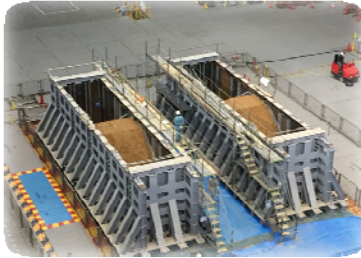


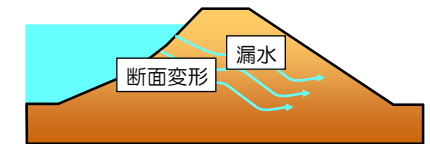
E-ディフェンスで実施された 実大ため池堤体の振動実験について



災害対策セミナーin神戸 神戸国会会議場にて
平成29年 1月 23日(月)
神戸大学大学院農学研究科
澤田 豊

ため池について

- 農業用水を確保するために、人工的に造成された池で、約7割は江戸時代以前に築造
→老朽化による漏水、(波浪による)断面変形
- 兵庫、広島、香川、大阪、山口など瀬戸内に多い(約6割)
- 堤高15m以下(15m以上はダム)
- 自然災害による被害：豪雨による被害約9割、地震による被害約1割(東日本大震災：藤沼池など3池決壊)



老朽化ため池イメージ

ため池の種類

・ため池は、その形態により「谷池」と「皿池」に区分されます。
・棚状に複数のため池が連なっているものは、「重ね池(又は親子池)」と呼ばれています。

□谷池



山間や丘陵地で谷をせき止めて造られたため池

□皿池



平地の窪地の周囲に堤防を築いて造られたため池

□重ね(親子)池



棚状に複数のため池が連なっているため池

・用水を貯留するための堤体は、以下のとおり分類されます。

□均一型

堤体の全断面で遮水する型式、または堤体の最大断面で均一の材料の割合が80%以上である型式



□ゾーン型

堤体が遮水材料と半透水性または透水性材料からなる型式



□表面遮水型

堤体が透水性または半透水性からなり、上流法面にシートやアスファルト舗装を施工し遮水する型式



豪雨によるため池災害

①大雨時

決壊のパターン	堤体で起きている現象
浸透破壊 	堤体が傷んでくると、水位が上がるたびに水圧が掛かり、水みち*ができることで決壊につながります。普段、水が上がらない上部は、ネズミ穴などが多く、大雨時の水位上昇で水みちになります。
すべり破壊 	堤体全体に水が浸透して、堤体内の強度が弱まり、法面にすべりが発生します。
越流破壊 	豪雨により流入量が増し、排水が間に合わないで、堤体を越えて溢れます。その時に堤体が浸食され、決壊に至ります。

* 水みち：堤体内を水が流れて漏水の原因となる経路


地震による ため池災害

これらの被害形態に加え、洪水吐などのコンクリート構造物や地山との取付部においても被害は多い

出典：青森県農林水産部農村整備課、ため池管理マニュアル、p3, 2014

Graduate School of Agricultural Science KOBE UNIVERSITY

②地震時
地震により堤体が破壊あるいは損傷し、水をせき止められなくなり決壊に至ります。

地震後の状況	堤体損傷の程度
クラック(亀裂)	堤体に生じたクラック(亀裂)はそのまま水みちになります。特に堤体の上下流方向に生じるクラックは注意が必要です。 
沈下	柔らかい地盤で発生します。堤体の形状を保っている場合は軽微ですが、クラックが発生したり法面にはらみが出る場合は重傷といえます。
斜面崩壊	堤体内部に異状はなく、すぐに決壊には至りませんが、崩壊が全体に及ぶ場合には注意が必要です。一部の崩壊であっても、全体に広がったり内部が変形している場合もありますので注意してください。
斜面すべり	法面の損傷が大きい場合には、大きな規模ですべりが発生します。すべりの前兆としてクラックが発生することもあります。
崩壊	堤体などの損傷程度が大きく、決壊に至る可能性が大きく危険な状態です。

土地改良事業設計指針「ため池整備」での ため池の重要区分と耐震性能

重要度 区分	区分の定義	耐震性能	
		レベル1地震動	レベル2地震動
AA種	①堤体下流に主要道路や鉄道、住宅地等があり、施設周辺の人命・財産やライフラインへの影響が極めて大きい施設 ②地域防災計画によって避難路に指定されている道路に隣接するなど、避難・救護活動への影響が極めて大きい施設	健全性を損なわない	限定された損傷にとどめる
		(液状化対策工の評価を行う)	
A種	被災による影響が極めて大きい施設	健全性を損なわない (液状化対策工の評価を行う)	耐震設計を行わない
B種	AA種、A種以外の施設	健全性を損なわない	耐震設計を行わない

レベル1地震動
施設の供用期間中に1～2度発生する確率の地震動
レベル2地震動
発生確率は低いが地震動強さの大きな地震動

Graduate School of Agricultural Science KOBE UNIVERSITY

土地改良事業設計指針「ため池整備」での レベル1地震動に対する安定照査

・円形すべりスライス面法

$$F_s = \frac{R \sum \{CL + (W' \cos \alpha - UL - K_h W \sin \alpha) \tan \phi\}}{R \sum (W' \sin \alpha + K_h W \cos \alpha)}$$

ここに

F_s : 安全率

R : すべり円弧の半径 (m)

C : 粘着力 (kN/m²)

L : スライス底面の長さ (m)

W : スライスの全重量 (kN/m)

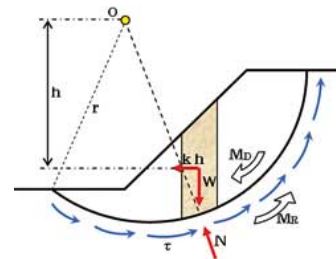
α : スライス底面が水平面となす角度

W' : スライスの重量 (水位線以下は水中重量) (kN/m)

U : スライス底面に作用する過剰間隙水圧 (kN/m²)

K_h : 設計水平震度

ϕ : 内部摩擦角 (°)

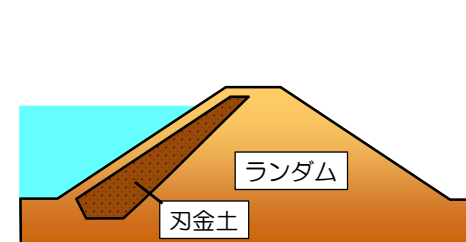


安全率 F_s が1.2以上となることを確認

Graduate School of Agricultural Science KOBE UNIVERSITY

ため池改修における課題

- 一般的に粘性土(堤体遮水材)を使う前刃金工法で改修
- 改修ため池近隣において、**良質な粘性土が枯渇・不足**
- 代替工法としてベントナイト系遮水シートが用いられるが、**耐震性を含めた力学的安定性の検討が不十分**



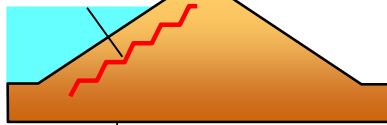
(兵庫県小野市の土取り場)

