

2025年度 河川技術に関するシンポジウム

模型大型堤防における降雨時の水収支分析に基づく堤体内の水の貯留及び流出過程の検討

中央大学大学院

中央大学大学研究開発機構

中央大学大学研究開発機構

中央大学大学研究開発機構

○白石 芳樹

竹村 吉晴

後藤 岳久

福岡 捷二

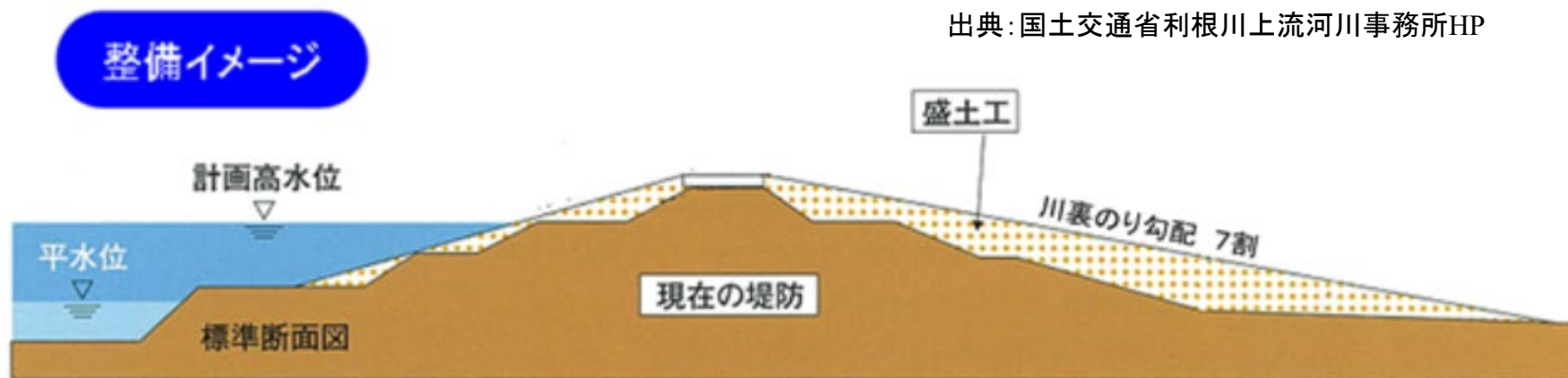
■問題意識

- 利根川のような7割堤では、浸潤面が長くなり法尻からの崩壊を抑制することができる。一方で堤体表面積が増加することで浸透量が増加する。
- 従来の浸透流解析法では、堤防への降雨の浸透特性は、堤体の土質だけでなく、雨の降り方にも影響され、降雨量のうちどの程度の量が貯留されるかの判断が困難。



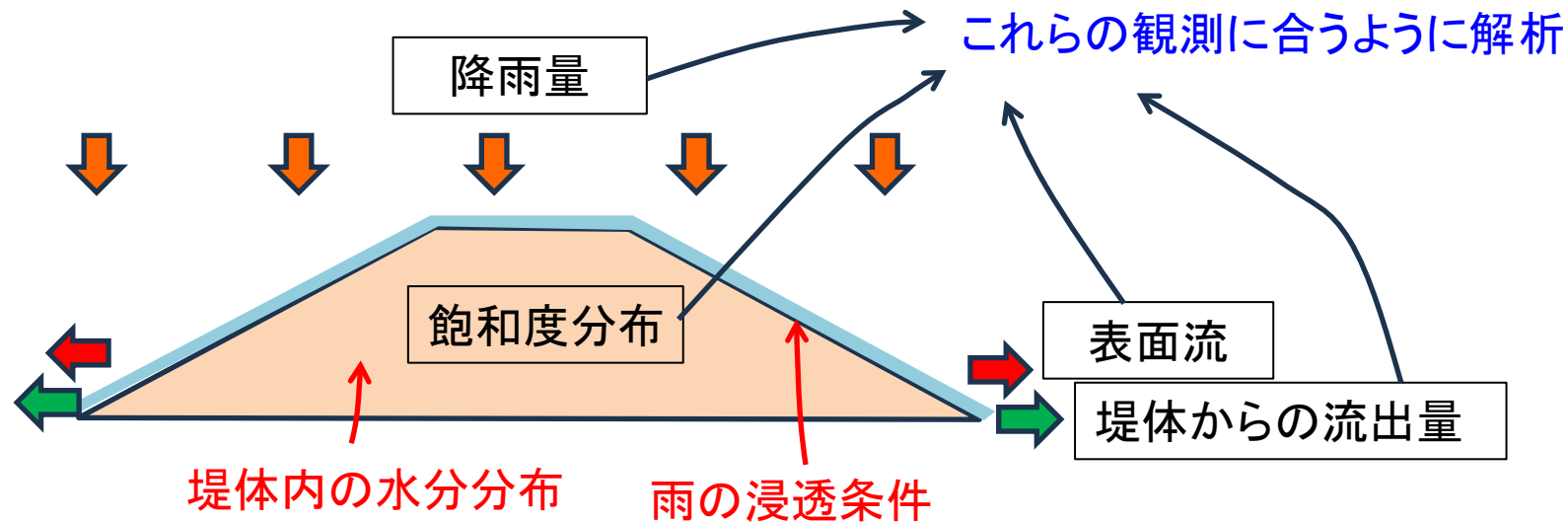
(令和6年1月撮影)

出典:国土交通省利根川上流河川事務所HP



堤防断面図

堤防に降った雨と堤防からの流出量と堤体内の飽和度等の計測値の時間変化が観測できれば，水理解析法を用いることで，降った雨がいつ，どこに，どのような量が存在しているかを示す水収支分布が得られ，降雨の浸透条件や堤体内の水分分布の推定が可能。

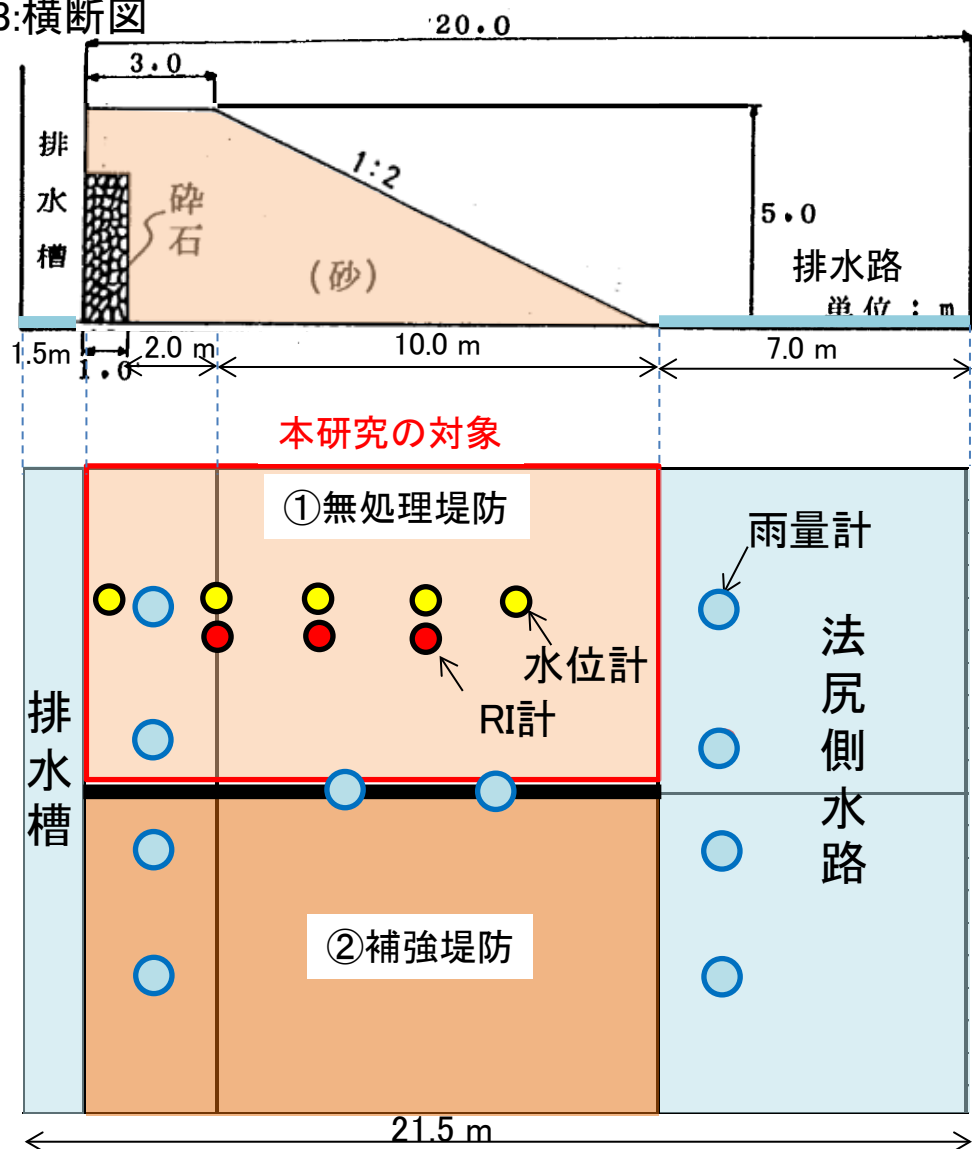


■研究の目的

本研究では，土木研究所で実施された模型大型堤防を用いた降雨実験結果をもとに，境界適合型の水理解析モデルを開発し，水収支分布を再現することで堤体内の水の貯留及び流出過程を検証し，今後の堤体における水収支解析の課題を整理する。

