

## II. 堰・堤体安全性評価班報告

### II-1 堰安全評価(水理学、河川工学的観点からの評価)

#### 1. 担当領域

現堰が計画規模の洪水を安全に流下させることができるかどうかは極めて大きな問題である。本班では、堰の安全性の検討に関して、検討課題を整理するとともに最新技術によるその安全性予測の可能性を判断する際に注目すべき課題を整理し、その結果を報告する。

#### 2. 注目すべき現象と問題点

堰の安全性を検討するためには、出水時の流況や土砂輸送、およびこれらが堰本体および堤防、河床、河岸に与える影響を予測する必要がある。特に近年の気候変動に伴う異常出水に対しても堰本体が安全かどうか検討する必要がある。至近の例では平成16年にピーク流量が約16,000m<sup>3</sup>/sを超える出水が記録されており、この時観測・調査データも活用した検討が望まれる。出水時の流れや土砂輸送、河床変動の予測は一般的に模型実験や数値シミュレーションにより行うが、技術革新の著しい数値シミュレーションが洪水時の流れや土砂輸送の有力な予測手法と考えられる。以下に具体的に注目すべき点を以下に挙げる。

##### (1) 堰上げ

斜め固定堰による水位への影響(水位上昇の大きさと範囲)を把握することが必要である。

##### (2) 局所流

斜め堰の存在によって発生する迂回流、流れの集中・偏倚、跳水や段落ち流の状況などの局所的な流れに注目する必要がある。さらに、これらの局所流による堰体やコンクリートブロックの「めくれ」、「吸出し」にも着目する必要がある。これらの検討には鉛直2次元による圧力(変動)の解析が必要である。局所流の検討は、大流量時には左岸側の迂回流が顕著になり、中小流量時には斜め跳水や落ち込み流が卓越すると考えられるので、幅広い流量に対する検討が必要である。

##### (3) 透過流

透過流が存在する場合の流体力(揚力・抗力)と覆工のめくれ上がりや砂礫の吸出しの影響を検討する必要がある。

##### (4) 土砂輸送

上記の局所流による局所洗掘・側岸侵食・河床変動を把握する必要がある。この場合、堰を通

過する土砂量の把握が重要である。これらの土砂に関連した検討を行う場合は、堰の越流水深と堰下流の水深との関係から必ずしも大流量（既往最大流量や計画流量）時が最も危険な状態になるとは限らないので、幅広い流量範囲とその継続時間を考慮した検討が必要である。

また、上流域のダム等による土砂の捕捉を含めた長期的な土砂供給量の減少の影響についても検討が必要である。

#### （５）深掘れが堰の安全性に与える影響

斜め堰下流右岸において深掘れが顕著に発生することがこれまでに実施された模型実験や現地調査により確認されており、この進展は堰および下流堤防の破壊につながる可能性があり、その影響を検討する必要がある。

### 3. 検討すべき技術課題

#### （１）数値シミュレーションでの検討課題

##### 適切な計算条件の設定

計算条件は計算結果を大きく左右する最も重要な要素であるにもかかわらず、不確定な要素も多く含まれるため、十分な配慮が必要である。

##### i) 流量

数値シミュレーションは対象とする河川の計画高水流量に対して行われることが多いが、これは、水位に関しては大流量ほど危険となるためである。しかし、洗掘や侵食に対しては必ずしも大流量ほど危険とは限らない。本件のように堰（段落ち）を有する流れにおいては、流量規模や下流の水位条件によって、「段落ち」や「もぐり」など局所的に異なる流れの状況が現れることも想定される。このため、幅広い流量規模での検討が必要である。

##### ii) 粗度

河床や河岸の粗度の与え方によって計算結果は大きく異なる。このため、明確な根拠に基づいて与えることが必要である。本件の場合、堰本体、下流のコンクリートブロック敷設範囲、その他の河床部分などについて個々に粗度の検討が必要である。また堰上流右岸部分には樹木帯が存在するため、樹木の抵抗も考慮する必要がある。

##### iii) 境界条件

下流端水位の条件は潮位（干満）や台風による高潮の影響も考慮して決定すべきである。また、土砂輸送を伴う流れの計算を行う場合には上流端からの供給土砂量も適切に決定する必要がある。また、堰を越える掃流砂量の有無あるいはその量の把握も必要である。

#### iv) 地形・河床材料

地形データの与え方(地形測量の密度)や流砂を伴う計算における河床材料の与え方も計算結果を大きく左右する。出来るだけ堰の形状の影響を抽出出来るよう密な測量に基づいて与えることが必要である。

#### v) 対象区間

人為的に与えた境界条件が流れに与える影響が十分に小さくなるように計算区間を設定することが必要である。

#### vi) 計算メッシュ

計算に使用するメッシュの配置や密度は計算結果に大きな影響を及ぼす。堰周辺で発生する複雑な現象を解析するためには十分な空間解像度を有するメッシュを使用することが必要である。

