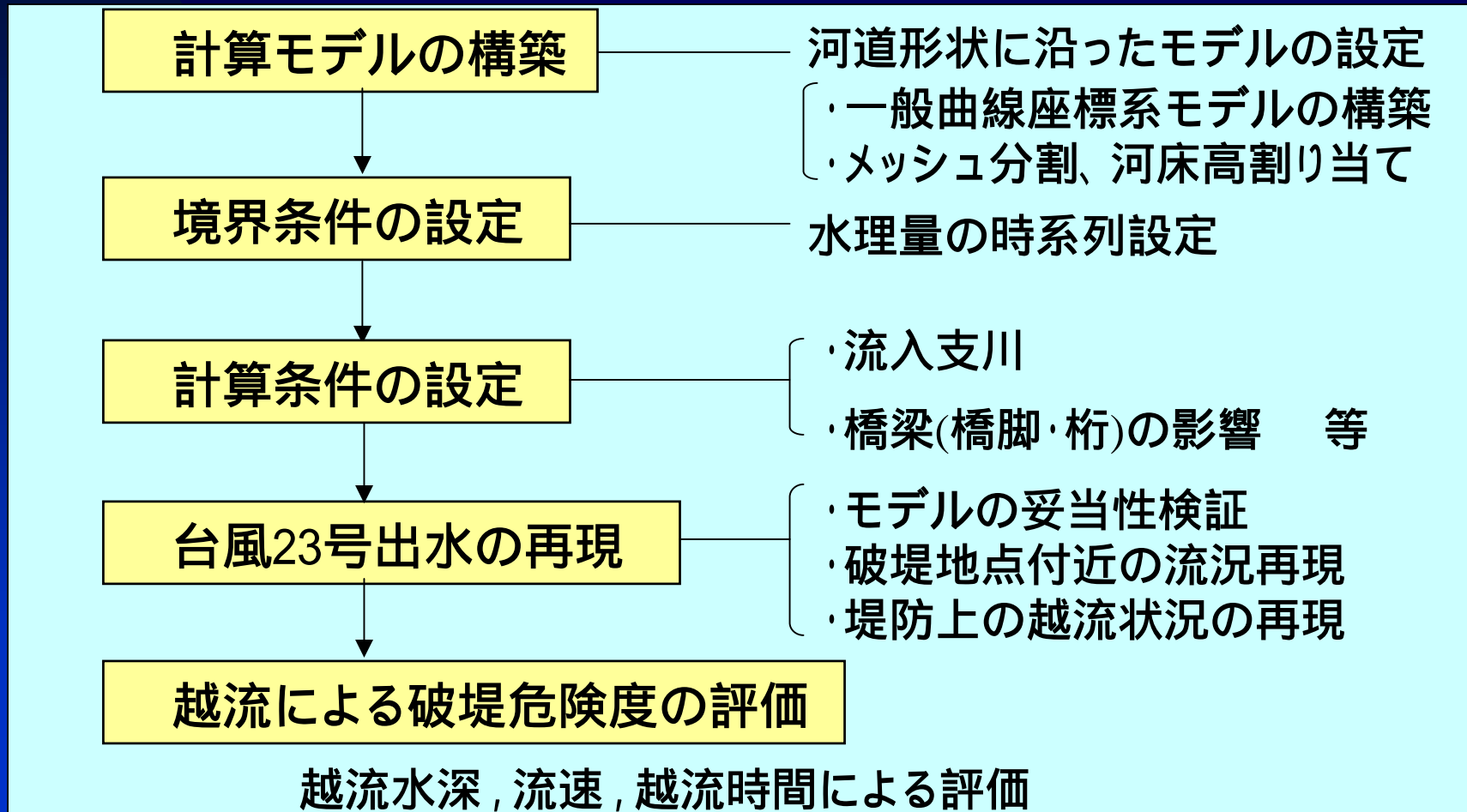


(4) 出石川の洪水流の解析 (平面二次元不定流解析)

破堤原因の解明には、河道上の平面的な流れの状況(流速・流向)や越流水深を把握する必要がある。このため、平面二次元不定流解析を以下のフローに従って実施した。

検討フロー

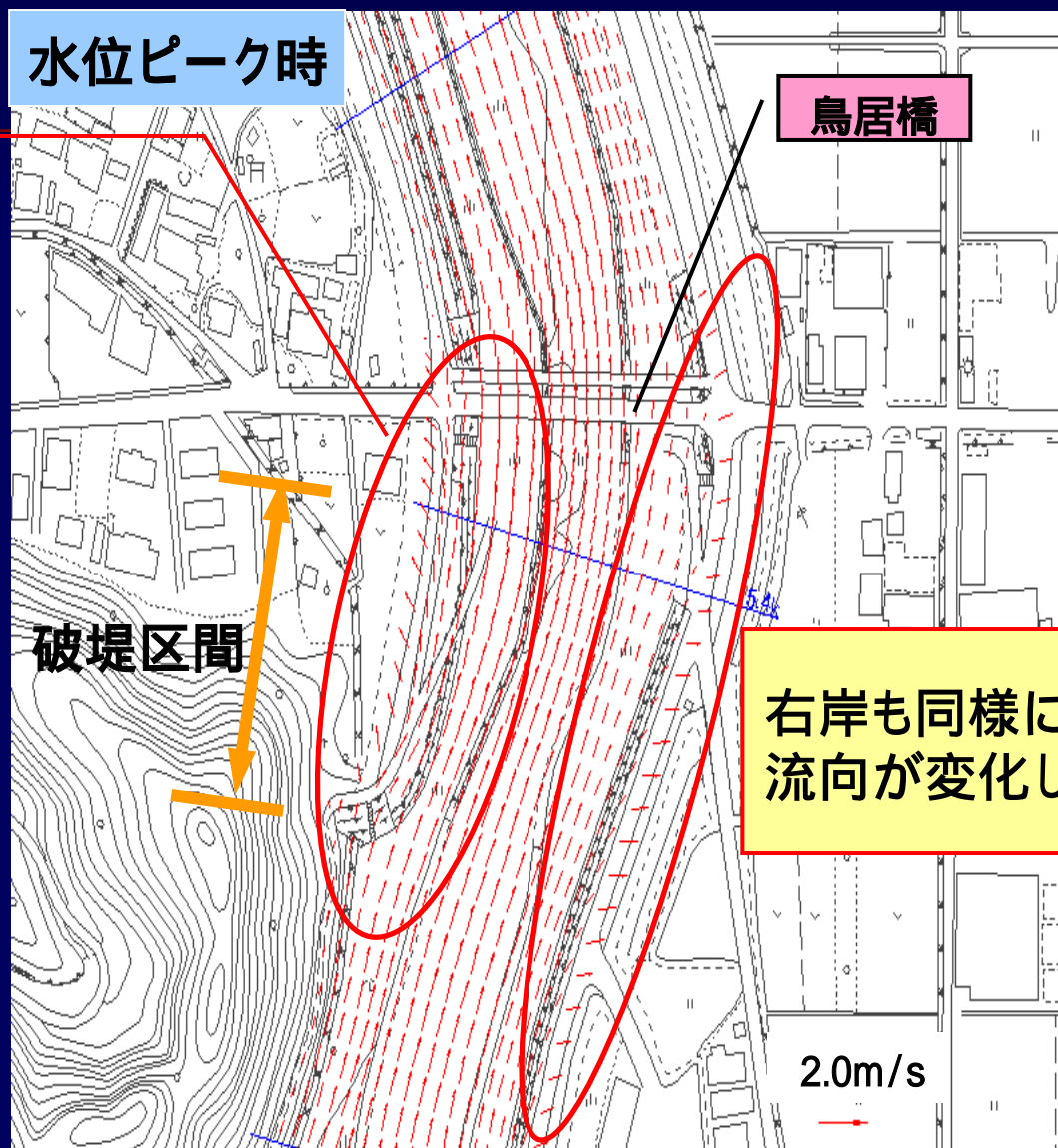


破堤地点周辺の流況(流向・流速の解析結果)

・鳥居橋上流左岸(内岸)の高水敷上で流れが速くなる。

・鳥居橋のせき上げにより堤防上を越流した流れは、堤内地側へ流向を変えている。

・越流流速は、概ね1.0～1.2m/s程度、最大で1.7m/sである。



右岸も同様に越流し、流向が変化している。

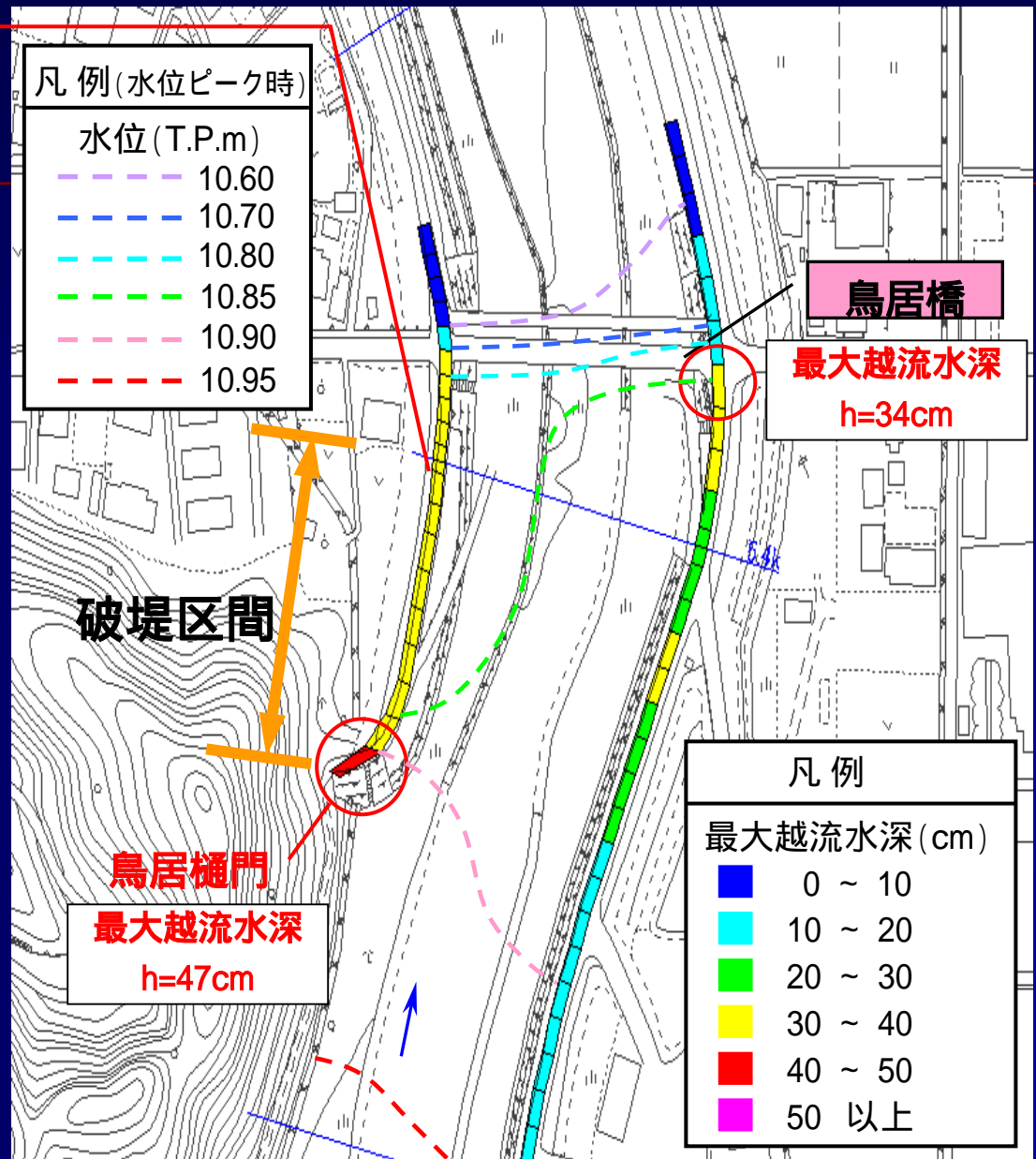
破堤地点周辺の越流水深 (解析結果)

- ・鳥居橋上流区間の越流水深は、概ね30～40cm程度である。
- ・最大越流水深は鳥居樋門地点で、約50cmとなった。
- ・これは越水が起きる程の水位上昇により、通常低水路沿いに流れる洪水が、上流から直線的に流下し、左岸堤防の山付け部に集中したためと考えられる。