Graduate School of Agricultural Science KOBE UNIVERSITY

遮水シート（ベントナイトシート）工法

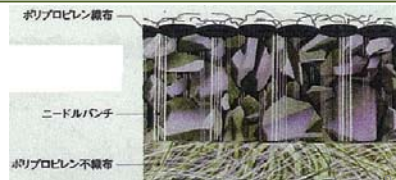
＜ベントナイトシートとは＞

遮水シート



シート敷設状況

- ・遮水性に優れた材料で、産廃処分場などの使用実績が多い
- ・小さな穴が空いても、膨潤して漏水を防ぐ（自己修復機能）
- ・織布・不織布で挟み、互いをニードルパンチにより固定し、ベントナイトの流出・偏在を防ぐと共に、滑りに対する抵抗力を増加



研究背景

(1)東日本大震災の被害

- 福島県の藤沼池など3池の決壊
- ため池の耐震性不足に対する課題認識の高まり

(2)兵庫県の特徴

- ため池数は全国一（約4.3万/全国約20万）
- 改修すべきため池数も多い

(3)漏水対策工法の課題

- ため池改修工事に必要な刃金土が不足
- 代替工法（遮水シート）の耐震性が検証されていない

研究目的

遮水シート工法に関する耐震性能検証と動的挙動の解明

防災科学技術研究所・兵庫県・神戸大学の共同研究で

Eディフェンスを用いた改修ため池堤体の振動実験を実施

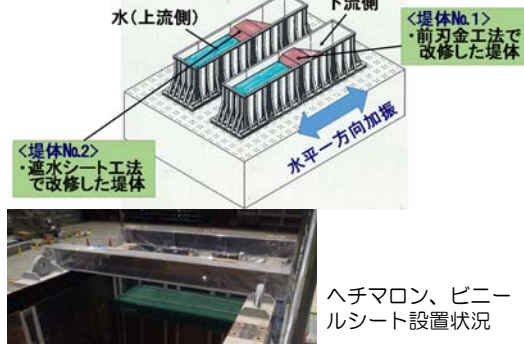
当実験でわかったこと

- ・ 高さ3 mという小規模なため池堤体は、十分に締め固められていれば、設計指針で要求される耐震性能（レベル1地震動での安定性）は保持される可能性が高い
- ・ 地震動の周波数が高く、継続時間が短い場合、密度の高い堤体上流法面は非排水状態となり負の間隙水圧が発生→上流側の締固めは極めて重要であることを示唆
- ・ 上流側（湛水部側）は下流側に比べ、剛性低下に伴い、加速度応答が大きくなる可能性がある→上流側で変形が大きくなる一つの要因
- ・ 不飽和の箇所であっても、飽和度高い場合、過剰間隙水圧は増加し、これが堤体の内部で発生した場合、長時間消散しないことがある

実験概要

実験土槽

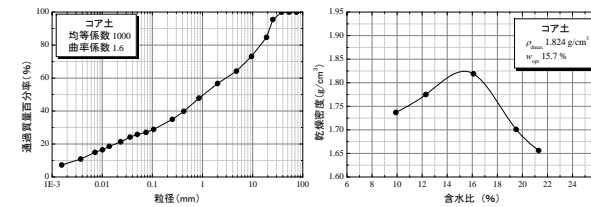
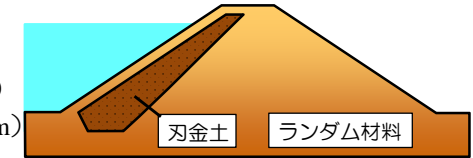
- 105t/基, 幅12.588m, 高さ3.55m, 奥行き2.5m
- 土槽上部には補強用と計測用を兼ねたH鋼
- 水の飛散による外部への流出を防止
→ヘチマロン+ビニールシート



13

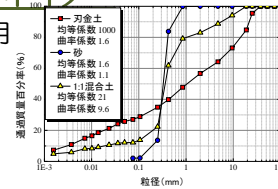
土質材料（刃金土）

- 小野市の良質な粘性土を刃金土として使用
- $\rho_s = 2.379 \text{ g/cm}^3$
- $c' = 38.4 \text{ kN/m}^2$, $\phi' = 33.2^\circ$
- $k = 6.80 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ (最大粒径2mm)
- $k = 9.42 \times 10^{-6} \text{ m/s}$ (最大粒径19mm)

兵庫県小野市
土取り場

土質材料（ランダム材料）

- 刃金土と砂の混合土をランダム材料として使用
- 刃金土と掛津珪砂 ($\rho_s = 2.653 \text{ g/cm}^3$)
の重量比1:1の混合土を計画



ランダム材料に要求される条件

- ① 短期間（3～4日程度）で堤体内部（特に上流側）に水が浸透するような透水性を有する材料
→室内試験での透水係数
→飽和-不飽和浸透流解析による確認
- ② 東日本大震災で決壊した藤沼池の堤体材料は均質な砂、青田新池においては、 $c' = 4 \text{ kN/m}^2$, $\phi' = 28^\circ$ の弱い地盤。遮水シートにより改修される場合、既設の堤体土が使用されるので、砂質土が材料として使用される可能性がある。
→三軸圧縮試験による強度確認
→安定解析（円形すべりスライス面、レベル2Kh=0.35）による確認

15

ランダム材料の室内試験結果（D値90）

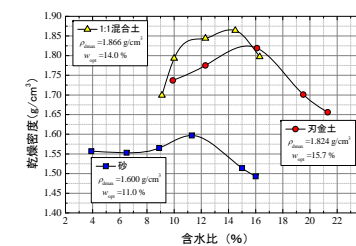
透水試験（最大粒径：2mm）

刃金土と砂の割合		透水係数 (m/s)
刃金土	砂	
100	0	6.80×10^{-7}
50	50	3.06×10^{-6}

透水試験（最大粒径：19mm）

刃金土と砂の割合		透水係数 (m/s)
刃金土	砂	
100	0	9.42×10^{-6}
50	50	2.39×10^{-5}

締固め試験



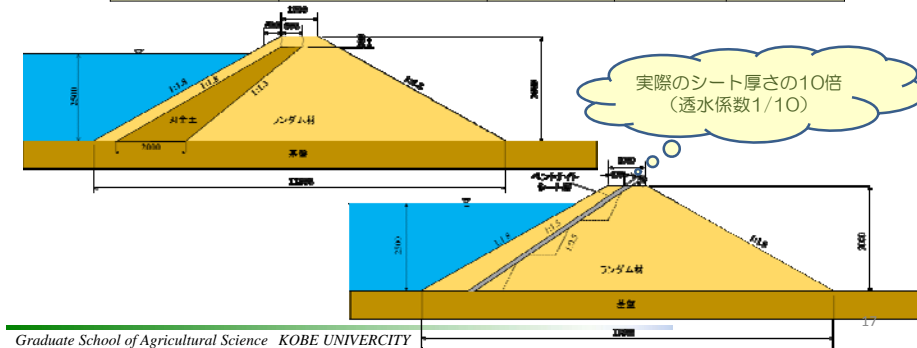
三軸圧縮試験（CUB）

刃金土と砂の割合		c' (kN/m ²)	ϕ' (°)
刃金土	砂		
100	0	38.4	33.2
50	50	6.1 ($qu/2=6.75$)	35.5

