

樋門、樋管周辺のパイピング特性に関する大型模型実験

古本一司* 恒岡伸幸** 三木博史*** 小畑敏子****

1. はじめに

河川堤防は、線構造の重要防災構造物であり、氾濫域に対し全区間にわたって洪水に対する安全性の確保が必要である。一方、堤防を横断して設けられる樋門・樋管は、排水や用水確保などの目的の他、堤防としての目的も有するものであるため、連続する堤防と同等の機能を確保する必要がある。

しかしながら、樋門・樋管周辺においては、構造物と堤体との境界部でパイピング破壊の原因となる水みちが形成されやすく、浸透に対する堤防の弱点箇所となる可能性がある(図-1 参照)。特に、過去軟弱地盤上に設置されたものには杭により剛支持されたものが多く、周辺堤防が沈下するのに対し、樋門・樋管が沈下しないため、構造物直下に空洞が発生し、これが水みちとなる。

パイピングが発生すると、堤体断面が減少し、場合によっては破堤に至る。このため、過去施工された樋門・樋管に対し、構造物周辺に空洞が存在する場合のパイピング発生メカニズムを解明することによって、空洞が存在している樋門・樋管周辺堤防に対する有効な対策工法を確立することが急務である。

また、新たに樋門・樋管を設置する場合、周辺堤防のパイピング破壊を防止するために、構造物周辺に遮水工を設置し、必要な浸透経路長を確保している。そのとき、遮水工の長さについては、レーンの加重クリープ比に基づいて設計しているが、このクリープ比は、小規模なフィルダムにおける遮水工を元に経験的に設定されているものであり、堤防のように規模の異なる構造物への適用の妥当性は明らかでない。また、複数遮水工を設置する場合、その設置間隔を十分に考慮することができないといった問題点がある。