#### vii) 自由水面の計算法

内部(水面下)の流れの計算と自由水面の位置の計算法の整合が取れた計算法を採用する必要がある。

##### 数値シミュレーション手法(モデル)の選択

現在、様々な計算手法が提案されているが、それぞれの長短所・適用限界を整理した上で計算手法を選択することが必要である。

#### i) 基礎式

流れの計算の次元数(1次元、2次元、3次元)、流砂の考慮の有無(掃流砂、浮遊砂)、流砂の非平衡性の考慮の有無、現象の非定常性(流量の非定常性、局所的な流れの非定常性)など、着目する現象に応じた基礎式の選択が必要である。特に自由水面の計算法(取り扱い方)に注意を要する。

#### ii) 計算スキーム(離散化手法)

数値シミュレーションにおいて基礎式を忠実に解くためには、計算スキームの選択が計算精度に大きな影響を与える。本件のように局所的に急変部を含む計算においては従来の風上差分ではなく、近年提案されている高精度スキームの使用が不可欠である。具体的に各種のスキームの長短所を明確にした上で計算スキームを採用すべきである。

### (2) 模型実験での検討課題

水理現象を予測するためのもうひとつの有力な手段として、模型実験が挙げられる。ただし、実験の方法や条件、計測方法、さらには、実験そのものの妥当性などに関する十分な配慮が必要である。特に、移動床(河床材料の移動を伴う実験)においては、実際の河川と模型の間での河

床変動量の対比をつけるのは必ずしも容易ではないので注意が必要である。具体的には現地と模型での河床形態（小規模、中規模）や流送土砂の形態が相似となるように配慮して実験の水理条件や実験に使用する河床材料を選択する必要がある。

なお、模型実験で配慮すべき事項は、上記の数値シミュレーションにおける適切な条件の設定に関するもの[(i)～vii)]と同様である。

## II-2 堰安全評価(地盤工学的観点からの評価)

### 1. はじめに

第十堰は河床から 4m 程度の高さで構築されている固定堰である。この堰は低い堰で、一見すると安定しているように判断されるが、本体の構造上の問題や、堰の下流の河床が局所洗掘される等の河川構造物としての形状上の問題が生じており、ここでは、堰周辺の地質調査結果や、河床の洗掘状況から堰本体の安定性の評価法に関して検討する。

### 2. 第十堰周辺の基礎地盤

吉野川の第十堰周辺の堤防基礎のボーリング調査より、第十堰の基礎は約 20m 近くまで沖積の砂礫層である。このような場所に堰を建設する際には、この沖積の砂礫層の止水が大きな課題になる。

堰を設けることにより、上流と下流に表面水に水位差が生じる。もし、堰の直下の沖積層のような比較的透水性の良い層をグラウトが止水壁によって十分に止水をしていない場合には、堰の上流と下流の水位差により、水は地下に浸透して、新しい流れが生じ、その流線に沿って侵食し、止水がなければボイリングやパイピング現象が生じる。特に堰が難透水性の構造物で構築されていると、堰と地盤の境界にルーフィングという「水みち」が生じて、その浸透によって堰直下下流端の土砂が徐々に流亡し、堰本体と基礎地盤の間に大きな水みちが生じる。これが現在の第十堰の現状である。堰の基礎が岩盤であればこのような水みちは生じないが、現在の第十堰は基礎の止水もあまり十分になされていない地盤の上に堰を施工しているため、透過構造の堰になっている。石積みであるため透過構造であるが、本来、堰の基礎に水みちができないような十分な根固めをした基礎の上に堰を構築すべきであったと考えられる。

現在の第十堰は砂利で堰を造り、その表面を石で被覆している。現在では、その石の代わりに堰本体の砂利が侵食されないように厚さ約 1m 近いコンクリートで被覆されている構造である。

このような構造では、堰の下を水が浸透し、コンクリートや石の難透水層と砂利の間に水みちが生じ、その空洞が経年的に大きくなって、河川流による基礎地盤の侵食が一層大きくなる。

このような現状に対しての対策として、堰の基礎を止水できる構造に改修し、その止水壁の上に堰を連結する構造にする必要がある。このように考えると、現状の問題を改修する対策は現在の堰本体を取り除いて新しい堰を構築することと同じことになる。

### 3. 堰本体の安定性について

第十堰では、洪水毎に堰の下流の局部洗掘が進行し、堰の基礎の土砂が吹出しや侵食によって流亡をしている。このような小さなダメージが繰り返されることによって、堰全体の崩壊がいつの日か来ることが予測できる。

第十堰の全体的な崩壊を防ぐためにどのような補修をする必要があるかを検討すると、まず、堰下流の右岸の局部的な洗掘箇所を砂利等によって埋め戻し、その局部的な洗掘を再び生じさせないような根固め工が必要である。もし、この対策をしないなら、第十堰のこの部分の崩壊が生じ、一部が崩壊すると、この崩壊箇所に流れが集中して、一層洗掘が進んで、最終的に堰全体の崩壊になる。また、堰下流の右岸の洗掘により、右岸の kp14.2～kp14.6 の堤防の基礎の洗掘が進み、この区間の堤防が基礎の洗掘崩壊を起こす危険がある。

