

浮き型地下ダム構築に伴う塩淡水境界挙動 に関する研究

A STUDY ON BEHAVIOR OF SALTWATER AND FRESHWATER INTERFACE
FOR EFFECTIVE UTILIZATION OF FLOATING-TYPE UNDERGROUND DAM

太田綾子¹・増岡健太郎¹・山本 肇¹・今村 聡¹

Ayako OHTA, Kentarou MASHUOKA, Hajime YAMAMOTO and Satoshi IMAMURA

¹正会員 大成建設株式会社 技術センター土木技術研究所 (〒245-0051 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

In islands, rising sea level induced by global warming may cause a concern on fresh water supply, because sea water penetrates groundwater aquifers, resulting in saline and less usable groundwater. Floating-type underground dam is a feasible way to secure fresh water in islands, in which fresh groundwater can be stored in circular diaphragm walls. Toward the practical use of the dam, in this paper, we addressed two topics as follows. 1) The applicability of "vertical double pumping method" was investigated by laboratory experiments and numerical simulations. The results suggest that the method can effectively used to prevent up-corning of salt water due to excessive freshwater extraction, by placing a saltwater discharge well below freshwater pumping wells. 2) Long-term behavior of fresh/salt water boundary after the placement of a floating type underground dam was demonstrated by numerical simulations. The results suggest that the feasibility of a floating-type underground dam could strongly depend on rate of freshwater recharge from the surface; The thickness of freshwater lens will become thin at the outside of the dam.

Key Words : *Underground dam, Freshwater lens, Boundary between saltwater and freshwater*

1. はじめに

気候変動の影響によって、21世紀中頃までにカリブ海と太平洋の島嶼では、乾季における水不足が深刻化すると推定されている。また、地球温暖化に伴う海面上昇と気候変動による降雨パターンの変化が重なると、ツバルやマーシャル諸島といったサンゴ礁からなる島嶼国の水資源は、致命的な影響を受けると予想される^{1),2)}。日本国内においても、海水面の上昇による河川の塩水遡上や、塩水混入による淡水の取水障害が懸念されている。島嶼の地盤は浸透能が非常に高い風化石灰岩で形成されていることが多く、安定した淡水資源を確保できるような河川は一般的に存在しない。また、高級リゾート地などで使用されている海水の淡水化プラントについては設置、維持管理に高額のコストが必要であることから、島嶼での淡水源は容器に貯留した雨水か、地下水に限られる。

サンゴ礁が堆積した地盤では、雨水の一部は表流水として海へ流出するものの、一部は涵養し、地盤中へ浸透して海水との境界まで達する。地盤に浸透した雨水は、海水と淡水の密度差によって、海水上部にレンズ状に溜まっており、これを淡水レンズと呼ぶ。淡水レンズは、Ghyben-Herzbergの式で表現

されるように、島の中央では最も層厚が大きく、海岸へ近づくにつれて薄くなっている。

『浮き型地下ダム』とは、このような淡水レンズを持つ島嶼において、淡水貯留量を増大させる技術である(図-1)。島の地下に周状に止水壁を構築し、止水壁の内側に淡水を貯留して、淡水の貯留量を増大させる。既往の研究によれば、浮き型地下ダムの淡水貯留能に関する有効性については成果が得られており、島嶼における水不足問題を解決する手法として注目されている。しかしながら、貯留した淡水の効率的な取水方法に関しては、従来の井戸による取水を行うと井戸周辺において局所的に塩水を引き込んでしまうアップコーニングの問題が残されている。また、最適な浮き型地下ダムの深度や、浮き型地下ダム構築後の淡水の貯留速度については未だ明らかにされていない。

本研究では、浮き型地下ダムに貯留した淡水の効率的な取水方法として『鉛直二重揚水法』を提案し、その有効性を室内試験および数値解析により検討した。また、塩水密度流を考慮した地下水シミュレーション(3成分2相流解析)により、浮き型地下ダム構築後の淡水レンズの挙動特性を検討した。