16

飽和-不飽和浸透流解析

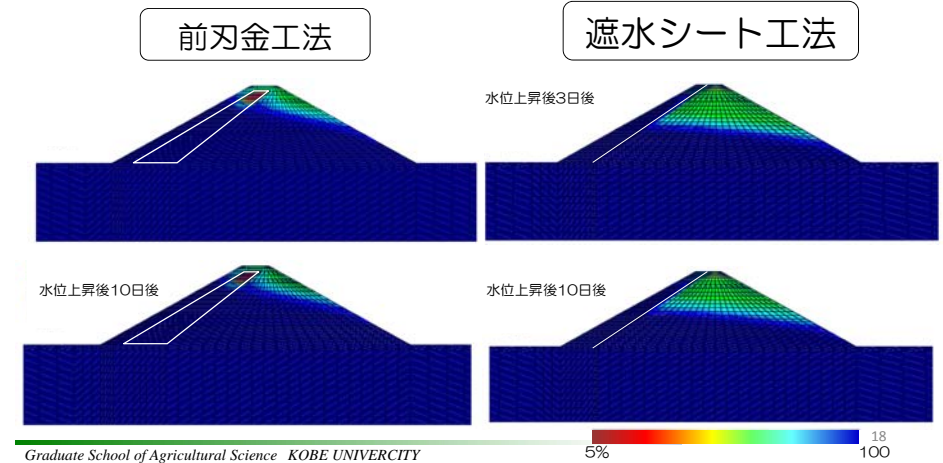
	透水係数 k (m/s)		飽和体積含水率 θ_s	比貯留係数 (1/m)	最小含水量 θ_r
	鉛直方向 k_v	水平方向 k_h			
ランダム材料	2.39×10^{-5}	1.20×10^{-4}	0.42	1.0×10^{-4}	0.15
基礎地盤 (刃金土と同じ材料)	9.42×10^{-6}	4.71×10^{-5}	0.42	1.0×10^{-3}	0.15
刃金土	9.42×10^{-6}	4.71×10^{-5}	0.42	1.0×10^{-3}	0.15
ペントナイトシート	5.0×10^{-10}		0.10	1.0×10^{-3}	0.00



Graduate School of Agricultural Science KOBE UNIVERSITY

浸透流解析結果（飽和度）

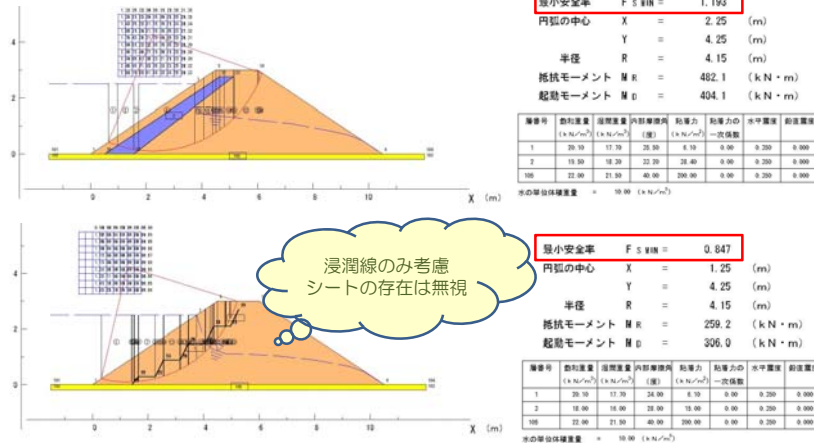
- 前波金・・・浸潤線は下流に向かい緩やかに低下
- 遮水シート・・・浸潤線はシート下流側で大きく低下
- 水位上昇後3日程度で概ね浸潤線に到達



Graduate School of Agricultural Science KOBE UNIVERSITY

安定解析（円形すべりスライス面法）

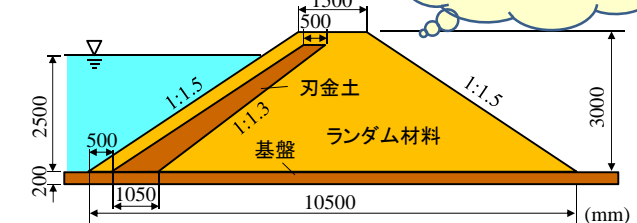
Kh=0.35



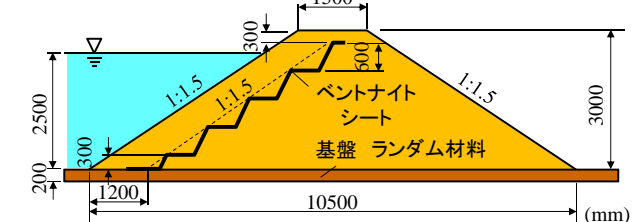
Graduate School of Agricultural Science KOBE UNIVERSITY

試験体断面

No.1 前刃金工法により改修された堤体



No.2 遮水シート工法による改修された堤体



Graduate School of Agricultural Science KOBE UNIVERSITY

現場混合土（ランダム材料）

- 施工性を考慮して、体積比約1：1で刃金土と砂を混合

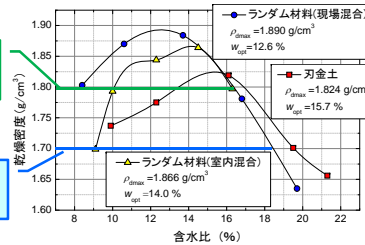
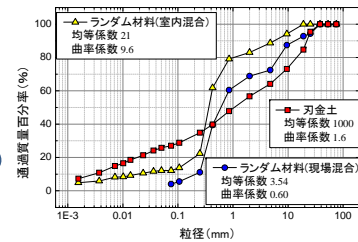
ふるいによる攪拌



すり潰しによる混練



スケルトンパケツ(0.45)を使用



21

試験盛土

- 試験盛土より締固め機械と締固め回数を決定
- ハンドガイドローラー（800kg）、プレートコンパクターを使用
- Ri計器と砂置換法により含水比と密度を測定（各回数3地点）



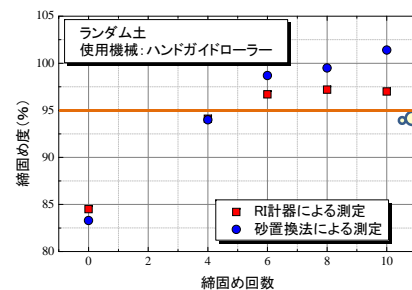
ハンドガイドローラーによる締固め状況



プレートコンパクターによる締固め状況

22

試験盛土結果（密度）



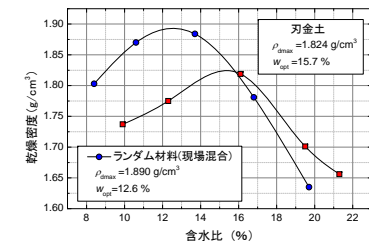
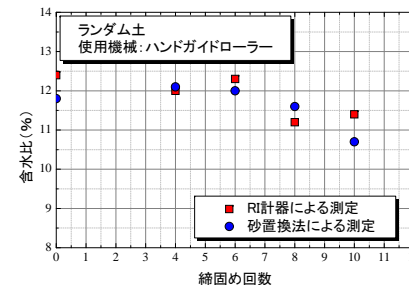
現設計指針のD値95%を考慮

仕上げ層厚を20cmにするための巻き出し厚は23cm

材料	ランダム材料						刃金土	
施工方法	ハンドローラー						ハンドローラー	
転圧回数	0	4	6	8	10	6	8	8
Ri計器による測定%	84.5	94.1	96.7	97.2	97.0	94.0	94.9	—
砂置換法による測定%	83.3	94.0	98.7	99.5	101.4	—	—	102.1
規格値%	≥90							
判定	×	○	○	○	○	○	○	○