そこで、本研究では、

- (1) 樋門・樋管周辺に空洞が存在した場合のパイピング発生メカニズム
- (2) 遮水工の浸透・パイピング破壊に対する効果や設計手法

を明らかにするために、大型模型実験を行った。

その結果、

- (1) 空洞の存在による樋門・樋管構造物周辺堤防の洪水に対する安全性
- (2) 遮水工の効果とレーンの加重クリープ比による評価手法の適用性

に関する知見が得られたので、その概要を報告する。

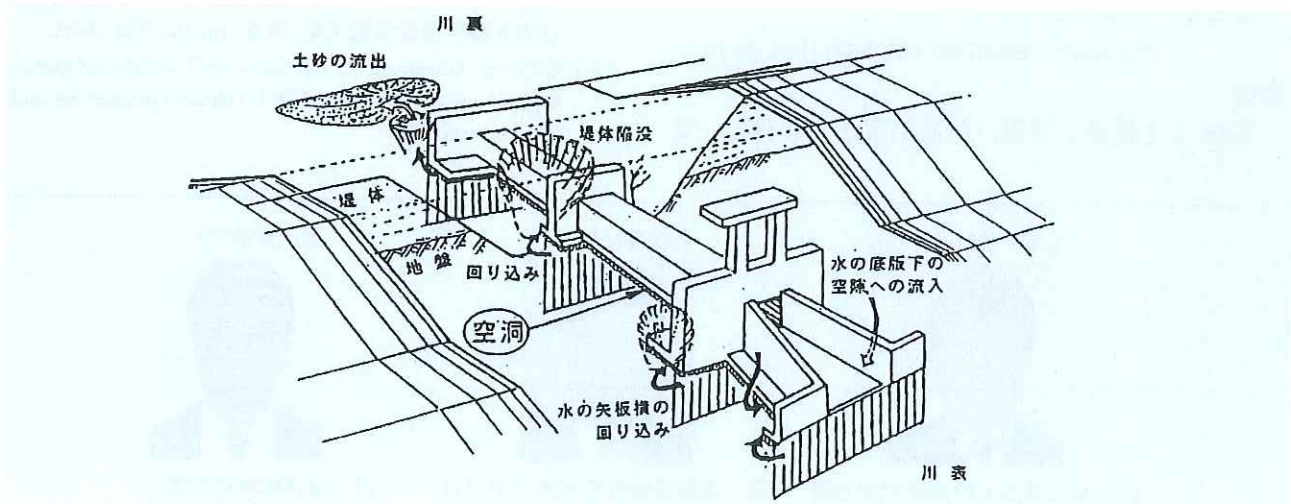


図-1 樋門・樋管周辺の劣化

2. パイピング現象について

土粒子の間を水が流れるとき、水の流れる力がかたに土粒子に加わる。(透水力と呼ぶ。)透水力に対する土の安定性について検討する。

図-2に示すように、土に対して、ある水位すなわち動水勾配(= h/L)を与えると、図に示すような圧力分布を示す。このとき、土の有効圧力は、動水勾配が0の場合に比べ、 $\gamma_w L$ ほど低下している。動水勾配がある値に達すると、さらに、有効圧力は低下し、その結果、土粒子一つ一つが遊離する状態となる。このようにして発生した孔は、水が次々に流れることにより大きくなり、最終的に水が無限に流れ出す。この現象をパイピングという。

このように、パイピングには浸透力(動水勾配)が大きく影響する。洪水時の河川堤防においては、堤体の土粒子に対し、河川水による浸透水による透水力が作用しており、透水力がある値を上回れば、堤体にパイピングが発生し、場合によっては、破堤に至ることとなる。

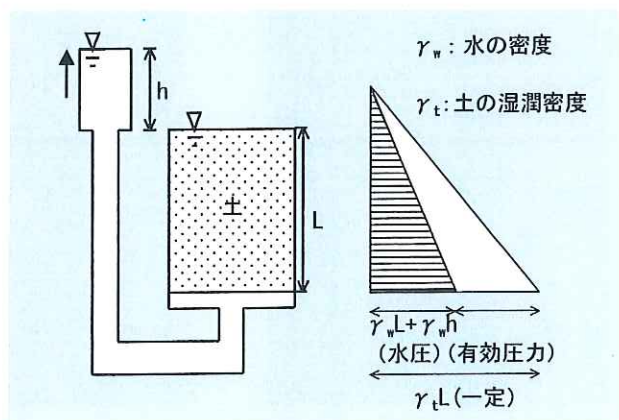


図-2 透水力が作用したときの土の内部応力

3. 空洞が樋門・樋管構造物周辺堤防の安全性に与える影響

3.1 概要

樋門・樋管構造物周辺堤防において、空洞が発生している場合の洪水時における安全性について検討するために、空洞の存在する樋管模型を作製し、浸透実験を行った。

3.2 大型模型実験

大型模型の概要を図-3に示す。

堤体は、実堤防をほぼ再現できるように、約半分の大きさとし、のり勾配は、通常の堤防とほぼ

同じである。碎石槽と堤体、基礎地盤の境界部にはジオテキスタイルを布設しており、碎石槽から、堤体、基礎地盤に水頭を与えることができる。

樋管にはコンクリート製プレキャストボックスカルバート(幅45×高さ46cm)を用いた。また、樋管直下の空洞は、特に高さ10cm以上の場合に問題となるケースが多いとされており、本実験では、縮尺を考慮して高さ5cmの空洞を設けた。また、空洞は堤体重量により発生するので、図に示すように碎石槽の位置からのり先まで設けた。また、空洞内壁はジオテキスタイルにより保護した。

堤体及び基礎地盤には、表-1に示すように、パイピング破壊の発生しやすい粒度のそろった透水性の高い川砂を使用し、タンパを用いて締め固めた。また、土槽側壁等と堤体・基礎地盤の境界面にはロームを敷き詰め、土槽と模型の境界が水みちとならないようにした。