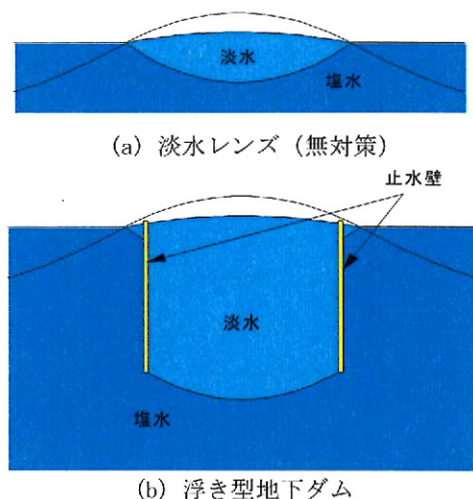


図-1 浮き型地下ダム概念

2. 鉛直二重揚水法の適用可能性

(1) 鉛直二重揚水法

淡水レンズから従来の井戸により淡水を揚水すると、塩淡水境界付近で局所的な塩水の引き込み(アップコーニング)が生じるため、淡水を効率的に揚水することは難しい。また、地球温暖化によって海水面が上昇すると、淡水レンズの厚さが薄くなることが予測されており、既存の揚水井が塩水化されることも危惧されている。鉛直二重揚水法とは、これらの塩淡水境界付近における淡水取水に伴う塩水の浸入回避技術である。

均質地盤において二点から同流量で揚水した場合、理論上二点の垂直二等分線上で二点を結ぶ方向の流速ベクトルは相殺され、流速場は二点の間に止水壁を設けた場合と同じ状態となる。図-2に単一揚水と二点揚水の浸透流解析による流れの違いを示した。単一揚水では、揚水箇所を中心として全方向から均等に揚水点へ向かう流れが生じている。一方、同流量を二点で揚水した場合、二点の垂直二等分線上で二点間方向の流れが消滅していることがわかる。

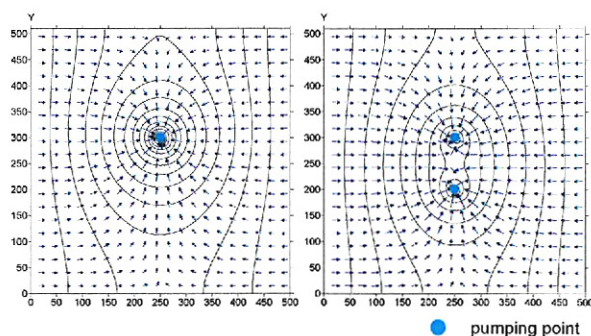
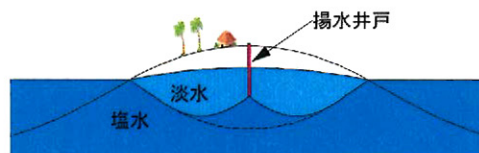


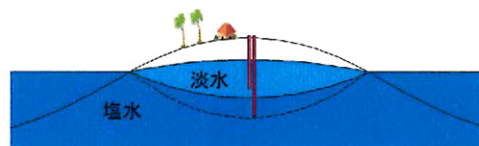
図-2 浸透流解析による流れの比較
(左:単一揚水 右:二点揚水)

鉛直二重揚水法ではこの原理を利用して、二本の井戸のうち一本の揚水地点は淡水側、一方は塩水側とし、塩淡水境界がそれぞれの揚水地点の垂直二等分線となるように設置する。淡水側で揚水すると同時に塩水側でも同量揚水することにより、塩淡水境界付近における井戸方向への流れを相殺し、淡水側への局所的な塩水混入を防止することが可能である。図-3に示すように、浮き型地下ダム構築時の淡水取水方法として鉛直二重揚水法を適用すれば、最も効率的に貯留した淡水の揚水が可能になると考えられる。