23

試験盛土結果（含水比）



材料	ランダム材料							刃金土	
施工方法	ハンドローラー					プレート		ハンドローラー	
転圧回数	0	4	6	8	10	6	8	6	8
Ri計器による測定%	12.4	12.0	12.3	11.2	11.4	11.4	10.9	—	—
炉乾燥による測定%	11.8	12.1	12.0	11.6	10.7	—	—	15.0	15.4
最適含水比	$w_{opt}=12.6$							$w_{opt}=15.7$	
判定	○	○	○	○	○	○	○	○	○

24

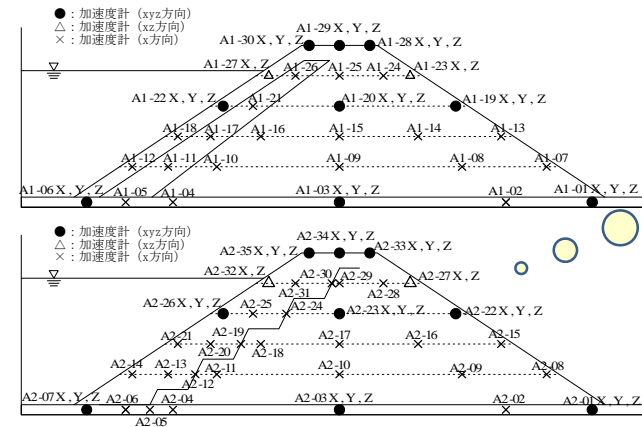
計測項目

- 加速度計および間隙水圧計（60cm毎）
- 天端および法面にレーザー変位計
- 盛土中は、静ひずみデータロガー（東京測器製 TDS303）により5分間隔計測
- 加振前後の光波測量

使用計測機器	前刃金工法	遮水シート工法	合計	設置場所
加速度計 ASW-5AM36	50	55	105	堤体内
間隙水圧計 BPR-A-200KPS	24	24	48	堤体内
レーザー型変位計 LK-500および IL-2000	18	18	36	アングル およびH鋼
合計	93	98	189	