第十堰本体に対しては、下流端の基礎部の砂利が吹出しや侵食によって下流に流亡してしまうため、下流端の堰本体がオーバハング状態になって崩壊している。これは何回となく起こり、このような崩壊は徐々に堰の上流に進行し、堰本体の崩壊へと進展していく可能性がある。このような進行性の崩壊を防ぐためには、堰の下流の広い範囲にわたって根固めや護床を行って、堰の下流端の基礎の浸透(流れ)による侵食を防止する必要がある。

現在も、右岸の局所的な洗掘対策を実施しているが、その対策は抜本的な対策になっておらず、対策後、その基礎の砂利が再び流亡してしまっていて、深掘りが再度生じるような状況である。これは河道に対する堰本体の形状や構造上の問題であるように考えられる。このような状況に対しては、堰下流に局部的な洗掘が生じない根本的な対策が必要である。

### 4. 堰本体の調査法・解析手法に関する注意点

第十堰は最初の建設(1752年)から250年を経ており、木杭の間に石基礎を構築しその上をコンクリートブロックなどで覆ってできた複雑な構造物と見られる。また、直下の基礎地盤は礫質や砂質地盤であるが、下部には沖積の粘土層があり、地盤としては砂粘土の互層地盤と見られる。このように見ると、堰本体は石とコンクリートで構成される上部と、下部の砂礫地盤の一部から構成されていると考えることができる。このような構造物が1800mにわたり河川を横断している、また、上堰と下堰から構成されるもので2段式斜め堰と呼ばれている。このような堰に対する外力として、以下洪水と地震の2つを考えてみる。

どの外力に対しても、まず、堰の構造深さと広がり把握することが重要である。その次に堰の下部の地盤構成を調べる必要がある。構造調査には、ボーリングによりコアを採取する方法と非破壊の物理探査法がある。ボーリングについてはある程度の量は可能であるが連続性と広がり  
の点で限界があるが、最小限必要である。次に、非破壊検査であるが、まずパルス式地中レーダ探査が考えられる。この方法は空洞調査に用いられる方法で2-4mくらいまではかなり正確な測定が可能である。一方、堰は5-6mの高さであるため、それより下部の地盤まで調査するには、深度10-15mまで調査可能は連続波レーダ探査が有効である。第十堰はかなり幅も広いので、連続波レーダ法のワイドアングル法も適用可能と考えられる。

最近、電磁波速度を測るこの方法により、土質区分も可能となっている。経年により、石の沈みこみや沈下があると考えられ、堰の下部はかなり複雑で不規則な形状になっていることが推量される。境界条件が定めれば、次に解析に進むことになるが、このような問題の解析の難しさは、水の流れ、堰構造物と地盤の変形、浸透という異なる物理問題を解くことにあり、典型的なマルチフィジックス問題である。解析には、まず堰の形状を特定し、水の流れを解き、その流れ解析から得られる水圧などを境界条件として、堰と下部地盤の浸透、変形を解析する方法が現在の時点では可能かつもっとも進んだ方法である。解析のための材料定数などの決定は、下部では石、コンクリートブロックなどと地盤が混じり合っておりかなり難しいが、観測結果から逆に決める方法も可能であろう。

最後に、液状化に対する安全性照査であるが、堰構造物と地盤の相互作用と浸透を同時に解くことのできる有効応力に基づく解析法が必要である。堤防の解析のところでも述べたように、浸透と変形を別々に評価する慣用の安全性照査法には、限界があり、すべり破壊などの崩壊時点のみでなく、崩壊の前兆を見出せる安全性照査法が必須である。さらに、洪水で基礎地盤に流れがある場合の液状化の解析が、堰の場合重要であり浸透との連成の可能な解析法が望まれる。

## 5. まとめ

吉野川第十堰は岩盤の基礎の上に構築された河川構造物ではなく、沖積砂礫層の地盤の上に砂利で堰をし、その表面の砂利が侵食しないように昔は石積みで、現在はコンクリートで被覆した構造になっている。

このような構造に対して、水の流れあるいは基礎の中を水が浸透する水の浸透力、その水圧等で、堰の基礎は下流から徐々に崩壊しており、また、河川水の流れによって堰直下の右流が局部的に深掘り現象が生じており、この現象は洪水の規模が大きくなればなるほど拡大していくものと考えられる。これは現在の豪雨の降り方を考えると、一日でも早く抜本的な対策によってこの