堤防高の設定

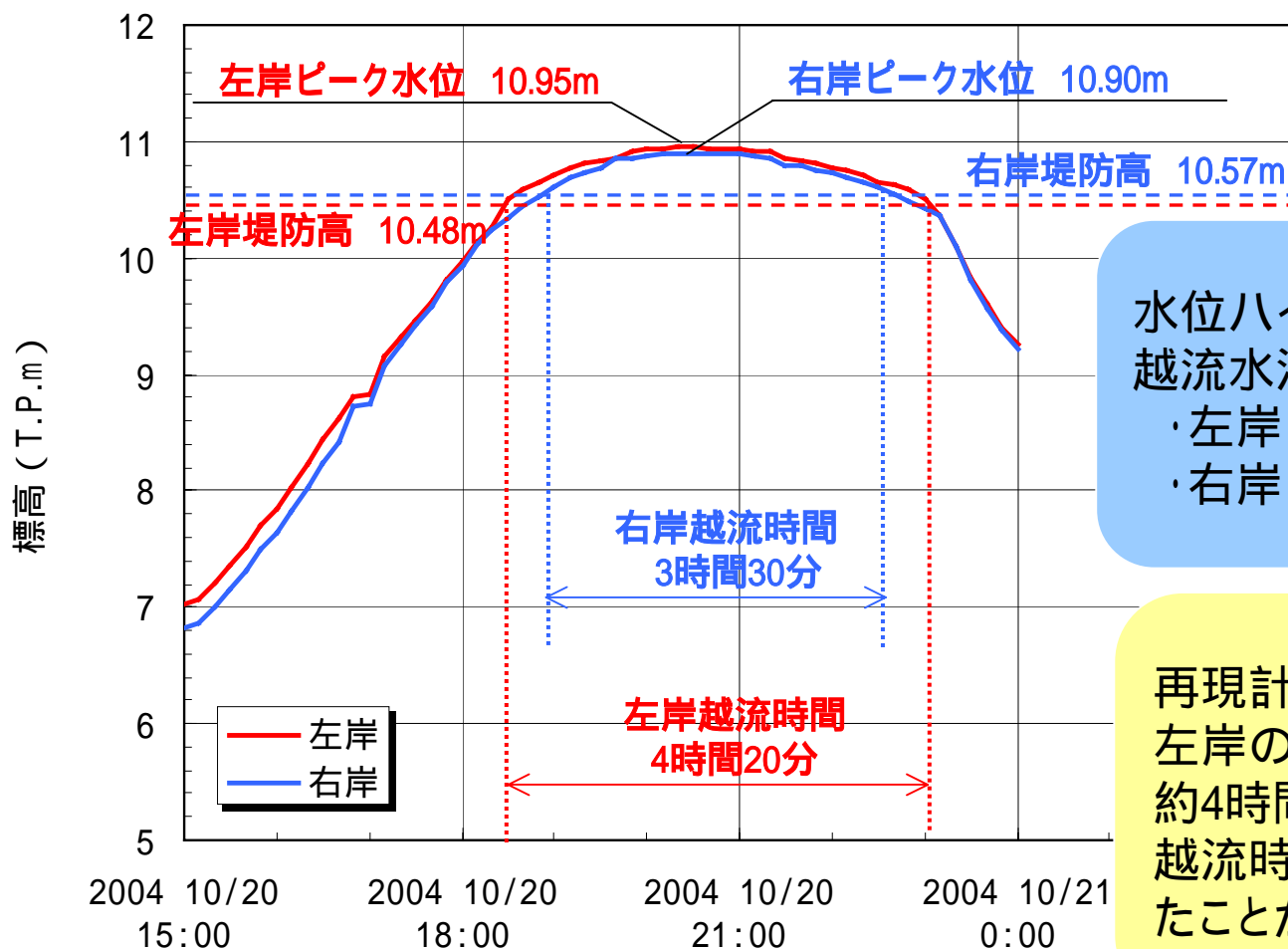
破堤区間の堤防高は、H15年測量による左岸5.4kの値とした。(一連区間は同じ高さ)

その他の区間の堤防高は、H16年測量の値(20mピッチ)とした。



破堤地点周辺の越流時間(再現計算結果)

出石川破堤地点周辺の水位ハイドロ



水位ハイドロは最大越流水深地点

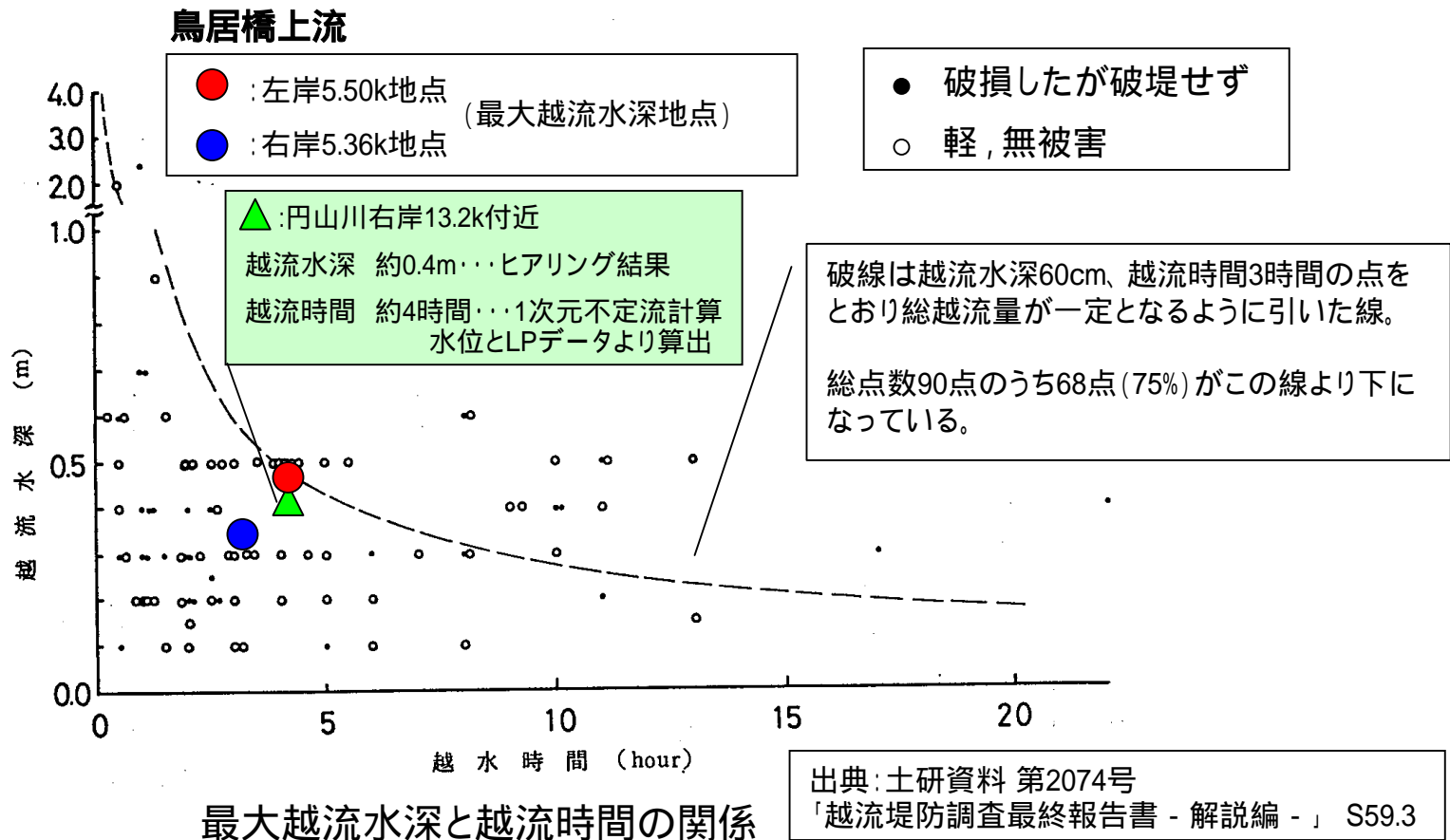
- ・左岸・・・5.50k
- ・右岸・・・5.36k

再現計算における左岸の越流時間は約4時間20分であり、越流時間が長かったことがわかる。

越流による破堤危険度の評価

越流水深と越流時間

下図の最大越流水深と越流時間の関係から、鳥居橋上流の左岸(破堤あり)、右岸(破堤なし)の越流区間をみると、破堤した左岸の越流区間は破堤の危険度が高かったことがわかる。



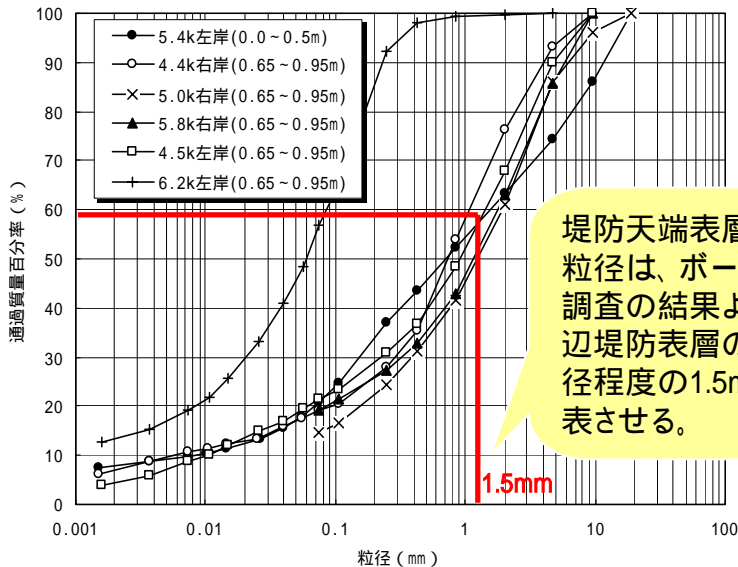
越流による破堤危険度の評価

堤体材料と掃流力

通常、土砂は掃流力 τ_c (摩擦速度 u_*) がある限界値 (u_{*c} : 無次元限界掃流力、 u_{*c} : 限界摩擦速度) を超えると移動が始まる。

下図より、越流区間の代表粒径 d に対する摩擦速度 u_* の関係は、大きく限界値を上回っており、堤体材料の土砂が流出した可能性が高い。

左岸天端は未舗装であったが、右岸天端は舗装されていたため、堤体材料の流出を防いだと考えられる。



堤防天端表層の代表粒径は、ボーリング調査の結果より、周辺堤防表層の60%粒径程度の1.5mmで表させる。

ボーリング調査結果(天端中央表層)