25

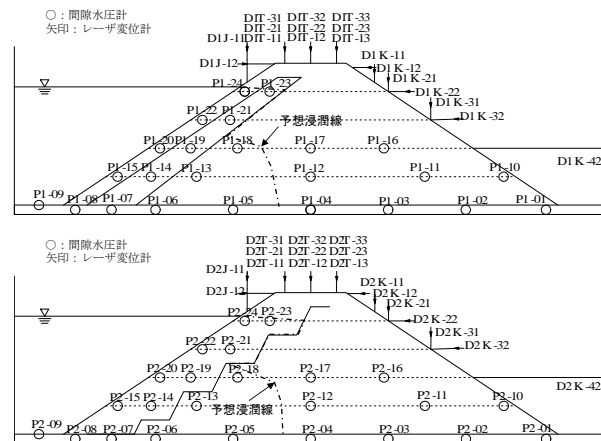
計測機器配置（加速度）



コア土および
ベントナイト
シートは周辺
土と異なる挙
動を示すこと
が考えられる
ことから、計
測機器を密に
配置

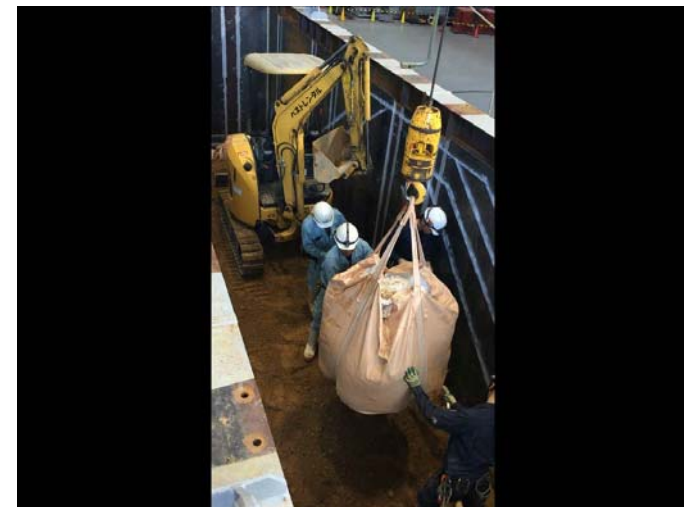
26

計測機器配置（変位、間隙水圧）



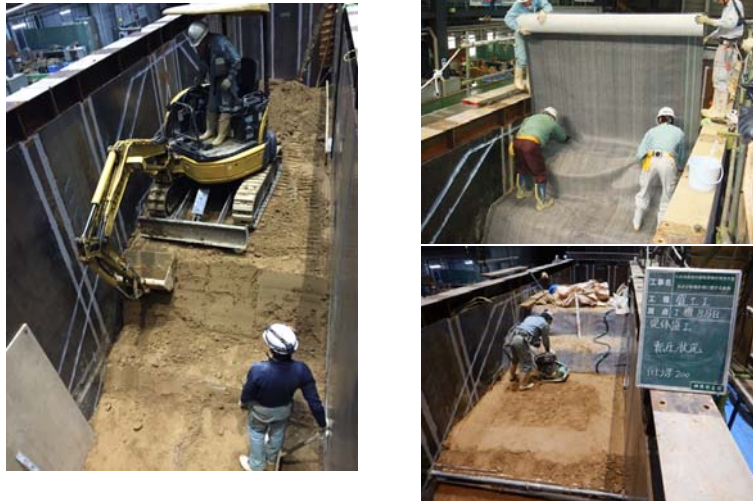
27

堤体施工（投入、敷均し、締め固め）



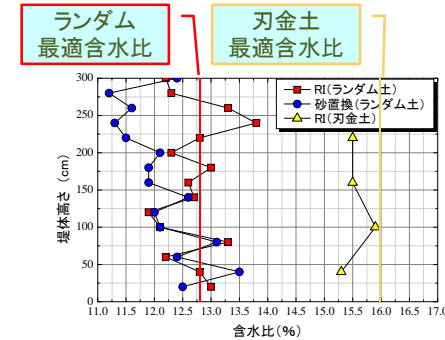
28

堤体施工（遮水シート工法側段切り）



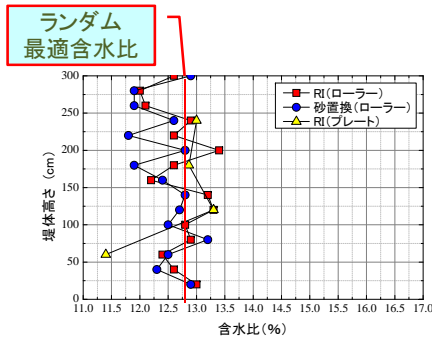
堤体の密度と含水比（前刃金工法）

- 締固め度：平均値概ね95%以上
- 砂置換法の方がRI値よりもやや大（含水比では逆の傾向）
- 含水比：最適（12.6%）よりも乾燥側（最大-1.4%）

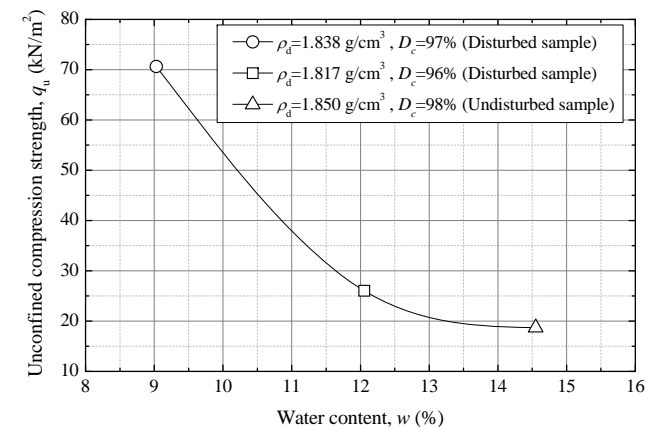


堤体の密度と含水比（遮水シート工法）

- 締固め度：平均値概ね95%以上
- プレートによる転圧：概ね95%
- 含水比：最適（12.6%）よりもやや乾燥側（最大-1.2%）

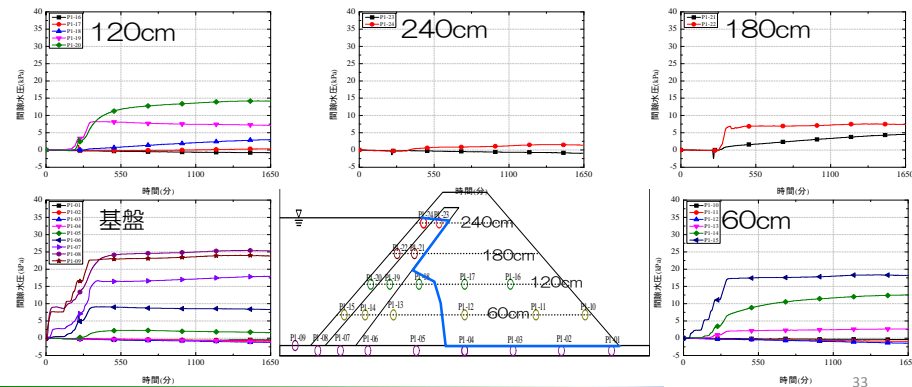


ランダム材料の一軸圧縮強度



注水時水圧変動（前刃金工法）

- 前刃金より上流側は浸水
- 浸透流解析結果よりも下流側の浸潤線が低い（透水係数の違い）
- 注水時天端0.3~0.7mm程度沈下，下流側法面0.2~1.2mm程度上流側に変位

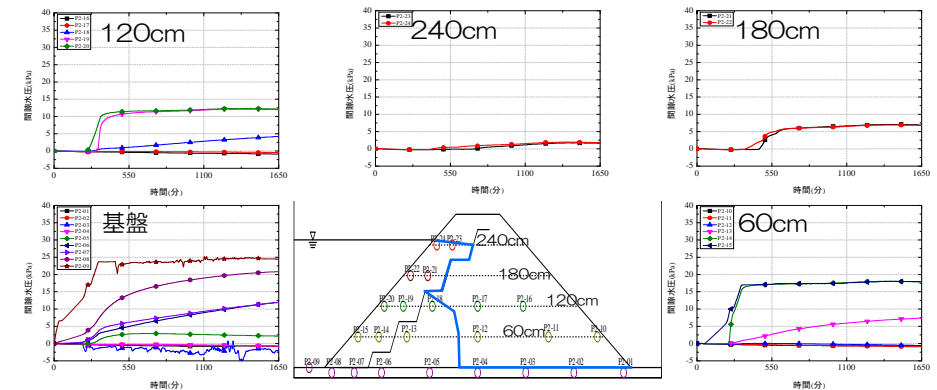


Graduate School of Agricultural Science KOBE UNIVERSITY

33

注水時水圧変動（遮水シート工法）

- 遮水シートより上流側は浸水
- 間隙水圧分布は定性的に浸透流解析の結果と一致
- 注水時天端最大0.7mm程度沈下，下流側法面最大0.8mm程度上流側に変位



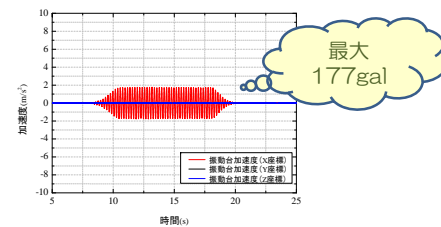
Graduate School of Agricultural Science KOBE UNIVERSITY

34

加振条件（入力波）

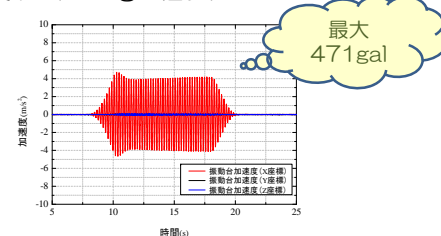
- レベル1地震を想定した地震波（170gal程度）

- 5Hz正弦波
- 170gal
- 8秒（40波）
- +テーパー2秒



- レベル2地震を想定した地震波（400gal程度）

- 5Hz正弦波
- 400gal
- 8秒（40波）
- +テーパー2秒



Graduate School of Agricultural Science KOBE UNIVERSITY

35

実験結果

Graduate School of Agricultural Science KOBE UNIVERSITY

36

L1加振実験映像（天端）

前刃金工法



遮水シート工法



L1加振後堤体状況

前刃金工法

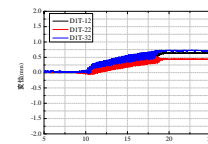


遮水シート工法



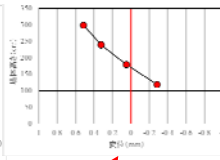
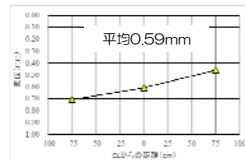
L1地震による堤体の残留変位

- 残留変位は1mm以内（ほぼ変位なしと判断）
- 天端：上流側の方がやや沈下大
- 沈下により、堤体底部のはらみ出し
- 両ケース変形の傾向は同一と見なせる

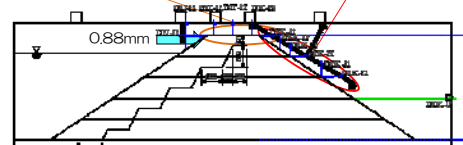
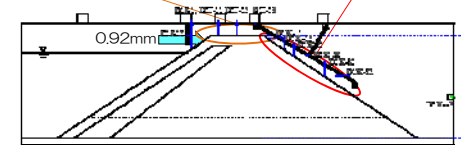
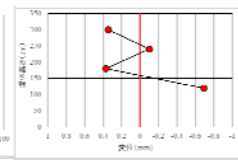
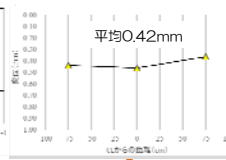