局所的な深掘りに対して対策をたてる必要がある。これは第十堰本体だけではなく、その下流の右岸の堤防の破堤にも関係する対策である。

また、堰本体は経年的に徐々に下流端より基礎の砂利の侵食等による流亡によって崩壊している。このような進行性の崩壊に対しても、一日も早く根本的な対策が望まれる。

## II-3 河川堤防の安全性評価

### 1. はじめに

河川堤防の調査法・解析においては、詳細な境界条件や解析が必要であるが、以下述べるように、堤体安定性評価に関してできるだけ最近の地盤力学、探査技術や計算力学の成果を取り入れることが必要であると考えられる。詳細な解析法による照査は、古典的な安定解析法の結果を再評価することにも役立つ。また、今後、現在堤防安定照査で検討事項に上げられていない越流による堤防の変形破壊も検討する必要がある。

### 2. 調査法

堤体断面の調査に関しては、河川堤防の特質としての不均質性が問題である。この点、定量的安定性評価を高めるためには、実測評価が重要となるが、河川堤防では長大な延長が障害となるといわれている。河川堤防に対して、最近、弾性波探査、電磁探査や地中レーダ探査などの探査技術の適用が行われてきている。不均質性や改築履歴のある堤防の調査には、ボーリング調査と同時にこのような探査技術の適用が有効である。この場合、探査の結果を有効に解釈し、利用するため、コーン貫入試験などの原位置試験、ボーリング調査や3軸試験など室内力学試験による探査結果のキャリブレーションが必要である。

堤防調査法としては、堤防そのものに対する現位置調査や堤防材料を用いた室内試験の他に、堤防を含む広域の地下水分布や古地図を用いた水みちの検討など広域調査も大切である。

#### 2.1 現位置調査法

##### 1) 表面波弾性波探査

弾性表面波探査：比較的深部までの堤防内部・基礎地盤の土層構造を概略的に把握することが可能である。高密度のものは、堤防縦断測線上に等間隔で受振器を多数設置し、一定間隔で起振した振動波形を受信し、データを地点ごとの波形データ群に波形処理・編集し、鉛直方向のS波速度分布を求め、最終的に測線下の鉛直断面を逆解析し、地下構造を推測する。

水平方向の分解能は低いのでボーリング結果との併用が必要。インバージョンのための標準貫入試験、RI コーンなどから求めたN値分布など堤体や基礎地盤の調査に適している。S波を通

して地盤物性との関係が得られる。

## 2) レーダ探査

電磁波の反射イメージや速度から、地盤構造や物性を調べることができる。レーダ探査は、河川構造物周りでも可能であり、吉野川第十堰の下部構造の劣化探査に向いている。

・パルスレーダ探査：2-3m の比較的浅い地盤の調査に向いている。地中の導電率の異なる面や反射面をもとめ、断面を可視化する。空洞などの構造判別に適している。土の物性は無理がある。堤体内部や樋門周りの調査に適する。

・連続波レーダ探査：送信信号の周波数帯域幅を広く、かつ掃引時間を長くとることで、パルスレーダ探査より高分解能で地盤深部（10-15m）まで調査することが可能である。2通りの方法があり、プロファイル法で測線下の反射断面（時間断面）を得ることができる。次に、ワイドアングル法で地中の電磁波の伝播速度分布を求める。プロファイル法による反射断面の時間断面をワイドアングル法で求めた伝播速度を用いて深度断面に変換する。10m-15mくらいまでの比較的深い深度までの計測が可能。EM探査や表面波探査より高分解能力、空隙率が大きいと電磁速度は高速度になるため、空洞などの構造判別や透水性などの物性調査も可能である。探査例を図II-1に示す。解析例中の数字は電磁波速度( $\times 10^{-8}m/sec$ )あり、空隙率が大きいと速く、含水率が大きいと遅くなる。この例は、淀川水系の堤防で行った探査例であるが、結果はN値分布とよく適合しており、深さ15mくらいの比較的深い地盤深度まで探査が可能であることが示されている<sup>1)</sup>。

