

5. 評価精度向上のための提案

5. 1 精度向上のためのアプローチ

堤防の浸透破壊に対する信頼性評価の精度向上のためのアプローチには様々な観点があると考えられるが、大きく分けると①解析手法の高度化・最適化による精度向上と②解析を行うために用いる土質定数の適切な設定による精度向上があると考えられる。前者については、浸透流解析を行った後、円弧すべり安定解析及び局所動水勾配の算出という2つのステップからなっているので、その両方から検討する必要がある。後者については水位や降雨の与え方から、土質定数、土質区分図の設定手法等がある。さらに、前述の①、②によらず土質材料の不均一性や破壊現象の不確実性に対して確定論的に解析するのではなく、確率論的にアプローチする手法が存在する。以下では、3つの観点からのアプローチについて論じる。

5. 2 解析手法の高度化・最適化

現在、浸透破壊に関する解析においては、浸透流解析を行った後、円弧すべり安定解析を行って、円弧すべりに対する安全率を算出するとともに局所動水勾配を算出し、安全率と局所動水勾配の両指標により安全性を評価している。安全率と局所動水勾配の両指標で適正に評価できるようにするためには、浸透流解析が適正に行われているという前提が必要である。

浸透流解析の適正性について、本検討で気づいた点としては、堤防法面の雨水の浸透能を適切に評価しているかという点であった。雨水の浸透能は堤防法面の被覆状況によって大きく異なるが、法面の勾配によっても大きくことなることが想定される。特に法面の小段部分は雨水がたまりやすく、堤体内へ雨水が浸透しやすくなるものと考えられる。図-5.1、5.2に江戸川左岸 24.5k~24.5k+200 の被災事例を示す。ピーク時の河道水位が低いことから被災の原因は河川水ではなく降雨であり、小段下ののり尻が滑っていることから、小段部分から雨水が浸透して小段部分下の飽和度が高くなり破壊に至ったものと考えられる。

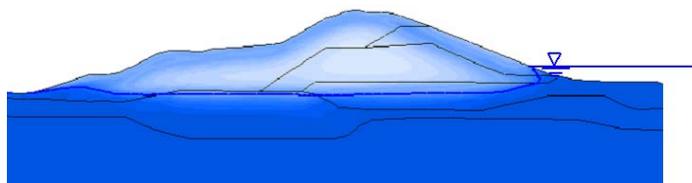


図-5.1 浸透流解析結果（江戸川 No. 6）



図-5.2 被災状況（江戸川 No. 6）

円弧すべり安定解析の高度化については、進行性破壊解析の導入が考えられる。通常の円弧すべり安定解析においては、小規模な円弧すべりは破堤に至ることはないとして無視し、ある程度大きな（例えば法面の長さの2分の1の長さを越えるもの）ものみを対象にすることがある（図-5.3）。しかしながら、小規模な滑りが拡大して大規模な破壊に至ることも考えられ、小規模すべりが発生した後、その後規模が拡大するか破壊現象が止まるかを検討する必要がある（図-5.4）。

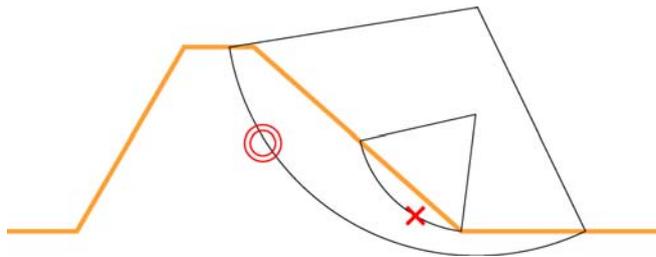


図-5.3 円弧すべりの規模に関する検討対象

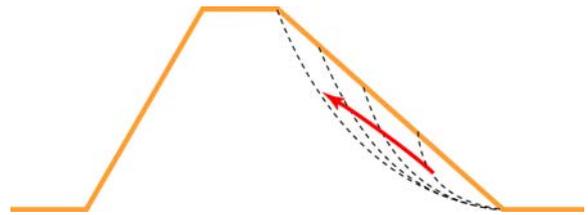


図-5.4 円弧すべりの拡大

パイピング破壊については現在の基準では一律局所動水勾配 $i=0.5$ の基準値を用いている。パイピング破壊については、浸透流による掃流力と土粒子の抵抗力の釣り合いで安全性が判断できると考えるならば、局所動水勾配の値を土質粒子の粒径等に応じて変更することや、土粒子の粒径や浸透流速からパイピングに対する安全性を判断する手法の導入も考えられる。また、パイピング破壊についても、土層の流動性や進行性破壊を考慮することにより精度の向上を図れる可能性がある。

パイピングと円弧すべりの複合現象（パイピングが発生してから法面すべりが発生する、あるいはその逆）も実現象として発生している。例えば、パイピングにより法尻部分の堤防断面が欠損し、安定を失い、法滑りを起こすこと（図-5.5）や、法滑りにより堤防断面が欠損し堤防断面が薄くなった結果、浸透経路長が短くなり動水勾配が高くなり、大規模な破壊（破堤等）に至る現象（図-5.6）が考えられる。浸透破壊により破堤に至るか至らないかを評価するためにはこのような解析が必要になってくると思われる。