鳥居橋上流

- : 左岸越流区間(破堤あり)
天端舗装なし
- : 右岸越流区間(破堤なし)
天端舗装あり

$$u_* d / \tau_c = 360$$

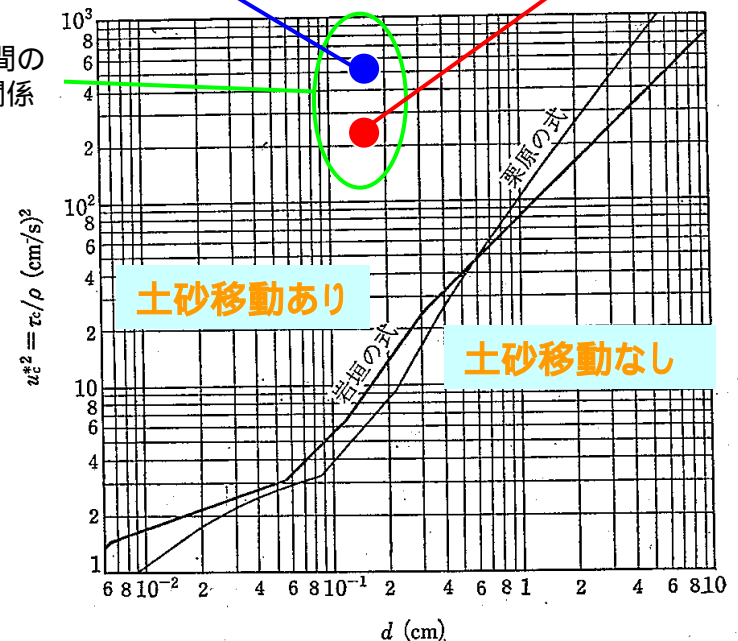
$$u_* = 2.37(*)$$

(*) $u_* > 0.05$ で概ね土砂は移動する

$$u_* d / \tau_c = 240$$

$$u_* = 1.00(*)$$

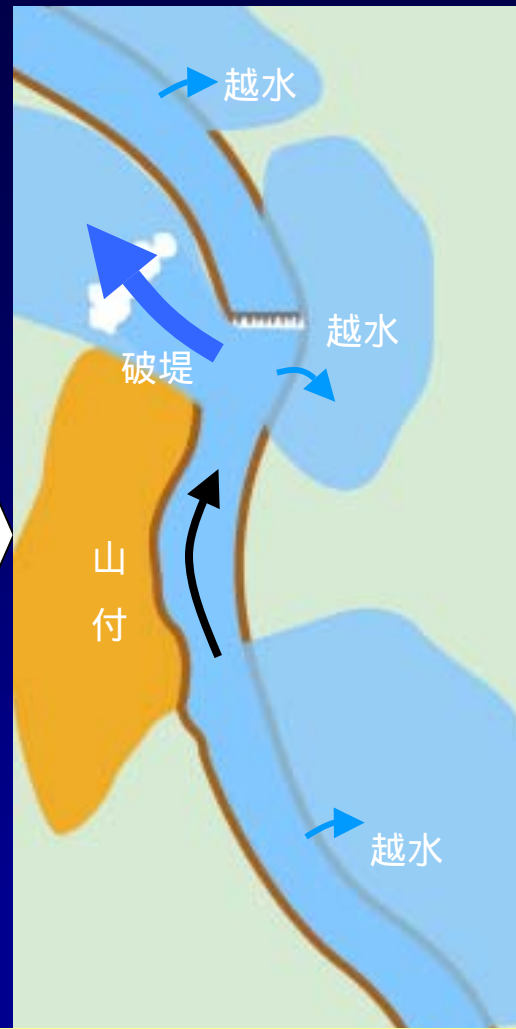
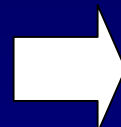
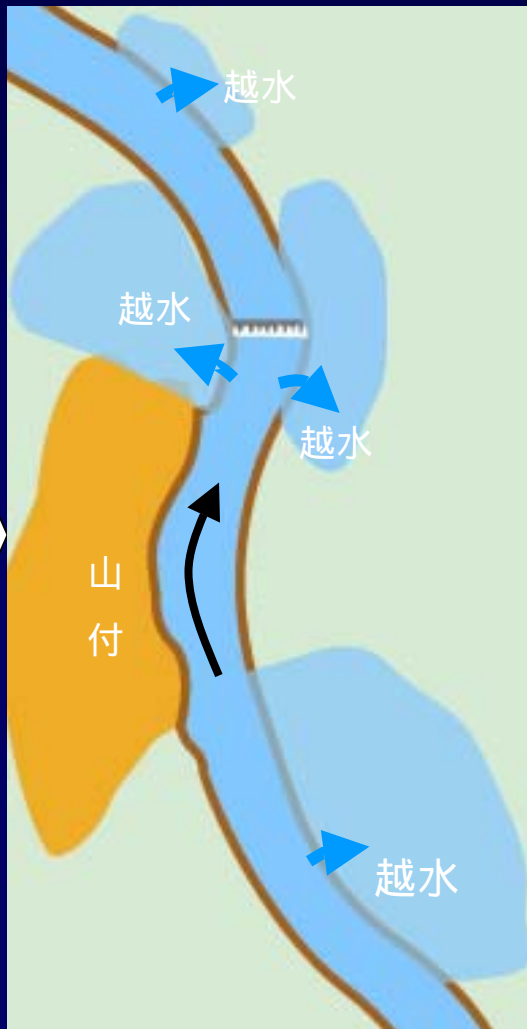
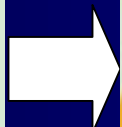
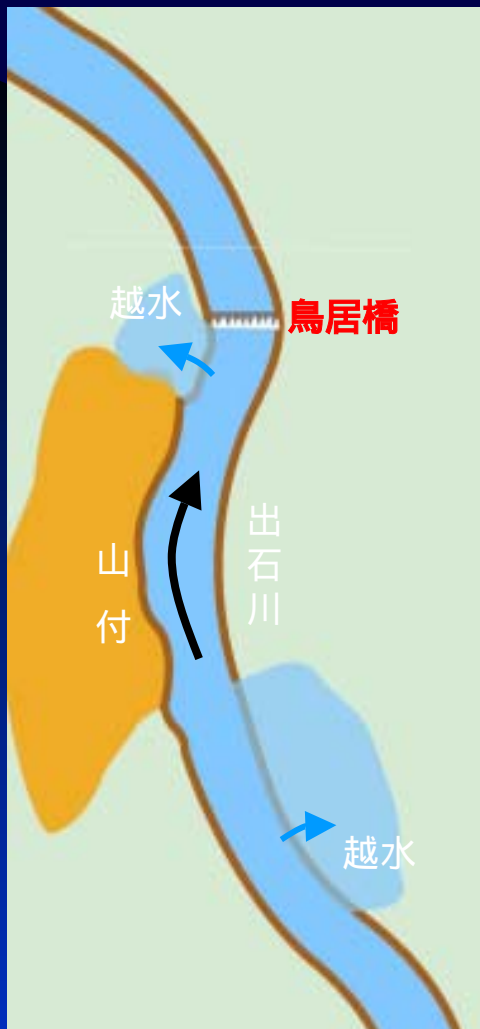
越流区間の $d \sim u_*^2$ 関係



粒径と限界摩擦速度の関係

(5) 破堤のイメージ

黒字：推測、青字:ヒアリング



20日18:00前、鳥居橋によるせき上げによって水位が上昇し、鳥居橋上流左岸で越水が始まる。

18:00頃、集会場（鳥居橋西150m）が浸水、消防団員が天井に避難（消防団）。

20:00頃、鳥居橋付近の水位がピークに達し、越水量が最大となる。最大越流水深は約50cm、越流幅は約100m、最大流速は約1.7m/sと推定される。

19:00～19:30頃に鳥居橋付近の一部が欠損（地元住民）

23:20頃、越水開始から約5時間後、浸食が進んだ鳥居橋上流左岸で破堤した。

23:18破堤（消防団からの通報時刻）

(6) まとめ(出石川左岸5.4k)

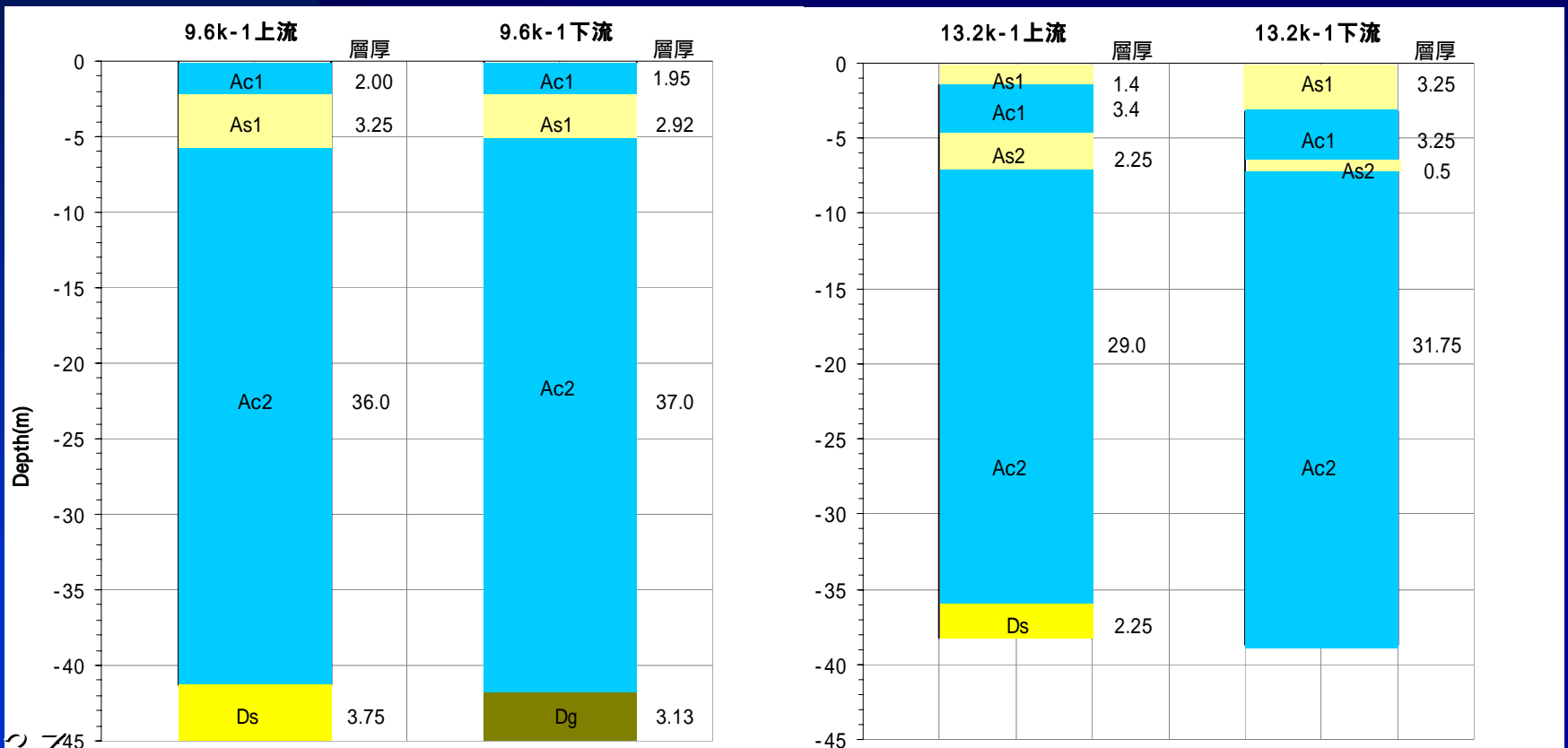
- 現況の断面(破堤前)では、浸透による安全性は、確保されている。(局所動水勾配、すべり安定性)
- ただし、越水により裏のりが侵食され、堤体幅が減少すると浸透による安全性は確保されなくなる。
- 平面二次元不定流解析結果では、破堤箇所付近は越流が発生し、その発生時間も長く破堤の危険度は高かった。
- 破堤の原因は、主に越流に伴う裏のり侵食によるものと考えられる。

2. 円山川の地盤特性

1) 基礎地盤の土質調査結果

円山川左岸9.6K、円山川右岸13.2kの上流、下流において沖積粘土の圧密特性を把握するために、サンプリングおよび圧密試験を実施した。

沖積粘土 (Ac) の層厚は、円山川左岸9.6Kで36～37m、円山川右岸13.2kで21～31.75mである。



2) 土質の物性値 < 円山川左岸9.6k上流 >

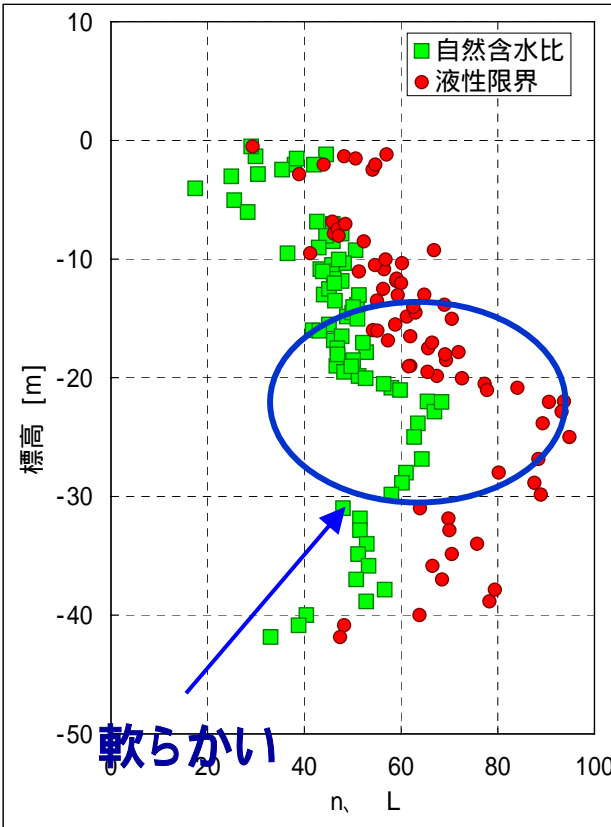
・ 自然含水比、液性限界：深度方向に凸の分布

➡ 粘土中央部が軟らかい、物性が深度ごとに異なる

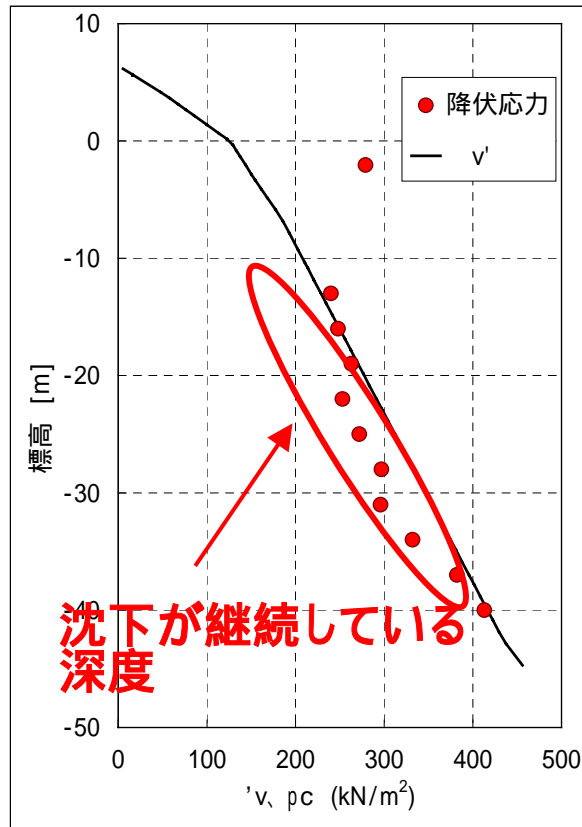
・ 圧密降伏応力：有効土被り圧 $\sigma'_v >$ 圧密降伏応力 p_c