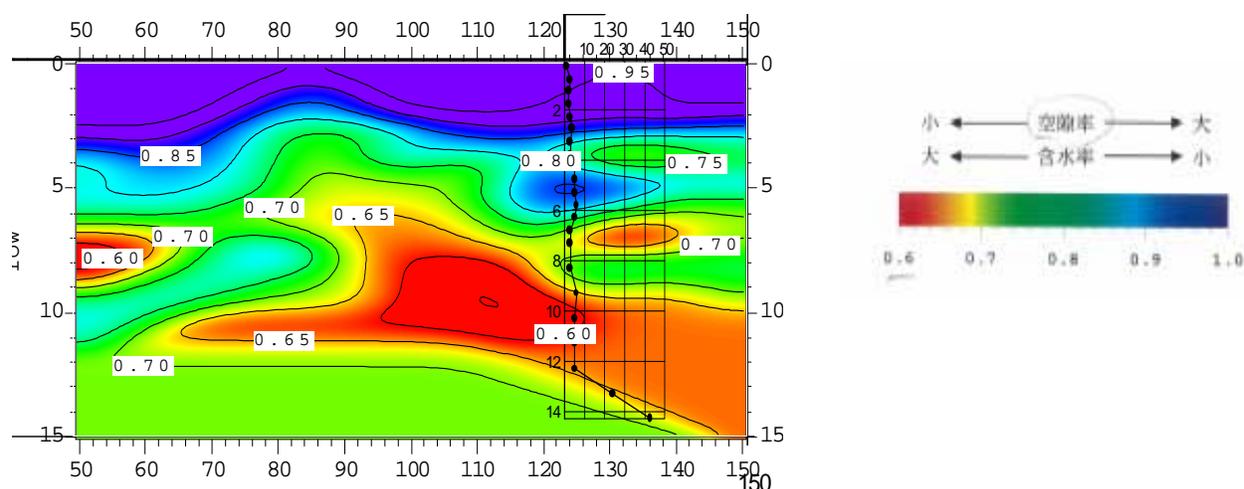


図 II-1 連続波レーダによる地盤の解析例

### 3) 電磁探査

電磁探査には周波数領域電磁法と時間領域電磁法があり、導電率や比抵抗を調べることができる。深度は 20m くらいの深いところまで、コイルの間隔によって変えることができる。探査能力として、含水率を調べることが容易で地盤の含水率判別に適している。

周波数領域の方法として、簡易電磁 EM 探査では、一定間隔の送・受信コイルを持って、測線上を数メートル間隔で静止測定することにより、二次磁場の同相および離相成分を計測し、両成分の関係から地中の導電率あるいは比抵抗値を算出する。浅部探査には送・受信コイル一体型の装置を用いるが、深部探査ではセパレート型を用い、コイル間隔を 2 種類で測定することにより異なる深度の導電率情報も観測できる。

時間領域の方法として、過般型送信ループを用いる方法がある。

4) 標準貫入試験 (N 値)、不飽和な堤体を泥水を使って掘削する場合、他のサウンディング試験で結果を確認する必要がある。

5) サンプリング：攪乱サンプルを用いて、コンシステンシー試験、粒度分析を行い、地盤種別を特定する。不攪乱試験は 3 軸試験などに用いる。

6) コーン貫入試験、RI コーン貫入試験は水分特性も把握できる。

7) スエーデン式サウンディング試験、礫が多い場合は、ラムサウンディング試験が適当である。

8) 現場透水試験

9) 孔内検層 PS 検層

#### 2.2 室内試験

強度と変形特性を求めるため、3 軸試験 ( $CU$ ,  $\overline{CU}$ ,  $CD$  試験) を行う。試料は、飽和試料および不飽和試料を用いる。試料は自然不攪乱試料が望ましい。次に、室内透水試験から透水係数、水分特性曲線を求める。

#### 2.3 堤防周辺の地盤調査

河川堤防の安定性の評価をするためには、河川堤防を含む流域を対象とした地下水位の分布や、その地域の伏流水系の挙動等を調査する必要がある。

洪水時に堤外地で生じる填砂現象は、隣接した河川からの直接の浸透も原因となっているが、図 11-2 のような旧河道の存在も影響していることがある。

このような流域の水理構造を調査する方法を整理すると、表 11-1 のようになる。この表において、古地図より旧河道の状況を推定し、現状の土地利用を考慮して、実際に地元での調査を行い、地下水利用状況や井戸の構造、分布の調査をする。

旧河道の位置の予測が可能となった所で、広域の地盤の物理探査を実施して旧河道の位置および幅等を確認する。物理探査はあくまで間接的な調査方法であるため、その探査結果の妥当性を確認するために、必要な所にボーリングし、地層構成の妥当性を確認する。対象地区の広域の地盤図がある場合には、その地盤図との整合性も確認する。広域地盤図がない場合には、自治体の道路建設や建築のためのボーリング調査結果も参考にする。

ボーリング調査では地質構成の把握とともに、そのボーリング孔を用いて、各層での原位置透水試験を実施して、それぞれの帯水層の浸透特性（透水係数）を求める。また、地下水検層も実施して、帯水層の中でどの深度が「みずみち」になっているかを探査する。

ボーリング孔を用いた原位置での単孔式透水試験からでは浸透特性として透水試験しか求められない。この透水試験だけでは洪水波形に対応した非定常の地下水の挙動の予測が不可能であるため、不圧帯水層では、ボーリングにより試料を採取して不飽和土の浸透特性である水分特性曲線と飽和度に依存した不飽和土の透水試験を求める必要がある。

また、被圧帯水層に対しては、揚水試験を実施して、帯水層の比貯留係数( $S_s$ )の値を測定する必要がある。しかし、河川堤防の安定評価のため広域の各帯水層の比貯留係数の値を測定することはきわめてまれである。したがって、このような現状の中でどのようにして比貯留係数の値を求めるかは今後の課題である。

ボーリング孔および既存の井戸を対象として、地下水位の観測網を構築する。ここでの注意は、各帯水層で地下水位（水圧）は異なるため、観測結果はどのような状況のデータかを十分に吟味して、地下水位、水圧の分布状況を評価する必要がある。