実験前にあらかじめ、基礎地盤内の水位を上昇させ、12時間程度放置し、河川水が上昇する前の平時の状態を再現した。

その後、給水槽の水位を10cm上昇させた後、堤体内の浸潤線が定常状態になるまで放置し、その後また10cm上昇させるという操作をパイピングが発生するまで繰り返した。

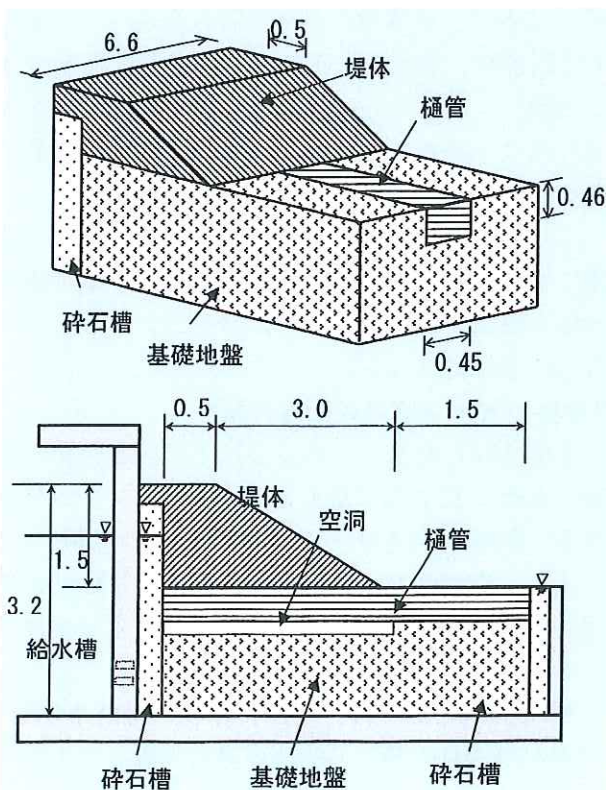


図-3 模型実験概要図 (単位:m)

表-1 土質特性

土の工学的分類		砂
レキ分 (%)		7.8
砂分 (%)		91.7
シルト・粘土分 (%)		0.5
均等係数 U_c		2.82
最大粒径 (mm)		4.75
最適含水比 (%)		16.4
最大乾燥密度 (g/cm^3)		1.655
土粒子の密度 (g/cm^3)		2.701

実験では、堤体及び基礎地盤を通過する流量(以下、通水量とする)、およびマンメーターにより地盤内各所における圧力水頭について計測を行った。また、のり尻付近にもマンメーターを配置し、局所的な水頭も計測した。

3.3 実験結果

3.3.1 パイピングの発生状況

給水槽の水位が76.5cm(樋管上面の高さを0cmとする)に達した時点で、堤体のり先のカルバート脇においてパイピング現象が確認された(写真-1参照)。

また、実験後、この周囲を掘削したところ、パイピングの発生した樋管脇に、径の大きい土粒子のみが残存している箇所が確認された(写真-2参照)。これは、給水槽の水が空洞を通過し、のり先まで到達後、地表面に表れようと樋管直近を通過した時に、水とともに細かい土粒子が洗い流されたために、径の大きい粒子のみが残存した結果である。

したがって、樋管下に空洞が存在する場合、堤体に浸入してきた水が、樋管下の空洞および樋管の脇を通過することにより、パイピングが発生するものと考えられる。

3.3.2 パイピング時の動水勾配

土構造物に対して、ある値以上の動水勾配が作用すると、2.で述べたように、パイピングが発生する。同様の砂を用いて行った過去の実験¹⁾によると、空洞がない場合は、平均動水勾配が0.33程度になるとパイピング破壊が発生するとされている。