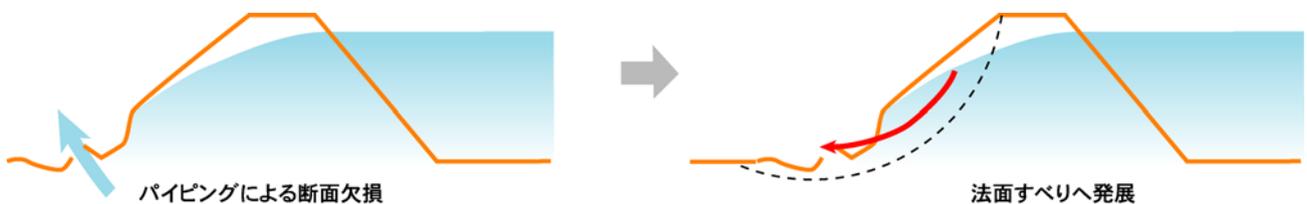


図-5.5 パイピング破壊が法面すべりに発展する事例



図-5.6 法面すべりがパイピング破壊に発展する事例

5. 3 材料定数等設定の最適化

解析手法を改善しても、与える材料定数等を適正にしなければ安全性評価のための指標の信頼性は向上しないものと考えられる。堤体材料及び基礎地盤の土層の材料は堤防の縦断方向にも横断方向に

も不均一性を有する。図-5.7、5.8は千曲川右岸 57.2k の堤防開削断面であるが、開削箇所の上流断面で土層構造がまったく異なっていることがわかる。

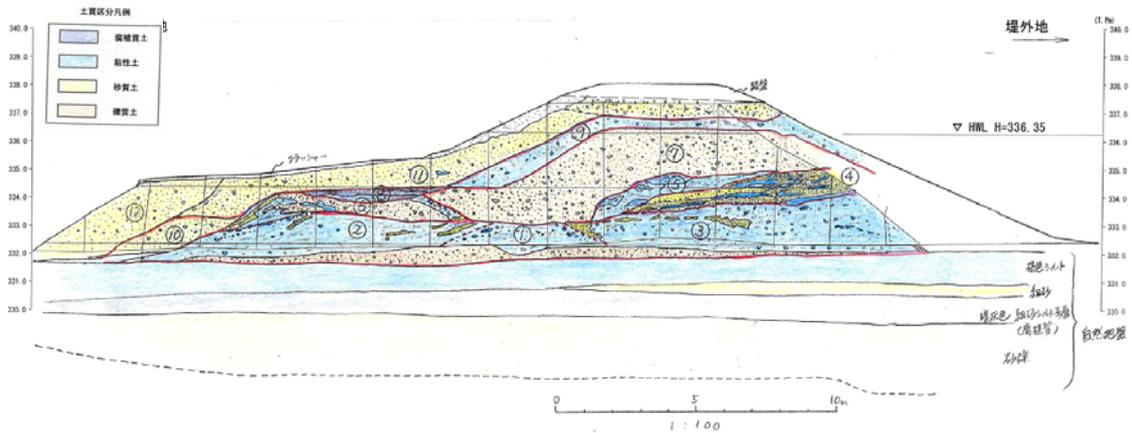


図-5.7 堤防開削断面スケッチ（千曲川左岸 57.2k 上流側）

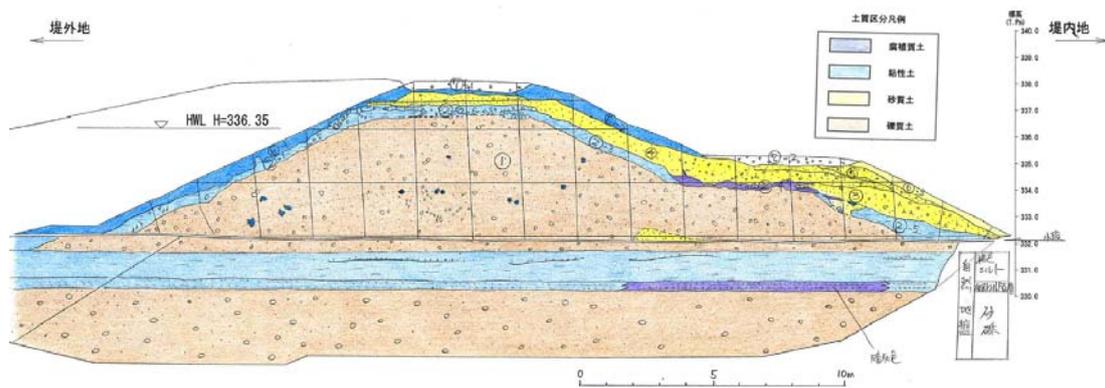


図-5.8 堤防開削断面スケッチ（千曲川左岸 57.2k 下流側）

また、米代川左岸 7.8k (No. 23) の被災事例では被災断面においてサンプリングした材料試験値と同一細分区間の詳細点検照査断面 (左岸 7.0k) とでは基礎地盤の土質が異なっているほか (図-5.9、5.10)、堤体材料の透水係数が 1 オーダー異なっている (被災断面は $2.0 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ に対して、詳細点検断面は $4.4 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$)。堤防の浸透破壊に対する安全性の精度向上には、適切な土質定数等の設定手法の開発が必要である。