変位計測結果一例

前刃金工法

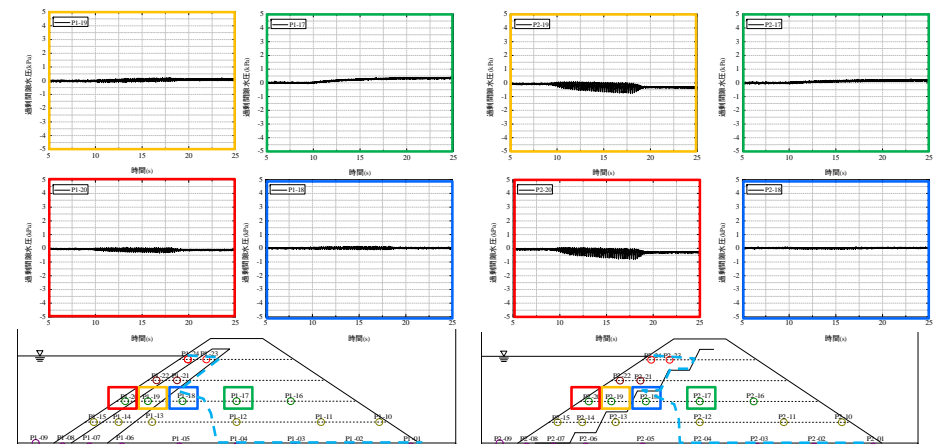


遮水シート工法



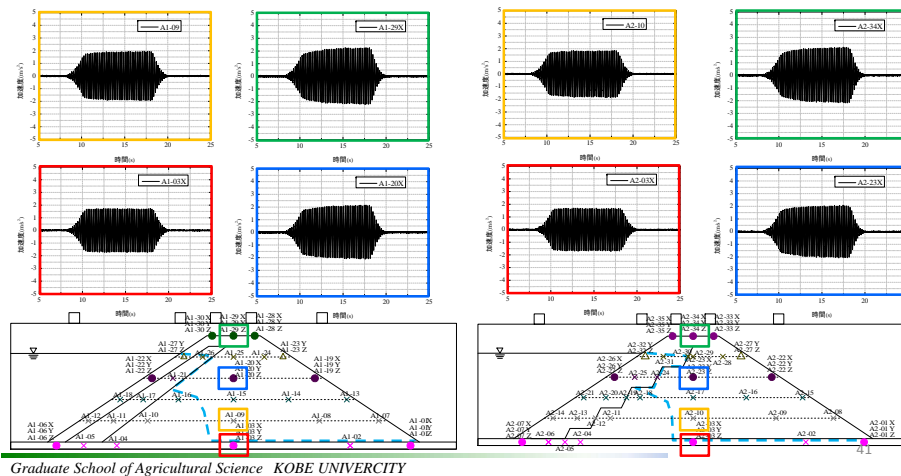
間隙水圧変化（L1地震）

全計測地点でほとんど上昇していない



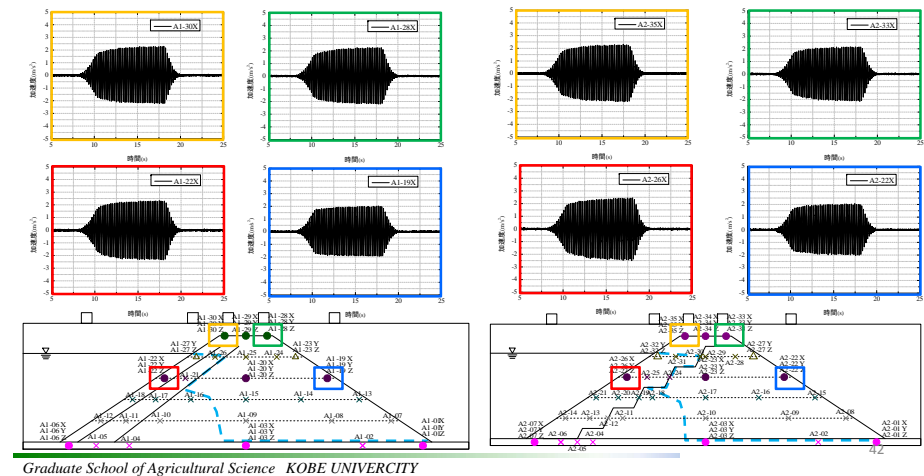
応答加速度 (L1地震)

- ・ 基盤の加速度に対する天端の増幅は1.3倍 (両ケースともに)
- ・ +(上流向き)と-(下流向き)の値はほぼ同一



応答加速度 (L1地震)

- ・ 浸水部 (水中) に設置された加速度計の応答が若干大きい
- せん断剛性の低下に伴うインピーダンス比の低下 (L2ではより顕著)



L2加振実験映像 (天端)

前刃金工法



遮水シート工法



13秒付近で天端にクラック発生

L2加振後堤体状況

- ・ 前刃金工法の堤体には上下流法面に5~15cm程度のクラック
- ・ 遮水シート工法には天端に大きなクラック, 上流法面に小さなクラック



前刃金工法上流



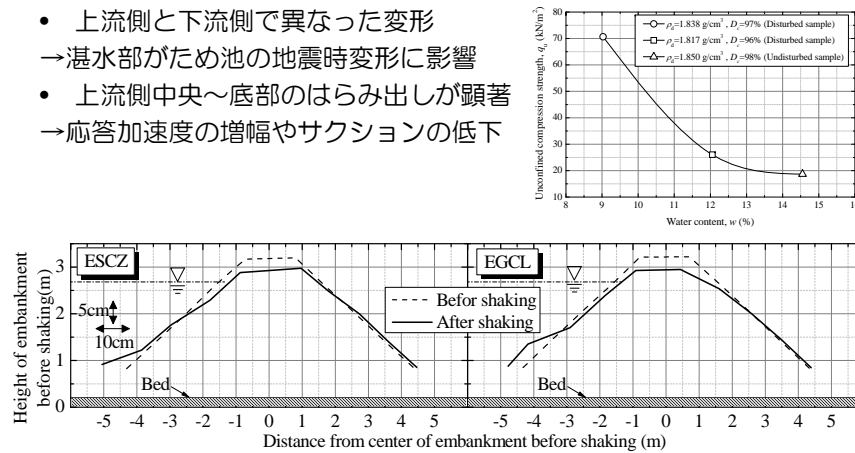
前刃金工法下流



遮水シート工法上流

光波測量による加振前後の堤体変位

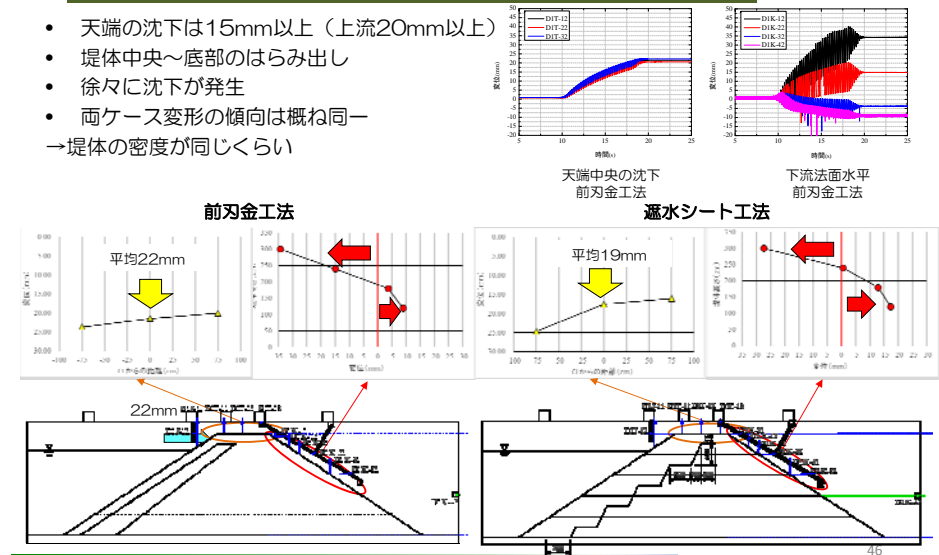
- 上流側と下流側で異なった変形
- 湛水部がため池の地震時変形に影響
- 上流側中央～底部のはらみ出しが顕著
- 応答加速度の増幅やサクシンの低下