➡ 圧密進行中で、沈下が継続

自然含水比と液性限界



圧密降伏応力

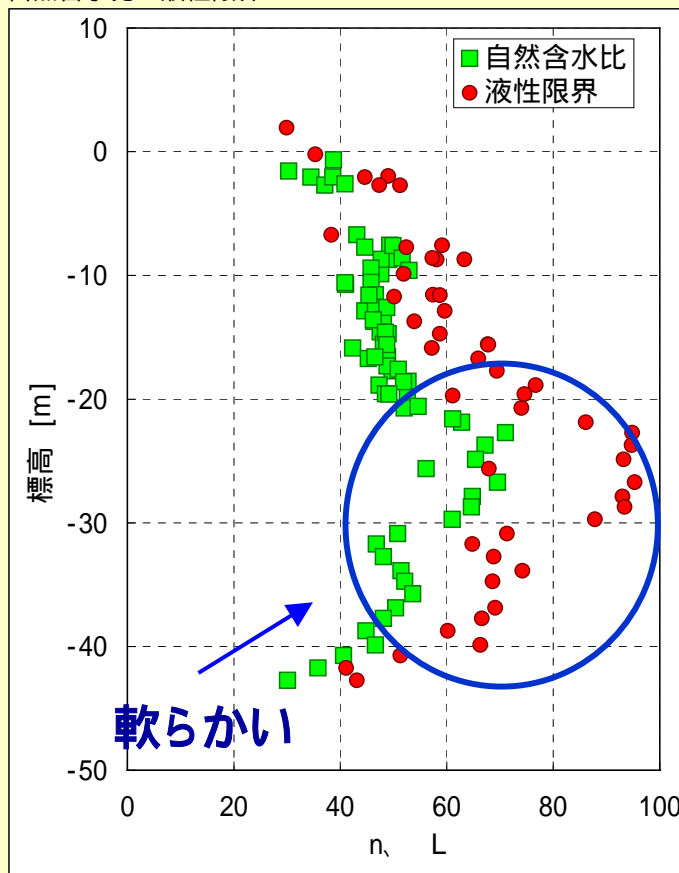


土質の物性値 < 円山川左岸9.6k下流 >

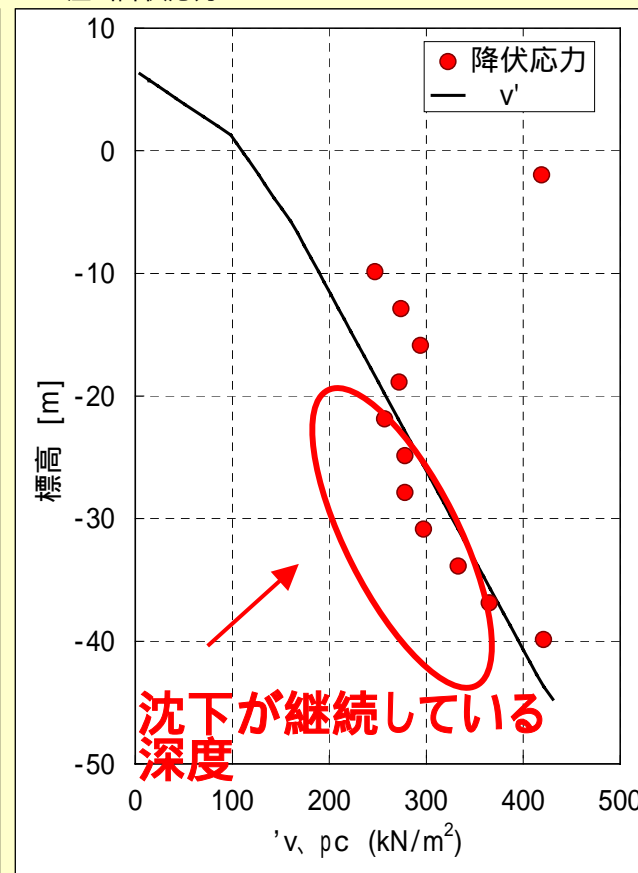
・自然含水比、液性限界、圧密降伏応力の分布は上流と同様な特性を示す。

上流、下流ともに、地下水の汲み上げなどによる圧密降伏応力の増加が見られる。

自然含水比と液性限界



圧密降伏応力

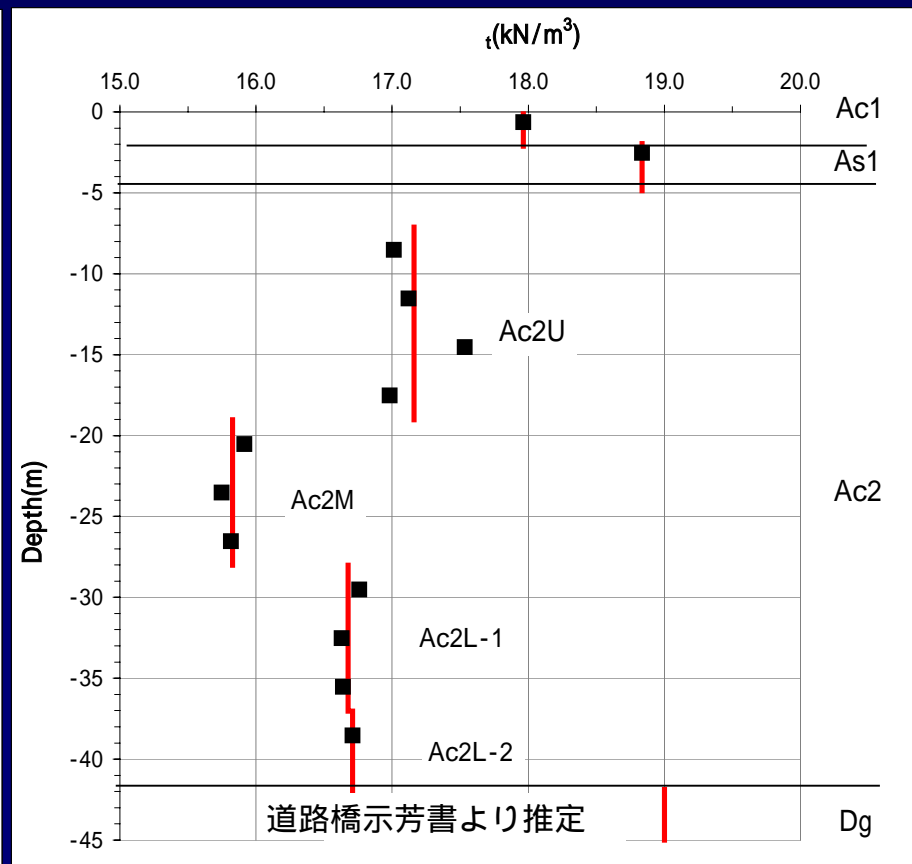
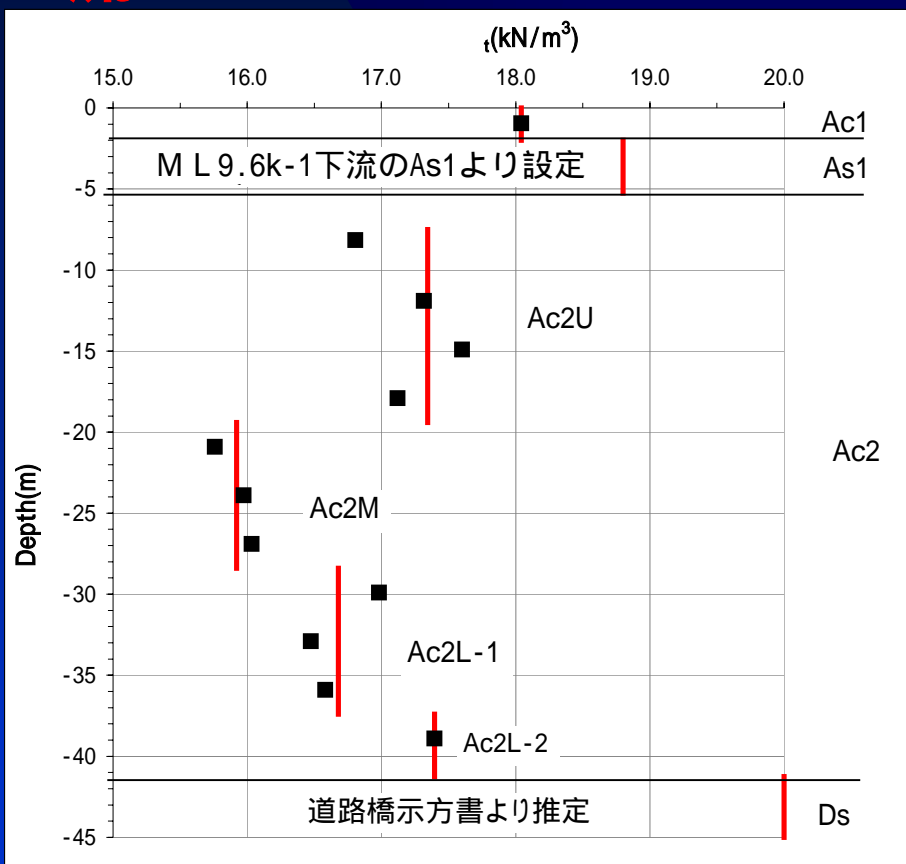


単位体積重量 < 円山川左岸9.6k上流下流 >

- ・ 室内土質試験結果から得られる単位体積重量を算出した。

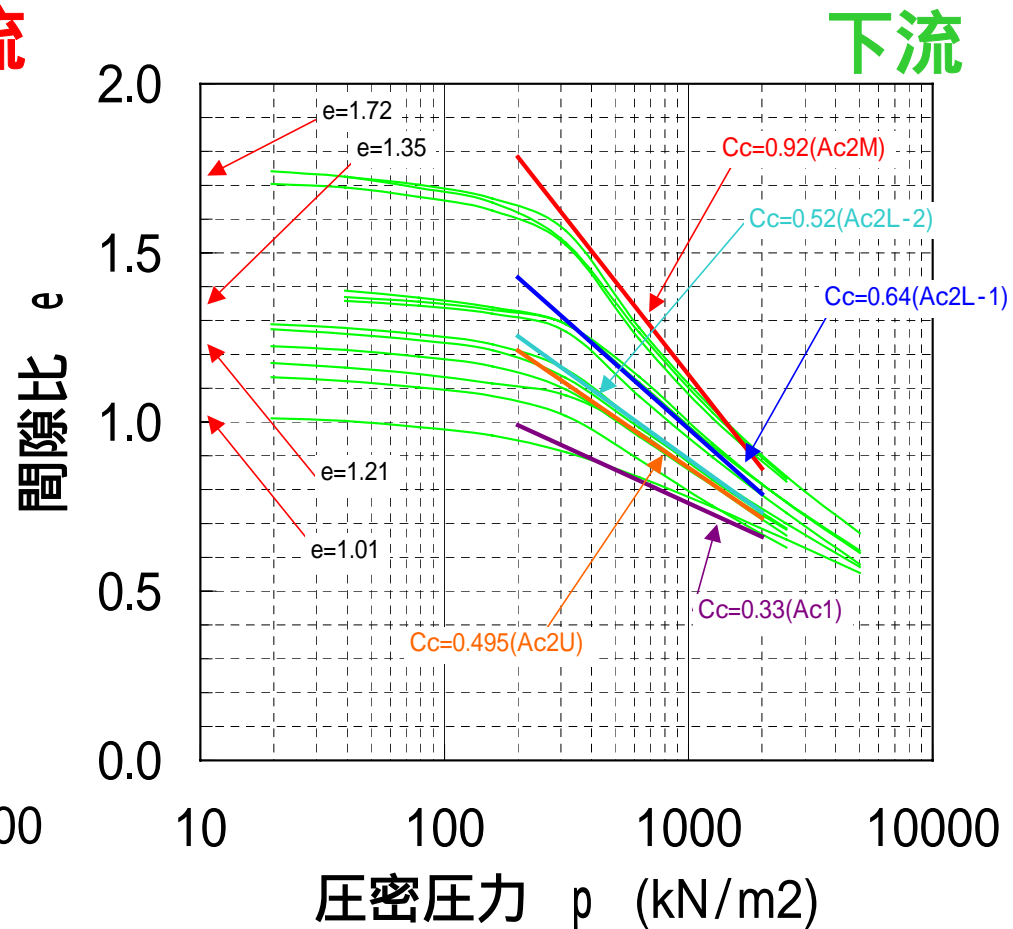
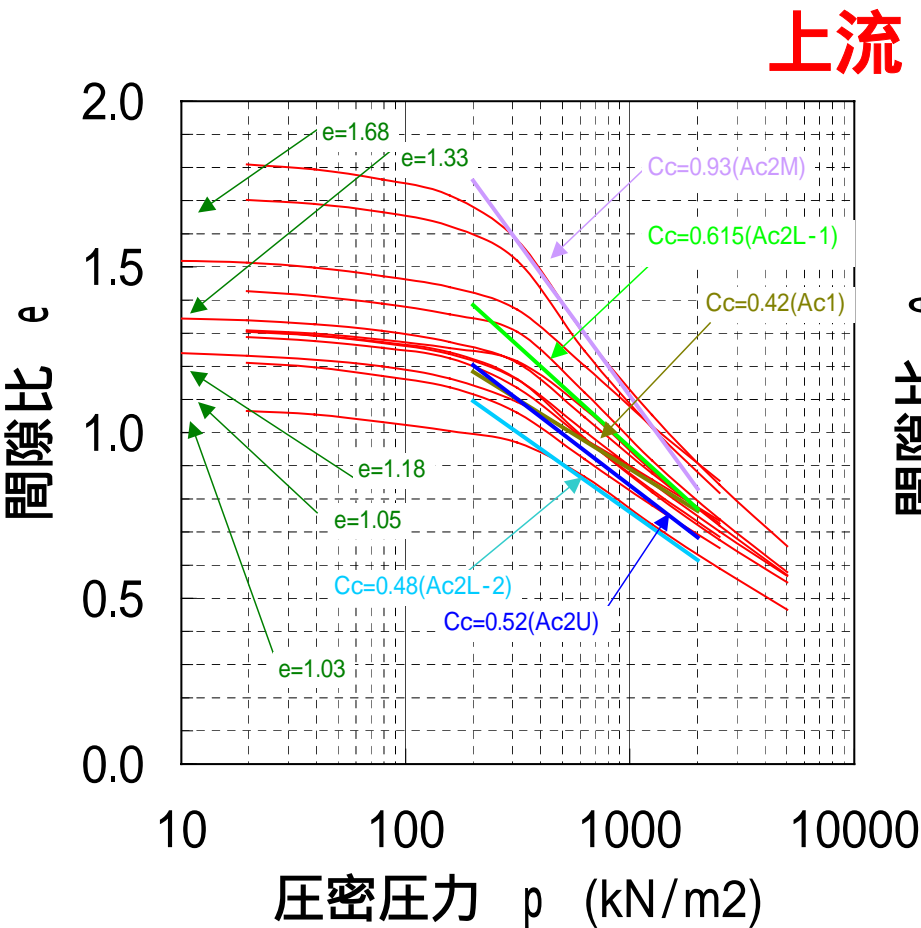
上流