【従来】



【二重揚水法適用】



【浮き型地下ダム+二重揚水法適用】

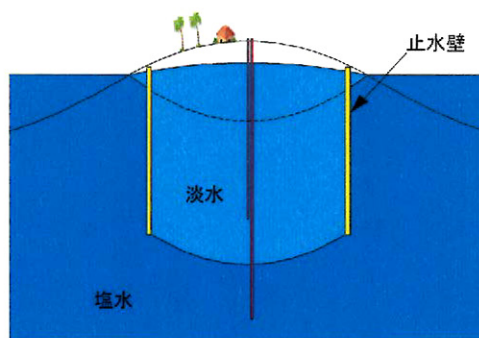


図-3 鉛直二重揚水の概念

(2) 室内試験

a) 試験方法

本研究での試験装置全体の概略を図-4に示す。試験装置の主要部材は、鉛直二次元アクリル水槽($l=100\text{mm}$)、淡水貯留タンク、塩水貯留タンク、定流量ポンプ、涵養装置(多孔塩ビ管)、越流タンクから構成される。鉛直二次元アクリル水槽の内部(図-4中ABCD)は試料充填エリアとし、表-1に示す材料を充填して島嶼の地盤を模擬し、水槽前面の中央には揚水孔を縦に並べて設けた。充填エリアの外側は水位濃度固定エリアとし、下側から定流量ポンプにより塩水を少量ずつ供給してエリア内の塩水濃度を一定に保った。試験に用いた塩水はフルオレイセンサト

[illegible]

表-1 充填材料物性

項目	値
土粒子の密度(g/cm ³)	2.826
均等係数	1.62
曲率係数	1.06
D ₅₀ (mm)	0.42
塩水重量濃度(%)	3.0
試料充填密度(g/cm ³)	1.50
間隙率(-)	0.47

ケース	淡水側（上部） 平均揚水量 (mL/min)	塩水側（下部） 平均揚水量 (mL/min)
1	133	なし
2	135	239

室内試験結果を図-5に示す。図より、塩水側（水槽下側）と淡水側（水槽上側）の両方で同時に揚水を行ったケース2の方が、淡水側のみで揚水を行ったケース1よりも、より多くの淡水を揚水できたことがわかる。図中に点線で示した塩分濃度0.02%の水質に達するまでの淡水揚水量は、ケース2ではケース1の約3.5倍となり、鉛直二重揚水法が単一井戸で揚水を行う場合よりも、塩水混入を抑制することができる可能性が高いことがわかった。図-7(b)、図-8(b)に室内試験時の観察結果を示す。ケース1では水槽中央が盛り上がるようなアップコーニングが発生したが、ケース2では観察されなかった。

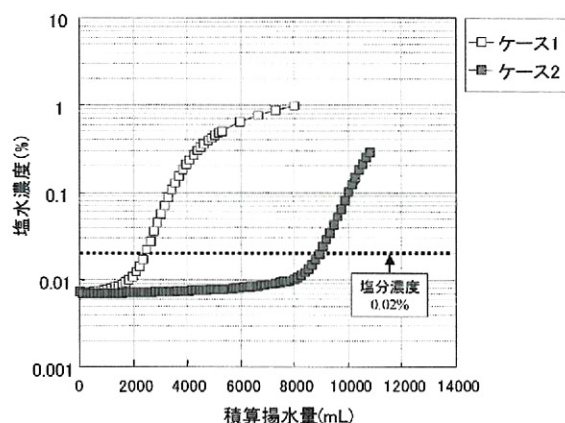
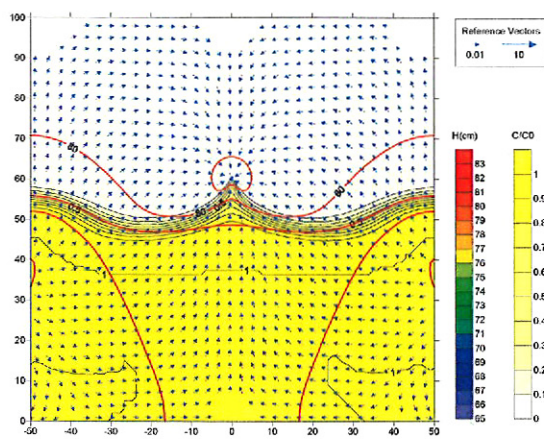