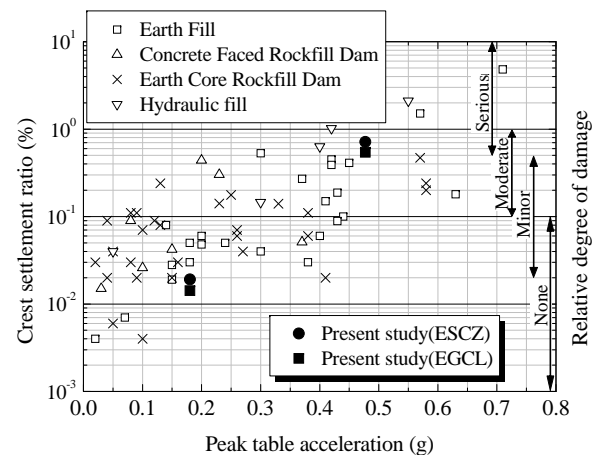
45

L2地震による堤体の残留変位

- 天端の沈下は15mm以上（上流20mm以上）
- 堤体中央～底部のはらみ出し
- 徐々に沈下が発生
- 両ケース変形の傾向は概ね同一
- 堤体の密度が同じくらい



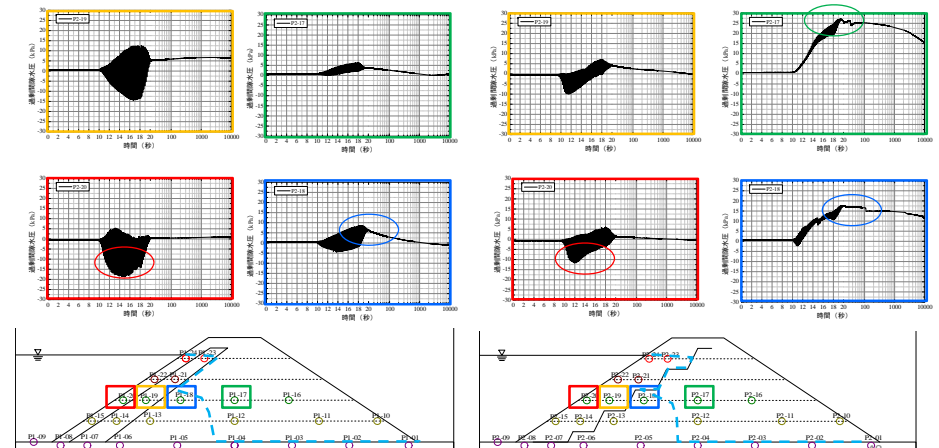
基盤加速度と天端の沈下率の関係



47

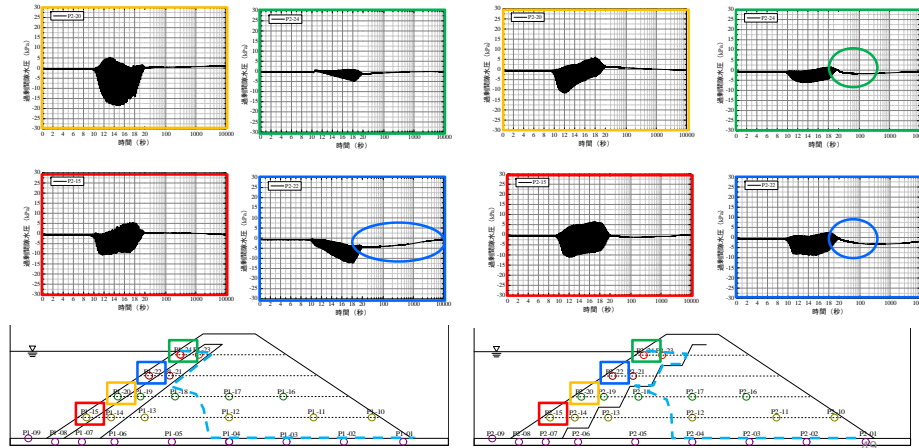
間隙水圧変化 (L2地震)

- 上流側では負の水圧が発生し蓄積や残留はあまりない
- 密度が高い砂の非排水せん断挙動
- 飽和度の高い不飽和領域で大きく上昇（蓄積、過剰間隙水圧比で0.7程度）
- 飽和度の高い状態で土の骨格体積収縮
- 2時間45分を経過した段階でも水圧はほとんど消散していない→余震による再増加の可能性



間隙水圧変化 (L2地震)

- 上流側では負の水圧が発生し蓄積する場合がある
→その後の再吸水すると体積膨張か？→余震で液状化？
- 遮水シート工法では加振終了後2分程度水圧低下
→クラックに水がしみ込んだ？

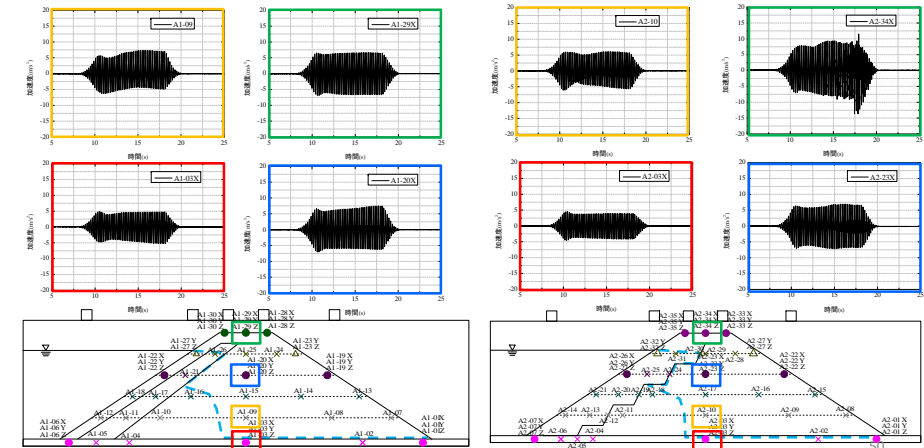


Graduate School of Agricultural Science KOBE UNIVERSITY

応答加速度 (L2地震)

