

温暖化に起因する海面上昇による河川堤防や高水敷・河岸の土質材料に及ぼす影響の簡易評価と適応策

茨城大学工学部都市システム工学科
小峯秀雄

茨城大学における地球温暖化／気候変動による社会基盤の脆弱性評価研究

- 河川堤防・高水敷・河岸を対象としている。
- 降雨や河川水増水を想定して、河川流域の土質材料の侵食、沈下、サクシヨンの挙動予測を研究してきた。
- 環境省S4プロジェクト(2005～2009)では、**基本的性質、サクシヨン、沈下・変形**に着目し、**日本全国**を対象に。
- 環境省S-8-3プロジェクト(2010～)では、**侵食特性**に着目し、**メコンデルタ地帯**も対象に。

研究論文

- 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲:温暖化に起因する海面上昇による河川堤防や高水敷・河岸の土質材料に及ぼす影響の簡易評価, 地盤工学ジャーナル, Vol. 4, No. 2, pp. 185-195, 2009.06.
- 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲, 内田佳子:各種土質材料の水分特性曲線に着目した集中豪雨による河川堤防や河岸の脆弱性簡易評価, 地盤工学会誌, Vol. 57, No. 4, pp. 22-25, 2009.04.

To be continued

国際会議論文(1/2)

- Taniguchi, Y., Komine, H., Yasuhara, K. and Murakami, S. : Evaluation of erosion vulnerability for river levee materials using physico-chemical properties of soil focusing on torrential rainfall due to climate change, International Workshop on Erosion and Its Adaptation, 2009.10.
- Komine, H. : Adaptations and countermeasures for mitigating impacts due to global warming in geotechnical and geoenvironmental engineering, 2nd Vietnam-Japan Symposium on Mitigation & Adaptation of Climate-change-induced Natural Disasters, 2008.11.
- Munegumi, T., Komine, H., Yasuhara, K. and Murakami, S. : Vulnerability evaluation of soil material simulated river bank material in torrential rainfall, 2nd Vietnam-Japan Symposium on Mitigation & Adaptation of Climate-change-induced Natural Disasters, 2008.11.

国際会議論文(2/2)

- Komine, H. : Vulnerability of riverbank materials by sea-level rising due to Global Warming in Japan, Proceedings of the 2nd Malaysia-Japan Symposium on Geohazard and Geoenvironmental Engineering, 2007.11.
- Komine, H. : Changes of fundamental properties of riverbank material by sea-level rising due to Global Warming, Vietnam-Japan Symposium on Mitigation & Adaptation of Climate-change-induced Natural Disasters, 2007.09.
- Uchida, Y., Komine, H., Yasuhara, K., Murakami, S. : Soil water characteristic curve and one-dimensional deformation of riverbank soils in Japan, Vietnam-Japan Symposium on Mitigation & Adaptation of Climate-change-induced Natural Disasters, 2007.09.

すべて、小峯秀雄のwebsiteからダウンロード可能です！

- 小峯秀雄のHPからダウンロードできるようになっています。
- HPアドレス:
<http://www.geo.civil.ibaraki.ac.jp/komine/>
- 「**小峯秀雄**」で検索できます

注意！
「小峰」ではなく「小峯」です！

メニューを選んでください

- 降雨や河川水位増加に伴う・・・
 - 土質材料の基本的物理特性と圧縮特性の変化から見た河川堤防・高水敷・河岸の脆弱性評価
→[S4\(2005年度\)](#), [S4\(2006年度\)](#), [JGS\(2010\)](#)
 - 土質材料の水分特性曲線の変化とサクシヨンの変化に伴う変形挙動から見た河川堤防・高水敷・河岸の脆弱性評価
→[S4\(2007年度\)](#), [S4\(2009年度\)](#)
 - 土質材料の侵食特性から見た脆弱性評価
→[S4\(2008年度\)](#), [S-8-3\(3\)\(2010年度\)](#)

一次元圧密特性の観点からの地球温暖化／海面上昇による河川堤防や高水敷・河岸を想定した土質材料に及ぼす影響の簡易評価

茨城大学
○小峯秀雄
安原一哉
村上哲

研究の背景(1)



- 地球温暖化の問題は、国際問題であり、かつ、国内の政策にも係る重要な問題である。
- 土木工学・地盤工学の視点からも、何らかの技術的な根拠を持って、地球温暖化への適応策を提言していくことが求められている。

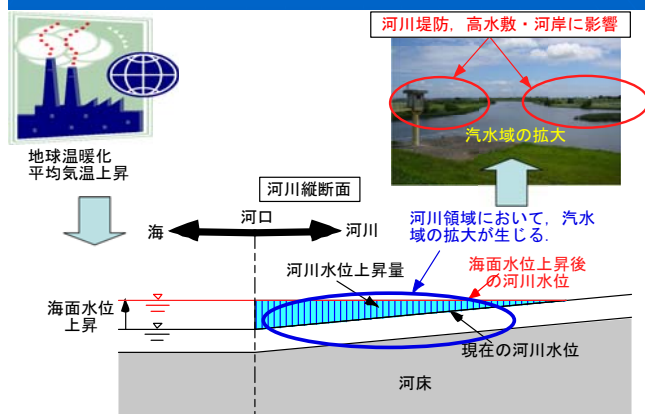
【関連発表】

安原一哉：地盤工学はIPCCに貢献できるか？(セッション：一般基準・一般・展望)

研究の背景(2)

- 地球温暖化に伴う海面の上昇は世界平均で今後100年間に59 cmと予測 (IPCC 第4次評価報告書より)
- 海面上昇により、海水が河川を遡上することが予想され、汽水域が上流側に拡大し、河川の堤防や高水敷・河岸に影響を及ぼすと考えられている。
- 地球温暖化が日本の社会基盤施設に及ぼす影響を定量的に評価することは極めて困難である。
- しかし、何らかの技術的根拠を持って、その影響を定量的に把握し、地球温暖化問題に対する具体的な対応策や政策に反映させなければならない。

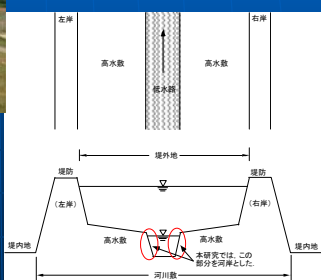
図に表すと



河川堤防／高水敷／河岸

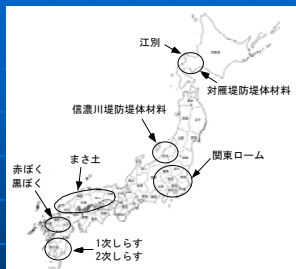


本研究における堤防、高水敷、河岸の考え方



北海道石狩川上流の堤防と高水敷の利用状況

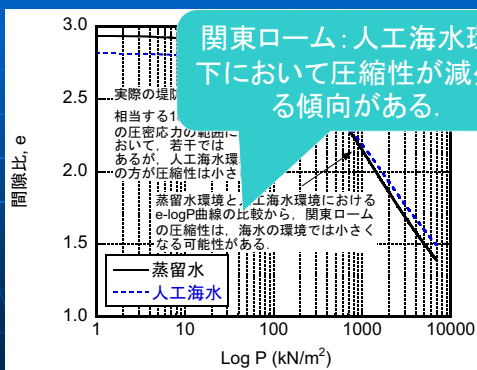
土質試料／実験装置／人工海水



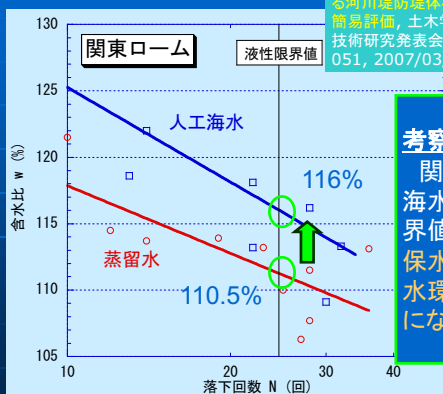
人工海水のNa, Ca, K, Mgイオン濃度(mol/m³)

Naイオン	Caイオン	Kイオン	Mgイオン
454.4	6.2	9.0	50.0

人工海水環境と蒸留水環境における関東ロームの圧縮性の違い



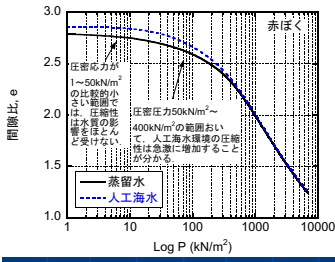
関東ロームの変状特性



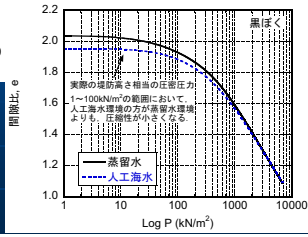
参考文献(6):小峯秀雄、安原一哉、村上哲、篠田光貴：液性限界・塑性限界の観点からの温暖化／海面上昇による河川堤防堤体材料に及ぼす影響の簡易評価、土木学会第34回関東支部技術研究発表会(CD-ROM), III-051, 2007/03/13の成果と整合！

考察：
関東ロームは人工海水の方が液性限界値が高くなる。保水性の向上(海水環境では、液状になりにくくなる。)

赤ぼく、黒ぼくでは



これらの実験結果も、参考文献6):小
 峯秀雄, 安原一哉, 村上哲, 篠田光
 貴:液性限界・塑性限界の観点からの
 温暖化/海面上昇による河川堤防堤
 体材料に及ぼす影響の簡易評価, 土
 木学会第34回関東支部技術研究発
 表会(CD-ROM), III-051,
 2007/03/13.とも整合



講演概要集のレジメの表-2
 にすべての土質材料の結果
 を総括

河川汽水域の拡大による堤防堤体や高水敷・ 河岸の土質材料への影響評価簡易マップ

蒸留水と人工海水における
 各土質材料の圧縮性の変
 化に基づいた、河川汽水域
 の拡大による堤防堤体や高
 水敷・河岸の影響評価簡易
 マップを試案!

対置堤防堤体材料、江
 加し、堤防や高水敷
 念される。透水係数
 も高くなることに伴

まきす：圧縮性はほと
 とから、堤防や高水敷
 増加は生じないと推察
 水係数が増加すること
 や高水敷・河岸内の浸
 とにより、強度低下が

赤ぼく、黒ぼく：
 赤ぼくは圧縮性が増加
 する一方、黒ぼくは圧
 縮性が低下する。透水
 係数についても、赤ぼ
 くでは増加するのに対
 し、黒ぼくでは低下す
 る。したがって、地域
 や地質によって影響程
 度や影響傾向が異なる。

1次しらす、2次しらす、圧縮性の増減は、応力条件
 に依存し変動する傾向がある。圧密係数および透水
 係数については、1次しらすでは増加するのに対し、
 2次しらすでは、いずれも低下する。したがって、地
 域や地質によって影響程度や影響傾向が異なる。

一次元圧密特性の観点からの地球温暖化／海面上昇による河川堤防や高水敷・河岸を想定した土質材料に及ぼす影響の簡易評価

地球温暖化 圧密 堤防

茨城大学 国際会員 ○小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲

1. はじめに

地球温暖化に伴う海面の上昇は世界平均で今後 100 年間に 59 cm と予測されている^{1)~3)}。この海面上昇が生じると海水が河川を遡上することが予想され、河川下流域に位置していた汽水域が上流側に拡大することが考えられる。このような事象が生じた場合、重要な社会基盤施設の一つである河川の堤防や高水敷・河岸に影響を及ぼすことが考えられる。地球温暖化が日本の社会基盤施設に及ぼすであろう影響程度を定量的に評価することは極めて困難なことではあるが、何らかの根拠を持って、その影響を定量的に把握し、地球温暖化問題に対する具体的な対応策や政策に反映させなければならぬ状況にある。そこで本研究では、蒸留水および人工海水環境下において、河川堤防や高水敷・河岸を想定した土質材料の一次元圧密特性を定ひずみ速度圧密試験により調査し、その結果から海面上昇に伴う堤防や高水敷・河岸への影響を推察した。

2. 使用した土質材料と試験方法

本研究では、9 種類の土質材料、すなわち関東ローム、まさ土、1 次および 2 次しらす、赤ぼくおよび黒ぼく、信濃川堤防堤体材料、対雁堤防堤体材料、江別を、堤防堤体材料や高水敷・河岸を構成する材料と想定し選定した。これらの土質材料は、著者らの研究グループが実際に採取できる状況にあり、また、生成・堆積環境が異なるものであることから選んだ。図 1 には、選定した各土質材料のおおよその採取地域を日本地図上に表示した。図 1 に示すように、日本の各地域に分布している土質材料であり、現時点では、おおよそ日本全体の傾向を把握できるものと考えている。本研究において一次元圧密特性を調査する方法は、「土の定ひずみ速度載荷による圧密試験方法 (JIS A 1227:2000)」⁴⁾に規定されている方法に準拠した。本試験により得られる結果から、各土質材料の圧縮性と圧密係数を算出し、沈下特性や透水係数の推定を行い、それに基づき河川堤防堤体や高水敷・河岸の変状予測を行った。図 1 は、定ひずみ速度圧密試験装置の概要を示す。この試験装置は海水環境

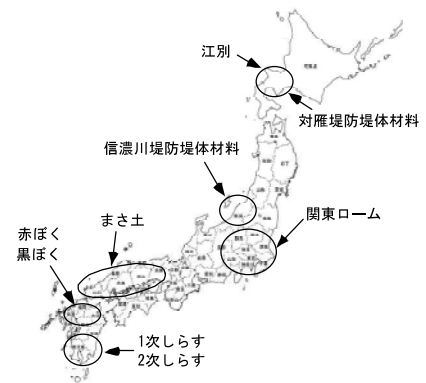


図 1 各土質材料の採取地域

下での実験が行えるように、耐腐食性の高い SUS316L で製作されている。使用する水溶液には蒸留水と市販の人工海水 (表 1 参照) を用いた。供試体は粒径 2mm 以下の試料を使用し、直径 60mm、高さ 20mm を目標に作製した。実験方法の詳細については、参考文献 5) に詳述しているので参考されたい。

3. 一次元圧密特性の観点からの海面上昇による河川堤防や高水敷・河岸を想定した土質材料の変状の簡易評価

図 3 に、定ひずみ速度圧密試験により得た関東ローム、赤ぼく、黒ぼくの e-logP 曲線を例示する。表 2 には、今回使用した 9 種類の土質材料に対して求められる蒸留水および人工海水環境における圧縮指数 C_c 、体積圧縮係数 m_v 、圧密係数 c_v および透水係数 k と蒸留水から人工海水に変遷することによる各物理量の増減率を示す。図 3 左の関東ロームの試験結果より、人工海水を用いた場合の e-logP 曲線は、蒸留水の e-logP 曲線と比べて、間隙比の低下が小さいことが分かる。圧縮指数 C_c は蒸留水環境において 0.989 であったのに対し、人工海水環境では 0.880 と小さくなった。すなわち、関東ロームは、人工海水環境下において圧縮性が減少するものと考えられ、この結果は、既往研究 6) で述べた液性限界・塑性限界の観点からの考察と整合している。また、透水係数の低下も、表 2 より認められる。透水係数 k は蒸留水を用いた場合が $1.12 \times 10^{-7} (\text{cm/s})$ に対し、人工海水を用いた場合が $7.14 \times 10^{-8} (\text{cm/s})$ と算出され、約 30% の透水係数の低下が認められた。体積圧縮係数 m_v や圧密係数 c_v も人工海水を用いた場合の方が若干低下した。以上より、関東ロームは、海水の影響により圧縮性の減少や圧密係数の低下が考えられる。



図 2 SUS316L 製定ひずみ速度圧密試験装置

表 1 使用した人工海水の Na, Ca, K, Mg イオン濃度

各陽イオン濃度(mol/m ³)			
Na イオン	Ca イオン	K イオン	Mg イオン
454.4	6.2	9.0	50.0

一方、赤ぼくにおいては、表 2 および図 3 中に示すように、圧密圧力が 50~400kN/m² の範囲において、e-logP 曲線の勾配は、人工海水環境の方がやや大きくなる事が分かる。これらのことから、赤ぼくの場合、堤防下部に相当する圧密応力において特に、人工海水環境下において圧縮性が増加するものと推察される。この結果は、既往研究 6) で述べた液性限界・塑性限界の観点からの考察と整合している。

Simplified evaluation on impact of soil materials for levee and river-bank by sea-water level raising due to global warming from the viewpoint of one-dimensional consolidation property.