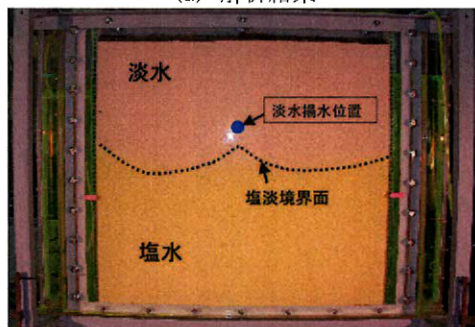
図-5 積算揚水量との塩水濃度の経時変化

a) 解析方法

図-6 解析モデル (単位: cm)

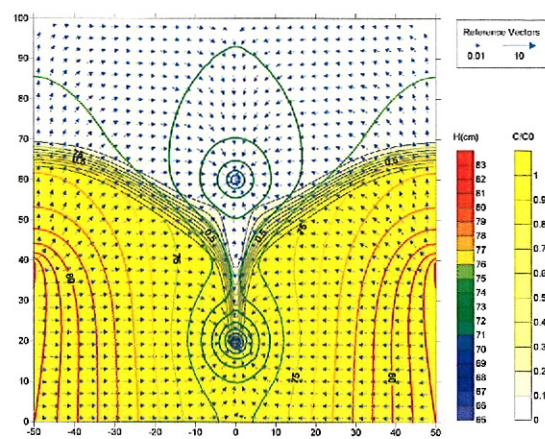


(a) 解析結果

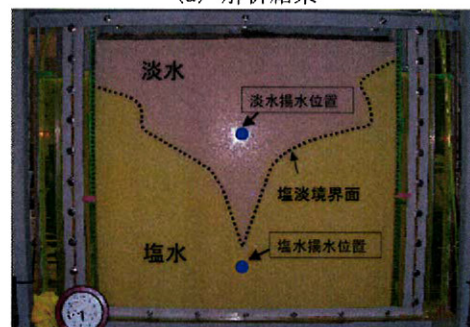


(b) 室内試験結果（排水開始40分後）

図-7 ケース1の計算結果と実験結果



(a) 解析結果



(b) 室内試験結果（排水開始60分後）

図-8 ケース2の計算結果と実験結果

b) 解析結果

室内試験のケース1に相当する解析結果と室内試験結果（排水開始40分後）を図-7に、ケース2に相当する解析結果と室内試験結果（排水開始60分後）を図-8に示す。解析結果には塩分濃度（黄色濃淡）、等ポテンシャル線、流速ベクトルを示す。図-7より、淡水側のみで揚水を行った場合には、塩淡水境界でアップコーニングが生じることが解析結果および室内試験結果の両方から確認できる。一方、図-8に示すように、淡水側で揚水すると同時に塩水側でも揚水することで、排水開始から60分後であっても、淡水側への塩水部のアップコーニングは発生しないことがわかる。

(4) 結論

鉛直二次元水槽による室内試験と室内試験をモデル化した数値解析を実施した結果、試験結果と解析結果は、概ね同じ傾向を示した。鉛直二重揚水法を適用すると局所的な塩水の引き込みを抑制することができ、塩分濃度0.02%以下の淡水の揚水量は、従来の井戸で単一揚水した場合に比べて約3.5倍であることが示された。

3. 淡水貯留シミュレーション

(1) 目的

浮き型地下ダム構築後の淡水貯留域の形状過程や貯留に要する期間について検討するため、塩水と淡水の密度差によって生じる塩水密度流を考慮した数

値シミュレーションを実施した。

(2) 解析条件

今回は、島を直径4kmの円柱で模擬し、図-9に示すような2次元軸対称モデルを作成した。地層は、浮き型地下ダムの構築に適すると考えられる沖縄県の島嶼を想定し、琉球石灰岩（EL+10～-60m、透水係数 $K=1 \times 10^{-1}$ cm/s）と、その下位層として島尻層群（ $K=1 \times 10^{-5}$ cm/s）を設定した³⁾。地表面標高はEL+10mとし、琉球石灰岩の有効空隙率は10%、年間降雨量は沖縄県の平均降雨量から2000mmと仮定した^{4), 5)}。

数値解析は、多成分・多相系の地下流体解析コードTOUGH2（Pruessら、1999）を用いた。塩水と淡水の密度差によって生じる塩水密度流や地下水面変動を考慮するため、3成分（ H_2O 、NaCl、空気）2相（液相、気相）流体解析を行うこととした。