平均動水勾配とは、堤体に作用する外水位を、堤体内浸透水の最短の浸透経路長で除したものである。

今回の浸透経路長は、堤体の敷幅である3.5m

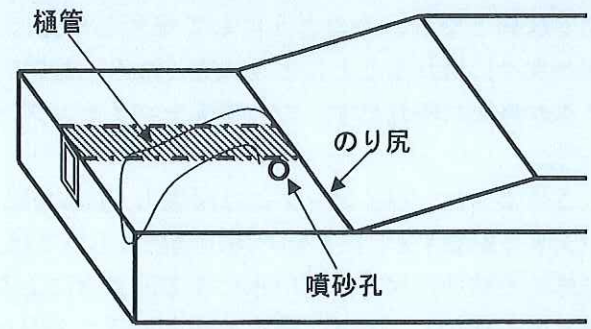
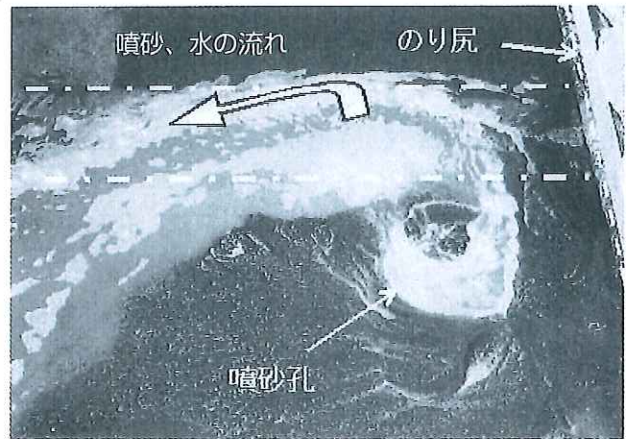


写真-1 パイピングの様子

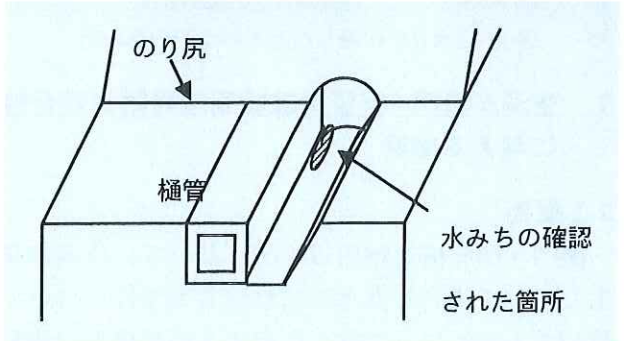
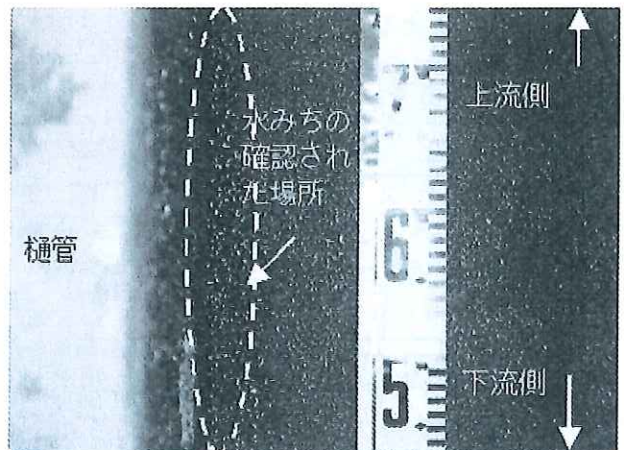


写真-2 樋管周辺の水みち

となるが、パイピング発生時の堤体内の平均動水勾配は、0.22であった。

一方、過去の実験と比較すると、より低い動水勾配でパイピングが発生していることから、空洞

の存在により安全性が低下していることが確認された。

一方のり尻における局所動水勾配に注目すると、図-4に示すように1.0になるあたりでパイピングが発生している。これは、今回用いたような土質材料においてパイピングが発生するといわれる限界動水勾配²⁾とほぼ一致しており、局所的にみると、粒子間の有効応力がゼロとなったためにパイピングが発生したものと考えられる。