下流



圧密定数 < 円山川左岸9.6k上流下流 >

- ・ 圧密試験結果から得られる圧密定数 (C_v, C_c) を、各地点の地層毎に設定した。



圧密定数 < 円山川左岸9.6k上流下流 >

- ・ 調査のボーリングデータにより物性条件を設定した。
- ・ 圧密降伏応力は、堤防施工以前を正規圧密条件と仮定した。
- ・ Ac2層は、上部・中央部・下部の3層構造とした。

9.6k-1下流 物性条件一覧表

名称	上面深度 (m)	t(kN/m ³)	Cv (cm ² /day)	Cc	Cs (Cs=Cc/10)	e0	Pc - i' (KN/m ²)
Ac1	0	18.0	1500	0.33	0.033	1.01	0
As1	-1.95	18.8					
Ac2U	-4.87	17.2	250	0.495	0.0495	1.21	0
Ac2M	-19.02	15.8	80	0.92	0.092	1.72	0
Ac2L-1	-28.02	16.7	250	0.64	0.064	1.35	
Ac2L-2	-37.02	16.7	175	0.52	0.052	1.21	0
Dg	-41.87	19.0					

9.6k-1上流 物性条件一覧表

名称	上面深度 (m)	t(kN/m ³)	Cv (cm ² /day)	Cc	Cs (Cs=Cc/10)	e0	Pc - i' (KN/m ²)
Ac1	0	18.0	700	0.42	0.042	1.03	0
As1	-2	18.9					
Ac2U	-5.25	17.3	300	0.52	0.052	1.18	0
Ac2M	-19.4	15.9	80	0.93	0.093	1.68	0
Ac2L-1	-28.4	16.7	200	0.615	0.0615	1.33	
Ac2L-2	-37.4	17.4	200	0.48	0.048	1.05	0
Ds	-41.25	20.0					

2) 土質の物性値 < 円山川右岸13.2k上流 >

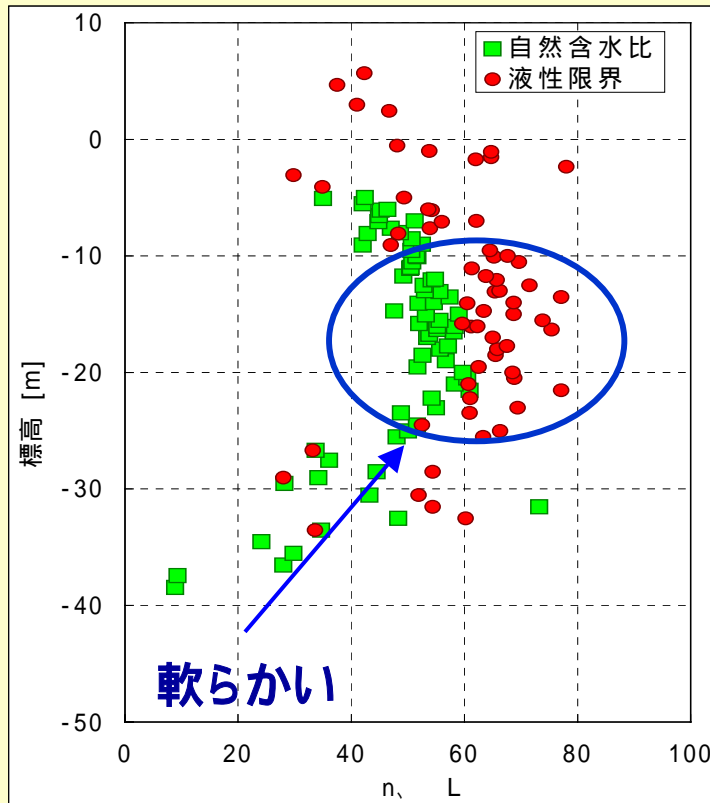
・ 自然含水比、液性限界：深度方向に凸の分布

➡ 粘土中央部が軟らかい、物性が深度ごとに異なる

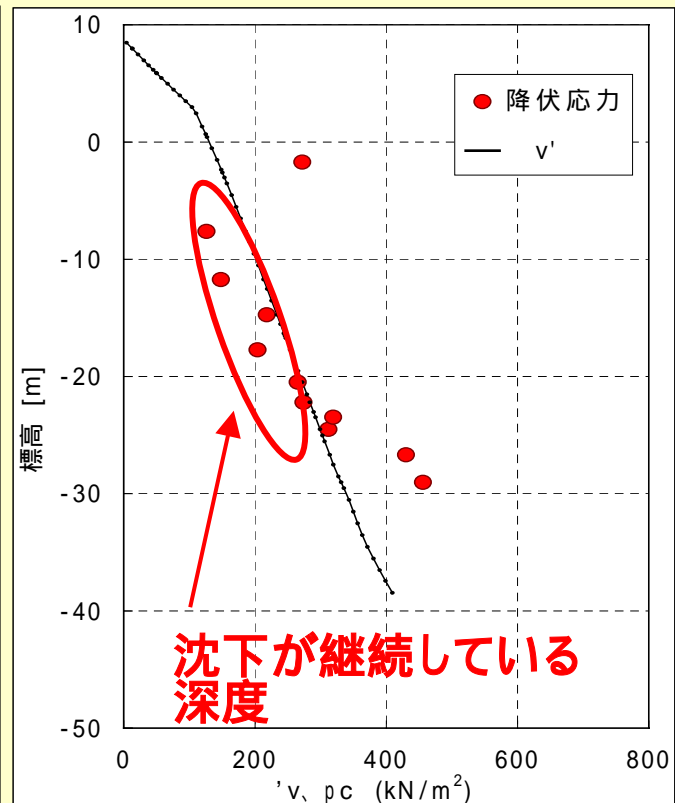
・ 圧密降伏応力：有効土被り圧 $\gamma'_v >$ 圧密降伏応力 p_c