Hideo Komine Ibaraki University
Kazuya Yasuhara Ibaraki University
Satoshi Murakami Ibaraki University

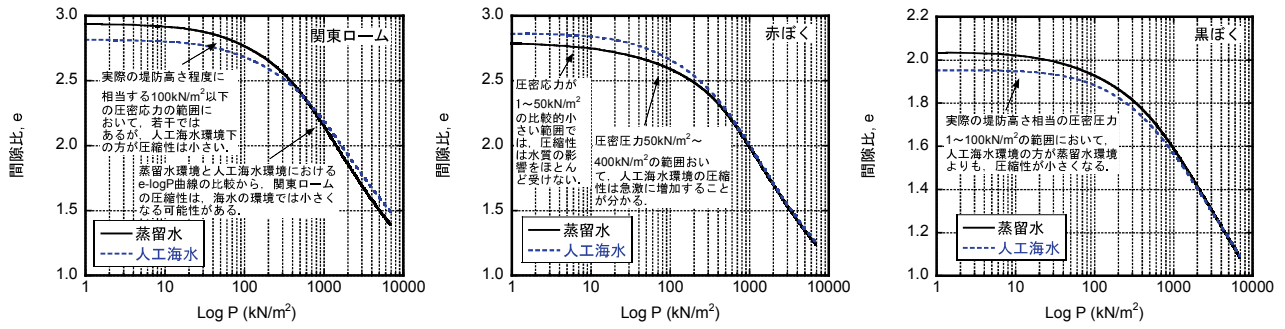


図3 関東ローム、赤ぼく、黒ぼくの e-logP 曲線

表2 蒸留水および人工海水環境下における各土質試料の圧縮指数，体積圧縮係数，圧密係数および透水係数

土質材料	水溶液	C_c	C_c の増減率	m_v	m_v の増減率	c_v	c_v の増減率	k	kの増減率
関東ローム	蒸留水	0.989	11.0%減	2.3×10^{-4}	26.1%減	4.3×10^2	14.0%減	1.12×10^{-7}	36.3%減
	人工海水	0.880		1.7×10^{-4}		3.7×10^2		7.14×10^{-8}	
赤ぼく	蒸留水	0.992	0.6%増	2.2×10^{-4}	27.3%増	4.3×10^2	7.0%減	1.07×10^{-7}	18.7%増
	人工海水	0.998		2.8×10^{-4}		4.0×10^2		1.27×10^{-7}	
黒ぼく	蒸留水	0.625	5.6%減	1.5×10^{-4}	13.3%減	1.1×10^3	36.4%減	1.87×10^{-7}	44.9%減
	人工海水	0.590		1.3×10^{-4}		7.0×10^2		1.03×10^{-7}	
1次しらす	蒸留水	0.476	1.7%増	3.3×10^{-5}	9.1%減	9.5×10^4	36.8%増	3.56×10^{-6}	24.4%増
	人工海水	0.484		3.0×10^{-5}		1.3×10^5		4.43×10^{-6}	
2次しらす	蒸留水	0.277	0.4%増	1.3×10^{-5}	15.4%増	1.2×10^5	33.3%減	1.77×10^{-6}	23.2%減
	人工海水	0.278		1.5×10^{-5}		8.0×10^4		1.36×10^{-6}	
まさ土	蒸留水	0.131	増減なし	7.1×10^{-6}	19.7%増	7.0×10^4	400%増	5.64×10^{-7}	499%増
	人工海水	0.131		8.5×10^{-6}		3.5×10^5		3.38×10^{-6}	
信濃川堤防堤体材料	蒸留水	0.161	6.2%減	2.0×10^{-5}	50.0%減	7.0×10^3	32.9%減	1.59×10^{-7}	66.4%減
	人工海水	0.151		1.0×10^{-5}		4.7×10^3		5.34×10^{-8}	
対雁堤防堤体材料	蒸留水	0.310	3.2%増	1.7×10^{-4}	64.7%増	2.0×10^3	175%増	3.86×10^{-7}	353.4%増
	人工海水	0.320		2.8×10^{-4}		5.5×10^3		1.75×10^{-6}	
江別	蒸留水	0.268	4.9%増	1.5×10^{-4}	20.0%増	2.7×10^3	2493%増	4.60×10^{-7}	3009%増
	人工海水	0.281		1.8×10^{-4}		7.0×10^4		1.43×10^{-5}	

C_c : 圧縮指数, m_v : 体積圧縮係数(m^2/kN), c_v : 圧密係数(cm^2/day), k: 透水係数(cm/s)

また、表2および図3右に実験結果を示す黒ぼくにおいては、実際の堤防高さ相当の圧密圧力 1~100kN/m² の範囲において、人工海水環境の方が圧縮性がやや小さくなる傾向が認められる。圧縮指数 C_c の値は、蒸留水を用いた場合が 0.625、人工海水を用いた場合が 0.590 となり、若干ではあるが人工海水の方が小さい値を示した。透水係数について、人工海水を用いた場合の方が蒸留水を用いた場合に比べ 45%減となっている。圧密係数 c_v も減少していることから圧密速度が遅くなると考えられる。

以上のような考察を9種類の全土質材料に対して実施し総括した結果は参考文献5)に記載されているので、参照されたい。さらに、このような考察に基づき、図4に示す河川汽水域の拡大による堤防堤体や高水敷・河岸の土質材料への影響評価簡易マップを提案した⁵⁾。このような影響評価マップは、地球温暖化に対する社会基盤施設としての河川堤防や高水敷・河岸の整備方針に資すると考えられる。

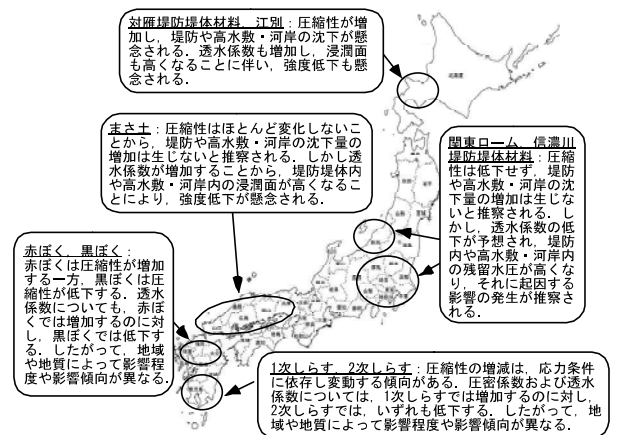


図4 河川汽水域の拡大による堤防堤体や高水敷・河岸の土質材料への影響評価簡易マップ

参考文献

- 1) 気候変動に関する政府間パネル: IPCC 第4次評価報告書第1作業部会報告書政策決定者向け要約, 2007.
- 2) 安原一哉, 小峯秀雄, 村上哲, 陳光斉, 三谷泰浩, 田村誠: 温暖化による気候変動が地盤災害に及ぼす影響, 地球環境, Vol. 14, No. 2, pp. 247-256, 2009.10.
- 3) 原沢英夫・西岡秀三: 地球温暖化と日本—自然・人への影響予測—, 古今書院, pp.1-55, 2003.
- 4) 地盤工学会: 土質試験の方法と解説—第一回改訂版—, 2000.
- 5) 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲: 温暖化に起因する海面上昇による河川堤防や高水敷・河岸の土質材料に及ぼす影響の簡易評価, 地盤工学ジャーナル, Vol. 4, No. 2, pp. 185-195, 2009.06.
- 6) 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲, 篠田光貴: 液性限界・塑性限界の観点からの温暖化/海面上昇による河川堤防堤体材料に及ぼす影響の簡易評価, 土木学会第34回関東支部技術発表会(CD-ROM), III-051, 2007/03/13.

温暖化に起因する海面上昇による河川堤防や高水敷・河岸の土質材料に及ぼす影響の簡易評価

小峯秀雄¹, 安原一哉¹, 村上哲¹

¹ 茨城大学・工学部都市システム工学科

概要

地球温暖化に伴う海面の上昇は世界平均で今後 100 年間に 59 cm と予測されている。この海面上昇が生じると海水が河川を遡上することが予想され、河川下流域に位置していた汽水域が上流側に拡大することが考えられる。このような事象が生じた場合、重要な社会基盤施設の一つである河川の堤防や高水敷・河岸に影響を及ぼすことが考えられる。地球温暖化が日本の社会基盤施設に及ぼすであろう影響程度を定量的に評価することは極めて困難なことではあるが、何らかの根拠を持って、その影響を定量的に把握し、地球温暖化問題に対する具体的な対応策や政策に反映させなければならない状況にある。そこで本研究では、河川を対象として、簡易な方法で地球温暖化による海面上昇の影響を想定し、海面上昇に伴う堤防や高水敷・河岸の構成土質材料への物理的影響を推察する。

キーワード：河川堤防，地球温暖化，海面上昇，液性限界・塑性限界，定ひずみ速度圧密試験

1. 研究の背景と目的

気候変動に関する政府間パネル(IPCC)の第 4 次報告書第 1 部作業部会報告書¹⁾において、21 世紀末には気温が最大 6.4℃上昇すると報告されている。その上昇速度は過去 1000 年間に於いて最も著しい。また上記の気温上昇に伴う海面の上昇は世界平均で今後 100 年間に、59 cm と予測されている^{1)~3)}。このような海面上昇が生じると海水が河川を遡上することが予想され、図 1 に示すように河川下流域に位置していた汽水域が上流側に拡大し、重要な社会基盤施設の一つである河川堤防や高水敷・河岸に影響を及ぼすことが考えられる。

日本における高水敷は、図 2 に例示するように、野球練

習場やテニスコートとしての利用がなされていることが多い。社会的には重要度の低い施設と考えられるものの、豊かな生活圏の形成において重要なレクリエーション空

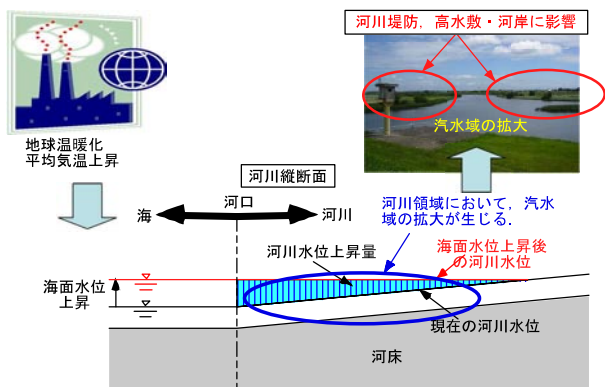


図 1 地球温暖化/海面上昇による河川における汽水域の拡大と河川堤防や高水敷・河岸への影響



(a) 北海道石狩川上流の堤防と高水敷の利用状況



(b) 茨城県小貝川の堤防と高水敷の利用状況

図2 日本の河川堤防と高水敷の利用状況の例

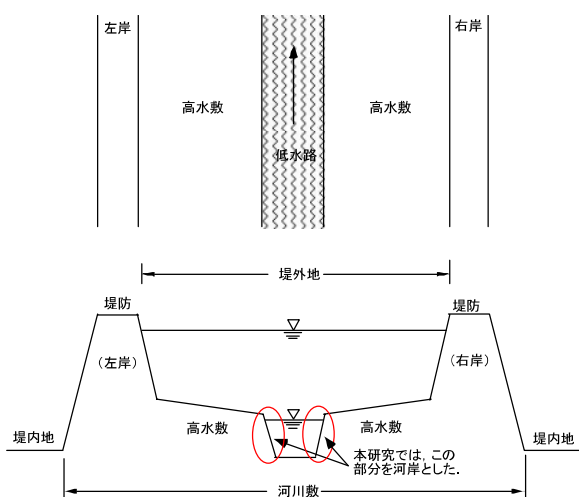


図3 本研究における堤防、高水敷、河岸の考え方

間を提供しているおり、このような空間施設の損失も社会的には大きな問題と言える。なお、本研究においては、堤防、高水敷および河岸については、図3のように考え進める。

ところでマスメディアをはじめ世界的に地球温暖化問題に対して注目が集まっている昨今、その重要性についてのみ議論するのではなく、今後の温暖化問題への対応方針について世界各国で考えられはじめている。地球温暖化現象が日本の社会基盤施設に及ぼすであろう影響程度を定量的に評価することは極めて困難なことではあるが、何らかの根拠を持って、その影響を定量的に把握し、地球温暖化に対する具体的な対応策や政策に反映させなければならない状況にある。

このような背景から地球温暖化による日本全国規模の社会基盤施設の脆弱性定量評価が求められている。そこで本研究では河川堤防や高水敷・河岸を対象として、簡易な方法で地球温暖化による海面上昇の影響を想定し、海面上昇に伴う河川堤防堤体材料や高水敷・河岸を構成する土質材料への物理的影響を推察する。

2. 研究の全体概要

本研究の検討フローを図4に示す。まず第一に、日本全域の河川堤防や高水敷・河岸を想定して、いくつかの地域から実際に土質材料を採取する。そして、それらの基本的性質として土粒子の密度と自然含水比の測定を行う。次に、陸水を想定した蒸留水および海水を想定した人工海水を用いて液性限界・塑性限界試験を各土質材料に対し実施し、NPとならず測定値が得られる場合には、その結果から各土質材料の性状変化の簡易評価を行い、河川汽水域の拡大による脆弱性評価を行う。さらに、全ての土質材料に対して、蒸留水および人工海水環境下において定ひずみ速度圧密試験を実施し、その結果と先に行った液性限界・塑性限界試験の結果とを合わせて、各土質材料の河川汽水域の拡大による脆弱性の総合評価を行う。

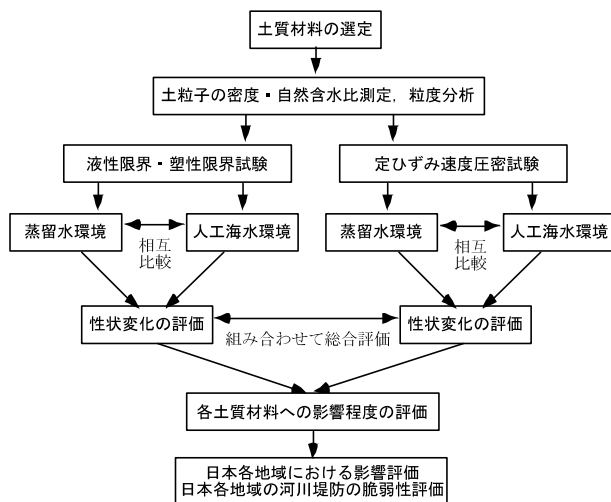


図4 本研究の検討フロー

以上の結果を総合的に評価し、各地域における堤防堤体や高水敷・河岸の河川汽水域の拡大による脆弱性の評価を破堤原因の視点から分類する。なお河川堤防の破堤の原因には降雨、越水、浸透、洗掘、地震、その他の原因による損傷の6項目が考えられている⁴⁾。本研究では、これらの内、沈下に伴う越水、降雨や河川水の浸透、堤体内残留水圧による影響を主な脆弱性要因として分類を行う。

3. 使用した試料

河川堤防は他の土木構造物と異なり、自然に存在する河川の氾濫を防ぐために、地形や地質など人為的に決定できない制約条件の下で築造された構造物である⁴⁾。参考文献4)では、構造物としての堤防の特徴として4項目ほど提示している。例えば、「河川堤防は建設位置を人為的に決められない」ことや「下部構造を人為的に設定できない」などをあげている。すなわち、河川堤防が自然状態の地盤の上に築かれるものであることから、構造物の設計において重要な建設地点や基礎地盤の条件を適切に選択することは不可能である。このような背景と河川堤防には大量の土質材料を必要とすることから、主として経済的な条件から材料選択の余地が少なく、河道掘削に伴って発生する土を利用するなど、現地に近接するところから材料を入手することが多い⁴⁾。以上のことを参考に、本研究では、後述の地点から採取した9種類の土質材料、すなわち関東ローム、まさ土、1次および2次しらす、赤ぼくおよび黒ぼく、信濃川堤防堤体材料、対雁堤防堤体材料、江別を、堤防堤体材料や高水敷・河岸を構成する材料と想定し選定した。これらの9種類の土質材料は、著者らの研究グループが実際に採取できる状況にあり、また、生成・堆積環境が異なるものであることから選んだ。図5には、選定した各土質材料のおおよその採取地域を日本地図上に表示した。図5に示すように、日本の各地域に分布している土質材料であり、現時点では、おおよそ日本全体の傾向を把握できるものと考えている。各土質材料の採取した地方都市を表1に示し

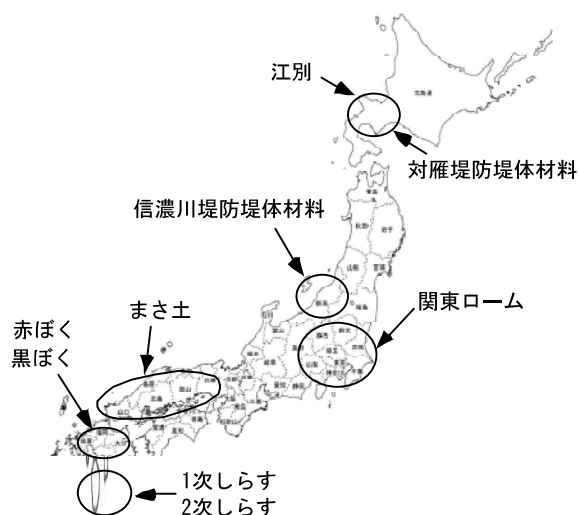


図5 各土質材料の採取地域

表1 本研究で検討対象とした9種類の土質材料と採取した地方都市

土質材料	採取した地方都市	備考
関東ローム	茨城県水戸市	
赤ぼく	大分県豊後大野市	下位ローム
黒ぼく	大分県豊後大野市	上位ローム
1次しらす	鹿児島県鹿児島市	田上の小山の崖にて採取
2次しらす	鹿児島県鹿児島市	田上川河床にて採取
まさ土	山口県岩国市	
信濃川堤防堤体材料	新潟県信濃川	河川堤防築堤材料
対雁堤防堤体材料	北海道江別市	河川堤防築堤材料
江別	北海道江別市	北海道江別市にて採取

た。各土質材料の基本的性質として、土粒子の密度と自然含水比を表2に、図6には、「土の粒度試験方法 (JIS A1204:2000)」⁵⁾に基づき取得した各土質材料の粒径加積曲線を示した。

4. 液性限界・塑性限界の観点からの海面上昇による河川堤防や高水敷・河岸を想定した土質材料の変状の簡易評価

4.1 検討対象試料と実験手順

陸水を想定した蒸留水および海水を想定した人工海水を用いて実施した液性限界・塑性限界試験により、各材料の変状を評価した。人工海水には市販のものをを用いた。人工海水の主要な陽イオン濃度を表3に示す。試験手順は「土の液性限界・塑性限界方法 (JIS A 1205:1999)」⁵⁾に規

表2 使用した土質材料の基本的性質

土質材料	土粒子の密度 (Mg/m ³)	自然含水比 (%)
関東ローム	2.702	101.3
赤ぼく	2.742	96.2
黒ぼく	2.435	74.2
1次しらす	2.365	12.1
2次しらす	2.680	10.0
まさ土	2.659	2.6
信濃川堤防堤体材料	2.661	23.2
対雁堤防堤体材料	2.683	23.9
江別	2.660	19.7

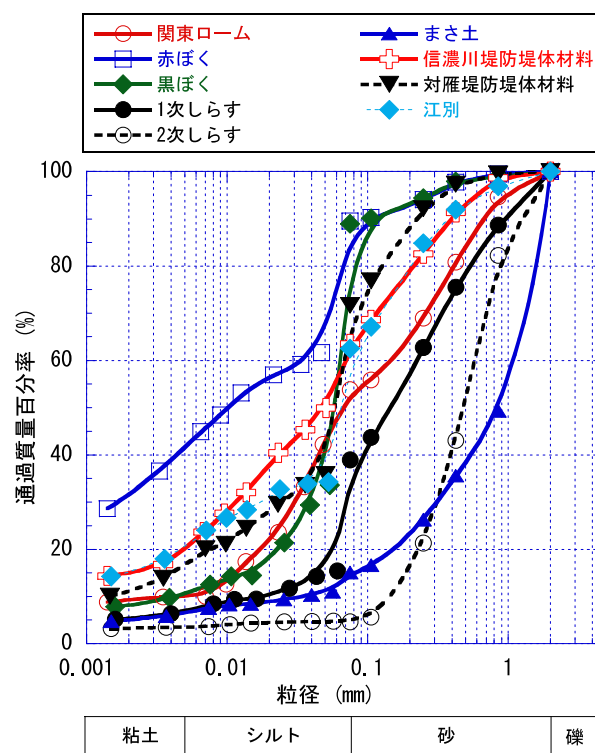


図6 各土質材料の粒径加積曲線

定される方法により実施した。表1に示した土質材料の内、液性限界・塑性限界試験の実験値がNPとならなかったものは、関東ローム、赤ぼくおよび黒ぼくであった。

4.2 実験結果と簡易評価

図7に関東ローム、赤ぼくおよび黒ぼくの液性限界試験による流動曲線を示す。また表4に液性限界・塑性限界試験の結果一覧を表示した。

これらの結果から、関東ロームの場合、人工海水におけ

表3 使用した人工海水のNa, Ca, K, Mgイオン濃度

各陽イオン濃度(mol/m ³)			
Naイオン	Caイオン	Kイオン	Mgイオン
454.4	6.2	9.0	50.0

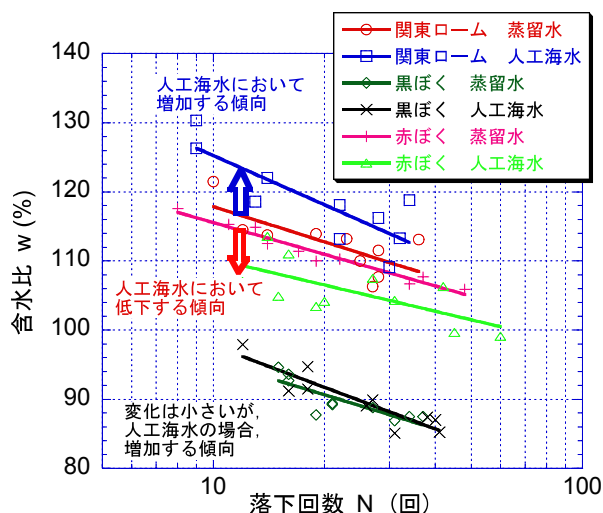


図 7 蒸留水および人工海水を用いた液性限界試験における流動曲線

表 4 液性限界・塑性限界試験結果一覧

試料		関東ローム	赤ぼく	黒ぼく
液性 限界	W _{L-dw} (%)	111.1	109.5	89.1
	W _{L-sw} (%)	115.6	105.3	89.8
塑性 限界	W _{P-dw} (%)	80.6	75.5	70.9
	W _{P-sw} (%)	83.1	70.9	65.4
塑性 指数	I _{P-dw}	29.4	34.5	19.1
	I _{P-sw}	31.9	36.6	24.6