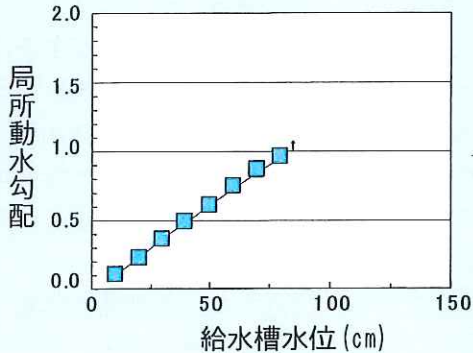


図-4 局所動水勾配と給水槽水位の関係

4. 樋門・樋管の遮水工の効果について

4.1 概要

これまで述べてきたように、樋門・樋管構造物と堤体土は、密着が難しく浸透破壊に対する弱点となりやすい。そこで、弱点箇所とならないよう浸透に対し十分安全であるように鋼矢板などによる遮水工が設けられる。この場合、レーンの加重クリープ比(式(1))を用いて、クリープ比が表-3に示すような値以上となるように、遮水工長さが決められる。

しかしながら、この手法は、小規模なフィルダムにおける遮水工長を評価するために経験的に用いられていたものを準用したものであり、対象とする規模の異なる樋門・樋管に対する適用性は必ずしも明らかでない。

そこで、遮水工の効果を把握するとともに、レーンの加重クリープ比による遮水工の評価手法の適用性について検討するために大型模型実験を行った。

また、遮水工が複数設けられる場合、それぞれの間隔が小さい場合は、浸透流の回り込みが起きず、効果が小さくなることが考えられる。そこで、遮水工の間隔が遮水効果に与える影響についても合わせて検討を行った。

$$C_c = \frac{2\Sigma D + (B/3)}{H} \quad (1)$$

C_c : 加重クリープ比 (表-3), D : 遮水工長さ,
 B : 堤防敷幅, H : 水位差

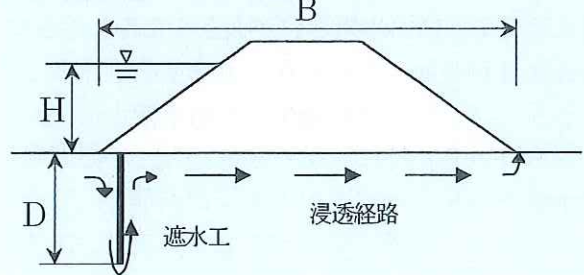


表-3 レーンの加重クリープ比

土質	C_c
極めて細かい砂またはシルト	8.5
細砂	7.0
粗砂	5.0
軟らかい粘土	3.0
堅い粘土	1.8

4.2 模型実験の概要

模型実験は、3.1に示す方法と同様な方法で行った。遮水工の大きさを表-4に示す。遮水工は、碎石槽から0.8 m離れた場所に樋門を取り囲むように設置した(写真-3参照)。大きさの決定にあたっては、事前に浸透流解析を行い、影響を把握しやすい大きさとなるよう留意した。

表-4 実験ケース

ケース	遮水工の大きさ (深さ×幅)(cm)	パイピング時の平均動水勾配
2	50×50	0.27
3	75×75	0.33
4	130×75	0.34
5	75×100	—*

* ケース5は堤防天端まで水位を上昇させてもパイピングが発生しなかった。

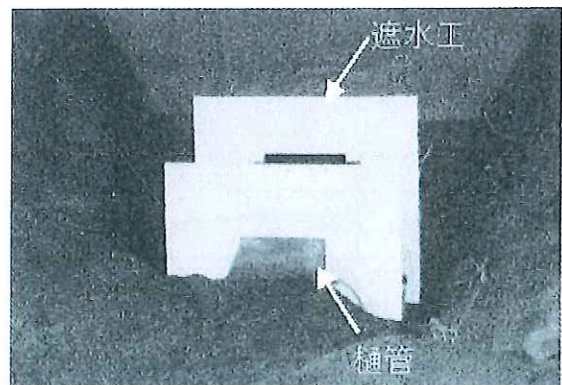


写真-3 樋管に設置した遮水工 (写真は遮水工を2枚設置したケース)