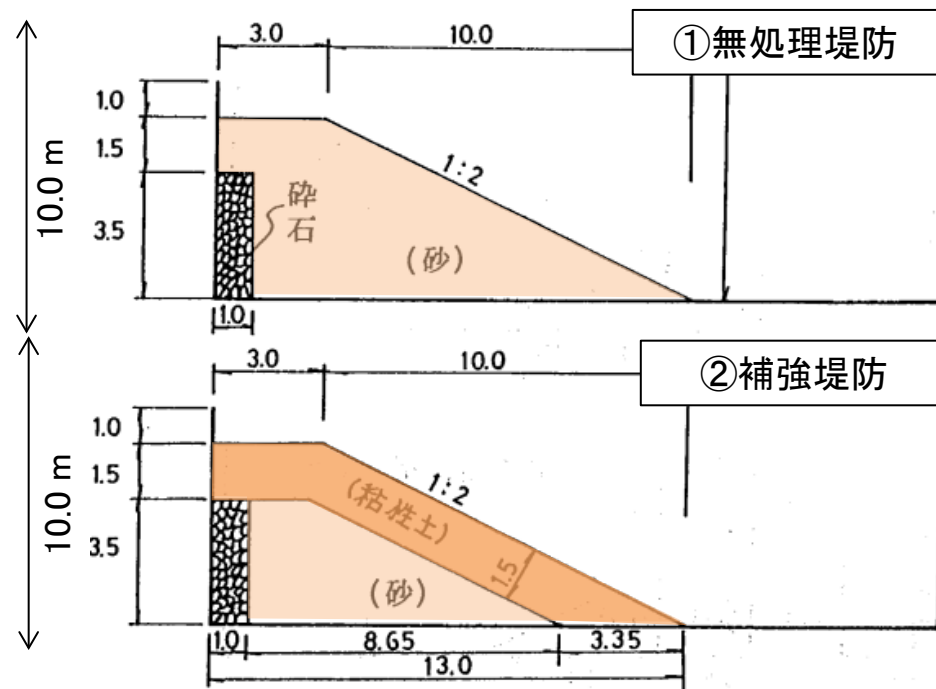
2.大型模型堤防実験装置の概要

B:横断面図



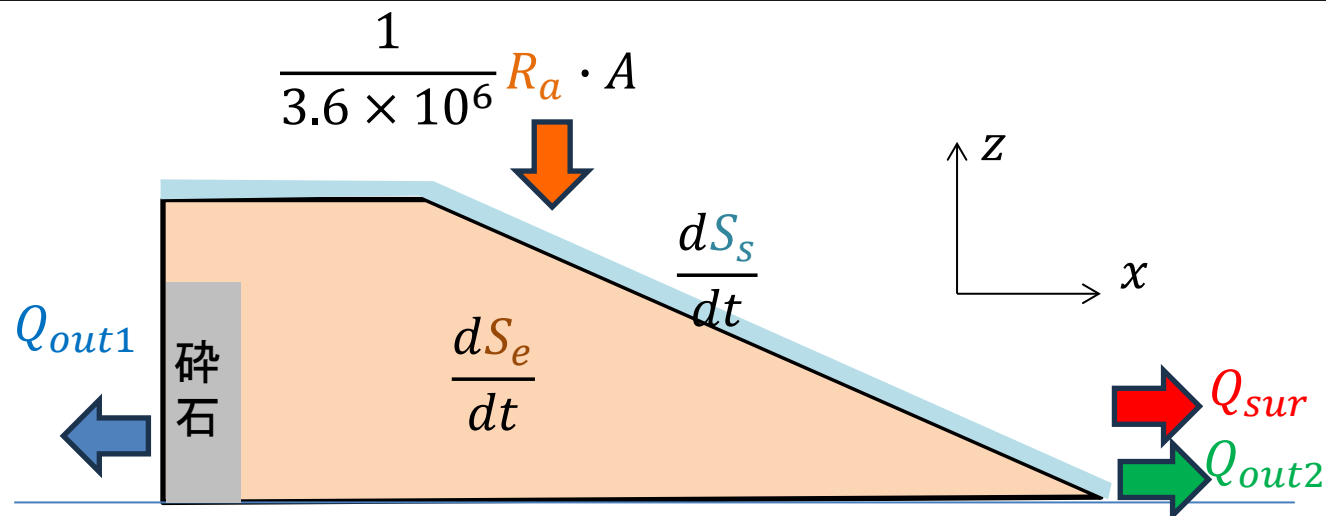
堤防の土質条件

		無処理堤防(砂)	補強堤防(補強土)
比重		2.695	2.700
れき分	(%)	0	1.5
砂分	(%)	96	54.5
シルト分	(%)	4	33
粘土分	(%)	0	11
最適含水比	(%)	15.8	23.6
最大乾燥密度	(g/cm ³)	1.569	1.562
乾燥密度	(g/cm ³)	1.5	1.47
締固め度	(%)	95.3	94
透水係数	(cm/s)	3.65×10^{-3}	1.03×10^{-6}



2.降雨実験の計測結果に基づく水収支分布式

実験で観測されているものは、降雨量と堤防からの流出量であり、その差分が堤体内と表面の貯留量になる。その貯留量がわかるとすれば、降雨の浸透条件や内部の水分分布を推測することができると思う。