➡ 圧密進行中で、沈下が継続

自然含水比と塑性指数



圧密降伏応力

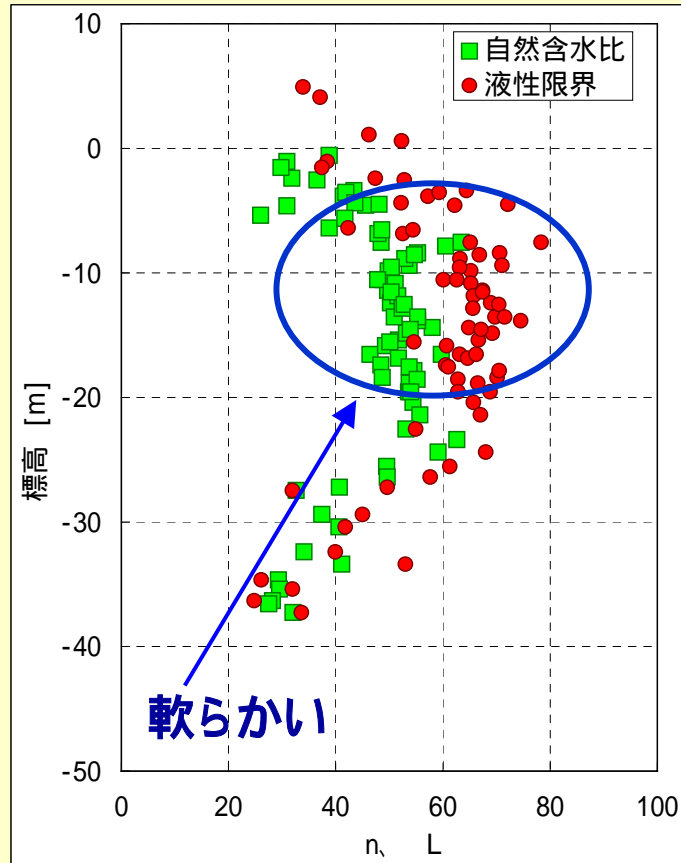


土質の物性値 < 円山川右岸13.2k下流 >

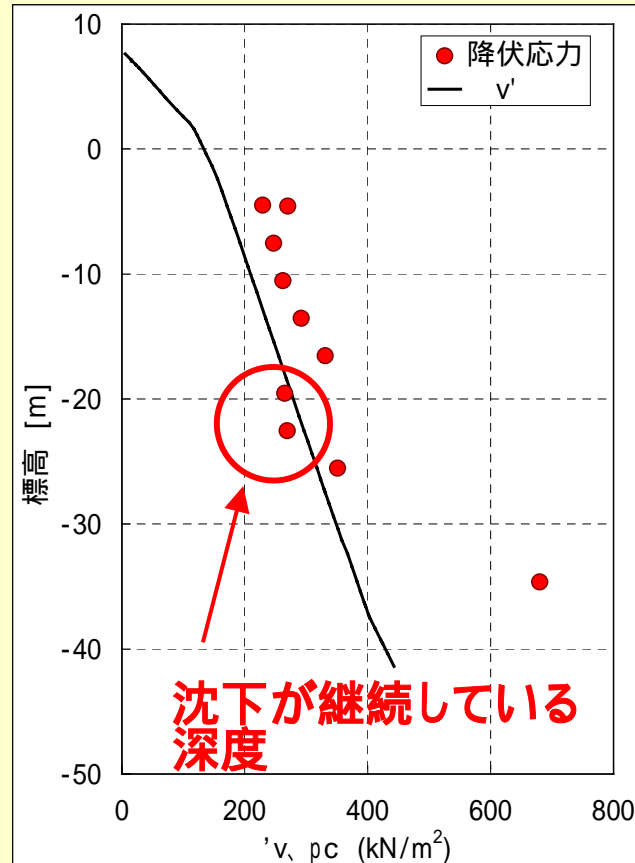
- ・ 自然含水比、液性限界、圧密降伏応力の分布は上流と同様な特性を示す。

上流、下流ともに、地下水の汲み上げなどによる圧密降伏応力の増加が見られる。

液性限界と自然含水比



圧密降伏応力

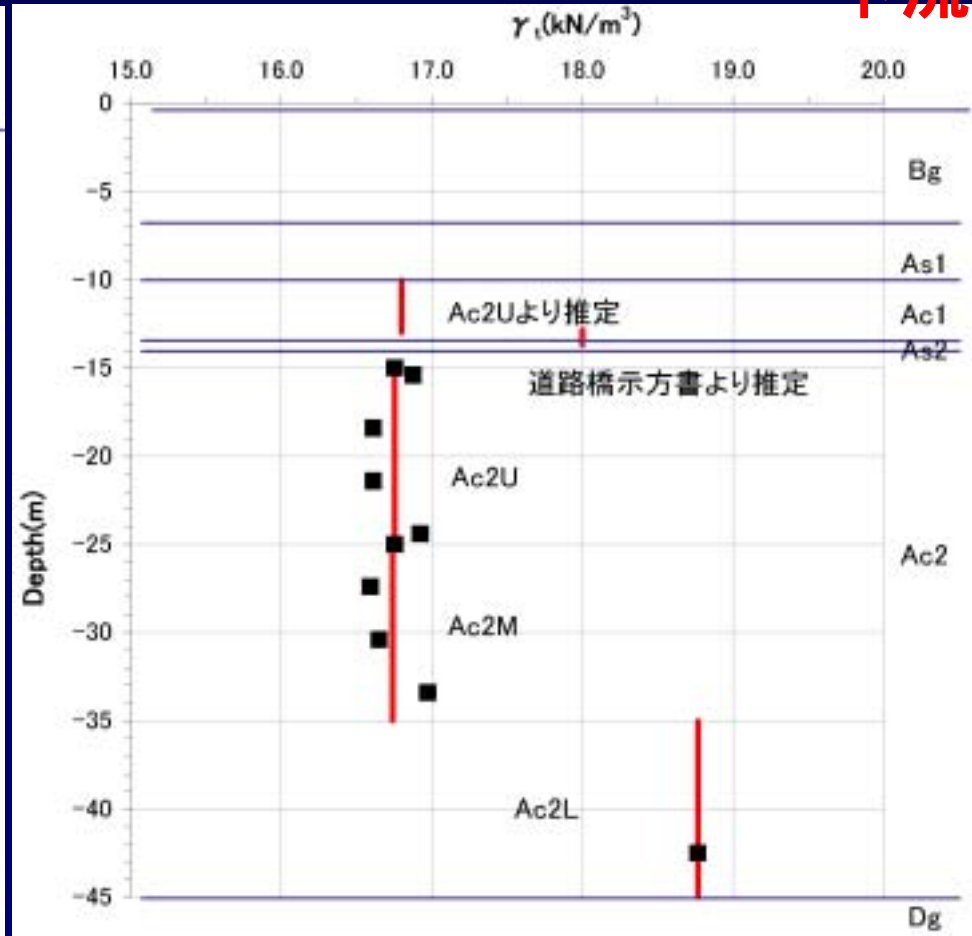
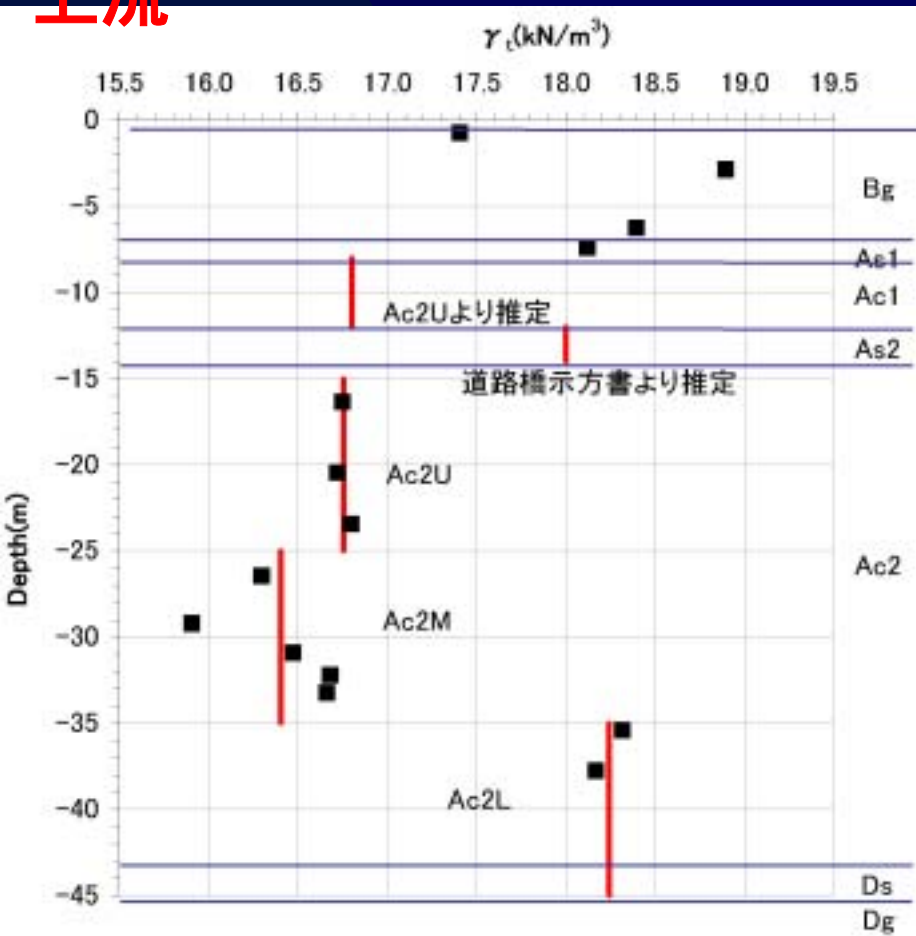


単位体積重量 < 円山川右岸13.2k上流下流 >

- ・ 室内土質試験結果から得られる単位体積重量を算出した。

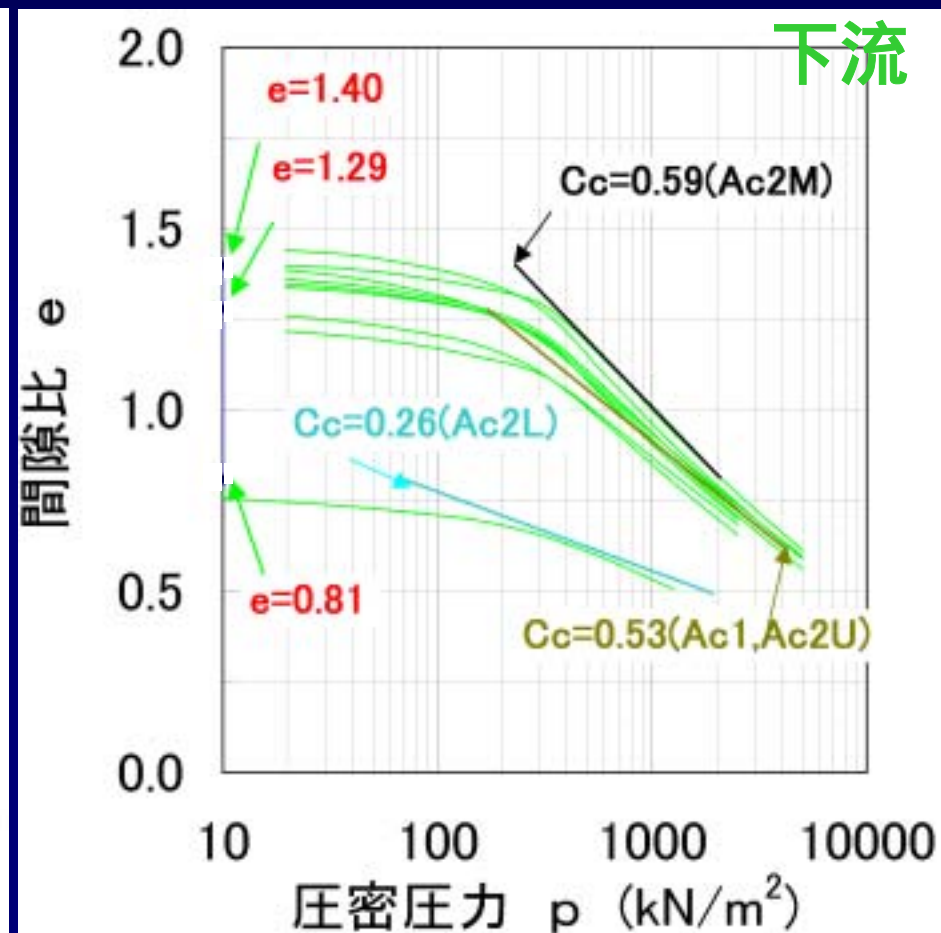
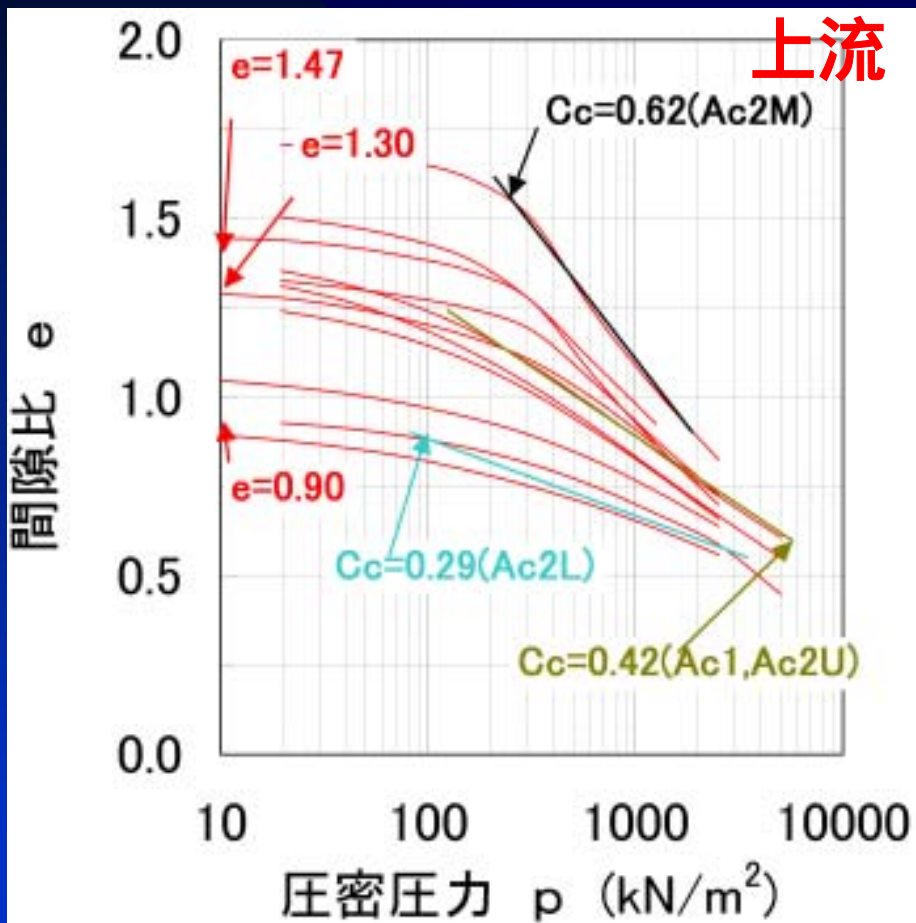
上流

下流



圧密定数 < 円山川右岸13.2k上流下流 >

- ・ 圧密試験結果から得られる圧密定数 (C_v, C_c) を、各地点の地層毎に設定した。



圧密定数 < 円山川右岸13.2k上流下流 >

- ・ 調査のボーリングデータにより物性条件を設定した。
- ・ 圧密降伏応力は、堤防施工以前を正規圧密条件と仮定した。
- ・ Ac2層は円山川左岸9.6kと同様に上部・中央部・下部の3層構造とした。

13.2k下流 物性条件一覧表

名称	上面標高 (m)	t(kN/m ³)	Cv (cm ² /day)	Cc	Cs (Cs=Cc/10)	e0	Pc- i' (kN/m ²)
Ac1	0	16.8	250	0.53	0.053	1.29	0
As2	-3.25	18	-				
Ac2U	-3.75	16.8	250	0.53	0.053	1.29	0
Ac2M	-14.33	16.7	80	0.59	0.059	1.4	0
Ac2L	-24.92	18.8	2000	0.26	0.026	0.81	0
Dg	-35.5	20					