液性限界、塑性限界および塑性指数の欄において、上段の数値は蒸留水を用いた場合、下段の数値は人工海水を用いた場合の各実験地を示す。

る液性限界 w_{L-sw} および塑性限界 w_{P-sw} が、蒸留水における液性限界 w_{L-dw} および塑性限界 w_{P-dw} と比べて高い値を示す。このことから関東ロームでは、人工海水が侵入すると保水能力が高くなり、蒸留水の場合に比べて変状しにくくなるものと推察される。すなわち関東ロームは海水環境に変遷してもその変状に関する影響は少ないものと考えられる。

一方、赤ぼくにおいては、人工海水における液性限界 w_{L-sw} および塑性限界 w_{P-sw} が、蒸留水における w_{L-dw} および w_{P-dw} と比べて低い値を示す。このことから赤ぼくにおいては、海水環境下では保水能力が低下し、海水侵入により変状しやすくなるものと考えられる。すなわち赤ぼくの場合、海水環境に変遷することにより少ない水分で変状を示し、土の強度低下などの影響が生じると推察される。

黒ぼくに関してはいずれの水溶液においても、ほぼ同じ液性限界を示したが、塑性限界は人工海水の場合の方が小さい値を呈したことから、黒ぼくも海水環境に変遷するこ

とにより、やや保水能力が低下するものと考えられる。

上述の関東ローム、赤ぼく、黒ぼくの液性限界・塑性限界に対する水質の影響メカニズムについては、各土質材料の鉱物組成および土質材料周辺の水質変化の観点から検討する必要がある。具体的には、各水質環境下での各土質材料の X 線回折などによる鉱物学的変化などの詳細な調査を行い、その結果に基づき考察する必要がある。しかし本研究では、そのような詳細な分析を実施するまでに至ってなく、現段階では定量的な考察はできない。関東ロームについては、その主成分であるアロフェンは一般に負に帯電しており、人工海水中の Na, Ca, Mg などの陽イオンを粒子周辺に保持しやすくなるに伴い、水分子も保有しやすくなると推測され、これに起因して液性限界および塑性限界が高くなると考察できる。しかし、上述のような各土質材料の鉱物組成や土質材料周辺の水質変化分析を行った結果ではないので、あくまで推論である。赤ぼくや黒ぼくについても同様に、鉱物組成や水質分析を行ってない現段階でのメカニズム考察はできない。本章では、蒸留水から海水に変遷する条件での各土質材料の物理的性質である液性限界・塑性限界の変化を概観すると共に、それに基づく各土質材料に生じうる挙動を予測した。予測した挙動の詳細なメカニズムについては、今後、鉱物分析や水質分析を行い検討する予定である。

5. 一次元圧密特性の観点からの海面上昇による河川堤防や高水敷・河岸を想定した土質材料の変状の簡易評価

本章では、蒸留水および人工海水環境下において各土質材料の一次元圧密特性を定ひずみ速度圧密試験により調査し、その結果から河川堤防や高水敷・河岸を想定した場合の海面上昇による変状を簡易評価した。

5.1 実験装置および方法

本研究において一次元圧密特性を調査する方法は、「土の定ひずみ速度載荷による圧密試験方法 (JIS A 1227:2000)」⁵⁾に規定されている方法に準拠した。本試験により得られる結果から、各土質材料の圧縮性と圧密係数を算出し、沈下特性や透水係数の推定を行い、それに基づき河川堤防堤体や高水敷・河岸の変状予測を行った。

図 8 は、定ひずみ速度圧密試験装置の概要を示す。この試験装置は海水環境下での実験が行えるように、耐腐食性の高い SUS316L で製作されている。使用する水溶液には蒸留水と市販の人工海水 (表 3 参照) を用いた。供試体は粒径 2mm 以下の試料を使用し、直径 60mm、高さ 20mm を目標に作製した。供試体の作製方法は図 9 に手順を示すと共に、次の通りである。

- ① 圧密容器を組み立てる (図 9(b)参照)。
- ② 圧密容器に試料を投入し (図 9(c)参照)、供試体端面

から 30mm の高さから突き固め棒（質量：502.2g）を 50 回自由落下させ、突き固める（図 9(d)参照）。なお、一層当たりの層厚は、締固め後においておよそ 5mm となるように実施した。

- ③ 各層を突き固めた後は、ドライバーなどで表面を削り、層境界部が発生しないようにする。
- ④ ②、③を 4 回繰り返し、高さ 20mm となる供試体の締固め作製を行う（図 9(e)参照）。
- ⑤ 最後に、カラーを外し圧密リングからはみ出た部分を削り取り、供試体作製の完成とする（図 9(f)参照）。
- ⑥ 供試体の上下端部にメンブレンフィルター（親水性ポリプロピレン）を設置する。なお、メンブレンフィルターは直径 60mm、厚さ 25 μ m であり、孔径は 0.25~0.075 μ m、密度 0.49Mg/m³、ポアソン比 0.50 である。
- ⑦ SUS316L 製定ひずみ速度圧密試験装置に設置する（図 8 参照）。
- ⑧ 使用した試料の含水比を測定する。

なお、上記の②における供試体の締固め方法については、実際の河川堤防の建設施工を模擬した条件で行うべきで



図 8 SUS316L 製定ひずみ速度圧密試験装置

あり、そのためには各土質材料の締固め試験を実施し、最大乾燥密度と最適含水比を測定する必要がある。しかし本研究においては、1 種類の土質材料当たりの採取量は少なく、締固め試験の実施が困難であった。そこで、下記に示す式(1)を適用し⁹⁾、関東ロームにおいて塑性限界の値から最大乾燥密度を算出した。なお式(1)はローム質土などに適用が高いと言われている。

$$\rho_{dmax} = \frac{1}{0.011w_p + 0.4} \quad (1)$$

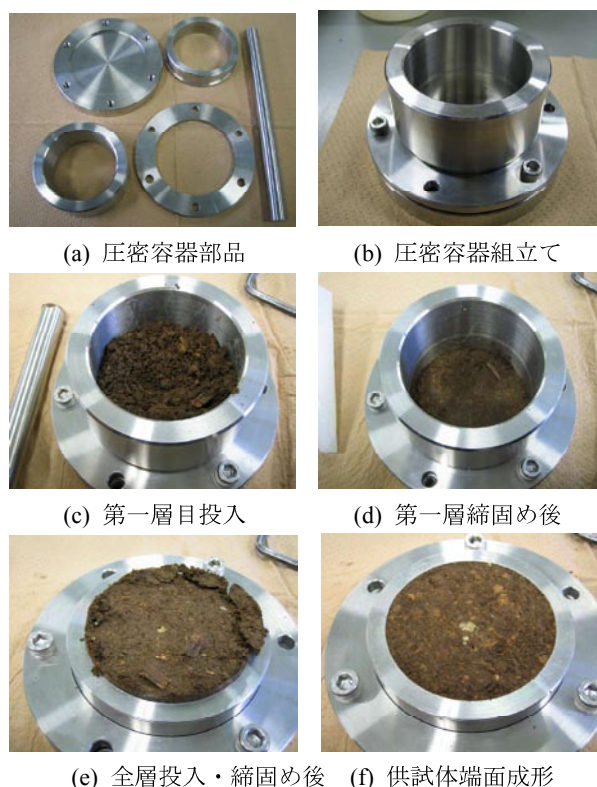


図 9 供試体作製手順 ((a)→(f)の順)

ここに、 ρ_{dmax} は最大乾燥密度(g/cm³)、 w_p は塑性限界(%) である。

表 4 に示すように、蒸留水環境下での関東ロームの塑性限界の値は 80.6%であることから、式(1)より算出される関東ロームの最大乾燥密度は 0.775 g/cm³ と計算される。図 9(b)の圧密容器を用いて関東ロームの締固めの予備実験を数回実施し、先の 0.775 g/cm³ 程度の乾燥密度が達成できる方法として、上記の②に示す締固め方法を設定した。

次に、作製完了した供試体と圧密容器底部・加圧部多孔板を飽和させるために背圧（50~100kPa）を作用させ、通水を行った。通水には、脱気した蒸留水および人工海水を用いた。供試体上部から給水し、供試体下部へと通水することにより供試体の飽和を図った。供試体の飽和の確認は、片面排水条件で背圧を作用させ、5 分以内に供試体の上下端において測定した間隙水圧が同じ値を示せば、供試体内の間隙部分は水で満たされていると考え、供試体は飽和したと判断した。試験は片面排水条件、ひずみ速度 0.01mm/min、背圧 50kPa に設定し実施した。ただし、関東ロームの人工海水を使用したケースにおいて、上記の条件・方法では供試体の飽和が確認できなかった。そこで背圧を 100 kPa に増加させることにより、飽和が確認されたので本条件にて実施した。

5.2 実験結果と簡易評価

表 5~13 は 9 種類の各土質材料の供試体条件と一次元圧密特性を示す。また、図 10~18 には、定ひずみ速度圧密試験により得た各土質材料の e-logP 曲線を示す。

表5 関東ロームの供試体条件と一次元圧密特性

	水質	蒸留水	人工海水
供試体条件	初期間隙比 e_0	2.937	2.817
	初期体積比 f_0	3.937	3.817
	初期含水比 w_0 (%)	102.945	99.599
	初期飽和度 S_{r0} (%)	94.653	95.497
	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.702	2.702
	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.393	1.413
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	0.686	0.708
圧密特性	圧密降伏応力 p_c (kN/m ²)	298	355.4
	圧縮指数 C_c	0.989	0.880
	体積圧縮係数 m_v (m ² /kN)	2.3×10^{-4}	1.7×10^{-4}
	圧密係数 c_v (cm ² /d)	4.3×10^2	3.7×10^2
	透水係数 k (cm/s)	1.12×10^{-7}	7.14×10^{-8}

表9 2次しらすの供試体条件と一次元圧密特性

	水質	蒸留水	人工海水
供試体条件	初期間隙比 e_0	0.879	0.884
	初期体積比 f_0	1.879	1.884
	初期含水比 w_0 (%)	10.000	10.010
	初期飽和度 S_{r0} (%)	30.472	30.339
	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.680	2.680
	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.569	1.565
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.426	1.423
圧密特性	圧密降伏応力 p_c (kN/m ²)	3906	3585
	圧縮指数 C_c	0.277	0.278
	体積圧縮係数 m_v (m ² /kN)	1.3×10^{-5}	1.5×10^{-5}
	圧密係数 c_v (cm ² /d)	1.2×10^5	8.0×10^4
	透水係数 k (cm/s)	1.77×10^{-6}	1.36×10^{-6}

表6 赤ぼくの供試体条件と一次元圧密特性

	水質	蒸留水	人工海水
供試体条件	初期間隙比 e_0	2.797	2.865
	初期体積比 f_0	3.797	3.865
	初期含水比 w_0 (%)	96.894	95.516
	初期飽和度 S_{r0} (%)	94.914	91.399
	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.742	2.742
	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.422	1.387
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	0.722	0.709
圧密特性	圧密降伏応力 p_c (kN/m ²)	312.7	248.4
	圧縮指数 C_c	0.992	0.998
	体積圧縮係数 m_v (m ² /kN)	2.2×10^{-4}	2.8×10^{-4}
	圧密係数 c_v (cm ² /d)	4.3×10^2	4.0×10^2
	透水係数 k (cm/s)	1.07×10^{-7}	1.27×10^{-7}

表10 まさ土の供試体条件と一次元圧密特性

	水質	蒸留水	人工海水
供試体条件	初期間隙比 e_0	0.640	0.667
	初期体積比 f_0	1.640	1.667
	初期含水比 w_0 (%)	2.602	2.602
	初期飽和度 S_{r0} (%)	10.809	10.369
	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.659	2.659
	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.664	1.637
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.622	1.595
圧密特性	圧密降伏応力 p_c (kN/m ²)	5264	4482
	圧縮指数 C_c	0.131	0.131
	体積圧縮係数 m_v (m ² /kN)	7.1×10^{-6}	8.5×10^{-6}
	圧密係数 c_v (cm ² /d)	7.0×10^4	3.5×10^5
	透水係数 k (cm/s)	5.64×10^{-7}	3.38×10^{-6}

表7 黒ぼくの供試体条件と一次元圧密特性

	水質	蒸留水	人工海水
供試体条件	初期間隙比 e_0	2.035	1.953
	初期体積比 f_0	3.035	2.953
	初期含水比 w_0 (%)	74.561	73.894
	初期飽和度 S_{r0} (%)	89.131	92.113
	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.435	2.435
	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.400	1.434
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	0.802	0.825
圧密特性	圧密降伏応力 p_c (kN/m ²)	451.1	462.9
	圧縮指数 C_c	0.625	0.590
	体積圧縮係数 m_v (m ² /kN)	1.5×10^{-4}	1.3×10^{-4}
	圧密係数 c_v (cm ² /d)	1.1×10^3	7.0×10^2
	透水係数 k (cm/s)	1.87×10^{-7}	1.03×10^{-7}

表11 信濃川堤防堤体材料の供試体条件と一次元圧密特性

	水質	蒸留水	人工海水
供試体条件	初期間隙比 e_0	0.684	0.685
	初期体積比 f_0	1.684	1.685
	初期含水比 w_0 (%)	22.550	23.804
	初期飽和度 S_{r0} (%)	87.704	92.412
	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.661	2.661
	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.937	1.955
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.580	1.579
圧密特性	圧密降伏応力 p_c (kN/m ²)	1792	3701
	圧縮指数 C_c	0.161	0.151
	体積圧縮係数 m_v (m ² /kN)	2.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}
	圧密係数 c_v (cm ² /d)	7.0×10^3	4.7×10^3
	透水係数 k (cm/s)	1.59×10^{-7}	5.34×10^{-8}

表8 1次しらすの供試体条件と一次元圧密特性

	水質	蒸留水	人工海水
供試体条件	初期間隙比 e_0	1.122	1.147
	初期体積比 f_0	2.122	2.147
	初期含水比 w_0 (%)	12.100	13.284
	初期飽和度 S_{r0} (%)	25.499	27.370
	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.365	2.365
	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.249	1.248
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.115	1.101
圧密特性	圧密降伏応力 p_c (kN/m ²)	2120	2360
	圧縮指数 C_c	0.476	0.484
	体積圧縮係数 m_v (m ² /kN)	3.3×10^{-5}	3.0×10^{-5}
	圧密係数 c_v (cm ² /d)	9.5×10^4	1.3×10^5
	透水係数 k (cm/s)	3.56×10^{-6}	4.43×10^{-6}

表12 対雁堤防堤体材料の供試体条件と一次元圧密特性

	水質	蒸留水	人工海水
供試体条件	初期間隙比 e_0	1.081	1.102
	初期体積比 f_0	2.081	2.102
	初期含水比 w_0 (%)	23.864	22.954
	初期飽和度 S_{r0} (%)	59.208	55.861
	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.683	2.683
	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.597	1.569
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.289	1.276
圧密特性	圧密降伏応力 p_c (kN/m ²)	303.5	185.7
	圧縮指数 C_c	0.310	0.320
	体積圧縮係数 m_v (m ² /kN)	1.7×10^{-4}	2.8×10^{-4}
	圧密係数 c_v (cm ² /d)	2.0×10^3	5.5×10^3
	透水係数 k (cm/s)	3.86×10^{-7}	1.75×10^{-6}

表 13 江別の供試体条件と一次元圧密特性

供試体条件	水質	蒸留水	人工海水
	初期間隙比 e_0	1.053	1.082
	初期体積比 f_0	2.053	2.082
	初期含水比 w_0 (%)	19.739	19.739
	初期飽和度 S_{r0} (%)	48.726	47.430
	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.600	2.600
	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.516	1.496
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.266	1.249
圧密特性	圧密降伏応力 p_c (kN/m ²)	311.3	261.1
	圧縮指数 C_c	0.268	0.281
	体積圧縮係数 m_v (m ² /kN)	1.5×10^{-4}	1.8×10^{-4}
	圧密係数 c_v (cm ² /d)	2.7×10^3	7.0×10^4
	透水係数 k (cm/s)	4.60×10^{-7}	1.43×10^{-5}