堤体内の水
の貯留量

堤体表面の
水の貯留量

砕石側から
の流出量

堤体法尻か
らの流出量

堤体法尻から
の流出量

$$\frac{dS_e}{dt} + \frac{dS_s}{dt}$$

=

$$\frac{1}{3.6 \times 10^6} R_a \cdot A$$

$$Q_{out1} - Q_{out2} - Q_{sur} \quad (1)$$

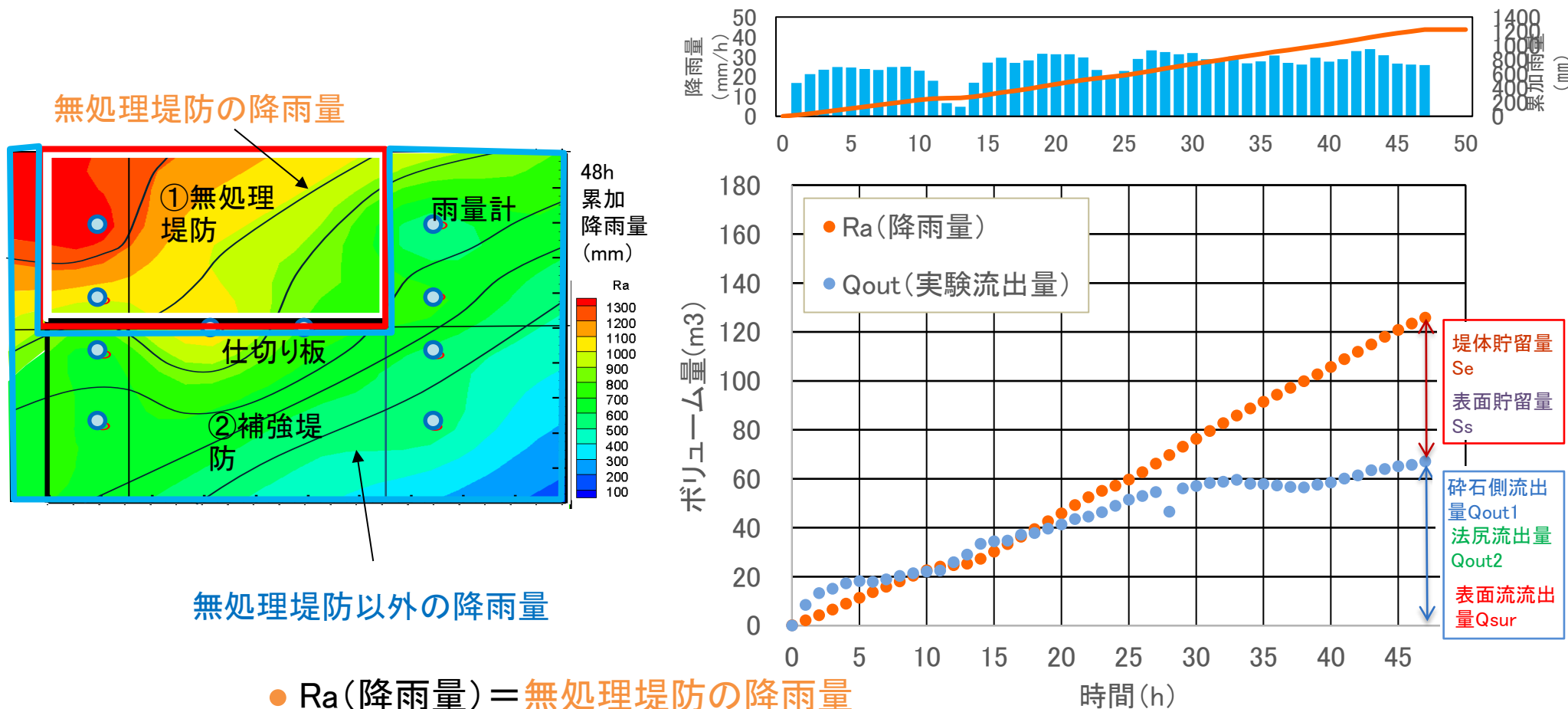
降雨の浸透条件, 堤体
内部の水分分布

堤体への
降雨量

堤体表面の
投影面積

2.大型模型堤防実験における実測の水収支分布図

式(1)の右辺に実測の堤防への降雨量と堤防からの流出量を用いて水収支分布図が描ける。
33時間以降は降雨量に対し流出量が増加せず、この理由として①降雨の分布、②法尻崩壊による影響等が考えられるため、33時間より前の時間で検証する。



● Ra (降雨量) = 無処理堤防の降雨量

● Qout (実験流出量) = 総流出量 - 無処理堤防以外の降雨量

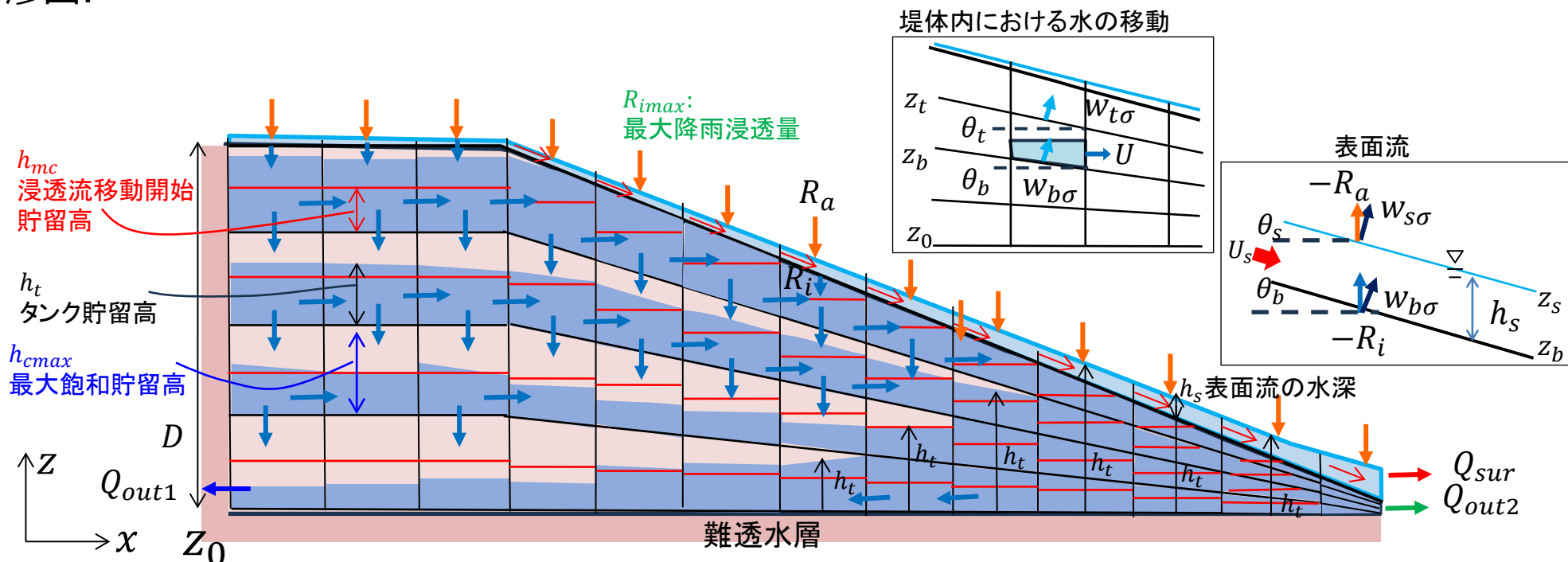
3.境界適合型水理解析モデル

降雨の浸透条件

降雨量を堤体表面に与えて、**最大浸透能** R_{imax} 以下の降雨量が堤体内に浸透するものとし、それ以上の降雨量は堤体に浸透しないものとして表面流が発生。

堤体内の水分分布

堤体境界に適合した複数のタンクを連結し、その土中の水分量を貯留高 h_t で表現し、**浸透流移動開始貯留高(圃場容水量)** h_{mc} を導入することで、不飽和時には水が動かず、水が貯まるとし、それ以上になると土中の水の運動はDarcy則と連続式で解析。
タンク貯留高 h_t が**最大飽和貯留高** h_{tmax} に達した場合、堤体に貯留しきれない雨水が堤体から滲出。



3.境界適合型水理解析モデル

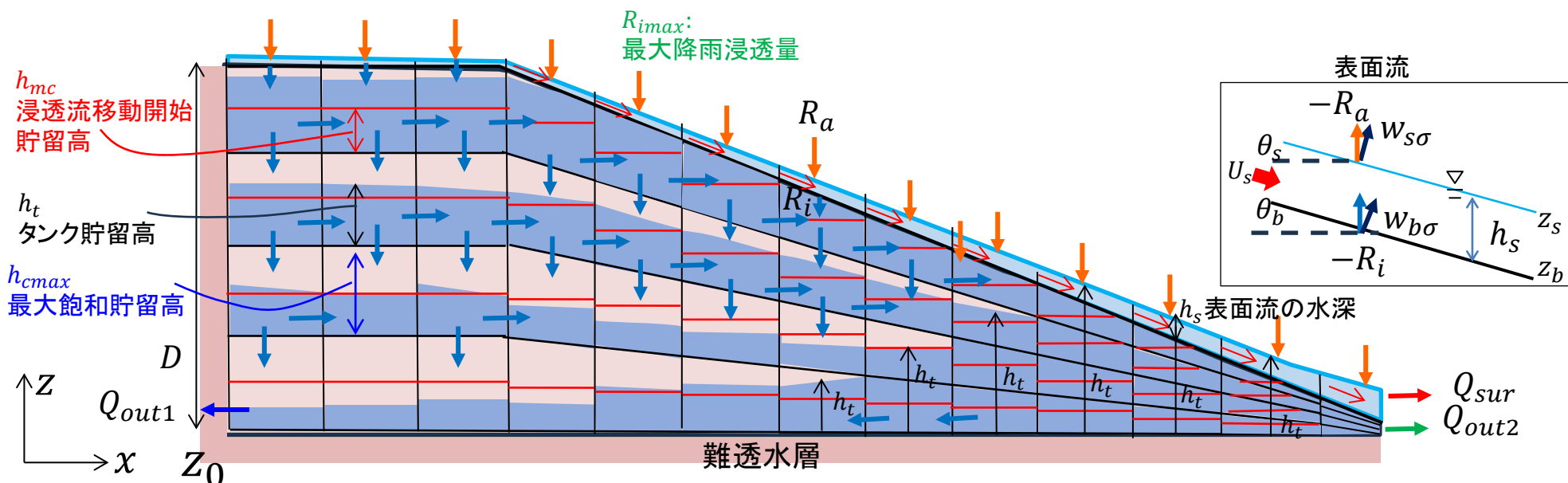
表面流

最大浸透能 R_{imax} 以上の降雨量は表面流が発生

$$R_i = \begin{cases} R_a & (R_a \leq R_{imax}) \\ R_{imax} & (R_a > R_{imax}) \end{cases} \quad (9)$$

$$\text{連続式} \quad \frac{\partial h_s}{\partial t} + \frac{\partial U_s h_s}{\partial x} + \frac{1}{3.6 \times 10^6} (R_i - R_a) = 0 \quad (2)$$

$$\text{運動方程式} \quad \frac{\partial U_s h_s}{\partial t} + \frac{\partial U_s U_s h_s}{\partial x} + U_s \frac{1}{3.6 \times 10^6} (-R_a + R_i) = -g h_s \frac{\partial z_s}{\partial x} - \frac{1}{\cos \theta_b} \frac{g n^2 U_s |U_s|}{h_s^{1/3}} \quad (3)$$