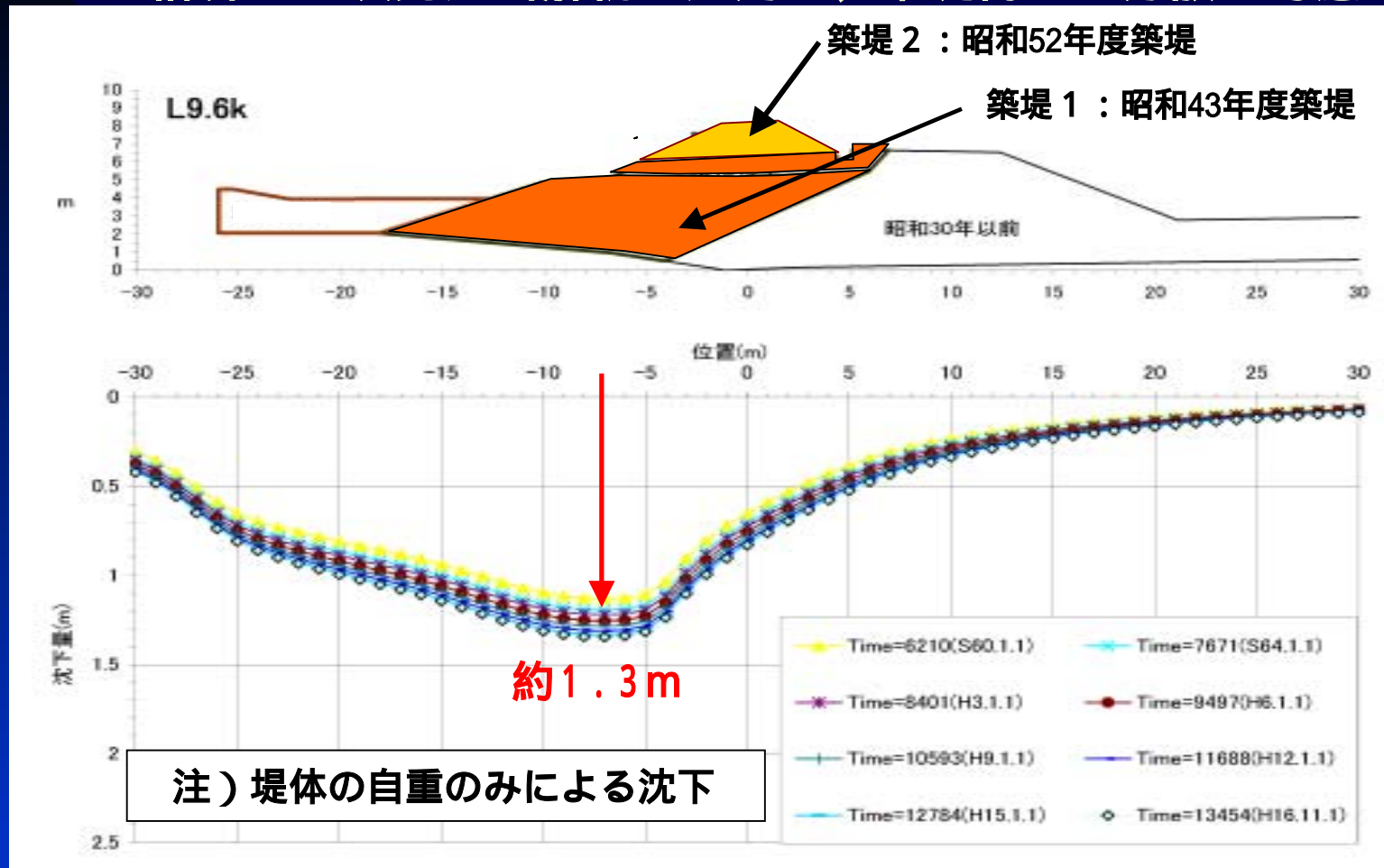
13.2k上流 物性条件一覧表

名称	上面標高 (m)	t(kN/m ³)	Cv (cm ² /day)	Cc	Cs (Cs=Cc/10)	e0	Pc- i' (kN/m ²)
Ac1	0	16.8	100	0.42	0.042	1.3	0
As2	-3.4	18					
Ac2U	-5.65	16.8	100	0.42	0.042	1.3	0
Ac2M	-15.32	16.4	100	0.62	0.062	1.47	0
Ac2L	-24.98	18.2	1750	0.29	0.029	0.94	0
Ds	-34.65	20					

3) 現在までの築堤履歴に伴う沈下予測結果

< 円山川左岸9.6kの土質データで沈下予測 >

- ・ 計算は一次元圧密解析を適用し、築堤荷重の分散を考慮した。

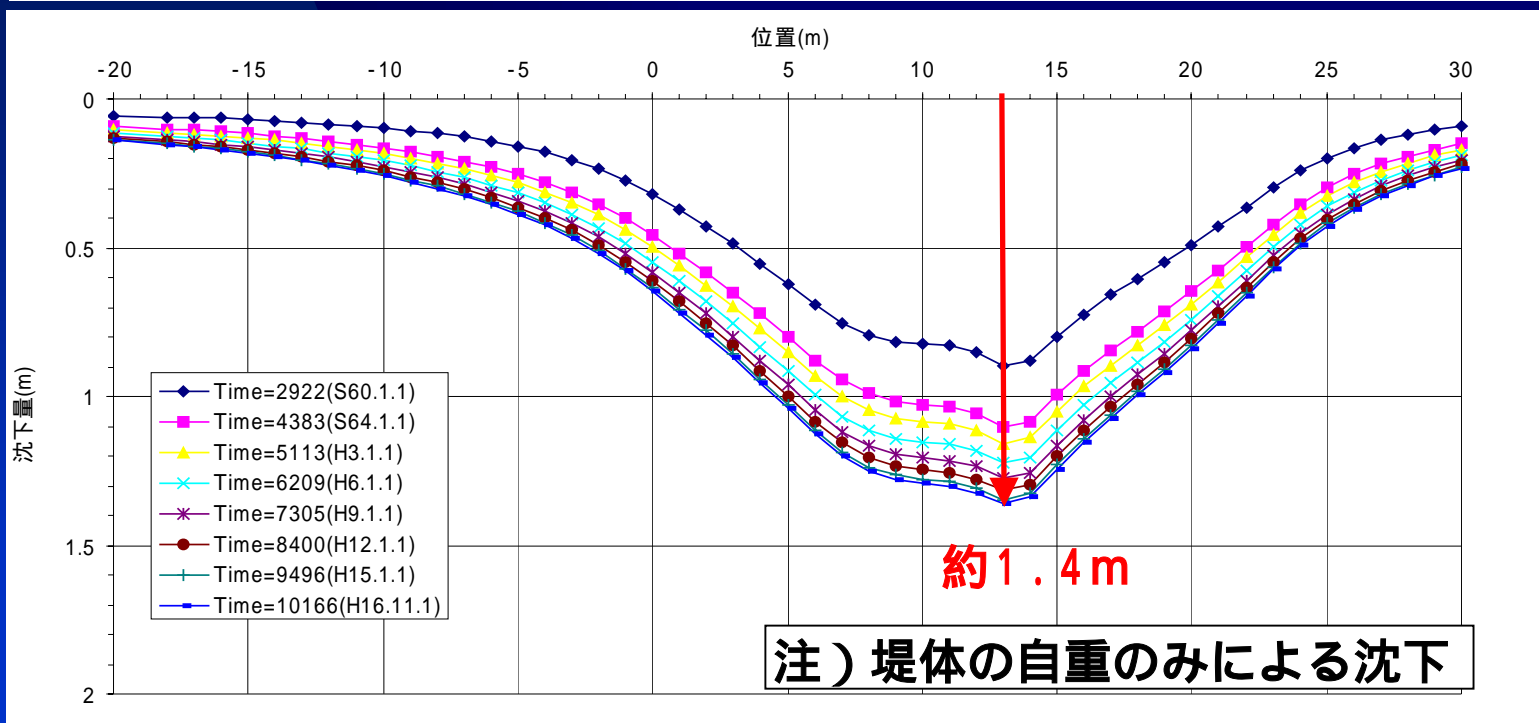
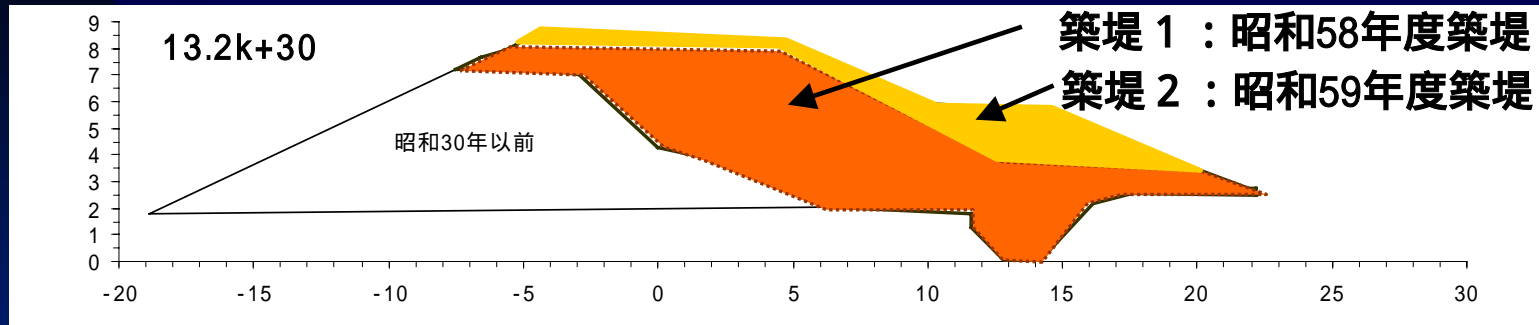


- ・ 昭和30年より現在までの累積沈下では裏のり部分で最大となる。

P48 ・ これは、昭和43年の築堤による沈下が影響している。

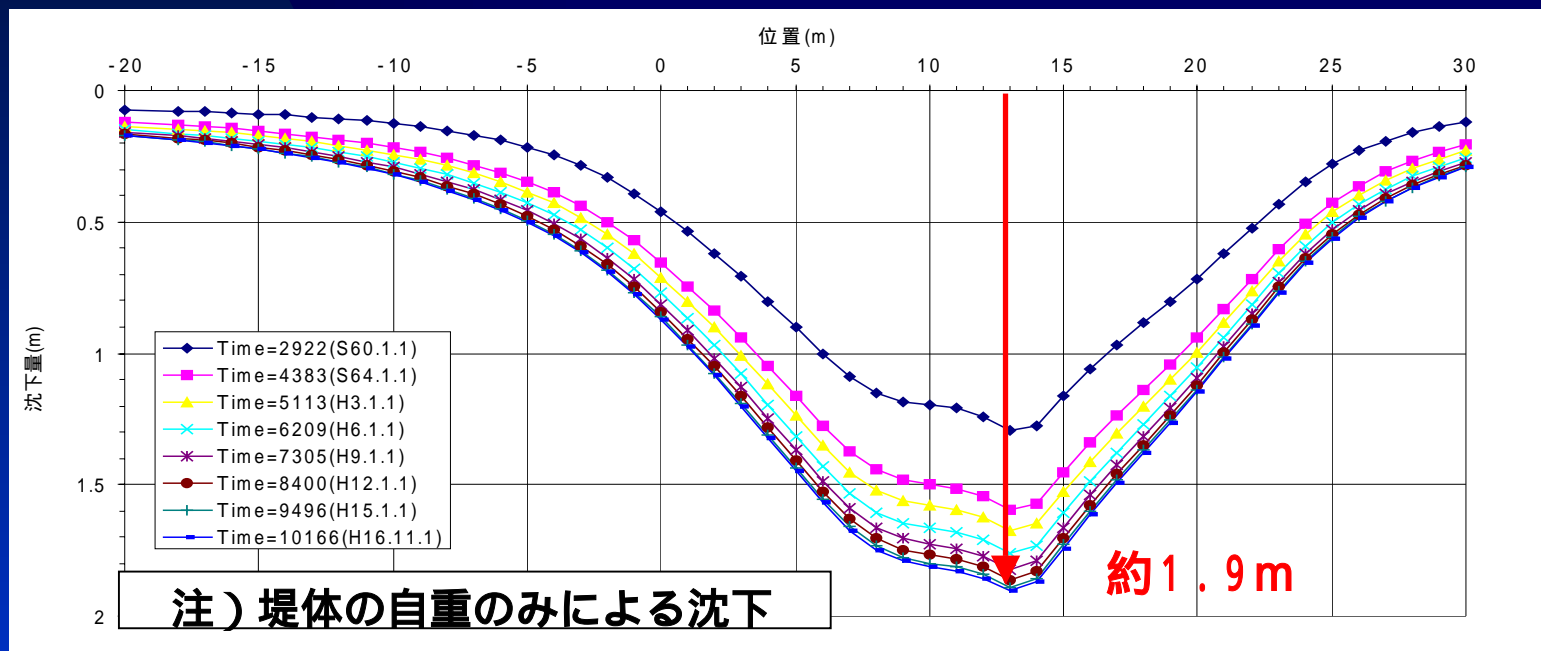
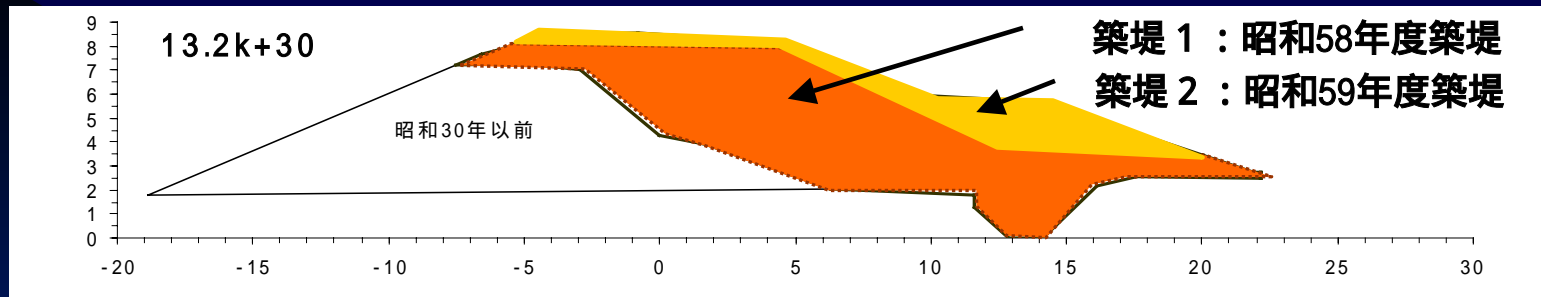
< 円山川右岸13.2k 上流の土質データで沈下予測 >