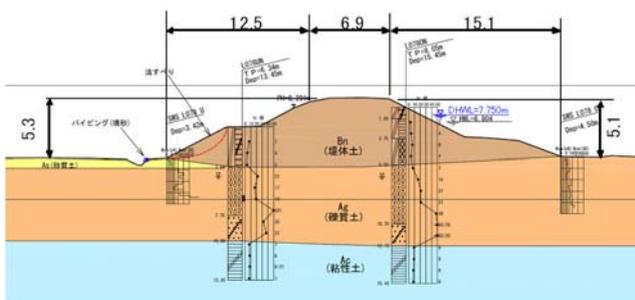


図-5.9 被災断面（米代川左岸 7.8k）

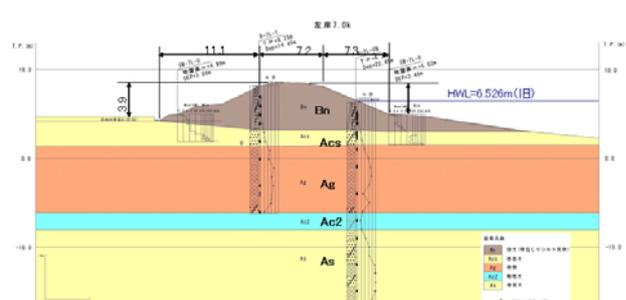


図-5.10 詳細点検断面（米代川左岸 7.0k）

実際の堤防では土層の自重による締め固め作用により土層のせん断強度が土被り深さに応じて増していると考えられる。垂直方向のみならず水平方向に関しても、堤防断面の天端中央から法尻に向かって土層の強度が低下していると考えられる。実際の法面すべり現象においては法尻付近や基礎地盤の浅層部分が滑ることが多いことから、強度が弱くなると考えられるこの部分の強度を適切に評価する必要がある。図-5.11の様に基礎地盤の水平方向及び鉛直方向の強度分布を仮定して円弧すべりに対する安全率を計算したケースは強度分布を考慮しなかったケースより安全率が大幅に低くなることわかる(図-5.12)。このことは、土質調査においてのり尻部分や基礎地盤の浅層部分の適正に評価することが重要であることを示している。

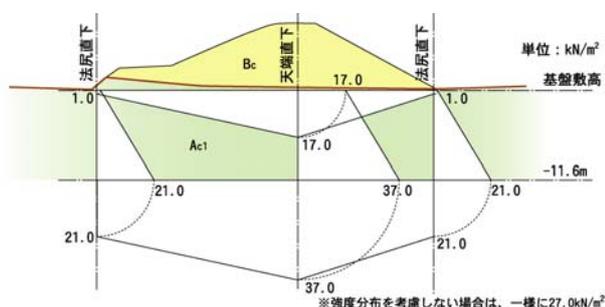


図-5.11 強度分布の設定

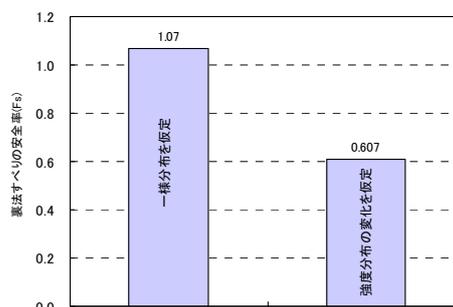


図-5.12 強度分布の変化の影響

5. 4 確率論的アプローチ

ばらつきをもつ材料から構成される構造物の破壊現象は再現性に乏しい(同じように外力を与えても、同じように破壊するとは限らない)確率事象であるため、確率論的あるいは統計的にアプローチする方法が考えられる。また、確率論的にアプローチする方法にも破壊現象を力学的に再現する物理モデルを用いる方法と破壊メカニズムは考慮せず土質条件や河道水位・降雨等の入力と出力(破壊が起こるか起こらないか)を統計的に結びつける非物理モデルがある。物理モデルとしては、土層の強度等のばらつきや弱点を乱数で与えるモンテカルロ法があり、非物理モデルとしては入力パラメータと出力を関連づける多変量解析等が考えられる。物理モデルでは材料等の不均一性をどのように表現し設定するか、非物理モデルではどのような説明変数を選定し、どのような関数を設定するかを検討する必要がある、これらの項目の設定により得られる解が異なってくるので、実現象と合致するように試行錯誤して設定する必要がある。