種々の要因により地下水位（水圧）は変動しており、その挙動を記録した結果より、先に述べた被圧帯水層の比貯留係数の値を求める方法も考えられる。

観測井内の地下水の水質調査により、対象としている帯水層と河川水との関係もある程度評価できる。

### 3. 解析手法

河川堤防の安定性の検討には、河川堤防の構造検討の手引きに示されているように、浸透破壊、浸食と地震に対する検討が検討項目としてあげられている。浸透に対する安定解析としては、浸透時の円弧すべり解析によるすべり破壊の検討とパイピングによる破壊が検討されている。このような堤防の安全性の照査では、現在は高水時の浸透解析と円弧すべりを仮定する安定解析法に基づいて別々に行われているが、これらの既往の解析法では、浸透と変形の連成や変形及び進行性破壊のメカニズムは考慮されない。このため、安全性と経済性の確保のためには、既存の堤防

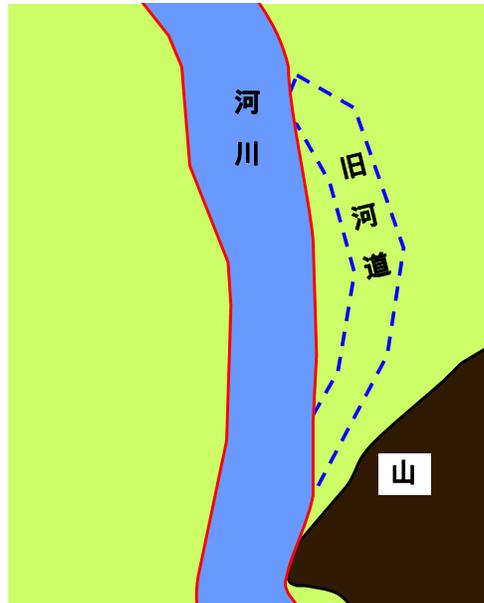


図 11-2 現河川と旧河道

表 11-1 流域の水理構造の調査法

(1) 古地図等文献調査
(2) 土地利用，現地調査
(3) 井戸の分布
(4) 物理探査
(5) 広域地盤図
(6) ボーリング調査
(7) ボーリング孔内検層
(8) 地下水検層
(9) 原位置透水試験
(10) 揚水試験
(11) 広域地下水位（水圧）調査（モニタリング）
(12) 地下水位の水質調査

の安全性照査法の高度化と見直しが必要であるとの考えから、近年、数値解析法に基づく浸透変形連成解析法が提案されてきている。吉野川の堤防においても、このような先進的な解析法を適用し、安定照査を行うことが望ましい。

### 3.1 浸透変形連成解析

最近、不飽和浸透 - 変形連成解析手法が提案されている<sup>2)</sup>。従来の安全性評価手法は、浸透解析による局所動水勾配による浸透破壊の予測と、円弧すべり解析による滑り破壊の検討を別個

に行うものであり、洪水時に起こりうる堤防の破壊形態を必ずしも正確に模擬したものとはなっていない。最近の不飽和浸透 - 変形連成解析手法では、多相系材料の変形解析法、具体的には、2相混合体理論に基づいて、不飽和浸透 - 変形連成解析手法を定式化し、不飽和浸透時に起こりうる土骨格の変形問題の解析を行う。 間隙空気の運動までは考慮する3相系解析法と、空気圧をゼロと仮定する簡易な2相系の解析法がある。不飽和浸透特性については、水分特性曲線を与えることにより、サクションと土中の水分量との関係を考慮する。この手法を用いることにより、堤防盛土の透水性、および堤防下に存在する基礎地盤の透水性、堤防断面内への不透水層の設置や堤防法面への遮水シートの設置等の各種堤防強化工法の効果についても評価することが可能である。堤防の安全性の評価にあたっては、従来の限界水平動水勾配=0.5で評価してきたパイピング破壊の再考や堤防法面の変形に着目し、局所破壊と判断されるひずみや発生するまでの時間を用いることにより、進行性の変形破壊を考慮することができる。さらに、越水時にもこの方法は用いることができるが、その際、単に越流水深一定の境界条件を用いることなく、水の流れを精度よく予測しておくことが必要である<sup>3)</sup>。

### 3.3 液状化解析

地震時液状化が懸念される場合の河川堤防の安全性については、円弧すべり解析や簡易液状化予測法のみではなく、スーパー堤防の設計で用いられている有限要素法による有効応力を考慮した液状化動的解析法、ただし、透水を考慮できる動的解析法<sup>4)</sup>の適用が有効であろう。また、最近洪水時における地震の発生も懸念されていることから、先に述べた浸透 - 変形連成解析法と有効応力液状化解析法を連続して用いることも重要である。特に吉野川下流は沖積低地にあり、兵庫県南部地震によって下流部で液状化が発生したように、今後も液状化の影響を考慮する必要がある。

