった。
 ② 被覆土層の透水性が低い場合に関して、図-8から図-10はそれぞれ飽和度分布、せん断ひずみ分布および平均骨格応力分布を示す。3章の場合と異なり、浸潤面が高透水性層を越えたあたりで地盤の層境での平均骨格応力が

ゼロに近づき、最終的には層境でもボイリングして大きなせん断変形が生じ、せん断面は堤体に向かって進展した。③ ②の条件下で、水位のみ180mmで低い場合に関して、図-11から図-13はそれぞれ飽和度分布、せん断ひずみ分布および平均骨格応力分布を示す。水位を低くする



と、今度は層境ではなく地表におけるせん断変形が最終的には卓越した。

図-14は各ケースで浸潤面が地盤の層境を越えたときの過剰間隙水圧の等値線の比較を示す。ここで、過剰間隙水圧は、ある基準位置（本解析では初期地盤上端の高さ150mmの位置）に自由水面を仮定した場合に計算される静水圧値から、過剰に発生した間隙水圧と定義する。水位420mmで(a) 被覆土層が6号砂と(b) 8号砂の場合を比較すると、8号砂の場合は層境において、等値線が密に存在し、上向き動水勾配が大きい。(c) 被覆土層が8号砂でも水位が180mmの場合は、法尻近くの等値線の間隔は(a)に近い。このことから、破壊モードに差が生じたことがわかる。

以上より、高透水性層の行き止まりの有無、地盤を構成する土材料の透水性および外水位の差が、浸透破壊発生の有無に加えて、浸透破壊モードにも影響を与えることがわかった。

5. おわりに

高透水性層を有する透水模型実験のシミュレーションを通じて、空気～水～土連成の弾塑性有限変形解析コード^[4]は、浸透破壊（ボイリング）を間隙水圧の上昇に伴う骨格応力の低下現象として、破壊箇所・破壊時間ともによく再現できることを示した。また、ケーススタディを通じて、高透水性層の行き止まりの存在、高透水性層と被覆土層の透水性のコントラスト、および水位高さによって、ボイリングの有無や破壊形態が異なることを示し、特に、高透水性層の飽和透水係数（ 4.06×10^{-3} m/s）に比

べて、被覆土層の値が約200分の1倍小さい場合（ 2.21×10^{-5} m/s）は、高透水性層と被覆土層の層境でボイリングが生じ、せん断面は堤体に向かって大きく進展することを示した。

本解析手法は、砂か粘土か、変形か破壊か、降雨か地震か、という土材料・照査対象・外力形態等の違いを問わず、同一の理論的枠組みで地盤・土構造物の挙動を評価できる。今後は、実大スケールの照査に加えて、越水破堤などの水理学的観点からの照査も視野に入れ、広範な土材料や外力に対する河川堤防の変形・破壊問題に取り組んでいきたい。

謝辞: JSPS科研費25249064と国土交通省H27年度河川砂防技術研究開発の助成を受けた。ここに、謝意を表します。

参考文献

- [1] 矢部川堤防調査委員会：報告書，九州地方整備局筑後川河川事務所，2013.
- [2] 災害報告特別セッション配布資料，第2回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム，土木学会，2014.
- [3] 大角一浩・飯田大輔・今森美穂：梯川古府地先漏水対策について，平成26年度北陸地方整備局事業研究発表会，2014.
- [4] Noda, T. and Yoshikawa, T.: Soil-water-air coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *Soils and Foundations*, 55(1), 45-62, 2015.
- [5] Asaoka, A., Noda, T., Yamada, E., Kaneda, K. and Nakano, M.: An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, 42(5), 47-57, 2002.
- [6] Noda, T., Asaoka, A. and Nakano, M.: Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, *Soils and Foundations*, 48(6), 771-790, 2008.
- [7] Takaine, T., Tashiro, M., Shiina, T., Noda, T. and Asaoka, A.: Predictive simulation of deformation and failure of peat-calcareous soil layered ground due to multistage test embankment loading, *Soils and Foundations*, 50(2), 245-260, 2010.
- [8] 杉井俊夫・山田公夫・奥村恭：高飽和時における砂の不飽和透水係数に関する考察，平成13年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集，267-268，2002.
- [9] van Genuchten, M. T.: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898, 1980.
- [10] Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, 12, 513-522, 1976.

[11] Jommi, C.: Remarks on the constitutive modelling of unsaturated soils, *Experimental Evidence and Theoretical*

Approaches in Unsaturated Soils (eds. by Tarantino, A. and Mancuso, C.), Balkema, 139-153, 2000.