3.境界適合型水理解析モデル

堤体内の浸透

連続式

$$\frac{\partial h_t}{\partial t} + \frac{\partial U h_t}{\partial x} + \frac{1}{3.6 \times 10^6} \boxed{R_i} - \frac{w_{b\sigma}}{\cos \theta_b} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial h_t}{\partial t} + \frac{\partial U h_t}{\partial x} + \frac{w_{\sigma t}}{\cos \theta_t} - \frac{w_{\sigma b}}{\cos \theta_b} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial h_t}{\partial t} + \frac{\partial U h_t}{\partial x} + \frac{w_{\sigma t}}{\cos \theta_t} = 0 \quad (6)$$

運動方程式

$$U = -k_a \frac{\partial h_t}{\partial x} - k_a \sigma \frac{\partial D}{\partial x} \quad (7)$$

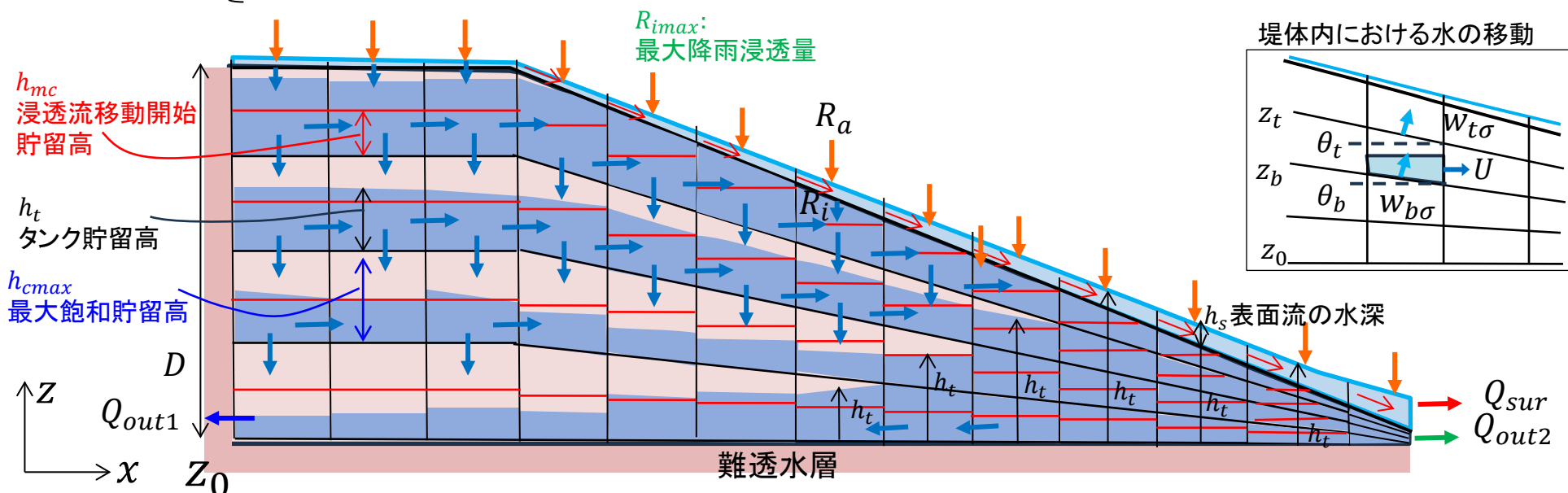
$$w_{\sigma} = -k_a \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} (h_t + \sigma D) \quad (8)$$

最大浸透能 R_{imax} 以下の降雨量が堤体内に浸透

$$\boxed{R_i} = \begin{cases} R_a & (R_a \leq R_{imax}) \\ R_{imax} & (R_a > R_{imax}) \end{cases} \quad (9)$$

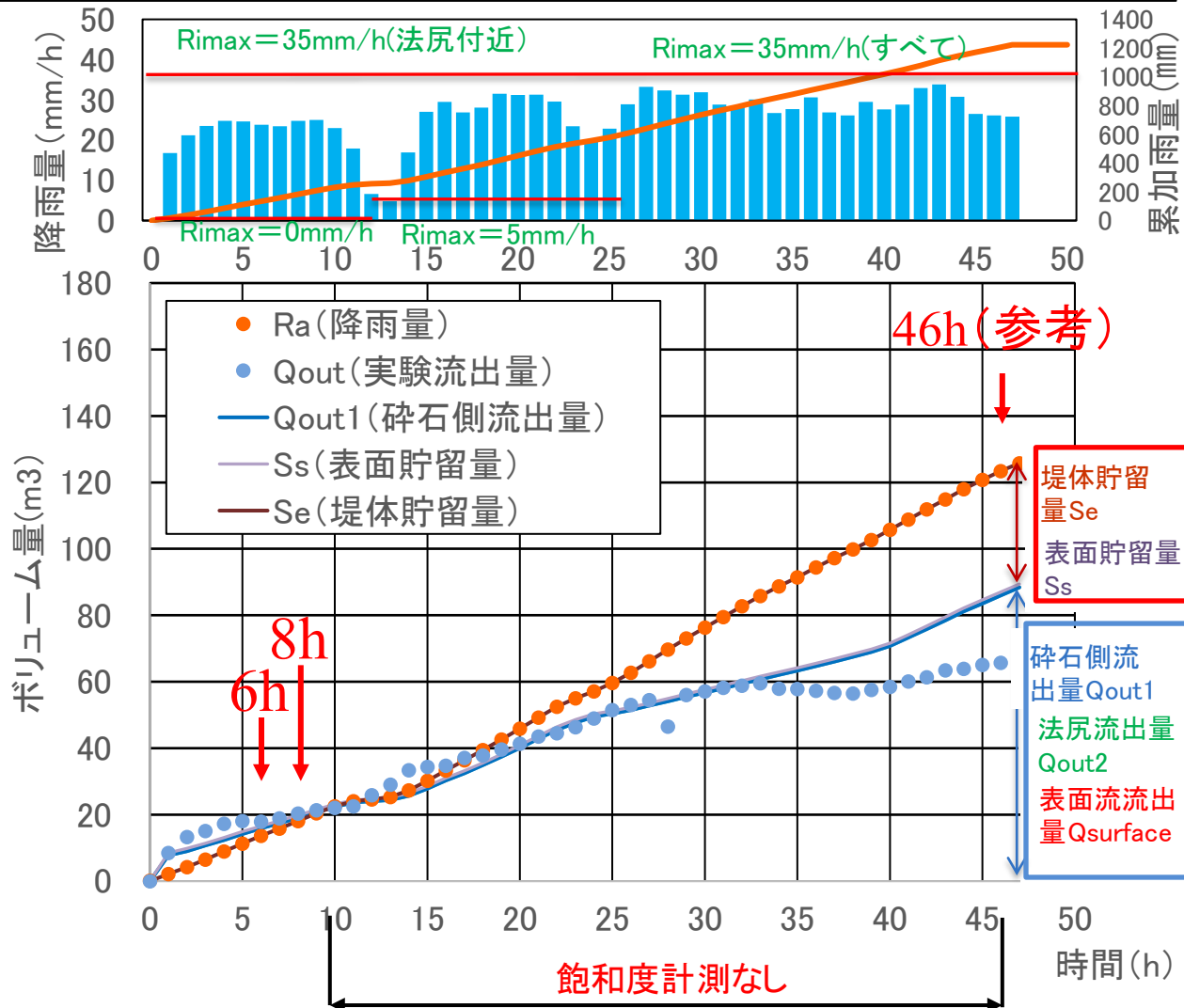
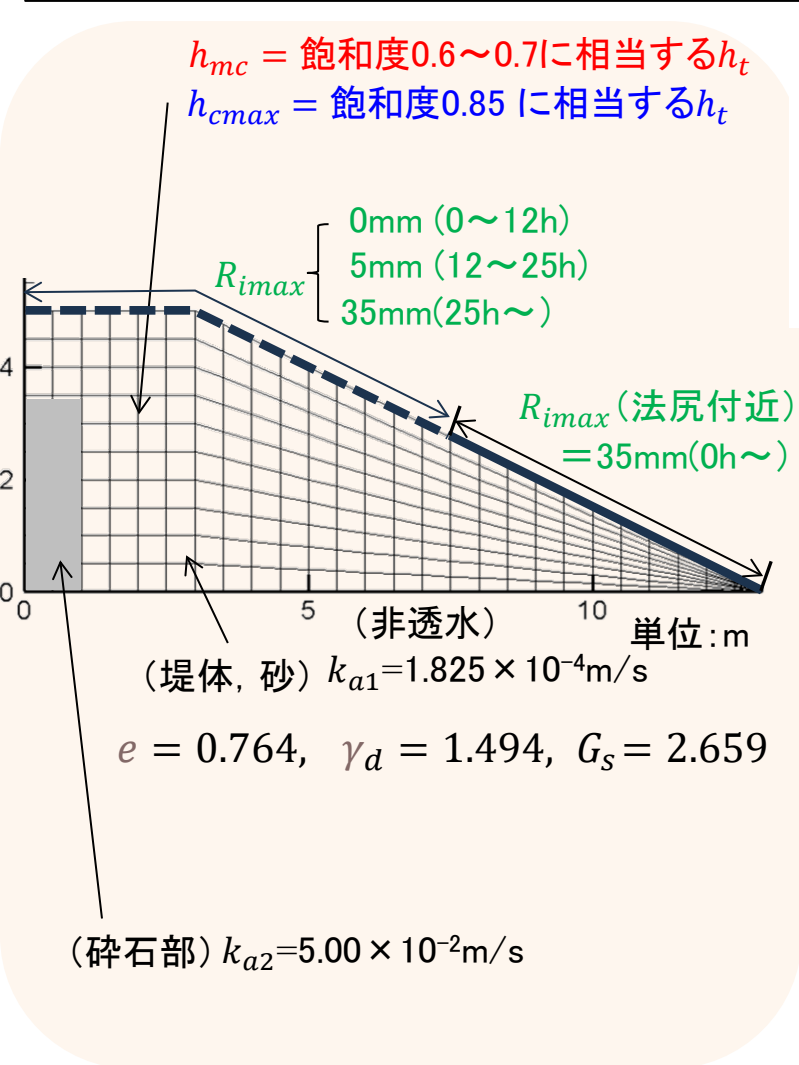
最大飽和貯留高 h_{tmax} に達した場合堤体に貯留しきれない雨水が堤体から滲出