前刃金工法で13秒付近、遮水シート工法で11秒付近から、上流方向の加速度が下流方向よりも大きくなる。

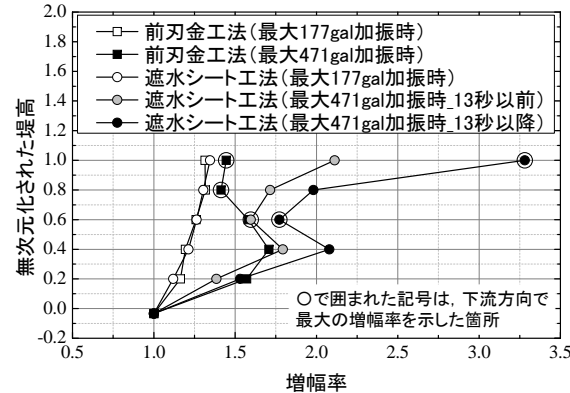
→上流側の変形が下流よりも大きいことと整合



Graduate School of Agricultural Science KOBE UNIVERSITY

堤体中央での加速度の増幅率

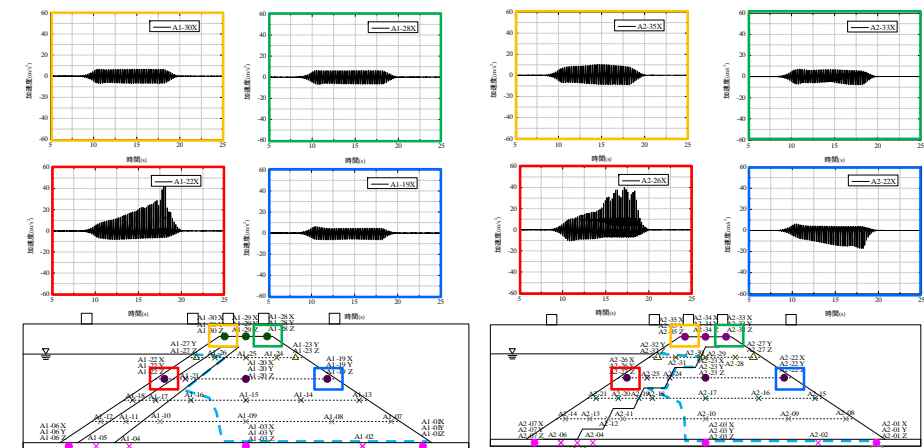
- L1加振の場合、両工法とも、増幅率は天端で1.3倍程度
- L2加振の場合、前刃金工法で1.4倍、遮水シート工法のクラック発生前で2.1倍、クラック発生後で3.3倍
→クラックの近傍にセンサーが設置されていたため、周辺地盤の挙動とは異なる可能性



Graduate School of Agricultural Science KOBE UNIVERSITY

応答加速度 (上下流の比較、L2地震)

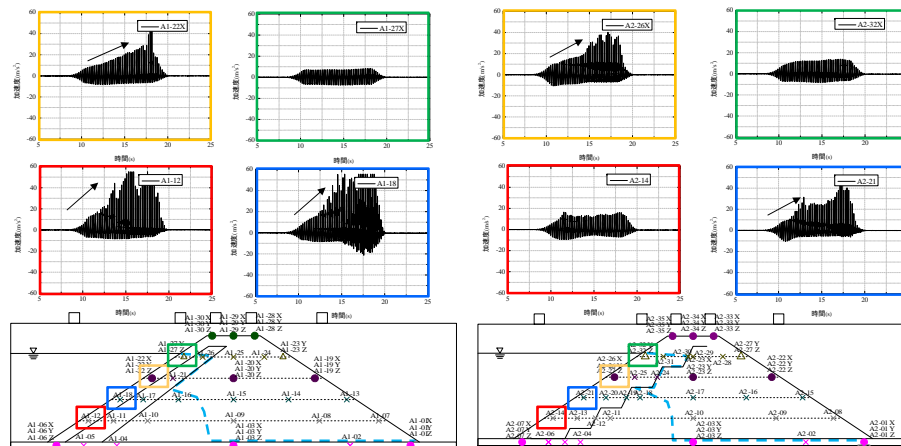
- 浸水部（水中）に設置された加速度計の応答がかなり大きい
→せん断剛性の低下に伴うインピーダンス比の低下



Graduate School of Agricultural Science KOBE UNIVERSITY

応答加速度（上流側での比較、L2地震）

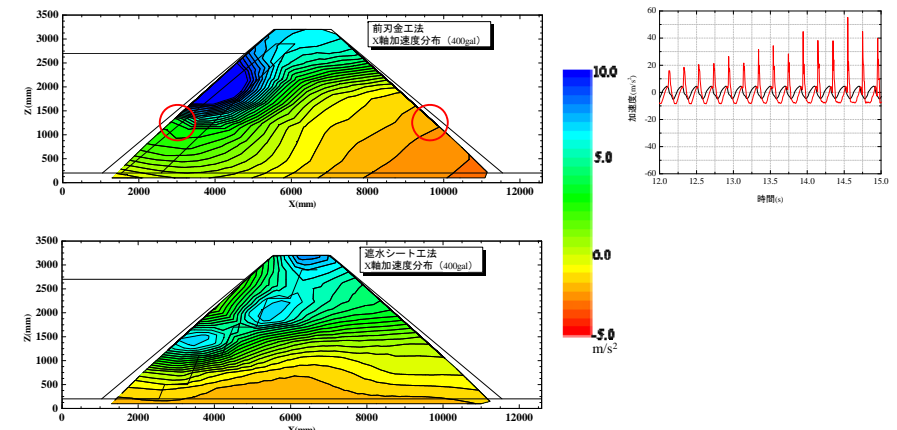
- 浸水部（水中）に設置された加速度計の応答がかなり大きい
→せん断剛性の低下に伴うインピーダンス比の低下



Graduate School of Agricultural Science KOBE UNIVERSITY

天端加速度最大時の加速度分布

- 前刃金では、上流側正の時、下流側負。
→堤体の上下流で大きな位相差が発生
→底樋や洪水吐など堤体を横断する剛構造の施設に影響？



Graduate School of Agricultural Science KOBE UNIVERSITY

54

まとめ

- 改修ため池の耐震安全性を検証するため、一般的な前刃金工法とGCLを用いた遮水シート工法による改修ため池を対象に、レベル1地震動、レベル2地震動を想定した実規模ため池堤体加振実験を実施。
- L1加振において、両ケースとも堤体の変形は極めて小さかった。
→高さ3 mという小規模なため池堤体は、十分に締め固められていれば、設計指針で要求される耐震性能は保持される可能性が高い。

L2加振の結果

- 上流側の方が、下流側よりも変形が大きく、ため池の地震時の変形に湛水部の影響があることが確認された。
- 両ケースとも堤体は沈下し、上流側天端の沈下は20mm以上発生した。遮水シート工法では天端に大きなクラックが生じたものの決壊や目立った漏水には至らなかった。

55

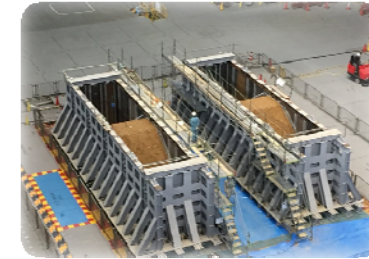
まとめ

- 堤体底面の応答加速度に対して、天端の応答は前刃金工法で1.4倍、遮水シート工法で2.1倍（亀裂後3.3倍）に増幅した。
- 周波数が5Hzと大きいため、密度の高い堤体上流法面は非排水状態となり負の間隙水圧が発生した。
→上流側の締め固めは特に重要
- 浸潤線より上側の不飽和領域でも飽和度が高い箇所では、堤体の大きな沈下に伴う土の骨格収縮により間隙水圧が大きく増加した。また、2時間以上経過しても水圧は消散しなかった。
- 両ケースとも上流側が下流側よりも加速度応答が大きい傾向を示した。
→含水比上昇に伴うインピーダンス比の低下に起因すると考えられる。

56

謝辞

本研究は、防災科学技術研究所と兵庫県の共同研究および兵庫県と神戸大学の協力型共同研究のもとに実施された。研究計画策定や実験実施にあたり、E-ディフェンスを活用した減災対策推進委員会（岡田恒男委員長）の助言を受けた。



ご静聴ありがとうございました