## 4. 河川堤防等の調査に関する注意事項

河川堤防の安定性を評価するためには、その堤体の内部構造を正確に把握する必要がある。従来はこのような堤体の内部構造を把握するために、堤体に直接ボーリングをしてその内部の構造を評価するのが主流であったが、ボーリングのデータはあくまで点か線のデータであり、全体の構造の把握は困難である。このような現状に対して、近年、物理探査による地盤や土構造物内の構造の評価手法の新しい技術が開発されて来ている。ただ、物理探査はあくまで間接的な調査で必ずボーリング試験により、その構造を確認する必要がある。

堤防の調査法を表 11-2 にまとめた。まず、堤防の過去の改修や構築された年代等についての参考資料があればそれを調査する。当然、過去の破堤の歴史についても調査をする。堤体の中で

どの部分が危険であるかを評価することはきわめて困難であるが、堤体の外形や河川形状よりある程度、詳細調査が必要な場所は特定できる。また、物理探査を実施する事によって堤体の内部構造が把握され、ボーリング調査によって、その層からのサンプリングにより、対象層の浸透特性も明確になる。ただ、現行のボーリング技術では、堤防の安全性で最も大切な砂質層、礫質土層のサンプリングがきわめて困難である。凍結サンプリングに替わるもう少し簡単な手法であまり乱さない砂礫層のサンプリング技術の確立が急務になって来ている。

不飽和領域の砂質土層のサンプリングでは気泡ボーリングが有力であり、孔径を大きくとると、内部の飽和度もあまり変化させないで試料のサンプリングが可能である。

ボーリング孔を用いての原位置での透水試験が実施されるが、河川堤防のような飽和度の状態での E-19 法的な原位置透水試験法により、本当に見掛け飽和状態の透水係数が求められているかどうかについてはまだまだ議論の余地がある。E-19 法はロックフィルダムのコア材の品質管理のための透水試験で、あくまで比較的飽和に近い状態に締め固めた場を対象とした試験である。また、それより求められる透水係数の妥当性に関してもサンプリングした試料による試験や数値解析手法によって確認されている。

したがって、今後の課題として、砂層や砂礫層を対象とした不飽和土の浸透特性を、ボーリング孔を用いた試験によって計測する手法の確立が大きな課題となる。サンプリングした砂層か礫層の試料に関しての室内における不飽和状態での pF 試験法についてはある程度確立されているが、不飽和状態での透水試験は透水試験法に対してはまだまだ複雑な試験法が必要であるため、もっと簡略化した簡単な試験法が必要である。

堤体の洪水時の飽和度の変化とその浸透水圧によって堤防は破壊を生じる。これに対しての数値解析的な評価手法に関しての研究も先に記述しているので、その内容に関してもここでは割愛するが、そのモデルの妥当性の評価のために、堤体内の降雨時の飽和度のモニタリングや間隙水圧のモニタリング結果が必要である。堤体が不飽和であれば降雨浸透や洪水の水の浸透によって堤体内の空気圧も変化するため、間隙空気圧の計測もきわめて大切である。一般に負の間隙水圧の計測にはテンションメータが用いられるため、長期の負の間隙水圧の計測はきわめて困難である。そのため、ADR、TDR、FDR 法等の誘電率を計測して飽和度を求める手法が主流になって来ている。このような不飽和領域の飽和度は、降雨によって増加し、表面からの蒸発散によって減少する。したがって、常時の堤体内の飽和度の計測より、どの程度の降雨が浸透し、どの程度の水分が蒸発散するのかを予測し、豪雨時の洪水、豪雨による堤体内の経時的な水分予測のため「初期の内部状態」の予測が必要である。

この「初期の内部状態」の予測は、従来は先行降雨量によって斜面の危険度を予測していたような手法に対抗するもので、より正確に堤防の危険度を時間項も入れて評価しようとするものである。

堤体の底部の地下水面下の水圧のモニタリングデータは、河川水位との連動性が河床の状況を予測するために必要である。

## 5. 堤体安定性評価における課題

河川堤防の被災形態別分類によると、越水による破堤が全体の70%を占めている。したがって越水しない堤防、越水しても破堤しない堤防にする必要がある。しかしながら、実際に破堤した堤防を調査すると、浸透により堤内地で局部的な表面崩壊が生じ、その後越水すると、表面崩壊の場所が簡単に表面洗掘されて堤防が破堤するようなシナリオが考えられる。

多くの堤防の表面は植生によって保護されており、越水してもそれほど洗掘が生じていないが、堤体の内部より崩壊すると、植生の保護層に欠陥が生じ、越流によって容易に堤防が破堤するため、堤体内の浸透による局部的な崩壊を防止する事はきわめて大切であることがわかる。

今後は堤防に関する調査手法を一層確実なものとして、図 11-3 に示すような浸透に関する安定性評価手順や、さらに進んで 3.1 で述べた浸透 変形連成解析を行って安定性を照査するとともにモニタリングも含めた総合的な河川堤防の安全性評価手法の確立が必要である。