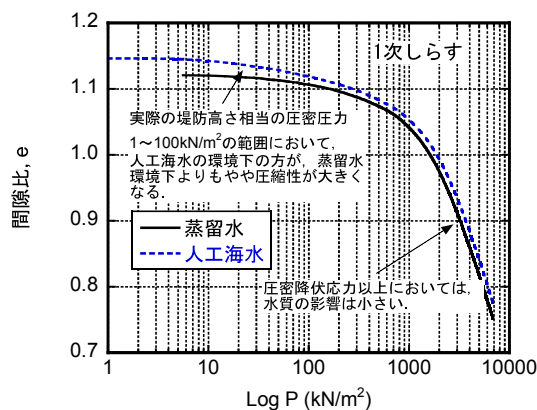


図 13 1次しらすの e-logP 曲線

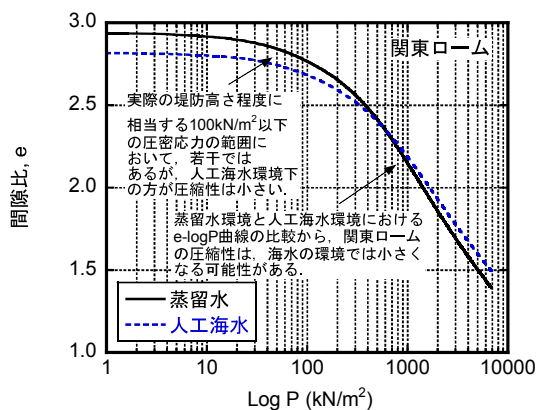


図 10 関東ロームの e-logP 曲線

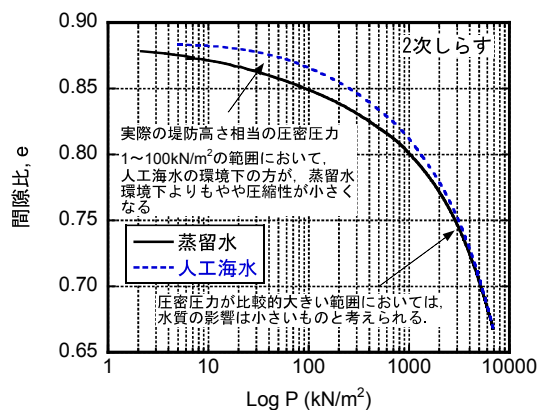


図 14 2次しらすの e-logP 曲線

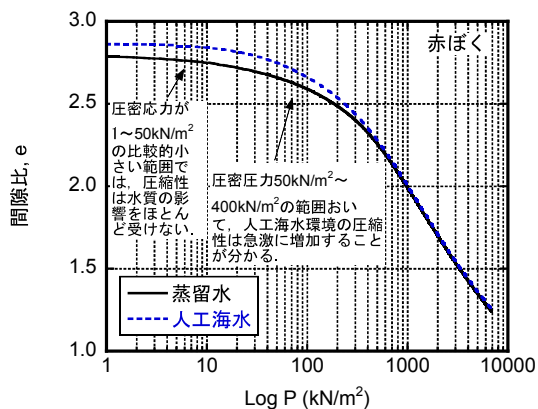


図 11 赤ぼくの e-logP 曲線

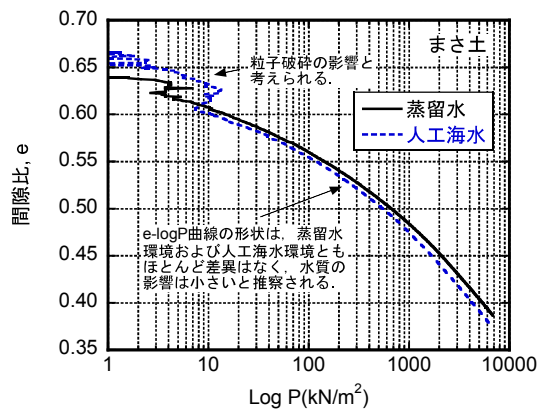


図 15 まさ土の e-logP 曲線

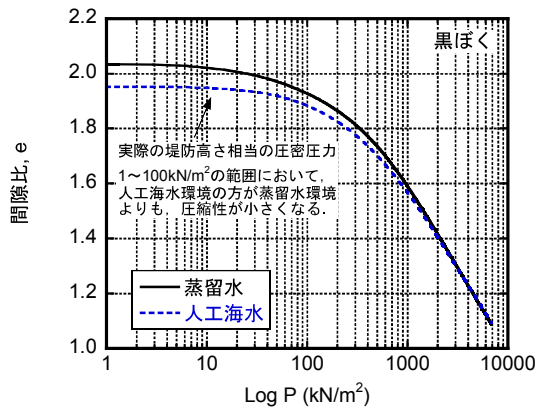


図 12 黒ぼくの e-logP 曲線

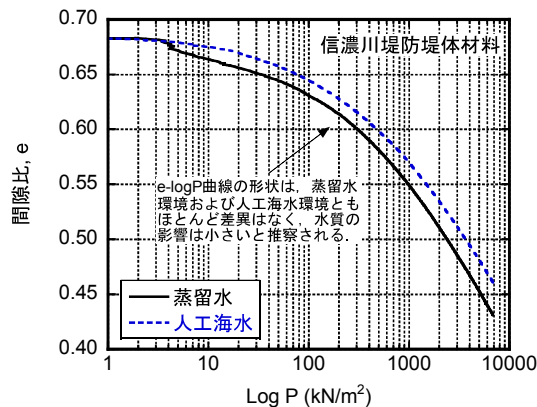


図 16 信濃川堤防堤体材料の e-logP 曲線

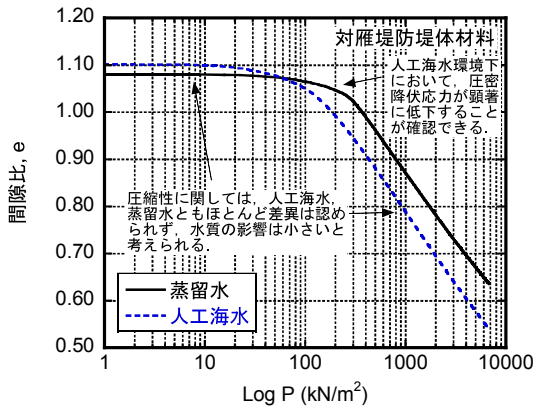


図 17 対雁堤防堤体材料の e-logP 曲線

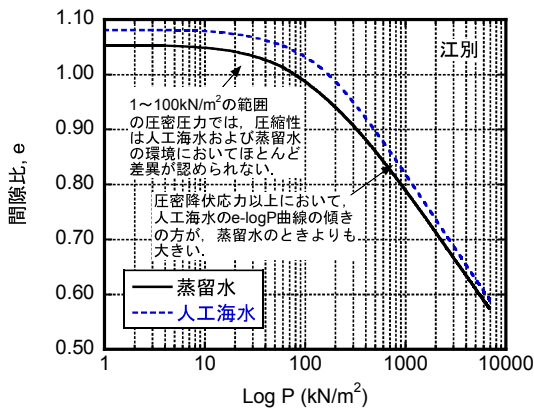


図 18 江別の e-logP 曲線

以下に、関東ローム、赤ぼく、黒ぼくを例に、実験結果に基づく考察を行う。表 5 および図 10 の関東ロームの試験結果より、人工海水を用いた場合の e-logP 曲線は、蒸留水の e-logP 曲線と比べて、間隙比の低下が小さいことが分かる。圧縮指数 C_c は蒸留水環境において 0.989 であるのに対し、人工海水環境では 0.880 と小さくなる。すなわち、関東ロームは、人工海水環境下において圧縮性が減少するものと考えられ、この結果は、4.2 節で述べた液性限界・塑性限界の観点からの考察と整合している。また、透水係数の低下も、表 5 より認められる。透水係数 k は蒸留水を用いた場合が $1.12 \times 10^{-7}(\text{cm/s})$ に対し、人工海水を用いた場合が $7.14 \times 10^{-8}(\text{cm/s})$ と算出され、約 30% の透水係数の低下が認められた。体積圧縮係数 m_v や圧密係数 c_v も人工海水を用いた場合の方が若干低下した。以上より、関東ロームは、海水の影響により圧縮性の減少や圧密係数の低下が考えられる。

一方、赤ぼくにおいては、表 6 および図 11 に示すように、圧密圧力が $50 \sim 400 \text{kN/m}^2$ の範囲において、e-logP 曲線の勾配は、人工海水環境の方がやや大きくなる事が分かる。これらのことから、赤ぼくの場合、堤防下部に相当する圧密応力において特に、人工海水環境下において圧縮性が増加するものと推察される。この結果は、4.2 節で述べた液性限界・塑性限界の観点からの考察とほぼ整合している。

また、表 7 および図 12 に実験結果を示す黒ぼくにおいては、実際の堤防高さ相当の圧密圧力 $1 \sim 100 \text{kN/m}^2$ の範囲において、人工海水環境の方が圧縮性がやや小さくなる傾向が認められる。圧縮指数 C_c の値は、蒸留水を用いた場合が 0.625、人工海水を用いた場合が 0.590 となり、若干ではあるが人工海水の方が小さい値を示した。透水係数について、人工海水を用いた場合の方が蒸留水を用いた場合に比べ 45% 減となっている。圧密係数 c_v も減少していることから圧密速度が遅くなると考えられる。

以上に関東ローム、赤ぼく、黒ぼくを例に考察を述べた。その他の土質材料に関する考察は、図 13~18 に示す e-logP 曲線の図中に、それぞれ記した。

表 14 は、本研究で使用した 9 種類の土質材料に対して求められる蒸留水および人工海水環境における圧縮指数 C_c 、体積圧縮係数 m_v 、圧密係数 c_v および透水係数 k を示す。また、これらの数値に基づき、各土質材料の圧縮指数 C_c 、体積圧縮係数 m_v 、圧密係数 c_v および透水係数 k が、蒸留水から人工海水に変遷することによる各物理量の増減率を表 15 に示す。すなわち、表 15 に示す値は、次式により計算される。

$$Index_{T15} = \left| \frac{prop_{seawater} - prop_{distilledwater}}{prop_{distilledwater}} \right| \times 100 (\%) \quad (2)$$

ここに、 $Index_{T15}$: 表 15 中の数値、 $prop_{seawater}$: 表 14 中の人工海水における圧縮指数、体積圧縮係数、圧密係数、透水係数のいずれかの値、 $prop_{distilledwater}$: 表 14 中の蒸留水における圧縮指数、体積圧縮係数、圧密係数、透水係数のいずれかの値、なお、表 15 中には、増減を表す用語を付記している。

表 15 に示す圧縮指数 C_c と体積圧縮係数 m_v の増減率の結果から、蒸留水から人工海水に変遷することにより圧縮性が大きくなる土質試料は赤ぼく、1 次しらす、2 次しらす、対雁堤防堤体材料および江別の圧縮性が大きくなるものと推察される。まさ土については、体積圧縮係数 m_v が増加しているけれども、圧縮指数 C_c の増減はほとんどない。図 15 に示すように、 10 kN/m^2 以下の比較的低い圧密圧力において、粒子破碎に起因すると考えられる圧縮が生じているが、それ以降は、人工海水環境と蒸留水環境において e-logP 曲線の形状にほとんど差異がないことから、水質による圧縮性の変化は少ないものと推察した。土質試料の圧縮性の増加は、堤防堤体や高水敷・河岸の沈下量の増加の可能性を示唆すると考えられる。

次に、表 15 に示す圧密係数 c_v の増減率の結果から、蒸留水から人工海水への変遷により圧密速度が増加する土質試料は 1 次しらす、まさ土、対雁堤防堤体材料、江別と判断される。土質試料の圧密速度の増加は、堤防堤体や高水敷・河岸の沈下速度の増大を意味すると言える。すなわち、堤防堤体内や高水敷・河岸内に海水が侵入すると、通常時の陸水のときに比べて沈下する速度が増加するもの

表 14 蒸留水および人工海水環境下における各土質試料の圧縮指数, 体積圧縮係数, 圧密係数および透水係数

土質材料	水溶液	C _c	m _v	c _v	k
関東ローーム	蒸留水	0.989	2.3×10 ⁻⁴	4.3×10 ²	1.12×10 ⁻⁷
	人工海水	0.880	1.7×10 ⁻⁴	3.7×10 ²	7.14×10 ⁻⁸
赤ぼく	蒸留水	0.992	2.2×10 ⁻⁴	4.3×10 ²	1.07×10 ⁻⁷
	人工海水	0.998	2.8×10 ⁻⁴	4.0×10 ²	1.27×10 ⁻⁷
黒ぼく	蒸留水	0.625	1.5×10 ⁻⁴	1.1×10 ³	1.87×10 ⁻⁷
	人工海水	0.590	1.3×10 ⁻⁴	7.0×10 ²	1.03×10 ⁻⁷
1次しらす	蒸留水	0.476	3.3×10 ⁻⁵	9.5×10 ⁴	3.56×10 ⁻⁶
	人工海水	0.484	3.0×10 ⁻⁵	1.3×10 ⁵	4.43×10 ⁻⁶
2次しらす	蒸留水	0.277	1.3×10 ⁻⁵	1.2×10 ⁵	1.77×10 ⁻⁶
	人工海水	0.278	1.5×10 ⁻⁵	8.0×10 ⁴	1.36×10 ⁻⁶
まさ土	蒸留水	0.131	7.1×10 ⁻⁶	7.0×10 ⁴	5.64×10 ⁻⁷
	人工海水	0.131	8.5×10 ⁻⁶	3.5×10 ⁵	3.38×10 ⁻⁶
信濃川堤防堤体材料	蒸留水	0.161	2.0×10 ⁻⁵	7.0×10 ³	1.59×10 ⁻⁷
	人工海水	0.151	1.0×10 ⁻⁵	4.7×10 ³	5.34×10 ⁻⁸
対雁堤防堤体材料	蒸留水	0.310	1.7×10 ⁻⁴	2.0×10 ³	3.86×10 ⁻⁷
	人工海水	0.320	2.8×10 ⁻⁴	5.5×10 ³	1.75×10 ⁻⁶
江別	蒸留水	0.268	1.5×10 ⁻⁴	2.7×10 ³	4.60×10 ⁻⁷
	人工海水	0.281	1.8×10 ⁻⁴	7.0×10 ⁴	1.43×10 ⁻⁵

C_c: 圧縮指数, m_v: 体積圧縮係数(m²/kN), c_v: 圧密係数(cm²/day)
k: 透水係数(cm/s)

と予想される。さらに、表 15 に示す透水係数 k の増減率の結果から、蒸留水から人工海水へ変遷することにより、透水係数が増加する土質試料は赤ぼく、1次しらす、まさ土、対雁堤防堤体材料、江別と判断される。一方、透水係数が低下する土質材料は、関東ローーム、黒ぼく、2次しらす、信濃川堤防堤体材料と判断される。透水係数の増加は、堤防堤体内や高水敷・河岸内の浸潤面が高くなることにより、浸潤面以下の堤防堤体や高水敷・河岸の強度が低下することが推測される。それに対して、透水係数が著しく低下することにより生じる問題も考えられる。すなわち、透水係数が非常に低下することにより迅速な排水が困難となるため堤防堤体内や高水敷・河岸内の残留水圧が高くなることが予想される。特に堤防堤体の場合は、残留水圧によって堤体内の有効応力が低下し、それに起因する強度低下が予想される。

以上の考察を総括し、図 19 に示す河川汽水域の拡大による堤防堤体や高水敷・河岸の土質材料への影響評価簡易マップを提案する。そして海面上昇に伴う河川汽水域の拡大による堤防堤体や高水敷・河岸の土質材料への影響は、以下の通りと予想される。なお、将来を具体的な時間として示す評価レベルにはないことを付記する。

1) 北海道: 対雁堤防堤体材料および江別の実験結果の総括から、本地域の堤防堤体や高水敷・河岸の土質材料

表 15 蒸留水から人工海水に変遷することによる圧縮指数, 体積圧縮係数, 圧密係数および透水係数の増減率

土質材料	C _c の増減率	m _v の増減率	c _v の増減率	kの増減率
関東ローーム	11.0%減	26.1%減	14.0%減	36.3%減
赤ぼく	0.6%増	27.3%増	7%減	18.7%増
黒ぼく	5.6%減	13.3%減	36.4%減	44.9%減
1次しらす	1.7%増	9.1%減	36.8%増	24.4%増
2次しらす	0.4%増	15.4%増	33.3%減	23.2%減
まさ土	増減なし	19.7%増	400%増	499%増
信濃川堤防堤体材料	6.2%減	50%減	32.9%減	66.4%減
対雁堤防堤体材料	3.2%増	64.7%増	175%増	353.4%増
江別	4.9%増	20%増	2493%増	3009%増

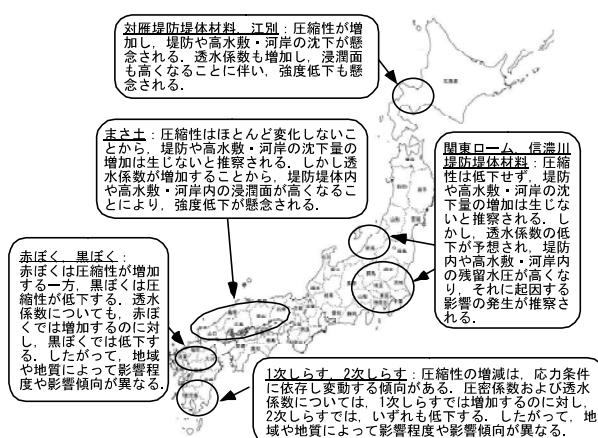


図 19 河川汽水域の拡大による堤防堤体や高水敷・河岸の土質材料への影響評価簡易マップ

では海水が侵入することにより圧縮性が増加し、堤防や高水敷・河岸の沈下が懸念される。透水係数も増加することから、河川水の浸透が容易になり堤防堤体内や高水敷・河岸内の浸潤面が高くなることにより、浸潤面以下の堤防堤体や高水敷・河岸の強度が低下することが推測される。

- 2) 関東・信越地方: 関東ローームおよび信濃川堤防堤体材料の実験結果の総括から、本地域の堤防堤体や高水敷・河岸の土質材料では圧縮性は低下しないと考えられ、沈下量の増加は生じないと推察される。しかし、透水係数の低下が予想され、堤防堤体内や高水敷・河岸内の残留水圧が高くなり、それに起因する影響の発生が推察される。
- 3) 中国地方: まさ土の実験結果の総括から、本地域の堤防堤体や高水敷・河岸の土質材料では、圧縮性はほとんど変化しない。しかし透水係数が増加することから、河川水の浸透が容易になり堤防堤体内や高水敷・河岸内の浸潤面が高くなることにより、浸潤面以下の堤防堤体や高水敷・河岸の強度が低下することが推測される。

- 4) 九州地方：赤ぼく，黒ぼく，1次しらすおよび2次しらすのの実験結果の総括から，本地域の堤防堤体や高水敷・河岸の土質材料では，地域や地質の違いによって，圧縮性の増減が異なる。また，圧密速度や透水係数の増減も，地域や地質によって変化するものと推測される。

以上の推察は，土質材料の種類，締固め密度や応力条件という点でかなり限定された実験条件の結果のみに基づいているのは言うまでもない。今後は，より多くの種類の土質材料や広範囲な実験条件の結果を取得し，影響評価簡易マップの信頼性向上を目指していく。

6. 結論

本研究では，日本各地より河川堤防や高水敷・河岸の構成材料と想定される土質材料9種類を選定し，海面上昇に伴う河川汽水域の拡大を想定した液性限界・塑性限界試験および定みずみ速度圧密試験を実施した。これらの結果から，各土質材料の液性限界・塑性限界，圧縮指数，体積圧縮係数，圧密係数および透水係数について，蒸留水および人工海水のそれぞれの環境での各値を測定し，汽水域の拡大により堤防堤体内や高水敷・河岸内に海水成分が侵入した場合に生じる可能性のある事象を，各地域ごとに推察した。また，これらの結果を総括し，河川汽水域の拡大による堤防堤体や高水敷・河岸の土質材料への影響評価簡易マップを提案した。