境界条件として、側面境界は、海水面（EL-0m）より上側を大気圧、海水面以下を静水圧で各々固定し、海水面以下の塩分濃度を4%で固定した。底面は不透水境界とした。地表面境界は、次に述べる地下水涵養量による一定流量境界とし、涵養地下水の塩分濃度は 1×10^{-3} %とした。

淡水レンズは地表面の降雨が地下に浸透することにより形成される。降雨から蒸発、地表面流出する水量を差し引いたものが地下水涵養量と呼ばれ、地域によるが、我が国では年間降雨量の20%～40%程度であることが多い。さらに涵養された地下水のうち、ある割合は表層の高浸透性の地層を通して海へ

直接流出する可能性があり、淡水レンズとして地下に貯留される割合はさらに少ないと考えられる。

本研究では、仮に、降雨量の年間降雨量のうち淡水レンズとして貯留される水の割合を実質貯留率 α （地下水涵養量＝年間降水量×実質貯留率 α ）と呼ぶ。淡水レンズの厚さは、地表面からの淡水涵養と海へ淡水流出のバランスで決まるため、 α が大きいほど淡水レンズの層厚は増すことになる。

a) 自然状態の淡水レンズ

地下ダム構築前の自然状態を設定するため、淡水レンズを解析した。図-10(a)に示すように、海水面以下を塩水で満たした状態を初期状態として地表面から淡水の地下水涵養を続けると、淡水レンズが形成される。実質貯留率 α が2%および20%のケースについて解析し、淡水レンズの層厚について検討した。ここで、実質貯留率が20%の場合は、地下水涵養量のほとんどが淡水レンズの形成に寄与する場合を相当し、2%の場合は淡水の浸透量が少ない場合に相当すると考えている。

b) 浮き型地下ダム構築後

a)で得た自然状態の淡水レンズを用いて、そこに浮き型地下ダムを構築した場合に形成される淡水域を解析した。浮き型地下ダムは、島の同心円状に構築し、その半径を1kmとした。解析ケースは、 $\alpha = 20\%$ の場合と、 $\alpha = 2\%$ の場合の2ケースを設定した。地下ダムの深度は、初期の淡水レンズの厚さに合わせ、各々40mと20mとした。地下ダムの透水係数は 1×10^{-6} cm/s、有効空隙率は10%とした。

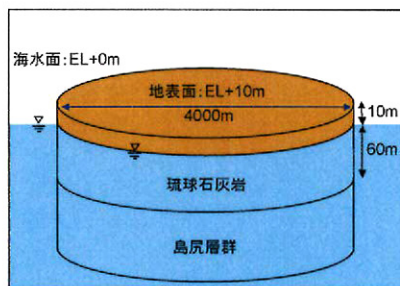


図-9 解析条件概略

(3) 解析結果

a) 自然状態の淡水レンズ

地下ダム構築前の淡水レンズを解析した結果を図-10(b), (c)に示す。定常状態となる100年後の淡水レンズの層厚は、 $\alpha = 2\%$ の場合約10m、 $\alpha = 20\%$ の場合約30mとなった。日本国内の島嶼の淡水レンズ調査結果⁵⁾によれば、淡水レンズの層厚は10mオーダーであるという報告もあるが、淡水レンズの厚さには帯水層の透水係数や水理地質構造によっても変化するため、実際のサイトでの実質貯留率の評価にあたっては、上記の要因を加味した総合的な調査と解析が必要となる。

b) 浮き型地下ダム構築後

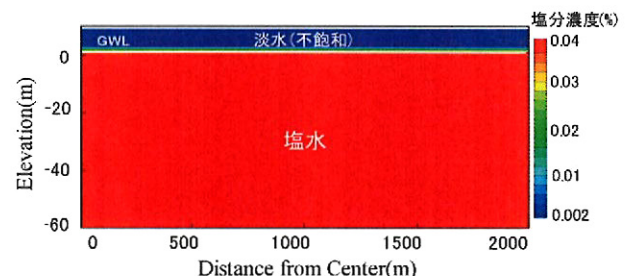
実質貯留率20%と2%の場合の解析結果を、各々図-11と図-12に示す。実質貯留率20%の場合（図-11）