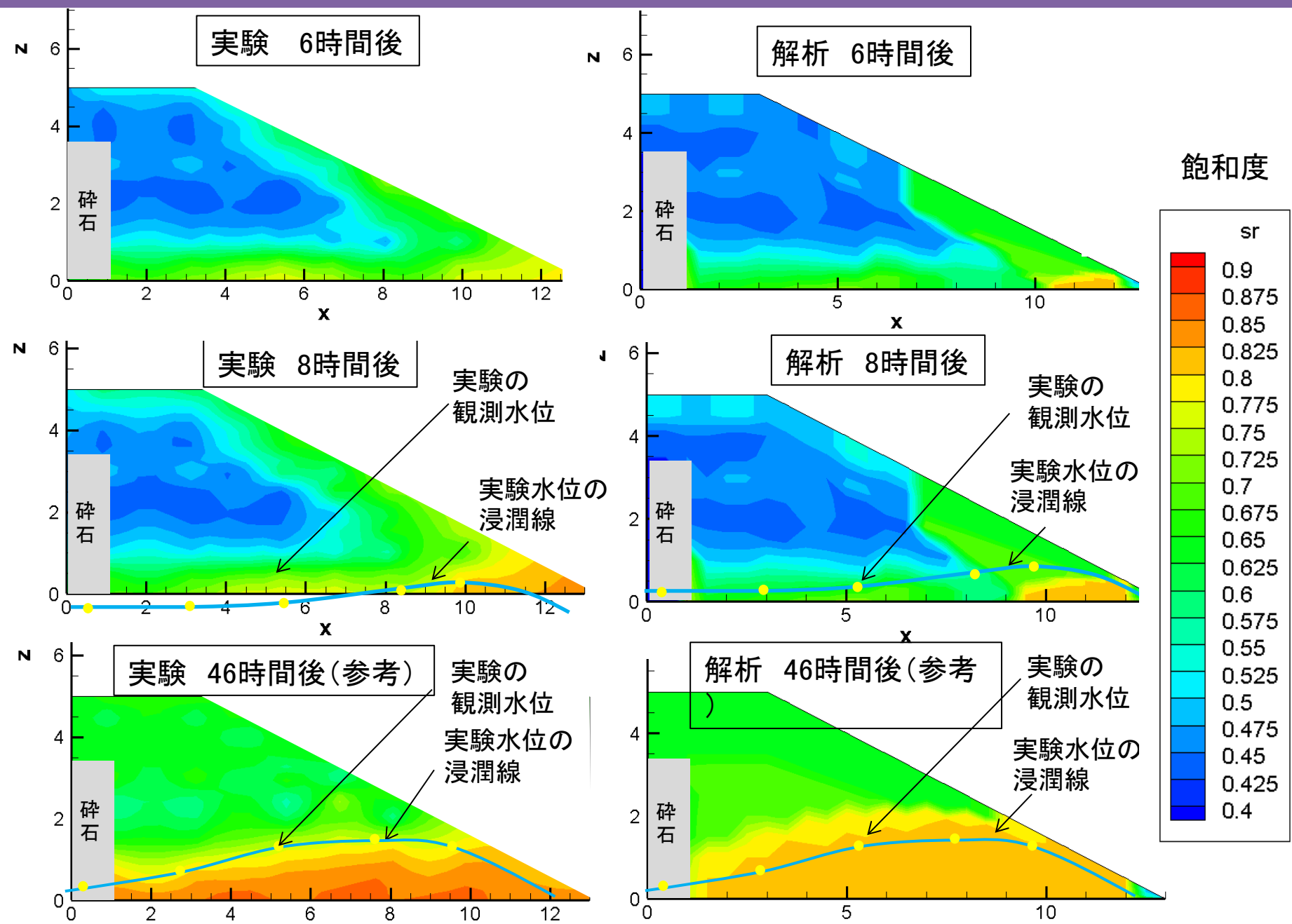
$$\boxed{R_i} = -\frac{\partial}{\partial x} \int_0^1 U h_t d\sigma \quad (10)$$



4.無処理堤防実験での水収支分布図

実験で計測された水収支分布を説明するように、パラメータ (h_{mc} h_{cmax} R_{imax})を以下のように設定. R_{imax} は降雨後に飽和度が大きくならないため、天端付近で0から段階的に大きくし、法尻付近で湛水実験の影響を考慮し大きい値に設定.





5.鉄道総研による盛土降雨実験への適用

実験で計測された飽和度分布を説明するように、パラメータ (h_{mc} , h_{cmax} , R_{imax})を設定。
 R_{imax} は実験の飽和度が20時間後まで上昇しないため、0から段階的に上げるように設定。

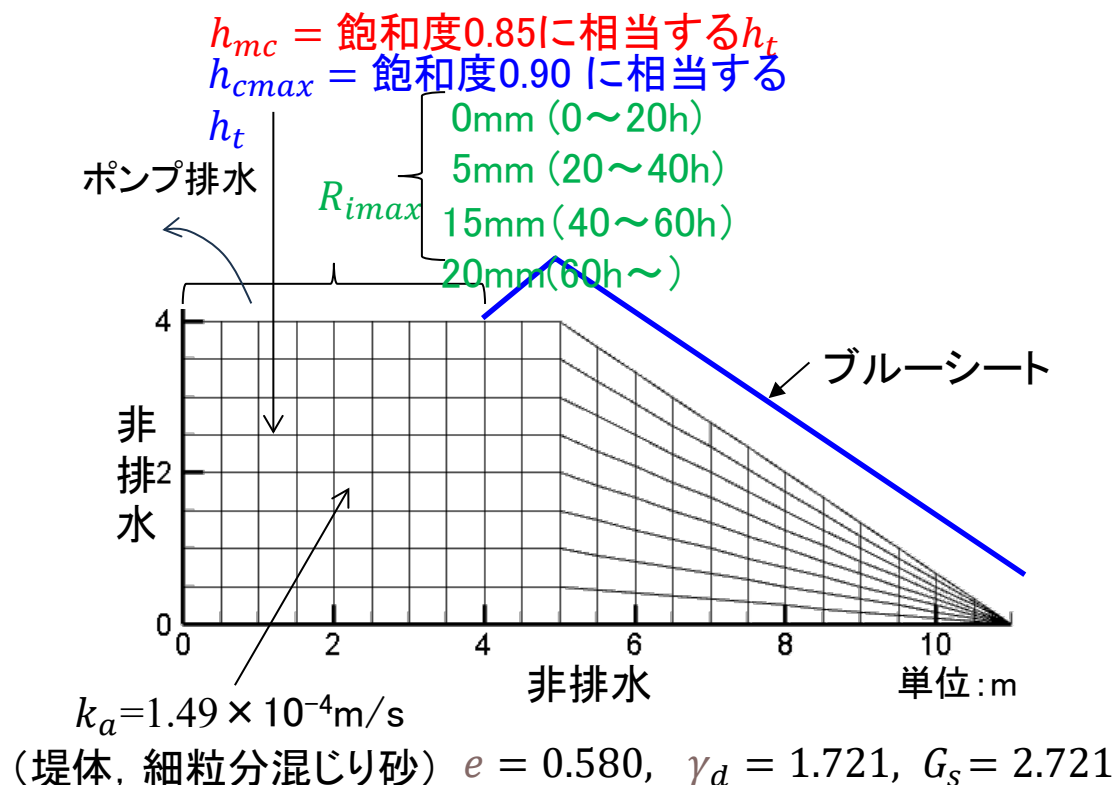
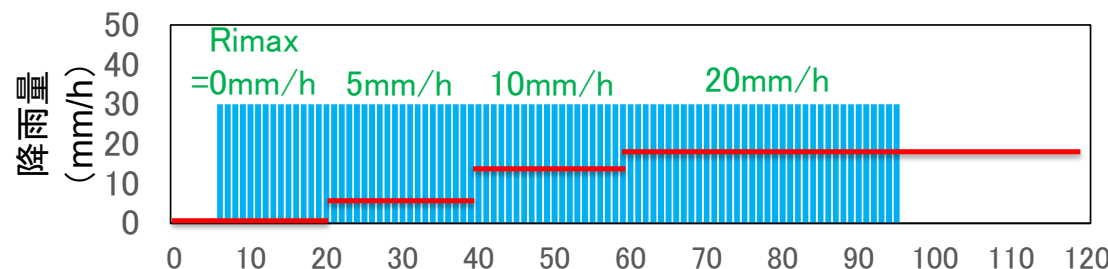