以上の研究成果は，地球温暖化／海面上昇により河川部の汽水域が拡大すること想定した場合に，河川堤防や高水敷・河岸に生じうる影響や脆弱性を簡易かつ定性的に評価したものであり，地球温暖化問題に対する社会基盤施設としての河川堤防や高水敷・河岸への対策方針の決定に資することが期待される。

謝辞

本研究は，科学技術振興調整費(戦略的拠点育成)の事業のフラッグシッププロジェクト(茨城大学担当分)および環境省地球環境推進研究『温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合評価に関する研究』(研究代表者：茨城大学・三村信男)におけるサブ課題「2(5)沿岸域における気候変動の複合的災害影響・リスクの定量評価と適応策に関する研究」(課題代表者：茨城大学・安原一哉)において実施された研究成果の一部をまとめたものである。また，各土質材料の収集には，基礎地盤コンサルタンツ九州支社，同熊本支店，同鹿児島事務所，復建調査設計(株)，応用地質(株)新潟ラボ，および(独)土木研究所寒地土木研究所の方々にご協力いただきました。また，篠田光貴氏(元茨城大学工学部都市システム工学科学生)には，実験実施に関してご協力いただきました。ここに深謝申し上げます。

参考文献

- 1) 気候変動に関する政府間パネル：IPCC 第4次評価報告書第1作業部会報告書政策決定者向け要約，2007。
- 2) 原沢英夫・西岡秀三：地球温暖化と日本—自然・人への影響予測—，古今書院，pp.1-55, 2003。
- 3) 気象庁：気候変動監視レポート2006，
<http://www.data.kishou.go.jp/climate/cpdinfo/monitor/index.html>
(2006/11/7現在)。
- 4) 中島秀雄：図説 河川堤防，技報堂出版，2003。
- 5) 地盤工学会：土質試験の方法と解説—第一回改訂版—，2000。
- 6) 吉国洋・宇野尚雄・柳沢栄司：新体系土工学17 土の力学—特殊土・締固め・土と水—，技報堂出版，pp. 145-146, 1984。

(2008. 8. 27 受付)

Simplified evaluation on impact of soil materials for levee and river-bank by sea-water level raising due to global warming

Hideo KOMINE¹, Kazuya YASUHARA¹ and Satoshi MURAKAMI¹

1 Department of Urban & Civil Engineering, Faculty of Engineering, Ibaraki University

Abstract

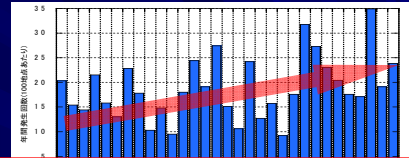
Recently, impact to society by global warming is attracting greater attention in all the world. It is afraid that the global warming is bringing sea-level rising and increases of heavy raining and storm. The IPCC prefigures that the maximum amount of rising sea-level due to global warming will be 59 cm. It is also prefigured that brackish-region in rivers will expand by running of seawater to the upside of rivers. If the above phenomenon will appear, it is afraid that levees and riverbanks made by soil material are affected by seawater. From the background, it is required to evaluate vulnerability of levees and riverbanks as infrastructures in Japan. This study investigates changes of properties of soil materials, which is used to construct levees and riverbanks, by water chemistry in laboratory. The laboratory experiments use the distilled water assuming fresh-water, and the artificial seawater assuming brine-water and brackish-water. From the laboratory experiments, this study evaluates vulnerability of levees and riverbanks as infrastructures by sea-level rising due to global warming.

Key words: levee, global warming, sea-level raising, liquid limit/plastic limit, constant strain rate consolidation test

サブテーマ(3) 温暖化に起因する 海面上昇による沿岸域地盤変状 予測と適応策 2007年度研究報告

茨城大学工学部都市システム工学科
小峯秀雄, 内田佳子, 胸組智光
安原一哉, 村上哲

背景



集中豪雨による降雨, 河川水の浸透に対する河川堤防の脆弱性評価が必要である。

近年では, 日本各地で集中豪雨による河川堤防への被害が発生している。



天竜川の破堤 (信濃毎日新聞より)

研究の目的

日本全国の河川堤防堤体材料について検討することは

困難

日本各地域より採取した代表的な土質材料を用いて, 土の保水性試験を実施し, その結果から集中豪雨時の河川堤防の変形特性を把握する。

安全性の検討, 脆弱性の評価, 適応策の提案。

研究計画時の実施予定項目

- 鉛直拘束圧下における堤防堤体材料の保水性試験
- 不飽和三軸圧縮試験装置を用いた堤防堤体材料の吸水・排水過程における体積変化特性試験
- 堤防堤体材料の水分特性とGISを用いた土壌目・地質分類に基づく河川部脆弱性マップの試作

実際の2007年度実施項目

- 鉛直拘束圧(50kPa)下における堤防堤体材料の吸水過程における保水性試験
- 不飽和三軸圧縮試験装置を用いた堤防堤体材料の吸水・排水過程における体積変化特性試験
- 土の保水性と変形特性を利用した実河川(肝属川/きもつきがわ)の堤防脆弱性評価

土の保水性試験に関する 2006年度と2007年度の内容比較

実施年度	2006年度	2007年度
拘束条件	一次元のみ	一次元と三軸条件の2種類
拘束圧	2.05kPa	一次元:50kPa 三軸条件:50kPa, 100kPa
試料	9種類	一次元:5種類 三軸条件:2種類
供試体作製条件	考慮せず	河川土工マニュアルに準拠
給水条件	排水 (降雨後を想定)	吸水 (降雨中を想定)
成果の応用	降雨後の脆弱性マップ	降雨中の脆弱性評価と適応策

①鉛直拘束圧下における堤防 堤体材料の保水性試験

研究の 流れ

土質試料を選定

ポイント

吸水過程

50kPaの鉛直圧下

河川土工マニュアルに則した供試体の締固め

一次元体積変化を詳細に

一次元変形特性の把握

適応策を提案

本研究に用いた土質試料

土質試料	採取場所	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	自然含水比 w_n (%)
関東ローム	茨城県水戸市	2.691	100.7
乱した一次しらす	鹿児島県鹿児島市	2.460	14.6
乱した二次しらす	鹿児島県鹿児島市	2.631	16.6
赤ぼく	大分県豊後大野市	2.692	95.7
黒ぼく	大分県豊後大野市	2.616	77.5
まき土	山口県岩国市	2.561	2.2
江別	北海道江別市	2.648	21.5
対雁築堤材料	北海道江別市の河川堤防の築堤材料	2.596	20.5
新潟築堤材料	新潟県の信濃川の堤体材料	2.610	21.0
旭川	北海道旭川市	2.680	14.4

土の保水性試験

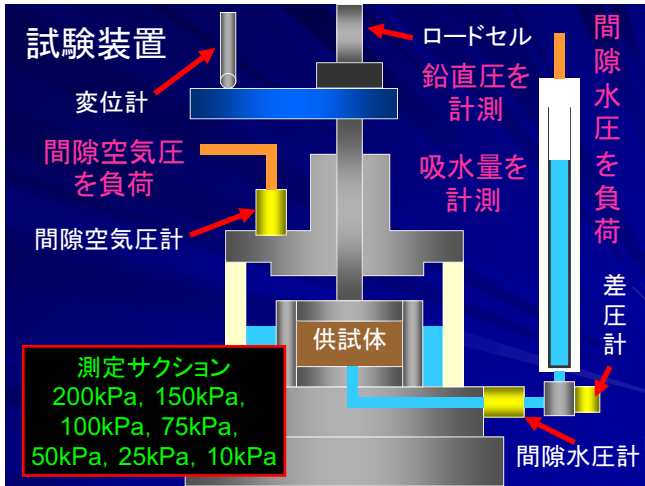
水の吸水による堤体の一次元変形を評価する。

吸水過程における測定サクシオンの範囲を200~10kPaと設定した。

河川堤防の上部を模擬するために、天端からの深さを考慮して鉛直圧50kPaを載荷した。



試験装置



サクシオン (kPa)

$$s = -(u_a - u_w)$$

s : サクシオン (kPa)

w_i : 第*i*段階における含水比 (%)

体積含水率 θ_i (%)

θ_i : 第*i*段階における体積含水率 (%)

$$\theta_i = \frac{w_i \rho_d}{\rho_w}$$

ρ_d : 第*i*段階における供試体の乾燥密度 (g/cm³)

ρ_w : 水の密度 (g/cm³)

排水過程における鉛直ひずみ ε_d (%)

ε_s : 吸水過程におけるひずみ (%)

$$\varepsilon_s = \frac{\Delta h_{si}}{h_{200}} \times 100$$

h_{200} : サクシオン200kPaにおける供試体の高さ (mm)

Δh_{si} : サクシオン200kPaの供試体の高さを基準としたときの第*i*段階における鉛直変位 (mm)

吸水過程における鉛直ひずみ ε_s (%)

ε_d : 排水過程におけるひずみ (%)

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta h_{di}}{h_0} \times 100$$

h_0 : 供試体の初期高さ (mm)

Δh_{di} : 供試体の初期高さを基準としたときの第*i*段階における鉛直変位 (mm)

鉛直ひずみは圧縮を正とする。

目標乾燥密度の設定

河川土工マニュアルにおける河川堤防の締固め度の規定

砂質土は品質下限度値である締固め度80%による規定

粘性土は施工含水比を用いた粘性土の空気間隙率および飽和度の規定

供試体作製時の目標乾燥密度を設定した。

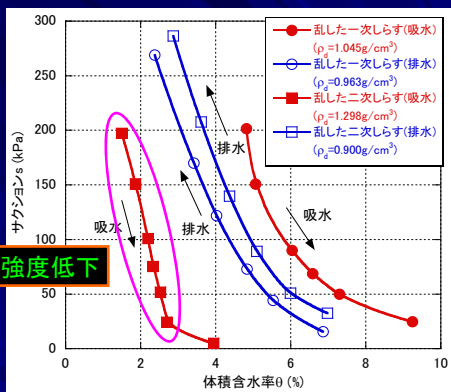
供試体の作製

本研究では実施工の締固めを模擬し、動的締固め方法にて行った。

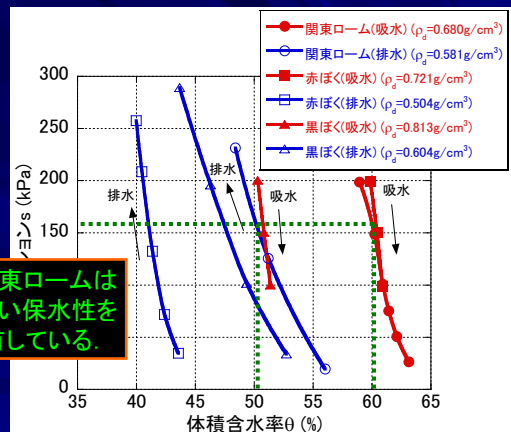
供試体の目標寸法
直径60mm, 高さ20mm



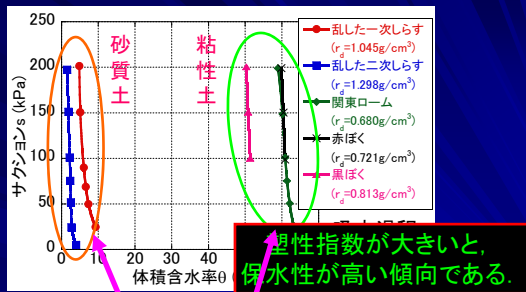
土質試料	含水比 w (%)	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	締固め度 D_c (%)
乱した一次しらす	12.3	1.046	1.174	82.5
乱した二次しらす	18.1	1.298	1.533	84.1
関東ローム	100.0	0.680	1.360	
赤ぼく	92.9	0.716	1.381	
黒ぼく	73.7	0.813	1.412	



砂質土の水分特性曲線

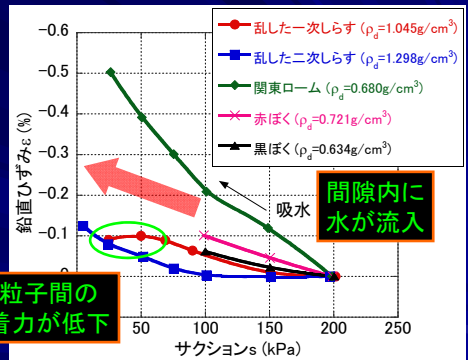


粘性土の水分特性曲線

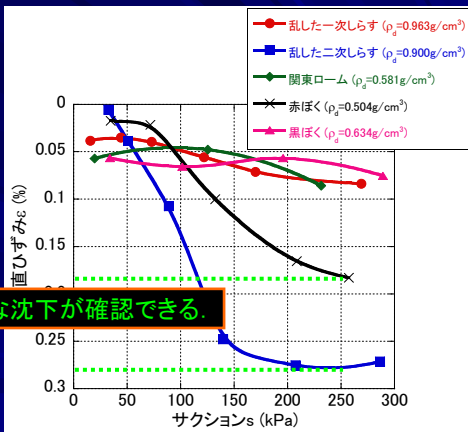


粘性土に比べ、砂質土は低い保水性を有する。

土質試料	液性限度... (%)	塑性限度... (%)	塑性指数
赤ぼく	105.8	60.6	45.2
黒ぼく	97.0	57.2	39.8
乱した一次しらす	NP	NP	NP
乱した二次しらす	NP	NP	NP



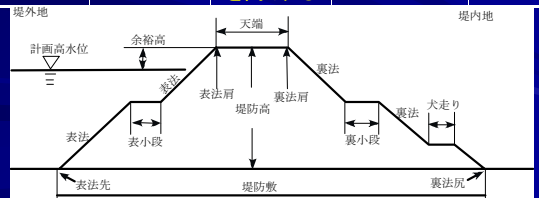
吸水過程におけるサクシオンと鉛直ひずみの関係



排水過程におけるサクシオンと鉛直ひずみの関係

河川堤防への安全性検討および適応策

土質試料	乱した一次しらす	乱した二次しらす	関東ローム	赤ぼく
問題	コラプス沈下	強度低下 越水破壊	残留水が排水しにくい	越水破壊
適応策	表法面に遮水対策	表法面に遮水対策 余裕高を高くする	裏法尻から排水対策	余裕高を高くする



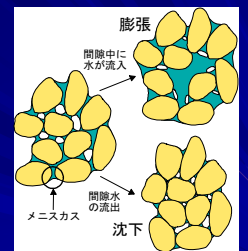
①の結論

・土の保水性試験より、簡易的ではあるが各地域における河川堤防への安全性を検討し、適応策を提案した。

- ・二次しらすは一次しらすに比べ、急激な強度低下を起こす。
- ・関東ロームと赤ぼくは、他の土質試料に比べて、高い保水性を有するため、堤体内の残留水が排水しにくい。
- ・簡易的ではあるが、塑性指数より保水性を評価できる。
- ・一次元変形挙動は、間隙中への水の流入が関連している。