には、地下ダムを構築してから約10年後に地下ダムのほぼ下端まで淡水が貯留されていることがわかる。一方、実質貯留率2%の場合（図-12）には、地下ダム構築後から10年経過しても淡水厚さの増加は小さく、地下ダム深度が20mであっても淡水域がダム深さに達するのに約100年を要することが分かる。

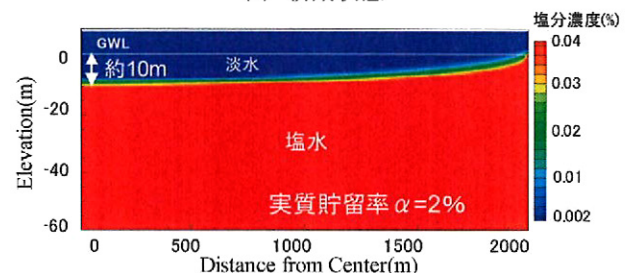
また、地下ダムの深度、実質貯留率に関係なく、地下ダム構築位置より島の端部側では湧昇流が生じており（図中の矢印）、徐々に淡水の層厚が減少し、淡水の揚水利用が不可能となる地域ができる可能性も指摘される。

(4) 結論

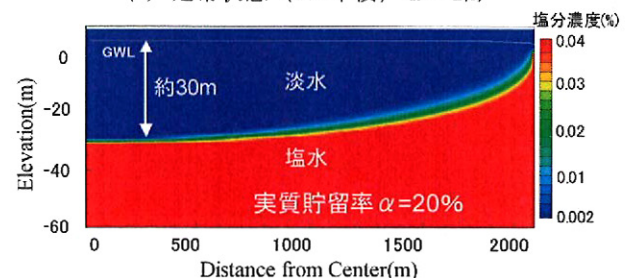
浮き型地下ダムの効果は、地表からの淡水の涵養量によって大きく左右され、涵養量が少ない場合には、十分な淡水域の形成に数10年以上の歳月を要する可能性がある。また、地下ダムの深度が深すぎると帯水層の地下水遮断効果により、浅部の地下水面上昇を引き起こすため、地下ダムの深度は淡水の予定貯水量を確保できる範囲で浅めに設定するのが妥当と思われる。ダム設計にあたっては、詳細な水文データならびに揚水量を考慮したダム形状や深度の最適化が重要となる。