表 11-2 堤防の水理構造の調査法

- |                       |
|-----------------------|
| (1) 文献調査              |
| (2) 物理探査              |
| (3) ボーリング調査           |
| (4) 原位置透水試験           |
| (5) 室内透水試験            |
| (6) 室内における不飽和土の透水試験   |
| (7) 室内における不飽和土の水分特性試験 |
| (8) 堤体内の飽和土の分布調査      |
| (9) 堤体内の飽和土のモニタリング    |
| (10) 堤体底部の水圧のモニタリング   |
| (11) 堤体内の空気圧のモニタリング   |
| (12) 堤体内の間隙水圧のモニタリング  |

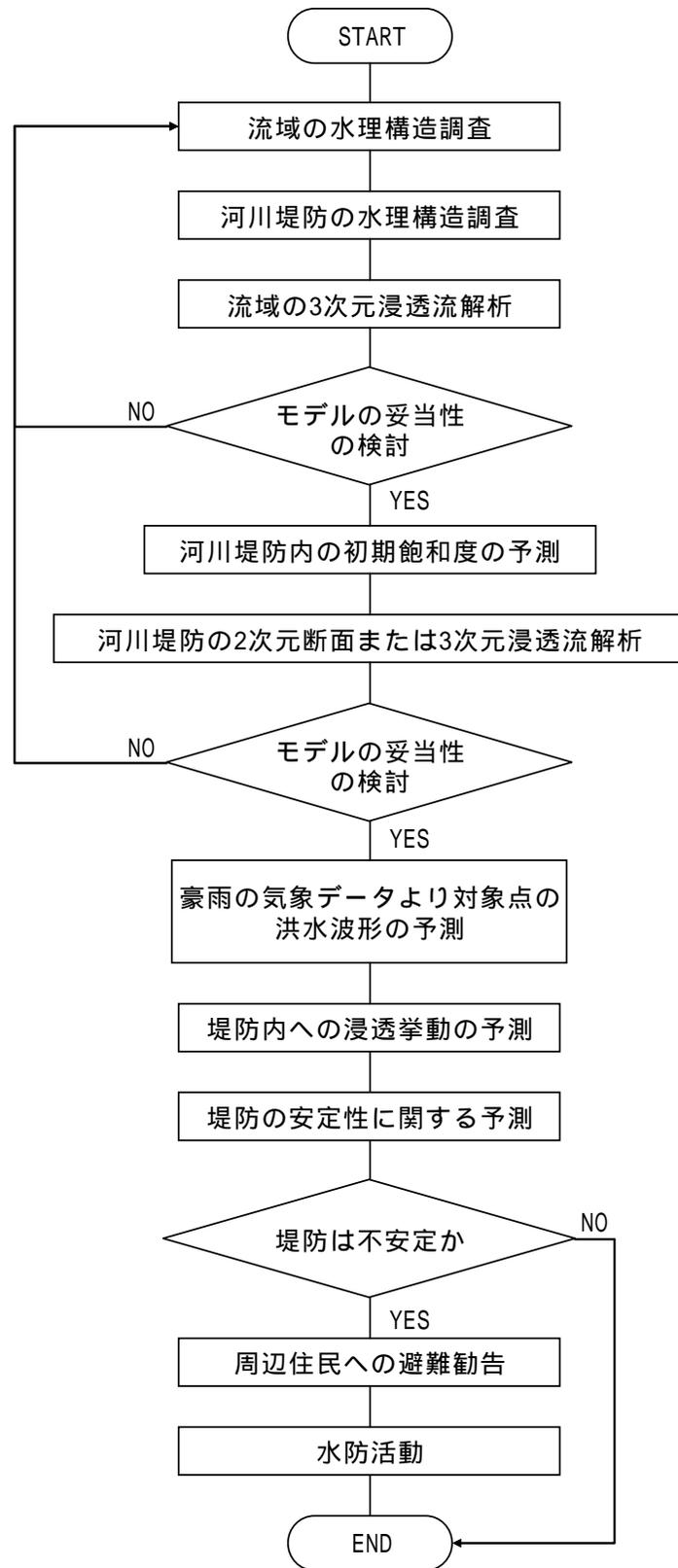


図 11-3 河川堤防の浸透に関する安定性評価手順

## 参考文献

- 1) 小高、岡、木元、芝田、服部、北川、山田、基礎工、pp.35-37, 2006
- 2) 岡 二三生、小高 猛司、木元小百合、加藤 亮輔、水-土連成数値解析法による洪水・地震時の土構造物 の変形・破壊予測、第 55 回理論応用力学講演会講演論文集、pp. 15-18、2006
- 3) 高田ら、堤防盛土の空気-水-土-多相浸透-変形連成解析、第 41 回地盤工学研究発表会平成 16 年度発表講演集、鹿児島、2006、7、No. 623、2006
- 4) リバーフロント整備センター高規格堤防盛土設計・施工マニュアル