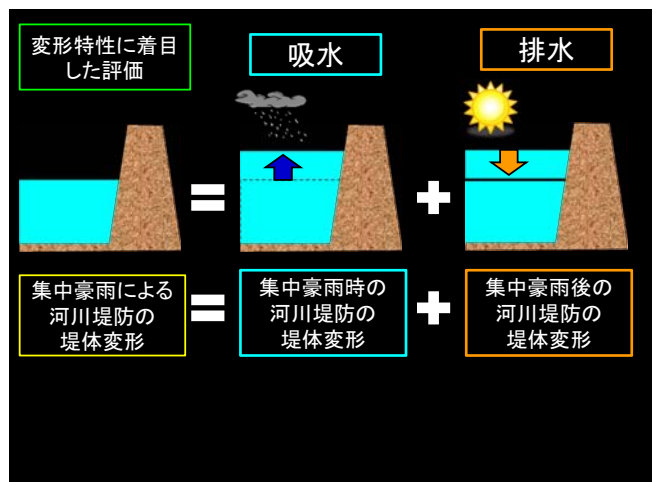
一次元変形のメカニズム

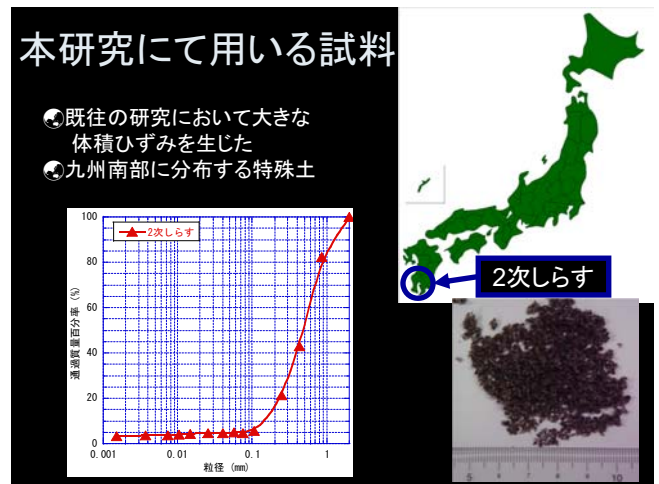
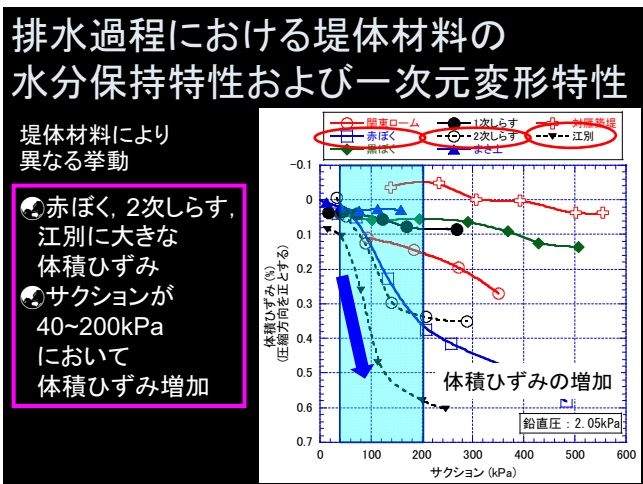
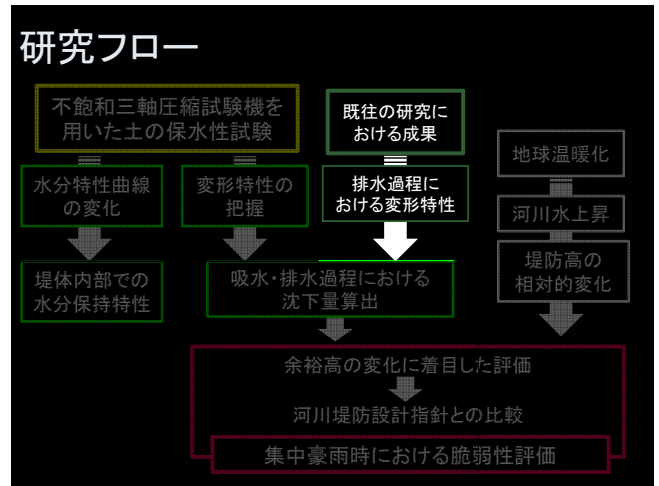
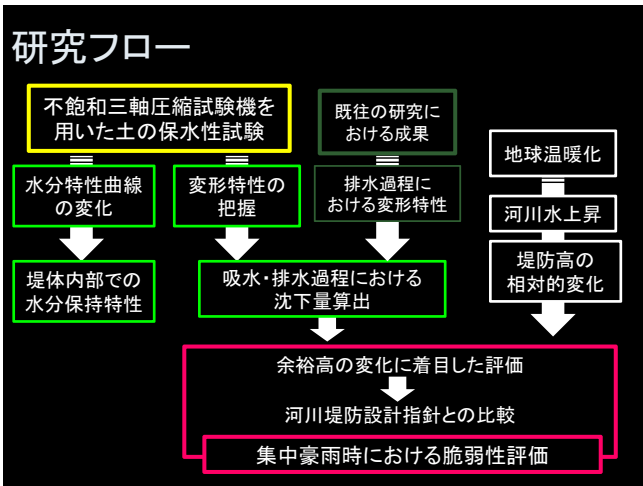
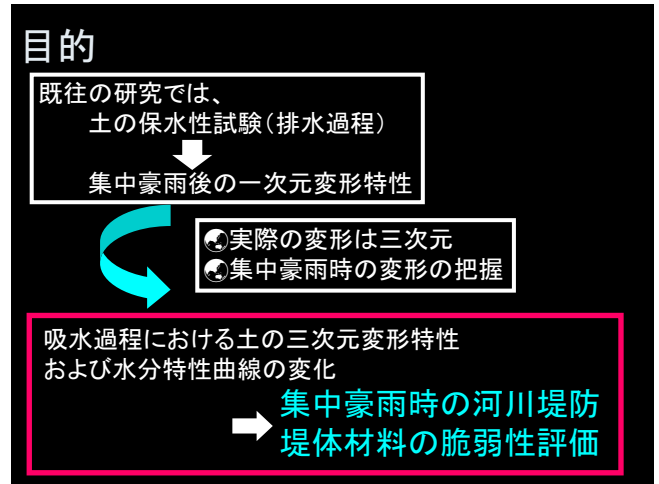
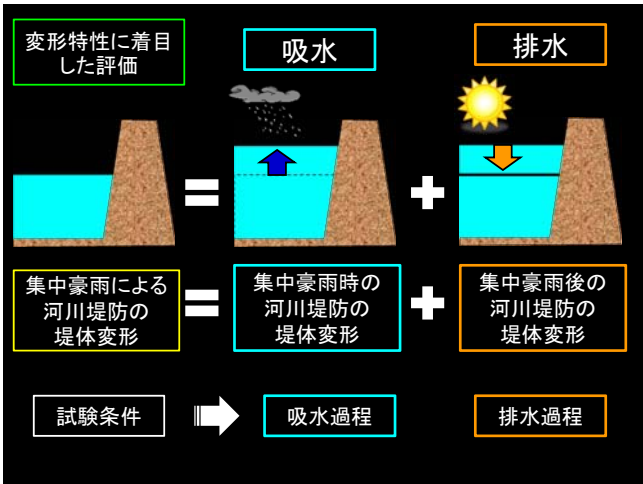
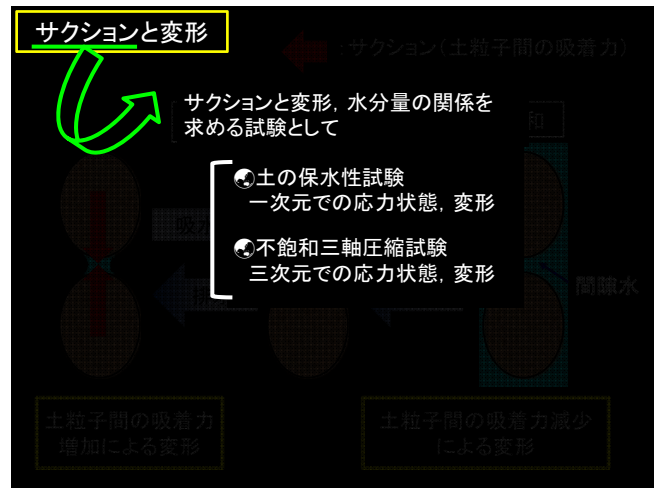
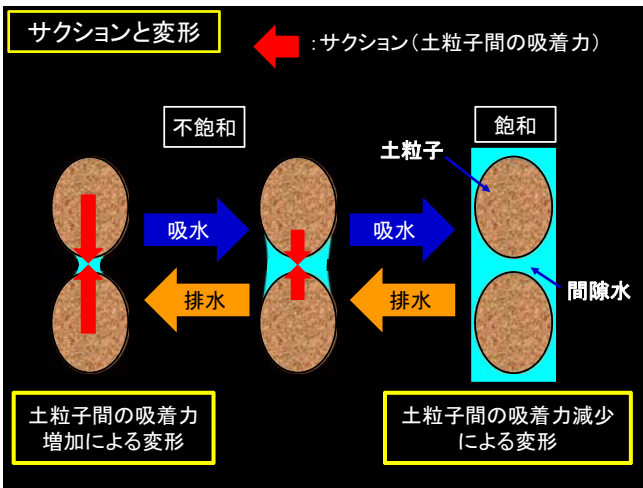
間隙流体は、骨格の隙間を自由に、骨格と相対的に移動することができる。



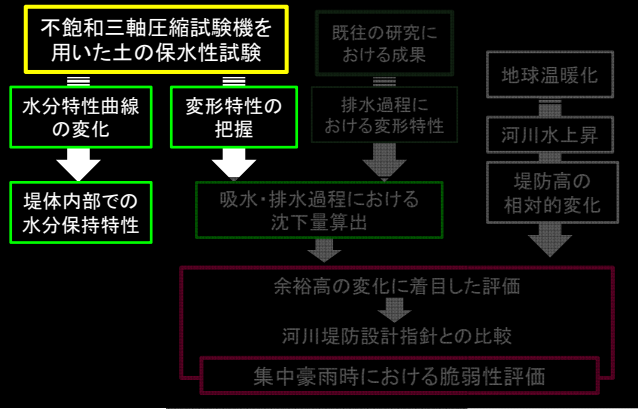
土粒子の総体積は不変であることから、一次元変形の挙動は、間隙中への水の流入が関連していると考えられる。

②不飽和三軸圧縮試験装置を用いた堤防堤体材料の吸水・排水過程における体積変化特性試験





研究フロー



不飽和三軸圧縮試験機を用いた土の保水性試験方法



土の保水性試験結果を三次元にて得ることができる。

試験方法

試験方法: 「不飽和三軸圧縮試験方法」に準拠

試験結果の評価: 「土の保水性試験方法」を参考

試験条件

試験条件	1	2
想定箇所	堤体中心上部	堤体下部法面付近
鉛直全応力 (kPa)	50	100
側圧 (kPa)	50	50

既往の研究: サクシオン $s=40\sim 200\text{kPa}$ にて変化が大きい

サクシオンの変化

サクシオン s を $200\text{kPa} \rightarrow 150\text{kPa} \rightarrow 100\text{kPa} \rightarrow 50\text{kPa}$ と除荷
 (間隙空気圧の増加だけでなく、間隙水圧を増加させることによりサクシオンを除荷)

試験手順

供試体の作製

形状: 直径50mm, 高さ100mmの円柱形
 作製方法: 地盤工学会基準「土の三軸試験の供試体作製・設置方法(JGS 0520)」に準拠する
 締固め方法: 突き棒による動的締固め方法

河川土工マニュアルより、締固め度80%以上を供試体作製時の目標値とした。

試験条件	目標値	初期条件	
		1	2
乾燥密度 $\rho_d(\text{g}/\text{cm}^3)$	1.34	1.36	1.32
含水率 $w(\%)$	18.0	18.9	18.3
間隙比 $e(-)$	0.96	0.93	0.97

試験手順

供試体の作製

↓

所定の応力条件にて圧密

試験手順

供試体の作製

↓

所定の応力条件にて圧密

↓

サクシオン200kPaでの測定

↓

サクシオン150kPaでの測定

↓

サクシオン100kPaでの測定

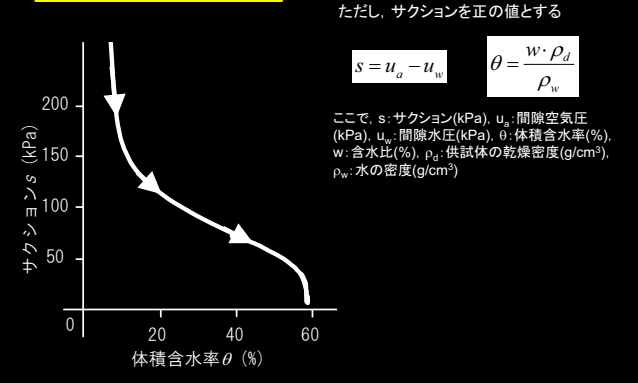
↓

サクシオン50kPaでの測定

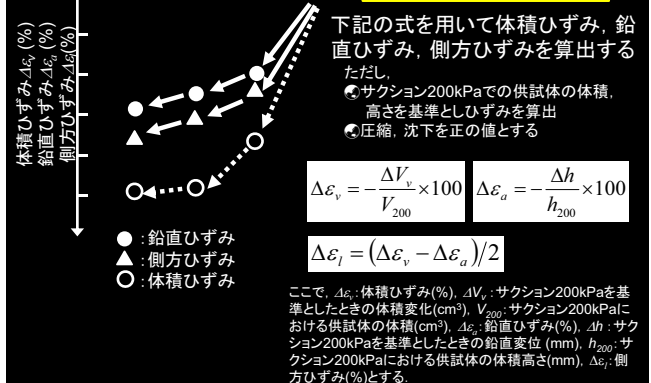
↓

試験終了

水分特性曲線への影響評価方法



変形特性の評価方法

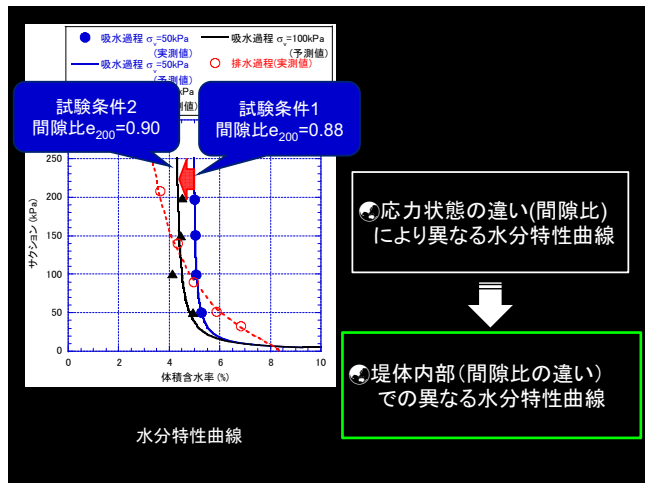


2次しらすの水分特性曲線への影響評価

土の保水性試験より得られる結果は離散的である

↓
曲線

van Genuchtenモデル式への近似 (最小二乗法) → 水分特性曲線



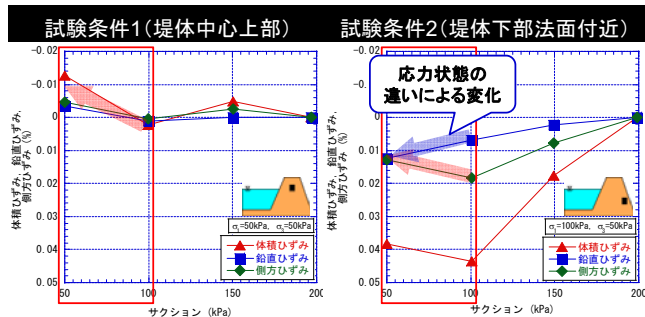
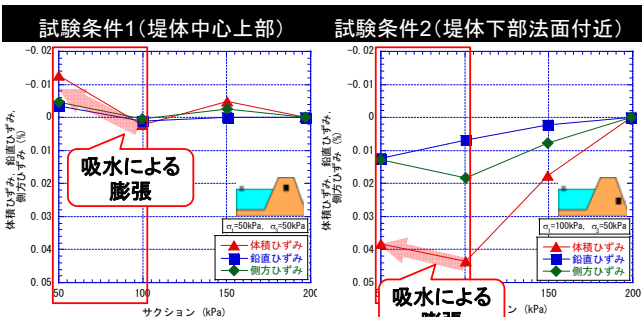
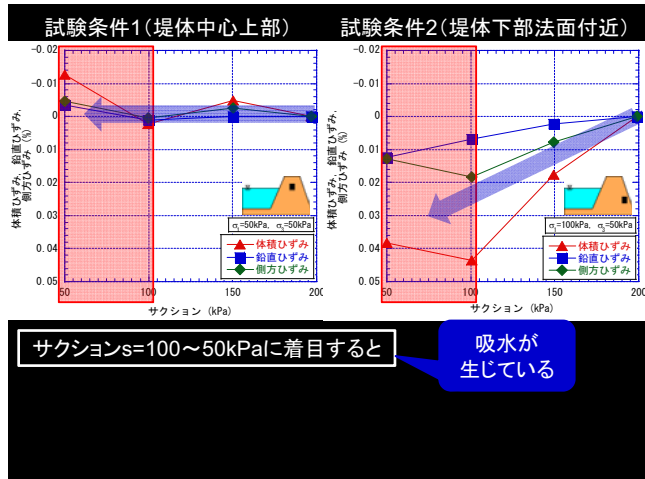
● 応力状態の違い(間隙比)により異なる水分特性曲線

↓

● 堤体内部(間隙比の違い)での異なる水分特性曲線

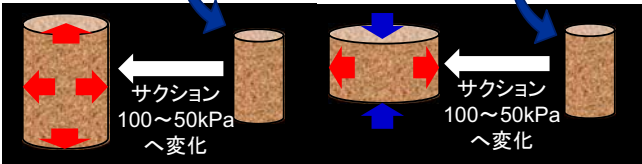
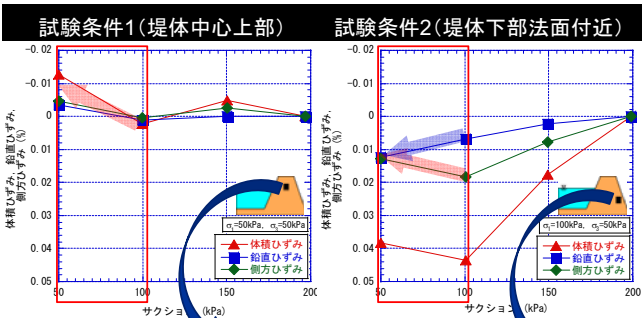
2次しらすの変形特性

サクシオンと体積ひずみ、鉛直ひずみおよび側方ひずみの関係を次のスライドに示す



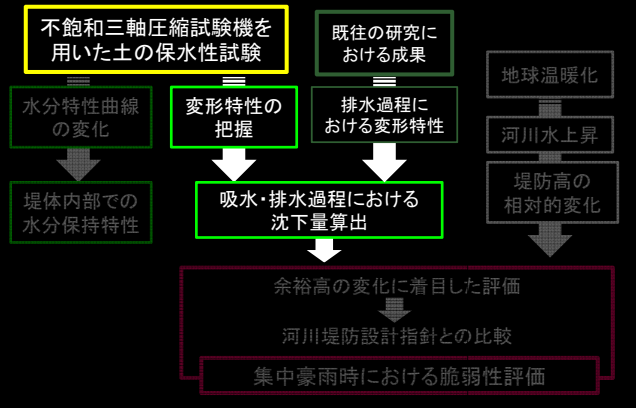
	体積ひずみ	鉛直ひずみ	側方ひずみ
試験条件1 (堤体中心上部)	吸水による膨張	膨張	膨張
試験条件2 (堤体下部法面付近)	吸水による膨張	沈下	膨張

	体積ひずみ	鉛直ひずみ	側方ひずみ
試験条件1 (堤体中心上部)	吸水による膨張	膨張	膨張
試験条件2 (堤体下部法面付近)	吸水による膨張	沈下	膨張



③土の保水性と変形特性を利用した実河川(肝属川/きもつきがわ)の堤防脆弱性評価

研究フロー



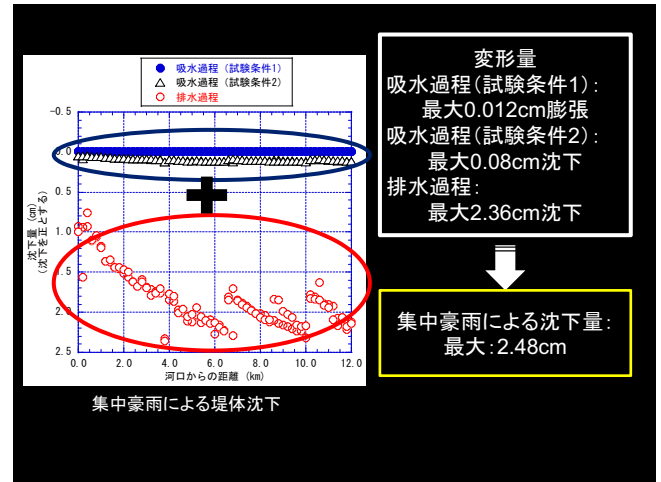
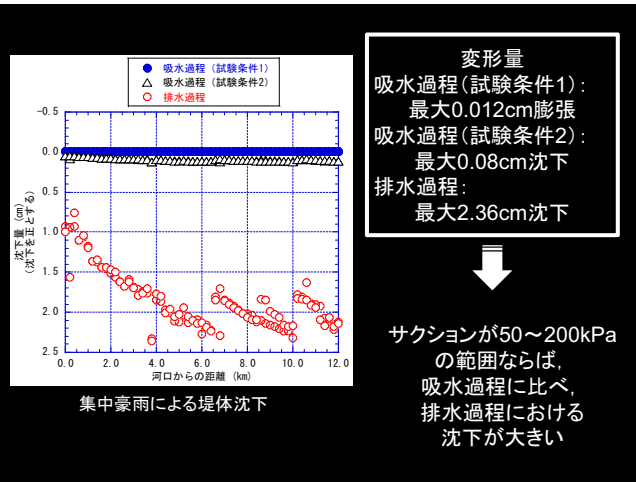
実河川堤防における沈下量算出