(a) 初期状態



(b) 定常状態（100年後、 $\alpha = 2\%$ ）



(c) 定常状態（100年後、 $\alpha = 20\%$ ）

図-10 解析結果（地下ダム構築前）

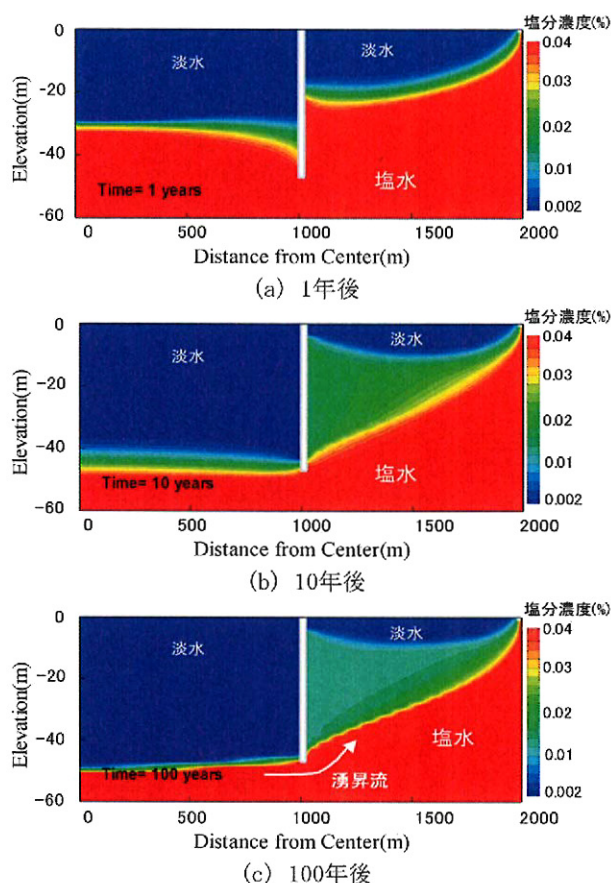


図-11 解析結果（地下ダム構築後、実質貯留率20%）

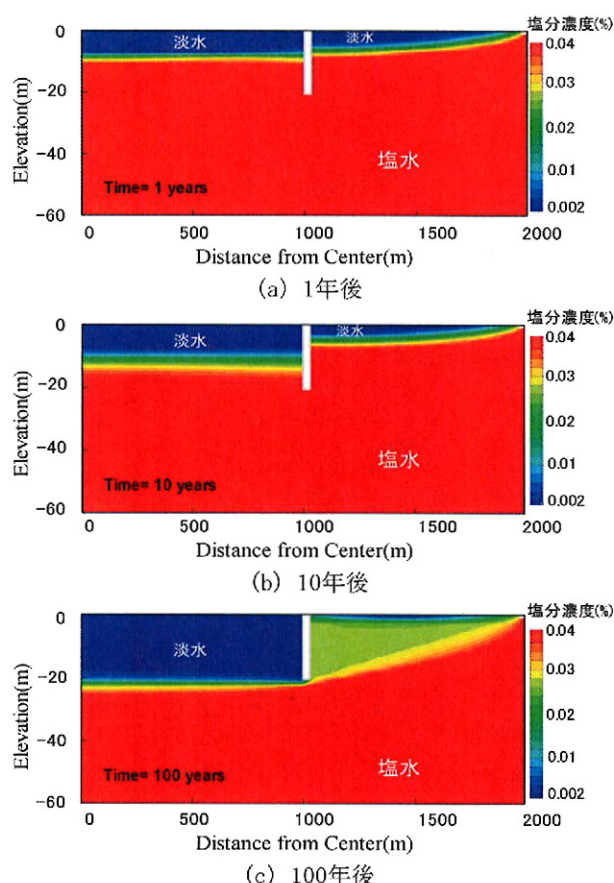


図-12 解析結果（地下ダム構築後、実質貯留率2%）

4. まとめ

浮き型地下ダムに貯留した淡水の効率的な取水方法として、鉛直二次元水槽による室内試験と室内試験をモデル化した数値解析を実施した。その結果、試験結果と解析結果は、概ね同じ傾向を示し、鉛直二重揚水法によって局所的な塩水の引き込みを抑制できることが示された。

地下ダム構築後の貯留シミュレーションにより、地下ダムへの実質貯留率が浮き型地下ダム構築の効果を左右する大きな要因であることを示した。特に、淡水の貯留によって地下ダム外縁では淡水の湧昇流が発生し、淡水レンズの層厚が減少するなどの課題が明らかとなった。

参考文献

- 1) 三村信男, 原沢英夫: 海面上昇データブック, 国立環境研究所 地球環境研究センター, 2000.
- 2) 笠橋一輝, 秋元圭吾: 南太平洋島嶼国の淡水レンズに対する海面上昇の影響評価, 第24回エネルギー資源学会研究発表会講演論文集, pp. 41-44, 2005.
- 3) 中里裕臣, 井上敬資, 中西憲雄: 沖縄県津堅島における淡水レンズ強化試験の可視化, (社)物理探査学会第114回学術講演会論文集, pp. 113-114, 2006.
- 4) 宮城調勝, 小宮康明: 琉球石灰岩の有効空隙率と圧縮強度, 琉球大学農学部学術報告 50, pp. 131-135, 2003.
- 5) 長田実也, 古川博恭, 富田友幸, 座波吉実: 沖縄・多良間島の淡水レンズ-琉球石灰岩の透水性について, 日本地質学会, pp. 420, 1988.
- 6) Pruess, K., C. Oldenburg, and G. Moridis.: TOUGH2 user's guide. Version 2.0. Rep. LBNL-43134. Lawrence Berkeley Natl. Lab., Berkeley, CA. 1999.