- ・ 計算は一次元圧密解析を適用し、築堤荷重の分散を考慮した。



< 円山川右岸13.2k 下流の土質データで沈下予測 >

- ・ 計算は一次元圧密解析を適用し、築堤荷重の分散を考慮した。

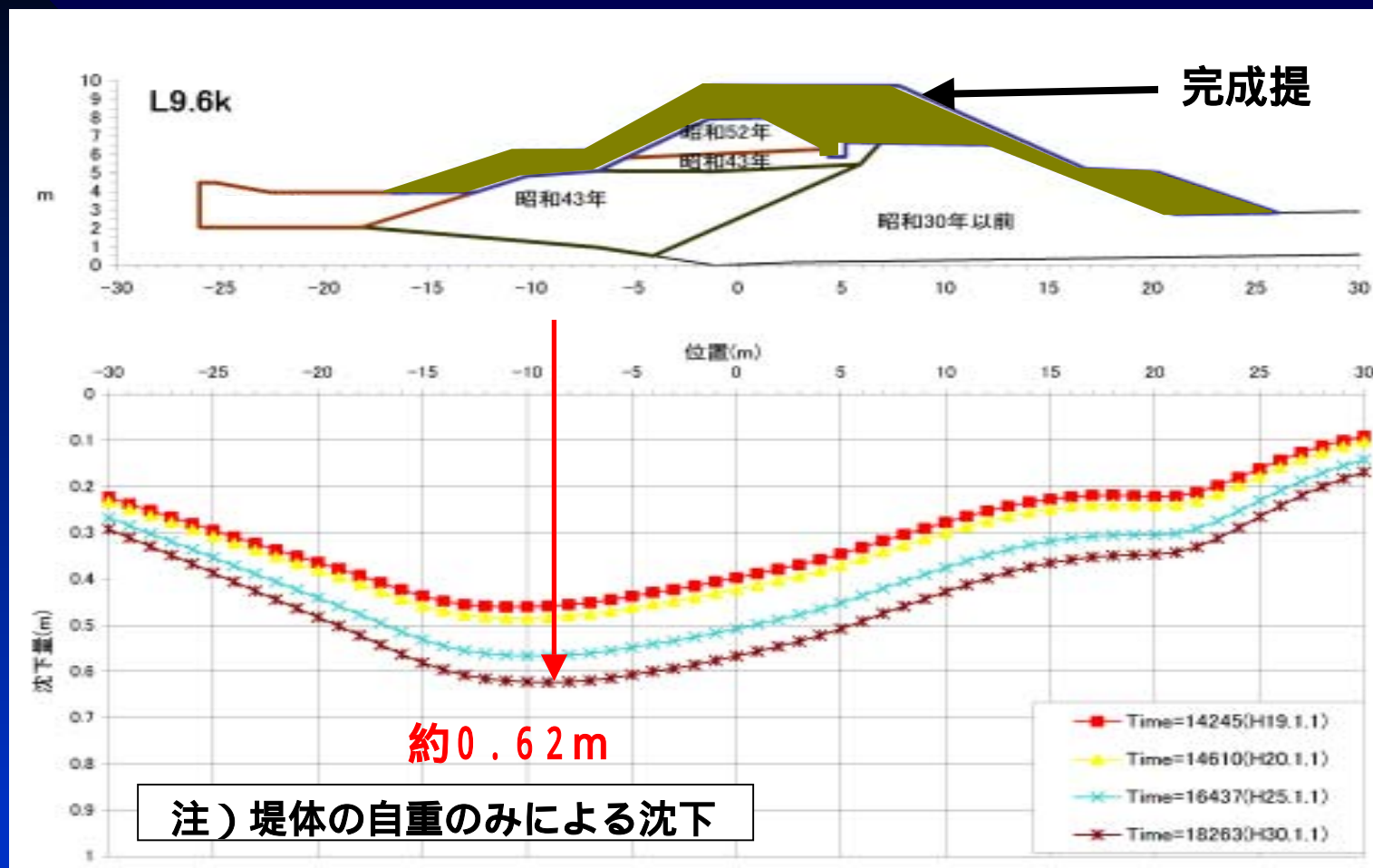


- ・ 昭和30年より現在までの累積沈下では裏のり部分で最大となる。
- ・ 累積沈下量は上流より下流地点が大きい。これは、地点による沖積粘土の状況（層厚や圧密沈下）が影響している。

4) 将来の完成堤の築堤に伴う沈下予測結果

< 円山川左岸9.6kの土質データで沈下予測 >

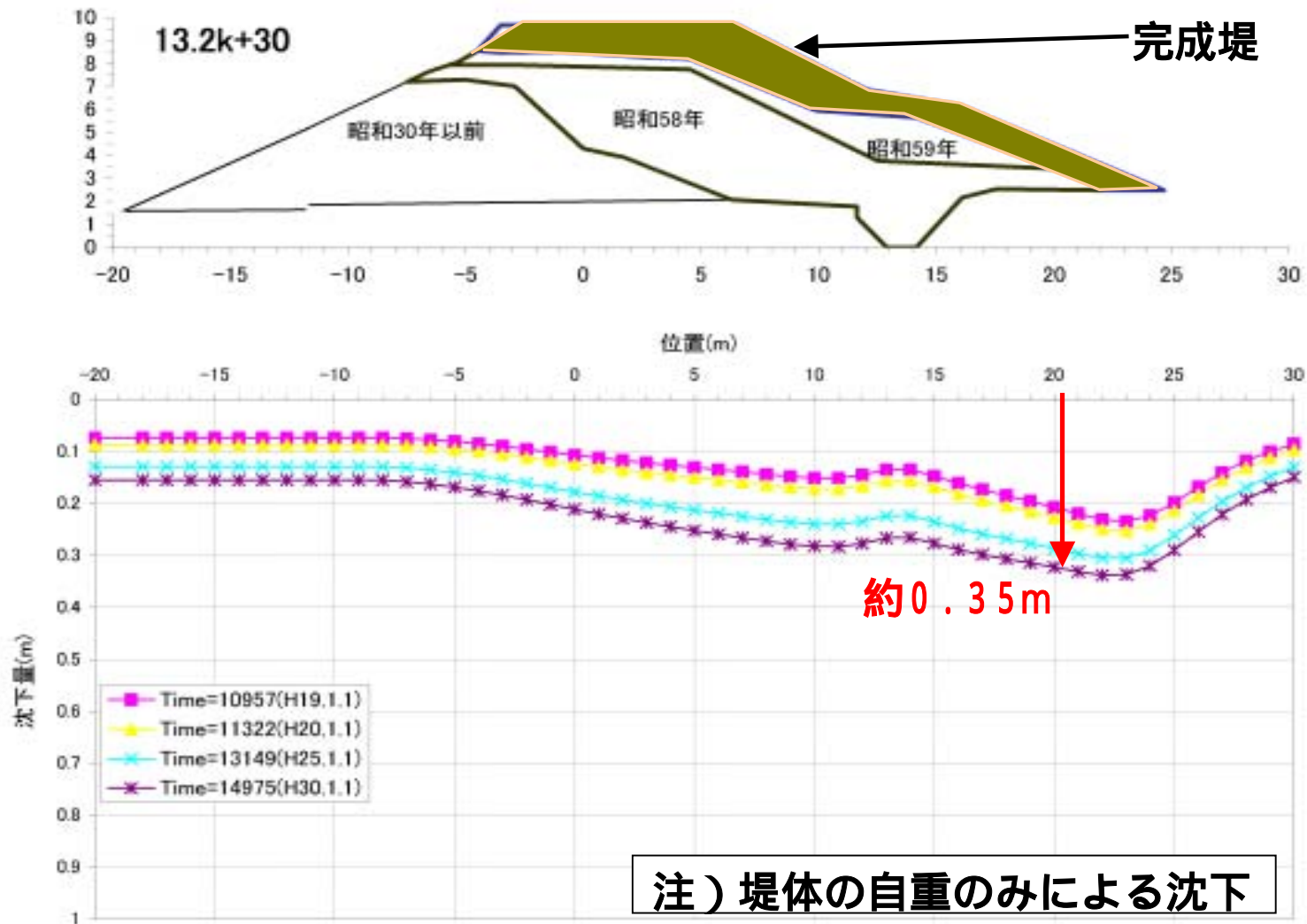
- ・ 計算は一次元圧密解析を適用し、築堤荷重の分散を考慮した。



- ・ 完成堤施工を平成17年4月に開始した場合の沈下量は、約62cmと大きい。

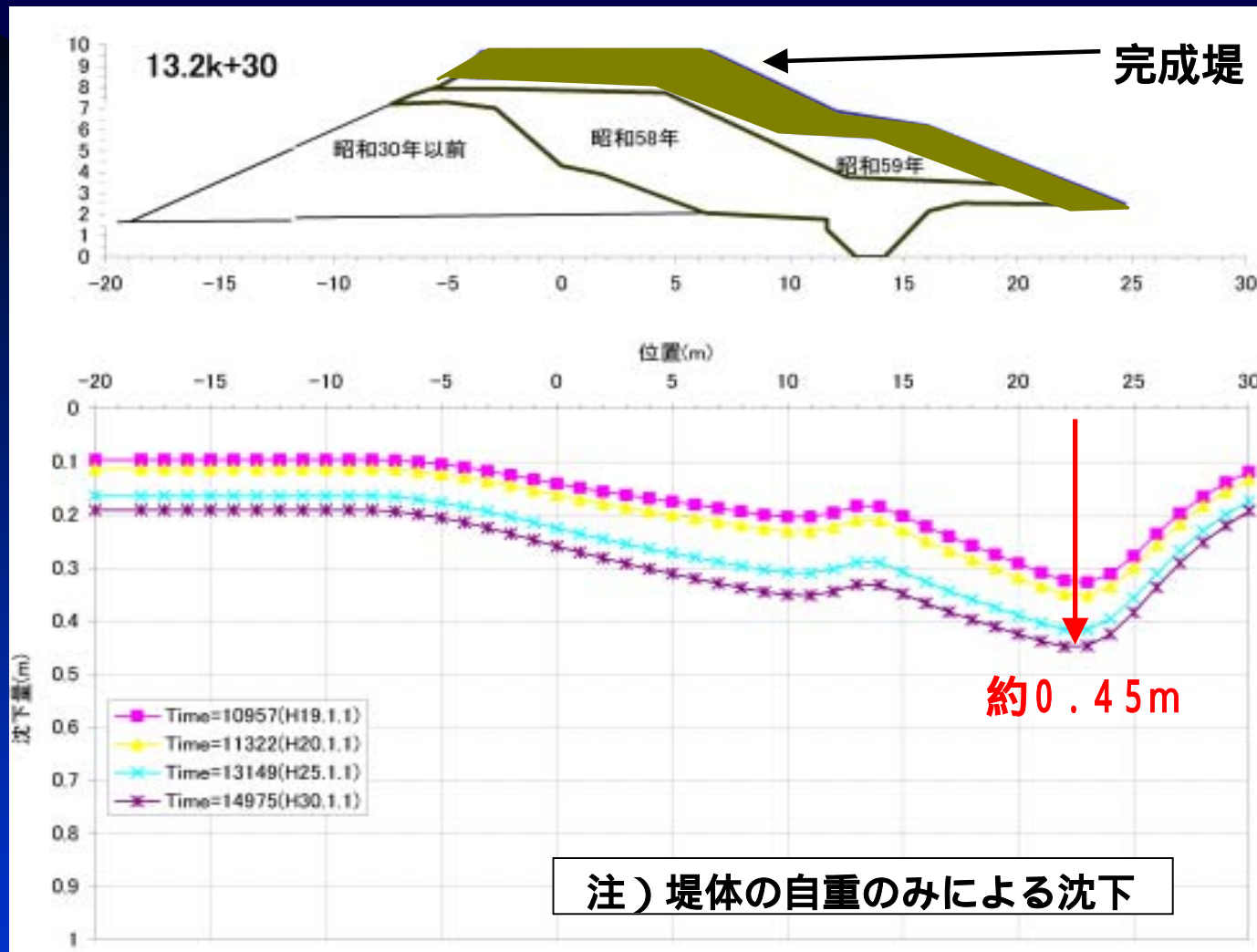
< 円山川右岸13.2k 上流の土質データで沈下予測 >

- ・ 計算は一次元圧密解析を適用し、築堤荷重の分散を考慮した。



< 円山川右岸13.2k下流の土質データで沈下予測 >

- ・ 計算は一次元圧密解析を適用し、築堤荷重の分散を考慮した。



- ・ 完成堤施工を平成17年4月に開始した場合の沈下量は、約35～45cm程度で上流より下流地点が大きい。

5) 沈下解析結果

他の箇所において完成堤防までに、堤防幅や高さの確保が必要な場合は、圧密荷重の増大、沖積粘土層厚の影響でさらに大きな沈下が発生する可能性がある。

破堤地点の沈下は、昭和40年～50年代以降の築堤により、現在までに円山川左岸9.6kでは約1.3m、円山川右岸13.2kでは1.4～1.9mの沈下が発生している可能性がある。

また、完成断面で築堤すると、円山川左岸9.6kで約0.65m、円山川右岸13.2kで0.35～0.45mの沈下が更に誘発される。

3. 対策の方針

次の対策が必要である。

地盤沈下状況を考慮すると計画堤防断面を確保することは困難である。

越水が複数の区間で生じたため河川水位を下げる対策が必要である。

堤防の被災状況を踏まえ浸透、侵食等に強い堤防とする。

裏小段の侵食を考慮すると堤防を一法化とした基本断面を確保する。

上記 ~ を満たす構造について基本的な考え方を整理する。

また、

堤防については沈下の影響に配慮して、維持管理体制を確立させる。