試験結果より,

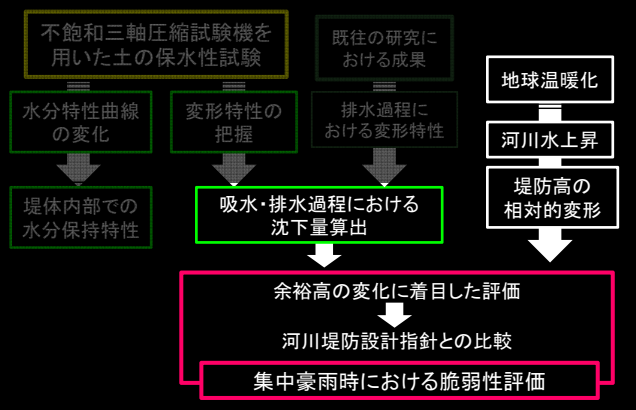
	吸水過程 s=200~50kPaと変化したときの鉛直ひずみ		排水過程 s=50~200kPaと変化したときの鉛直ひずみ
	試験条件1 [堤体中心 上部]	試験条件2 [堤体下部 法面付近]	
鉛直ひずみ (%)	-0.00115	0.0125	0.235

実河川堤防では、どの程度の沈下量なのか？

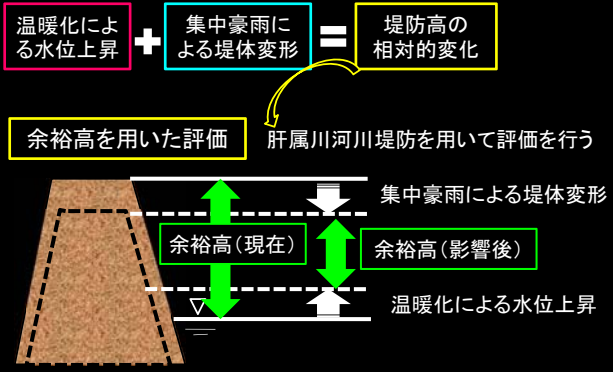
対象河川：肝属川（鹿児島県）
対象範囲：河口より0.0~12.0km
河川断面図：60断面（200m間隔）
左岸・右岸 計120地点



研究フロー



変形特性に基づく河川堤防堤体の脆弱性評価



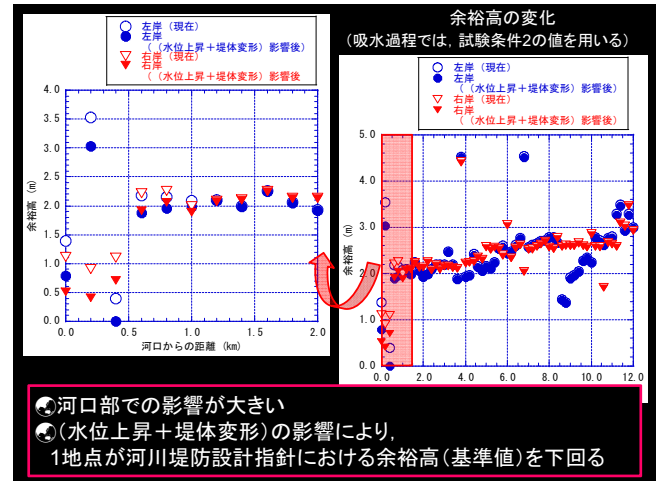
温暖化による水位上昇

- 上昇水位は、IPCC第4次報告書第1部作業部会報告書より59cm
- 影響範囲、各地点における上昇水位は河床勾配より求める

河床勾配1/5000 → 河口より1.18km地点までは水位上昇の影響を受ける

堤体変形

先に示した肝属川河川堤防における沈下量の値を用いる



● 河口部での影響が大きい
● (水位上昇+堤体変形)の影響により、1地点が河川堤防設計指針における余裕高(基準値)を下回る

②, ③の結論

余裕高を用いた脆弱性評価より、水位上昇および集中豪雨による影響を河川堤防設計指針における基準値と比較することを可能とし、河口部における影響が大きいことを示した。

- 1) 堤体内部では、築堤材料が密であるほど水分特性曲線は優れた保水性を有する傾向を示す。
- 2) 浸水時2次しらすは、堤体中心上部では大きな変化を示さないが、下部法面付近ではサクシジョンの低下に伴い沈下、圧縮傾向を示し吸水後は体積膨張、沈下を示した。
- 3) 2次しらすは浸水に比べ、排水による沈下量の方が大きい。
- 4) 肝属川では集中豪雨により最大2.48cm沈下する可能性を示した。

②, ③の結論(詳細)

- 堤体内部では深度、すなわち土被り圧に応じて築堤材料の水分特性曲線、変形特性が異なる。
- 浸水時、堤体中心上部では大きな変化を示さないが、下部法面付近ではサクシジョンの低下に伴い沈下、圧縮傾向を示し吸水後は体積膨張、沈下を示した。
- 排水時は徐々にサクシジョンが増加し、浸水時はある水分量を閾に急激にサクシジョンが低下する。
- 浸水に比べ、排水による沈下量の方が大きく、肝属川では集中豪雨により最大2.48cm沈下すると予想される。
- 余裕高を用いた脆弱性評価より、水位上昇および集中豪雨による影響を河川堤防設計指針における基準値と比較することを可能とし、河口部(河口から1km程度)における影響が大きいことを示した。
- 以上の変形特性の観点より、2次しらすは集中豪雨による影響が生じることが言える。

今後の課題

- 降雨時の浸水と降雨後の排水を想定して、河川堤防の吸水／排水過程の一次元変形特性を詳細に調査する必要がある。
- 鉛直圧条件をより広範囲にすると共に、河川堤防材料の種類も増やし、吸水／排水過程の一次元変形特性データベースを充実させる。
- 不飽和三軸による吸水／排水過程の体積変形特性のデータベース化
- 締固め不足の条件を考慮したデータベースの作製
- 堤防堤体材料の水分特性とGISを用いた土壌目・地質分類に基づく河川部脆弱性マップの試作

各種土質材料の水分特性曲線に着目した集中豪雨による 河川堤防や河岸の脆弱性簡易評価

Simplified Evaluation on Vulnerability of River Levee and Bank by Torrential Rainfall
from the Viewpoint of Water Retentivity of Some Soils

小 峯 秀 雄 (こみね ひでお)
茨城大学教授

安 原 一 哉 (やすはら かずや)
茨城大学教授

村 上 哲 (むらかみ さとし)
茨城大学講師

内 田 佳 子 (うちだ よしこ)
ケミカルグラウト㈱ (元茨城大学大学院 学生)

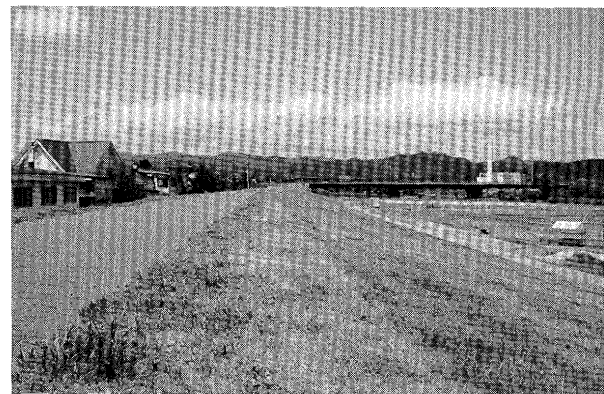
1. はじめに

気候変動に関する政府間パネル (IPCC) の第 4 次報告書第 1 部作業部会報告書において、21 世紀末には気温が最大 6.4℃ 上昇すると報告されている¹⁾。また、地球温暖化に伴い異常降雨、異常少雨の地域が顕著に分かれ、大雨の発生する頻度が増加する可能性が高いとの評価が示されている²⁾。実際、日本において集中豪雨の発生件数は増加しており (図-1 参照)、2000 年の東海豪雨、2004 年の福井豪雨などに見られるように、集中豪雨により大きな被害が生じた。特に、2000 年の東海豪雨では、河川堤防の決壊により人口の集中している低平地に被害が集中した³⁾。集中豪雨の発生件数の増加が予想される現在、被害を軽減するためには河川堤防を補強する必要がある。しかし、既存の河川堤防すべてを補強するには、非常に多くの時間と労力を必要とし、20~30 年程度の期間を要すると考えられている。以上の背景から、集中豪雨に対し脆弱な地域を把握し、効率的な河川堤防の補強を行うことが必要と考えられる。

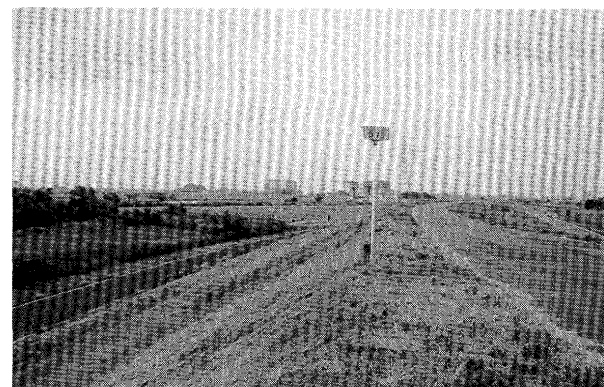
日本における河川堤防周辺および高水敷は、図-2 に例示するように、野球練習場やテニスコートとしての利用がなされていることが多い。社会的には重要度の低い

施設と考えられるものの、豊かな生活圏の形成において重要なレクリエーション空間を提供しているおり、このような空間施設の損失も社会的には大きな問題と言える。

ところでマスメディアをはじめ世界的に地球温暖化問題に対して注目が集まっている昨今、その重要性についてのみ議論するのではなく、今後の温暖化問題への対応方針について世界各国で考えられはじめている。地球温暖化現象が日本の社会基盤施設に及ぼすであろう影響程度を定量的に評価することは極めて困難なことではあるが、何らかの根拠を持って、その影響を定量的に把握し、地球温暖化に対する具体的な対応策や政策に反映させな



(a) 北海道石狩川上流の堤防と高水敷の状況



(b) 茨城県小貝川の堤防と高水敷の状況

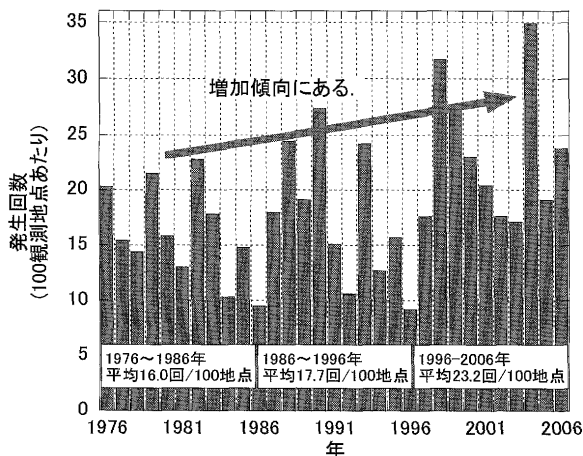


図-1 時間雨量50 mm/h以上の発生回数

図-2 日本の河川堤防と高水敷・河岸の状況の例

なければならない状況にある。

このような背景から地球温暖化による日本全国規模の社会基盤施設の脆弱性定量評価が求められている。そこで本研究では河川堤防や高水敷，河岸を対象として，簡易な方法で地球温暖化に伴う集中豪雨頻発化の影響を想定し，河川堤防堤体材料や高水敷，河岸を構成する土質材料への物理的影響を推察する。また，この推察結果を踏まえて，河川堤防堤体材料や高水敷，河岸の降雨に対する脆弱性評価と対策マップの試案を提示する。

2. 実験の概要

本章では，使用した土質材料および実施した実験の概要について述べる。

2.1 使用した土質材料

本研究で使用した土質材料は，河川堤防や高水敷，河岸の構成材料を想定し，現地発生土として考えられる関東ローム（茨城県），赤ぼく（大分県），黒ぼく（大分県），1次しらす（鹿児島県），2次しらす（鹿児島県），まさ土（山口県），対雁築堤材料（北海道）および江別（北海道）の8種を用いた。使用した土質材料の粒径加積曲線を図-3に示す。

2.2 土の保水性試験

本研究では土の保水性試験を行い，各土質材料の排水過程における水分特性曲線を比較することにより，各材料の降雨に伴う脆弱性を概観する。また，排水に伴う土質材料の一次元変形量を測定し，本実験が K_0 状態であることから体積ひずみとして整理し，各土質材料の排水に伴う変形の視点から脆弱性を概観する。今回は特に，排水過程での土の保水性試験であることから，降雨により河川水位が急激に上昇し堤体内が浸水した後の排水過程を想定している。

図-4に，本研究で用いた実験装置の写真および概略図を示す。すなわち，加圧板法による土の保水性試験を実施した。供試体の作製方法は，締固めによる実施工を模擬し直径20.0 mm，高さ207.0 mm および質量502.8 g の透水試験用円柱形突棒を用いた動的締固め方法を採用

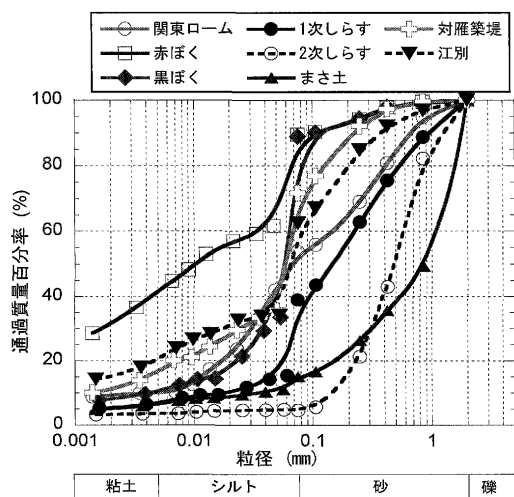


図-3 堤体土質材料の粒径加積曲線

した。供試体は直径60 mm，高さ20 mmを目標寸法とする円柱形とした。試験方法および評価は，地盤工学会基準「土の保水性試験方法」(JGS 0151-2000)に準拠して行った。表-1に，各土質材料の初期乾燥密度および初期間隙比を示す。本実験では，堤防堤体の表層部分を想定して，鉛直圧を2.05 kPaに設定して試験を行った。

測定される間隙空気圧，間隙水圧，鉛直変位，排水量および乾燥密度を用いて，式(1)~(4)よりサクシオン，含水比，体積含水率，各サクシオン段階における間隙比の変化を求めた。また，本実験は K_0 状態であることから，一次元変形量は体積変化量と等しいと考え，式(5)より体積ひずみを算出した。なお，各サクシオン段階における体積ひずみは圧縮側を正の値とする。

$$s = u_a - u_w \dots\dots\dots (1)$$

$$w_i = \frac{m_{i+1} + d_{i+1} - m_s}{m_s} \times 100 \dots\dots\dots (2)$$

$$\theta_i = \frac{w_i \cdot \rho_{di}}{\rho_w} \dots\dots\dots (3)$$

$$e_i = e_{i-1} + \frac{\Delta z_i \cdot A}{m_s / \rho_s} \dots\dots\dots (4)$$

$$\Delta \varepsilon = \frac{\Delta V_v}{V} \times 100 = \frac{e_0 - e_i}{e_0 + 1} \times 100 \dots\dots\dots (5)$$

ここで， s : サクシオン (kPa)， u_a : 間隙空気圧 (kPa)， u_w : 間隙水圧 (kPa)， w_i : 含水比 (%)， m_{i+1} : 第 $i+1$ 段階の供試体質量 (g)， d_{i+1} : 第 $i+1$ 段階の排水質量 (g)， m_s : 供試体の炉乾燥質量 (g)， θ_i : 第 i 段階の体積含水率 (%)， ρ_{di} : 第 i 段階の供試体の乾燥密

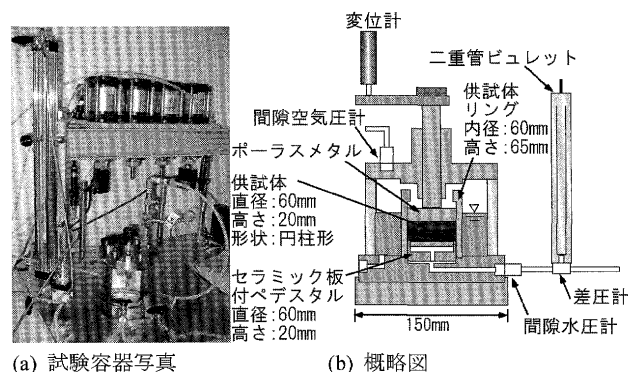


図-4 土の保水性試験機の概略図

表-1 土質材料の初期乾燥密度と初期間隙比

土質材料	初期乾燥密度 $\rho_{d0}(\text{g}/\text{cm}^3)$	初期間隙比 e_0
関東ローム	0.61	3.41
赤ぼく	0.50	4.34
黒ぼく	0.63	2.99
1次しらす	0.96	1.40
2次しらす	0.90	1.91
まさ土	1.49	0.89
対雁築堤材料	1.07	1.54
江別	1.50	0.74

報告

度 (g/cm^3), e_i : 第 i 段階の間隙比, Δz_i : 第 i 段階の鉛直変位 (cm), A : 供試体の断面積 (cm^2), ρ_s : 土粒子密度 (g/cm^3), e_0 : 初期間隙比, Δe : 体積ひずみ (%), ΔV_v : 供試体の体積変化 (cm^3), V : 供試体の体積 (cm^3)

3. 試験結果・考察に基づく河川堤防・河岸の脆弱性評価の試み

3.1 排水過程における水分特性曲線⁴⁾

各土質材料の水分特性曲線を図-5に示す。図-5より、まさ土、1次しらすおよび2次しらすは、ほぼ同様の水分特性曲線を示し、保水性が低いことが分かる。対雁築堤材料および江別は初期乾燥密度が異なったため水分特性曲線にやや差異が認められるが、いずれも保水性はやや低く、排水による体積含水率の低下に伴うサクシジョンの上昇傾向は、ほぼ同様となった。一般的な土質材料において、体積含水率の低下に伴うサクシジョンの増加は、土粒子間の吸着力を増加し、それに伴い、せん断強度が増加すると考えられる。したがって、図-5に示す水分特性曲線において、排水による体積含水率の低下に伴うサクシジョンの上昇傾向がほぼ同様となった、まさ土、1次しらす、2次しらすと対雁築堤および江別は、排水過程でのせん断強度の増加はそれぞれ同程度と推察される。

一方、赤ぼくと黒ぼく、関東ロームにおいては、他の材料と比べて保水性が高い。これらの材料では、比較的高い含水比状態でも、高いサクシジョンを保持し、せん断強度も有した状態を維持できるものと考えられる。また、赤ぼくと黒ぼくを比較すると、体積含水率の低下に伴う赤ぼくのサクシジョンの上昇は、黒ぼくよりも大きな傾きを示したことから、赤ぼくは排水過程において、体積含水率が等しく変化する黒ぼくに比べ、サクシジョンが大きくなり、せん断強度が大きくなると推察される。