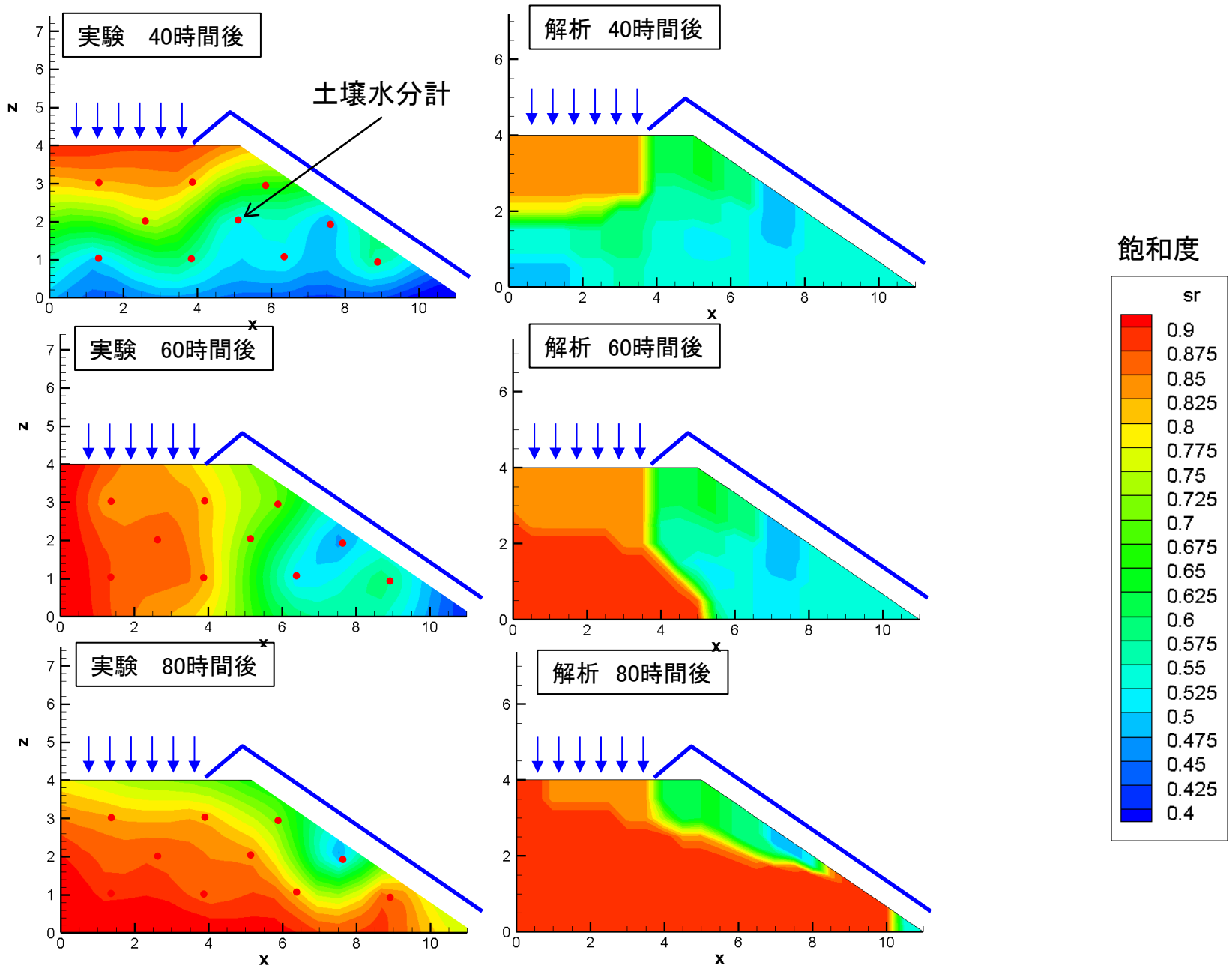
図1 降雨実験装置の外観 文部省2023



(a) 天端

(b) のり面

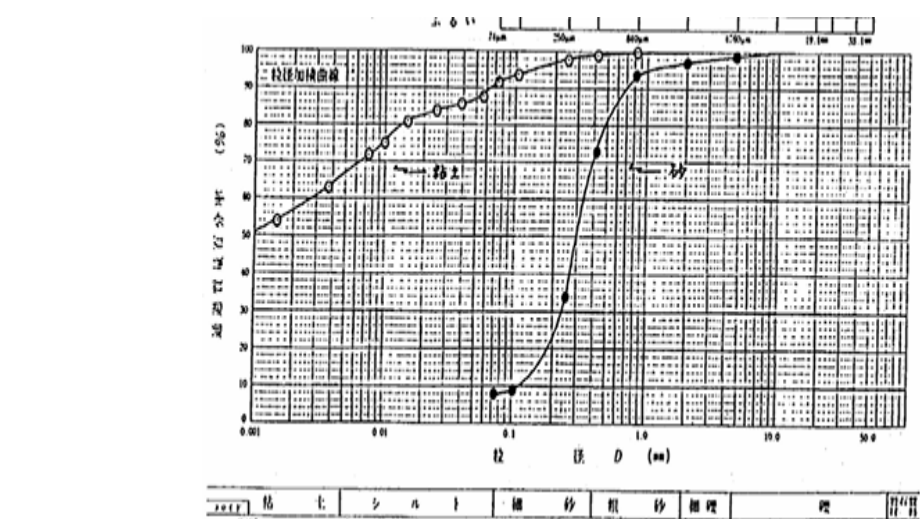




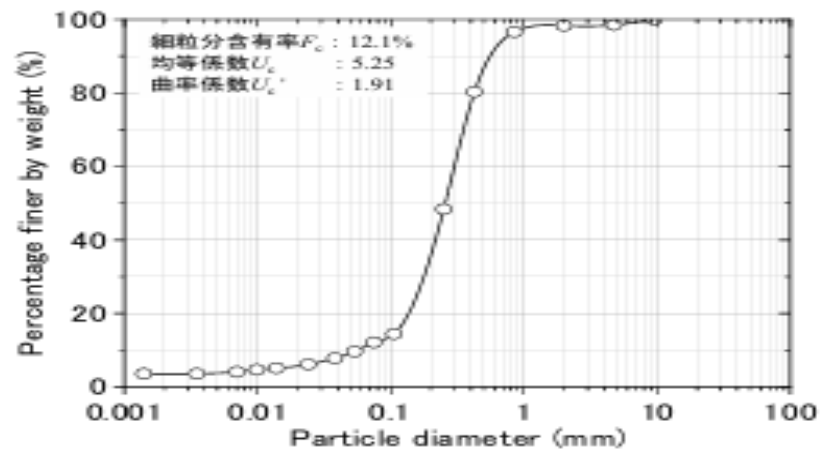
2つの実験での土質は、同等の砂であり、その違いは細粒分含有率が異なる。久楽らの実験の h_{mc} が鉄道総研よりも小さく、均等係数に違いが見られ、貯留量に関係すると考えられる

各実験堤防の土質条件と設定パラメーター一覧

実験名	土質分類	透水係数 (m/s)	間隙比	乾燥 重量	比重	均等 係数	h_{mc}	h_{cmax}	モデル設定 透水係数
久楽らの実験	砂	3.65×10^{-5}	0.764	1.494	2.659	2.21	0.6~0.7	0.85	1.85×10^{-4}
鉄道総研の実験	細粒分混じり砂	2.98×10^{-5}	0.58	1.721	2.721	5.25	0.85	0.9	1.49×10^{-4}



粒度分布(久楽らの実験)



粒度分布(鉄道総研の実験)

久楽勝行，丹羽薫，齊藤義章，石塚廣史：堤防補強に関する大型模型実験(1)，土木研究所資料，第1772号，1982.