4.3 実験結果

パイピングの発生位置は、3.と同様にのり尻部の樋管直近であった。

浸透流量と給水槽水位との関係を図-5に示す。図に示すように給水槽水位が大きくなるとともに、浸透流量が増加しているが、遮水工を設けることにより、パイピングが発生した給水槽水位が大きくなっている。特に、ケース5では、堤防天端まで水位を上昇させてもパイピングが発生しなかった。ただし、浸透流量とパイピング現象の関連性は低い。これは、パイピングが局所的な現象であるためと考えられる。

堤体内の圧力水頭分布を図-6に示す。図に示すようにパイピング発生時の、のり尻における圧力水頭はどのケースでもほぼ同じであった。一方、遮水工のあるケースでは、遮水工の前後で大幅な水位の低下があることから、パイピング発生の抑制効果があることが認められた。

平均動水勾配に注目すると、表-4よりケース3では、0.3程度になっており、空洞が生じている場合でも、遮水工が函体に密着していれば、周辺の堤防におけるパイピング発生時の平均動水勾配0.33と同等の安定性が確保されることがわかった。ただし、ケース2では平均動水勾配は0.27程度

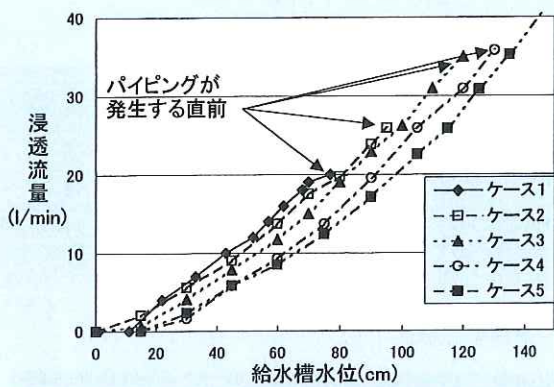


図-5 浸透流量と給水槽水位の関係

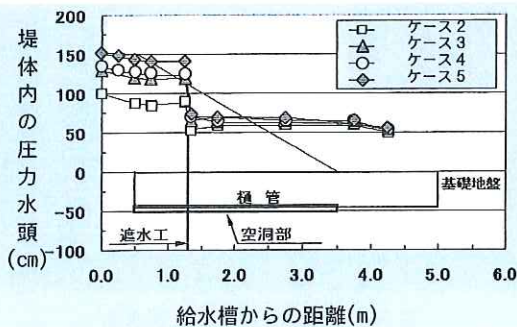


図-6 パイピング時の堤体内の水位分布

度であることから、空洞が発生したとしても通常の堤防と同等な安全性を保つためには適切な遮水工長を確保する必要があると考えられる。

4.3.1 レーンの加重クリープ比による評価

レーンの加重クリープ比の基準値は表-3に示すような値となっており、基準値以上になるように遮水工を設置することとなっており、今回の実験で用いた細砂の場合、7以上となっている。一方、実験の各ケースにおいて、パイピング発生時のクリープ比は2.7~3.1の範囲となったことから、基準値は、堤防における浸透に対する安全性に対して十分な安全率を見込んでいることがわかる。

したがって、レーンの加重クリープ比による遮水工の評価は、かなり安全側の評価となる可能性があり、今後はより合理的な評価手法の確立が必要と考えられる。

4.3.2 水平方向と鉛直方向の浸透流の影響

ケース4とケース5を比較すると、最短となる浸透経路長は同じであるが、ケース4では、最短経路が水平な方向に広がるのに対し、ケース5では、鉛直な方向に広がっている。これらのケースを比較すると、ケース5の方が、パイピング発生時の給水槽水位が大きくなっている(パイピング発生に至らなかった)。このことから、鉛直方向に加え、水平方向の浸透経路長を増加させることによりより効果的にパイピングを防止できることが予測される。