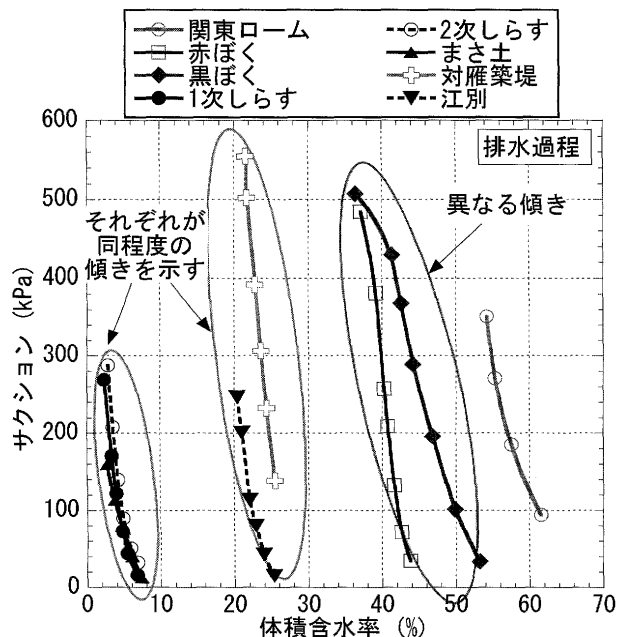


図-5 各堤防土質材料の水分特性曲線

3.2 排水過程における体積変化特性⁵⁾

土の保水性試験結果において、排水に伴う一次元変形量データから式(4)および式(5)により体積ひずみを算出し、サクシジョンとの関係で整理したものを図-6に示す。図-6より、赤ぼく、2次しらすおよび江別がサクシジョンの増加、すなわち排水に伴う体積ひずみが顕著であった。特に、サクシジョンが40~200 kPaの範囲において体積ひずみの増加が著しいことが分かる。関東ロームは、上記の土質材料について、サクシジョンの増加すなわち排水に伴う体積ひずみの増加が認められるものの、赤ぼく、2次しらすおよび江別と比べて小さい。一方、黒ぼく、1次しらす、まさ土および対雁築堤材料では、ほとんど体積ひずみは生じないと考えられる。このことから、黒ぼく、1次しらすおよびまさ土では、サクシジョンの増加すなわち排水が生じて、体積ひずみはほとんど生じないと推察される。

図-5および図-6の結果を総括して、以下のように推察できる。すなわち、赤ぼく、2次しらすおよび江別は、排水過程において大きな体積ひずみが生じるため、これらの材料で構成される河川堤防や高水敷、河岸は、降雨により河川水位が急激に上昇し、各部位内が浸水した後の排水過程において、大きな変形を生じる可能性が高い。一方、黒ぼく、1次しらすおよびまさ土で構成される河川堤防や高水敷、河岸は、排水過程での変形は小さいことから、降雨により河川水位が急激に上昇し、各部位が浸水した後に排水が生じて、ほとんど変形しないものと推察される。本節で述べた各土質材料の保水性試験の結果を総括すると表-2のようになる。

3.3 排水過程における水分特性曲線および体積変化特性に基づく河川堤防堤体や河岸の土質材料の降雨に対する脆弱性評価と対策マップの試作

前節までに、表-1に示す土質材料の保水性試験の結果から、水分特性曲線や体積変化の傾向について論じて

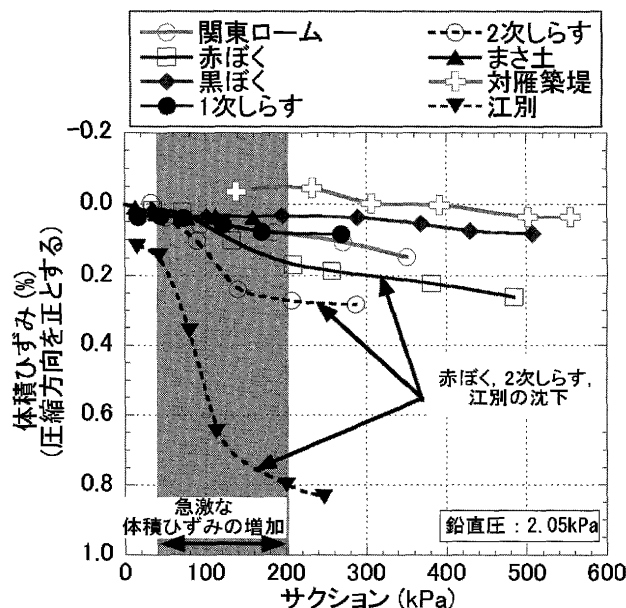
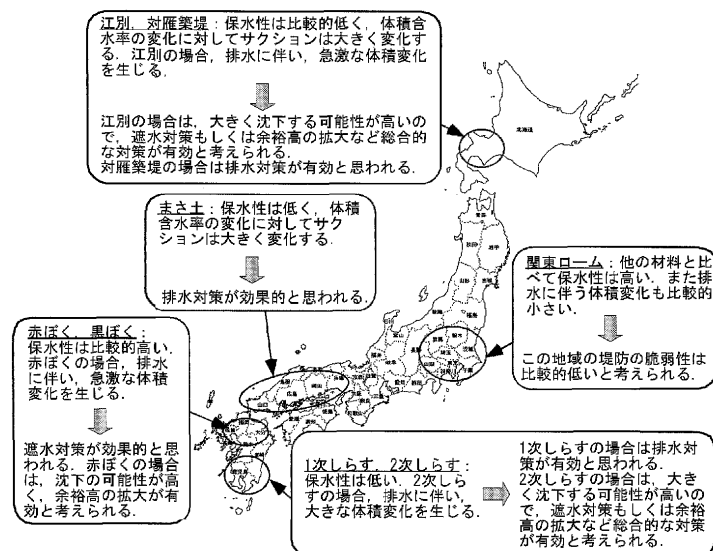


図-6 体積ひずみとサクシジョンの関係

表—2 堤体土質材料の保水性試験結果のまとめ

堤体土質材料	試験結果の総括
関東ローム	他の材料と比べて保水性は高い。また排水に伴う体積変化も比較的小さい。
赤ぼく	保水性は比較的高いが、排水に伴い急激な体積変化を生じる。
黒ぼく	比較的、保水性は高く、排水に伴う体積変化も比較的小さい。
1次しらす	保水性は低く、体積含水率の変化に対してサクシオンは大きく変化する。排水に伴う体積変化は比較的小さい。
2次しらす	保水性は低く、体積含水率の変化に対してサクシオンは大きく変化する。排水に伴い、大きな体積変化を生じる。
まさ土	保水性は低く、体積含水率の変化に対してサクシオンは大きく変化する。排水に伴う体積変化は比較的小さい。
対雁築堤材料	保水性は比較的低く、体積含水率の変化に対してサクシオンは大きく変化する。排水に伴う体積変化は比較的小さい。
江別	保水性は比較的低く、体積含水率の変化に対してサクシオンは大きく変化する。排水に伴う体積変化は大きい。



図—7 河川堤防堤体や高水敷、河岸の土質材料の降雨に対する脆弱性評価と対策マップ

きた。本節では、前節までに述べた保水性試験の結果から、各種土質材料の間で、実験結果の傾向を定性的に比較し、各地域の河川堤防堤体や高水敷、河岸の土質材料の降雨に対する脆弱性評価と対策を表示したマップの試作を行う。

1章でも述べたように、今後の温暖化問題への対応方針について世界各国で議論が開始されており、何らかの根拠を持って、地球温暖化現象が河川堤防等の社会基盤施設に及ぼす可能性を把握し、地球温暖化に対する具体的な対応策や政策に反映させなければならない状況にある。このような背景から、今回得られた結果に基づき、上記のような脆弱性評価と対策マップの試作を試みた。その結果を図—7のように提案する。本図には、各土質材料の脆弱性評価を基に対策についても言及を試みた。

4. まとめと今後の展開

本報告では、8種類の堤防や高水敷、河岸などを構成するであろう土質材料の排水過程における保水性試験の結果から、各地域の河川堤防堤体や高水敷、河岸の土質材料の降雨に対する脆弱性評価と対策を表示したマップの提案を試みた。しかし、拘束圧、締固め密度や給排水条件、試料の種類という点でかなり限定された実験条件の結果のみに基づいているのは言うまでもない。今後は、より多くの種類の土質試料や広範囲な実験条件の結果を取得し、脆弱性評価と対策マップの信頼性向上を目指す。謝辞：本研究は、科学技術振興調整費（戦略的拠点育成）の事業のフラッグシッププロジェクト（茨城大学担

当分）および環境省地球環境推進研究『温暖化の危険な水準及び温室効果ガス安定化レベル検討のための温暖化影響の総合評価に関する研究』（研究代表者：茨城大学・三村信男）におけるサブ課題「2(5)沿岸域における気候変動の複合的災害影響・リスクの定量評価と適応策に関する研究」（課題代表者：茨城大学・安原一哉）において実施された成果の一部である。また、土質材料の収集には、基礎地盤コンサルタンツ九州支社、同熊本支店、同鹿児島事務所、復建調査設計㈱および舩北海道開発土木研究所の方々にご協力いただいた。ここに深謝申し上げます。

参考文献

- 1) IPCC: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Summary for Policymakers, 2007.
- 2) 原沢英夫・西岡秀三：地球温暖化と日本 自然・人への影響予測，古今書院，pp. 1～55, 2003.
- 3) 三木博史：最近の水害の特徴と河川堤防の質的整備の課題，平成17年度土木研究所講演会講演集，pp. 65～82, 2005.
- 4) 内田佳子・小峯秀雄・安原一哉・村上 哲・工藤竜太：河川堤防築堤材を想定した様々な地盤材料の水分特性曲線の比較，土木学会第62回年次学術講演会講演概要集，pp. 201～202, 2007.
- 5) 内田佳子・小峯秀雄・安原一哉・村上 哲・工藤竜太：河川堤防を想定した堤体地盤材料の排水過程における一次元変形特性，第42回地盤工学研究発表会発表論文集，pp. 1105～1106, 2007.

(原稿受理 2008.12.10)

土質分類を考慮した侵食特性データの収集と 地盤情報データベースを併用した 低平地河川流域の侵食脆弱性広域評価法の提案

茨城大学防災・環境地盤工学研究室
小峯秀雄, 藤田圭介, 村上哲

研究の背景

集中豪雨の発生件数増加 → 河川水の流量・流速増加 → 河川堤防・高水敷・河岸へ影響

河川堤防・高水敷・河岸の模式図

河川堤防・高水敷・河岸の模式図

日本における1時間降水量50mm以上の年間発生件数
気象庁：気候変動監視レポート2009, p.30, 2009.

http://www.nhri.jp/100215_Dis-Tsujimoto.pdfより引用

研究の背景

河川堤防・高水敷・河岸を構成する土質材料

- ・日本各地に存在
- ・地域によって粒度特性が異なる

粒度特性が異なる土質材料を全て採取して侵食脆弱性評価は困難

土質材料を入手せずに侵食脆弱性を広域的に評価するための手法が必要

地盤の土質構成を地盤工学的に分類しデジタル化した情報

日本では...
地盤情報データベースが整備されている
全国の地盤情報を広域的に把握することが可能である

研究の目的

地盤情報を利用して侵食脆弱性を評価するための手法を構築する

河川堤防・高水敷・河岸を構成する土質材料の侵食脆弱性を広域的に評価する

研究の流れ

模擬材料の侵食脆弱性評価
河川堤防・高水敷・河岸の土質材料を模擬する各種土質材料の選定
砂分, シルト分, 粘土分の各種土質材料を選定

各種土質材料を使用した模擬材料の作製

模擬材料を使用した侵食試験

日本, ベトナムのデルタ地帯における地盤情報の調査
粒度特性に着目し, 砂分, シルト分, 粘土分の各割合を調査

模擬材料の侵食脆弱性評価結果と地盤情報調査結果の照合

侵食脆弱性の広域的评价

各種土質材料の選定および模擬材料の作製

砂分 シルト分 粘土分
相馬珪砂 DLクレー クレーサンド

各模擬材料の粒度特性

模擬材料名	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
砂分(%)	0	56	47	74	48	92	83	65	56	74	19	38
シルト分(%)	90	31	40	21	32	4	13	23	24	14	66	41
粘土分(%)	10	13	13	5	20	4	4	12	20	12	15	21

模擬材料名	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
砂分(%)	20	33	48	20	39	21	11	12	3	3	12
シルト分(%)	58	37	25	51	33	43	59	52	60	53	44
粘土分(%)	22	30	27	29	28	36	30	36	37	44	44

粒度特性の異なる23通りの模擬材料を作製

河川土工マニュアルの締固め度規定を考慮し
初期含水比11.4%, 初期乾燥密度1.42g/cm³を目標に各供試体を作製

侵食試験装置および試験概要

侵食試験装置

昇降式定水位透水容器

供試体上面の様子

ポイリング・パイピングが発生

流量計 水圧計

給水

供試体

供試体下部から圧力を加え, ポイリング・パイピング発生時の動水勾配を測定する試験

各模擬材料の侵食試験結果

流量が急増する動水勾配が存在した

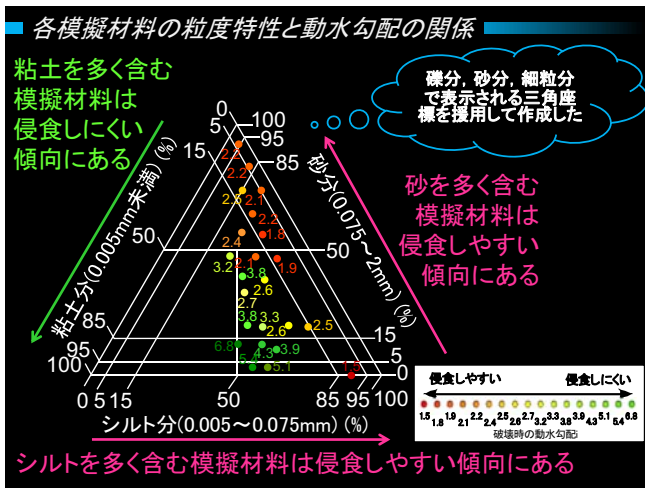
パイピングの発生

流量の急増は, ポイリングとパイピングによるもの

間隙水圧が増加し, 保持作用を失った土粒子が侵食された

各模擬材料の動水勾配と流量の関係

流量急増時の動水勾配を破壊に至った動水勾配と定義して, 相対的な比較を行った



侵食脆弱性広域評価手法の提案

模擬材料の粒度特性と動水勾配の関係

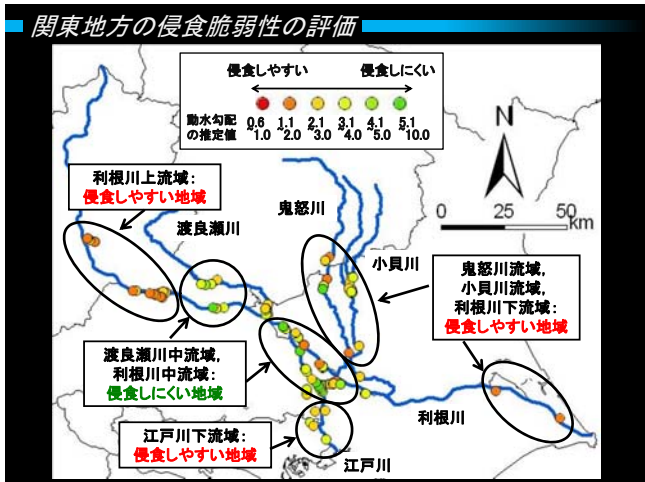
$$i_{BP-pr} = 0.036 + 0.012R_{sand} + 0.002R_{silt} + 0.114R_{clay}$$

i_{BP-pr} : 破壊時の動水勾配, R_{sand} : 砂含有率(%)
 R_{silt} : シルト含有率(%), R_{clay} : 粘土含有率(%)

国土情報検索サイト“KuniJiban”から入手した粒度試験実施データを入力し、破壊時の動水勾配を推定して侵食脆弱性を評価する

地方名	対象河川名
北海道	石狩川, 十勝川, 天塩川
関東	利根川, 鬼怒川, 小貝川, 江戸川, 渡良瀬川
北陸	信濃川, 関川
中部	天竜川, 木曾川, 庄内川
九州	大淀川, 五ヶ瀬川, 緑川, 白川, 菊池川, 松浦川, 嘉瀬川, 大野川, 大分川

本報告では関東地方の侵食脆弱性の評価を紹介する



ベトナムのデルタ地帯の侵食脆弱性の評価

土質材料の粒度特性の把握が困難な地域

文献調査から地盤情報を入力

土質材料の所在・粒度特性が把握できれば評価が可能

ベトナム北部を流れるRED RIVER下流域の土質材料の侵食脆弱性の評価を紹介する

VIETNAM

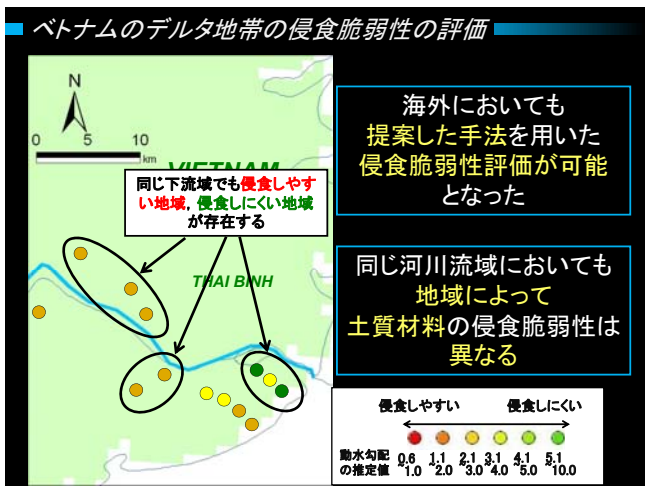
RED RIVER

THAI BINH

RED RIVER DELTA

推察する地域

※参考・引用文献
 Duc, D.-M.: Holocene Sedimentary Evolution And The Relation To Sea Level Change At The Red River Mouth, Northern Vietnam, pp.1-32, 2001.



結論

- 各模擬材料の侵食脆弱性評価の結果から、砂分およびシルト分を多く含む模擬材料は侵食しやすいと考えられる。一方、粘土分を多く含む模擬材料は侵食しにくいと考えられる。
- 1.の結果から、地盤情報データベースで得た粒度特性のときの破壊に至る動水勾配を推定し、侵食脆弱性を広域的に評価するため手法を提案した。
- 提案した広域評価手法を用いて関東地方とRED RIVER下流域の侵食脆弱性を評価した結果、同じ河川流域内でも、地域によって侵食のしやすさに違いがあると考えられる。

ご清聴ありがとうございました。