佐藤武斗，杉山健太，阿部慶太，笠原康平，松丸貴樹，富田佳孝：実物大鉄道盛土の降雨・載荷実験による崩壊規模に応じた安定性評価,地盤工学ジャーナルVol.19,No.1,pp.101-115,2024

6. 釧路川試験堤防降雨実験への適用

h_{cmax} = 飽和度0.90 に相当する h_t

h_{mc} = 飽和度0.85 に相当する h_t

R_{imax} = 35mm

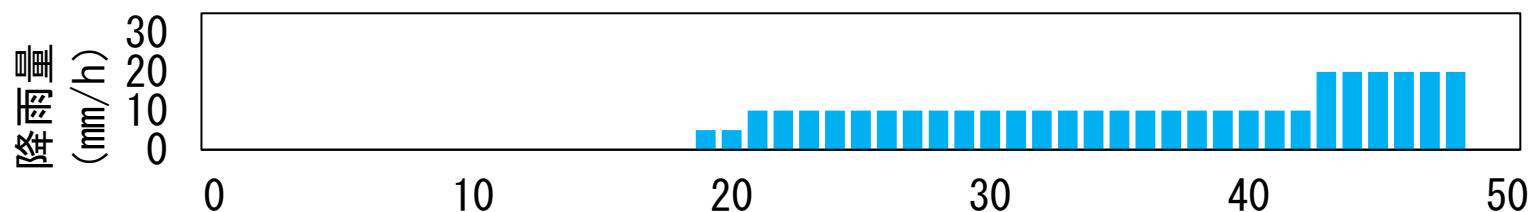
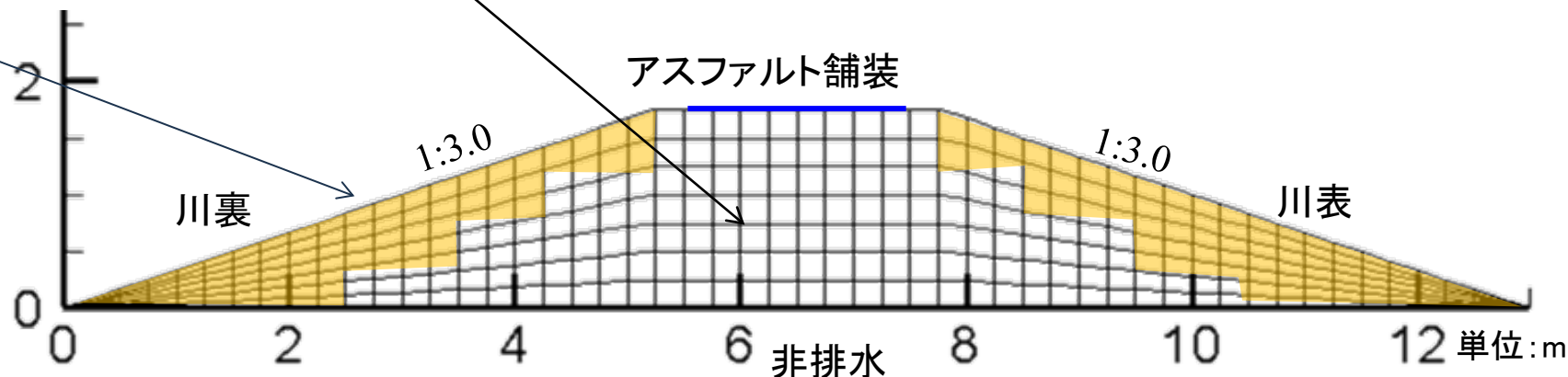
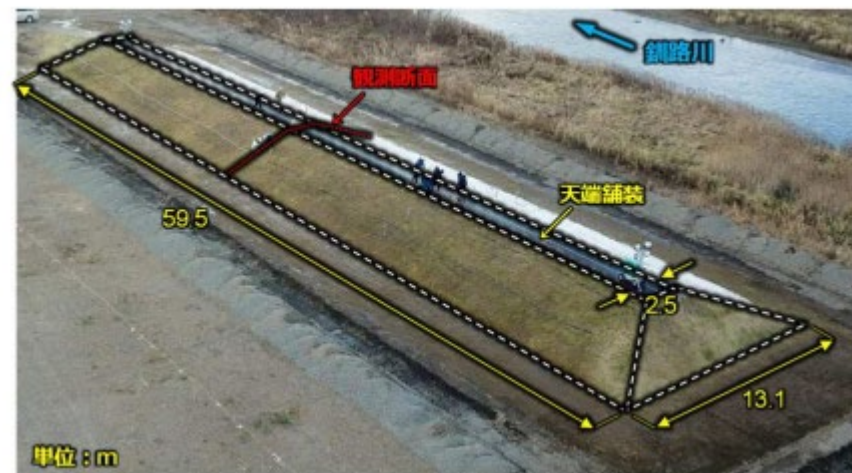
$k_{a2}=1.27 \times 10^{-5} \text{m/s}$ $e = 1.14$, $\gamma_d = 1.19$, $G_s = 2.55$
(拡幅部, シルト質土)