4.3.3 遮水工間隔の影響

複数の遮水工を設置する場合、その間隔によっ

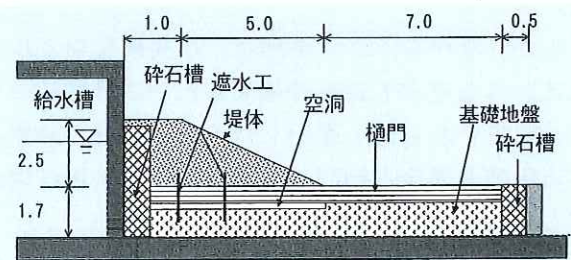


図-7 模型の概要 (単位:m)

表-5 実験ケース

ケース	遮水工長	遮水工間隔
6	なし	-
7	40cm(2枚)	120cm
8	40cm(2枚)	80cm
9	40cm(2枚)	40cm
10	80cm(3枚)	-

では、浸透流の十分な回り込みがなく、遮水効果を十分発揮できない場合があると考えられる。

そこで、遮水工間隔の影響について検討するため模型実験を行った。方法は2.と同様であるが、図-7に示すように遮水工間隔を確保するためにやや大きい模型を作製した。

のり尻における局所動水勾配の変化を図-8に示す。図に示すように給水槽水位が同じ場合、のり尻における局所動水勾配はケース7の値がケース10とほぼ同じとなることが確認された。これは、遮水工長さの3倍程度の間隔をとることにより、十分な回り込みがあり、遮水工における水頭低下効果が十分に発揮されたためと考えられる。

以上より、今回の実験では、浸透流の十分な回り込みを確保するために、遮水工間隔を遮水工長さの3倍程度とる必要があることが確認された。

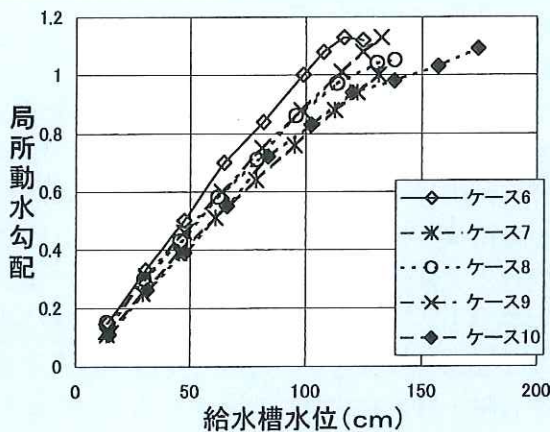


図-8 のり尻における局所動水勾配

5. まとめと今後の課題について

大型模型実験の結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 一般に樋門・樋管下に空洞があることにより、パイピングが発生しやすくなるが、今回の実験では、空洞がない場合と比較すると、平均動水勾配で2/3程度の大きさでパイピングが発生した。
- (2) 遮水工により、堤体内の圧力水頭が低下することから、空洞が発生した場合でも浸透に対する安定性は保持できる。
- (3) 今回の実験では、遮水工が複数ある場合、遮水工間隔が3倍程度であれば、浸透流の十分な回り込みにより、パイピング防止効果が高まる。今後は、三次元浸透流解析等を用いて、樋門・樋管構造物周辺の浸透に対する安定性を定量的に把握するとともに、押え盛土工法などパイピング対策について検討を進めてゆきたい。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所土質研究室：堤防基礎地盤のパイピング破壊に関する模型実験，土木研究所資料第3399号，p91，1996.1
- 2) 例えば石原研而：土質力学，丸善，p79，1988.9

古本一司*



独立行政法人土木研究所
材料地盤研究グループ
土質チーム研究員
Kazushi FURUMOTO

三木博史**



同 材料地盤研究グループ長，工博
Dr.Hiroshi MIKI

恒岡伸幸***



同 土質チーム上席研究員
Nobuyuki TSUNEOKA

小畑敏子****



同 土質チーム研究員
Toshiko OBATA