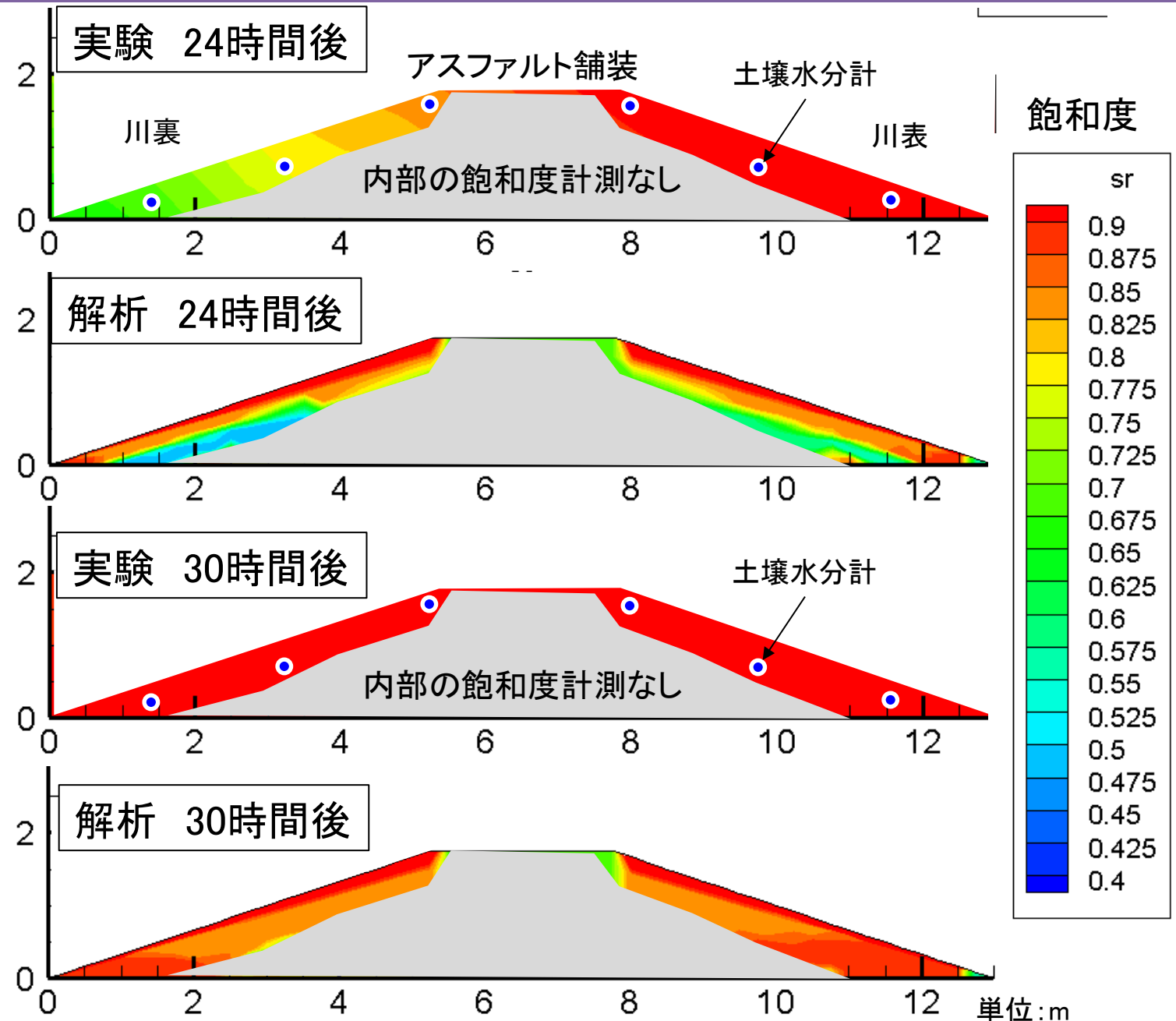
h_{cmax} = 飽和度0.80 に相当する h_t

h_{mc} = 飽和度0.70 に相当する h_t

R_{imax} = 35mm

$k_{a1}=7.24 \times 10^{-5} \text{m/s}$ $e = 0.80$, $\gamma_d = 1.42$, $G_s = 2.56$
(旧堤部, 砂質土)





7.境界適合型水理解析モデルへのRichards式の適用

物理的意味が説明できていない h_{mc} , h_{cmax} を使用せず, 不飽和領域の各タンクの水分量に応じて運動方程式及び不飽和透水係数が変化する機構を取り込んだRichards式を用いた

$$\text{連続式} \quad \frac{\partial h_t}{\partial t} + \frac{\partial(z_t - z_b)U}{\partial x} + \frac{w_{\sigma t}}{\cos\theta_t} - \frac{w_{\sigma b}}{\cos\theta_b} = 0 \quad (5)'$$

運動方程式(飽和時) $h_p \geq 0$

$$\left[\begin{aligned} U &= -k_a \frac{\partial h_t}{\partial x} - k_a \sigma \frac{\partial D}{\partial x} \end{aligned} \right. \quad (7)$$

$$\left[\begin{aligned} w_{\sigma} &= -k_a \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} (h_t + \sigma D) \end{aligned} \right. \quad (8)$$

運動方程式(不飽和時) $h_p < 0$

$$\left[\begin{aligned} u &= -k_{wi} \frac{\partial(h_p + \sigma D)}{\partial x} - k_{wi} \sigma \frac{\partial D}{\partial x} \end{aligned} \right. \quad (11)$$

$$\left[\begin{aligned} w_{\sigma} &= -k_{wi} \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} (h_p + \sigma D) \end{aligned} \right. \quad (12)$$

不飽和透水係数と圧力水頭の関係式(不飽和時)

$$k_{wi}(h_p) = k_{ws} \cdot S_e^{\xi} \left\{ 1 - \left(1 - S_e^{\frac{1}{m}} \right)^m \right\}^2 \quad (13)$$

圧力水頭と体積含水率の関係式(不飽和時)

$$\theta(h_p) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\{1 + (-\alpha h_p \rho g)^n\}^m} \quad (14)$$

h_t :貯留高

u :見かけの流速(x方向)

w_{σ} :見かけの流速(z方向)

$k_{wi}(h_p)$:不飽和透水係数(i=x,z)

S_e :有効飽和度

n :無次元パラメータ(sand=2.68)

$m = 1 - 1/n$

ξ :間隙結合関数($\xi=4$)

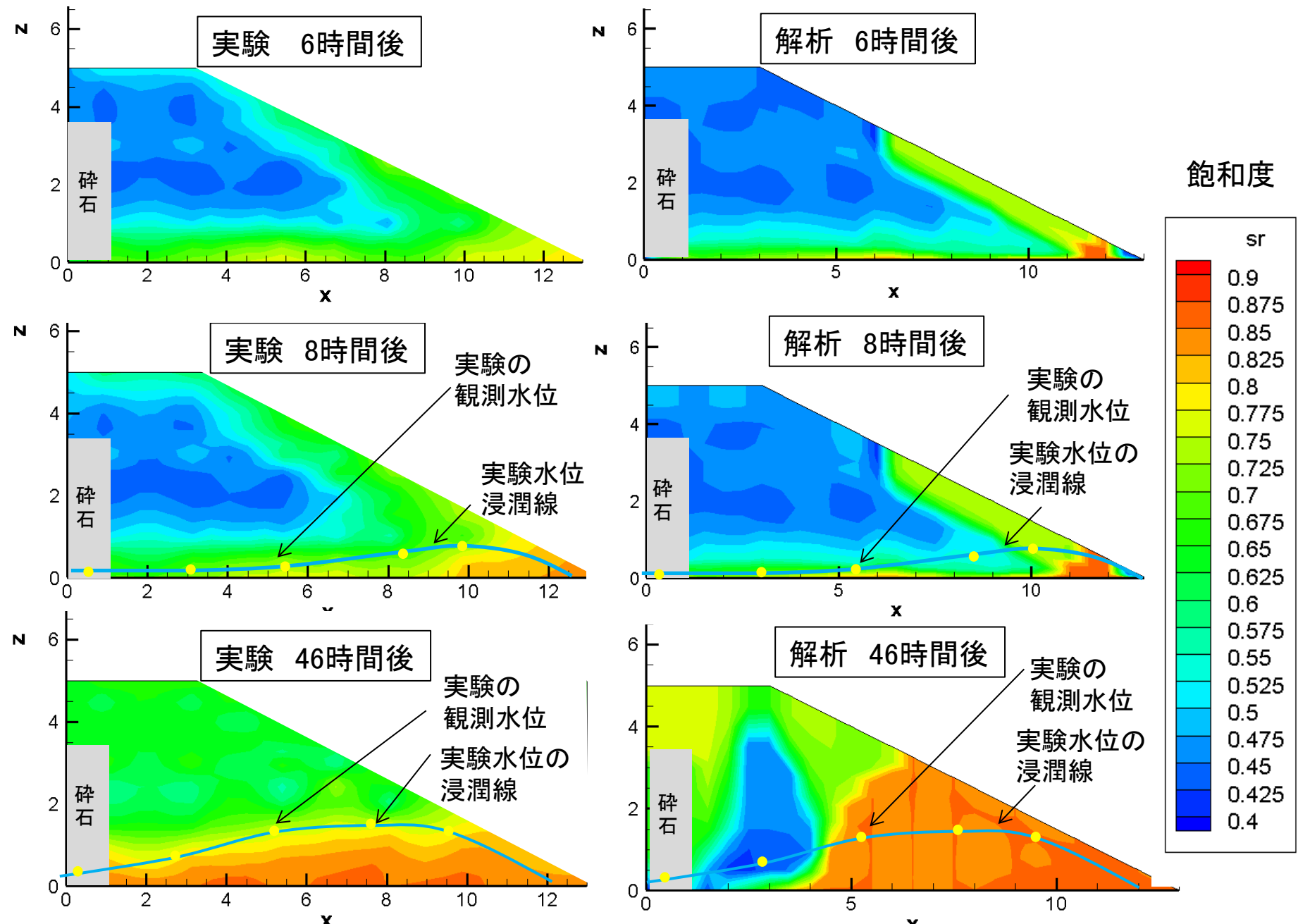
θ_s :飽和時の含水率(sand=0.43)

θ_r :残留含水率(sand=0.045)

α :スケールングパラメータ(sand=14.51(1/m))

Van Genuchtenの水分特性曲線で近似した場合,

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (15)$$



【本研究のまとめ】

- 模型大型堤防を対象として、降雨実験結果と、境界適合型水理解析モデルに基づいた水収支分布解析を行い、堤体内の水の貯留及び流出過程の再現性を検証した。さらに他の実験事例に適用することで水収支解析の有効性を検討した。
- h_{mc} は不飽和時のサクションに影響し、 h_{cmax} は有効飽和度に定義される飽和時の含水率を表現したものであり、その値は、 $h_{mc} = 0.6 \sim 0.85$ 、 $h_{cmax} = 0.8 \sim 0.9$ 程度となり、同じ土質特性では同様の値を示す。
- R_{imax} は表面流の発生しやすさに関するパラメータであり、降雨強度が20～30mm/h程度と強くなると、堤体内への降雨浸透量が少なくなる。

【今後の課題】

- モデルパラメータの物理的意味を明らかにすることを目的にRichards式を適用した境界適合型水理解析モデルに基づいて久楽らの実験の再現を試みた。その結果、堤体内部の水の移動を一部再現できるが、飽和領域と不飽和領域の水の移動に課題がある。