

堤体・基礎地盤統合型データベースの構築と災害脆弱性評価への適用

京都大学大学院工学研究科 教授 三村 衛

1. はじめに

近年、台風や前線活動の活発化による豪雨の頻度が増大するとともに、線状降水帯の発生によって局所的かつ継続的に豪雨に見舞われる傾向がある。人々の生活圏としての堤内地は、堤防によって河川から守られているが、水系の集水域が継続的に強い降雨を受けることにより、水位が上昇し、越流による破堤のほか、河川水の堤防への浸透、河川水による堤防の侵食などによって堤内地が水害を被る事象は毎年のように起こっている。淀川水系においても、平成 25 年 9 月の台風 18 号で桂川が嵐山と伏見で越流氾濫し、甚大な被害が発生した。また木津川流域では、水位が上昇すると越流はしないものの堤内地に泥水が噴き出す現象が起こっており、堤防構造の対水害安全性についての検討が喫緊の課題となっている。

堤防に関わる災害は、堤体のみならず堤体が構築されている地盤の構造を併せて考えなければならない。地下構造については、関西圏地盤情報ネットワークの枠組みにおいて、理学・工学協働で関西圏地盤情報データベースを整備し、現在では広く利活用されている。一方、堤防については国土交通省が直轄で管理し、独立した地盤情報システムとして整備されてきた。既に述べたように、河川堤防の災害脆弱性評価のためには、堤体と基礎地盤を一体とした情報が不可欠であり、両者を統合化したデータベースを構築する必要がある。本研究では、関西圏地盤情報ネットワークに整備されている基礎地盤のデータベースと国土交通省近畿地方整備局淀川河川事務所所有の淀川水系堤防の地盤データを統合し、従来、別個に整備されていた堤体と基礎地盤の地盤情報を統合した堤体・基礎地盤一体型の地盤情報データベースを構築する。構築した統合型地盤情報データベースに基づいて、豪雨による高い河川水位や地震に対する脆弱箇所を同定するとともに、高精度解析モデルを作成して浸透流解析を行うことにより、その災害脆弱性を定量的に評価する枠組みを構築する。これにより、豪雨による河川堤防の不安定化と破壊に対する合理的な対策に資する情報を提示することを目的とする。

2. 淀川水系・木津川の堤体・基礎地盤統合型データベースを活用した三次元地盤モデル

本研究で対象とした領域の地図と用いたボーリング地点の分布について図 1 に示す。対象としたのは過去に大規模な洪水や河川からの漏水、噴砂・噴泥といった被害が報告されている木津川周辺地域であり、下流側から上流側にかけて 5 つのエリアに分けてモデルの作成を行った。本研究では関西圏地盤情報ネットワークで作成された地盤情報データベース (GI-base) のボーリングデータを利用して対象エリアの三次元モデルを作成する。一方、国土交通省が管理している堤体の地盤情報は GI-base には含まれておらず、河川起源の浸透流解析を行うためには、堤体・基礎地盤を統合した地盤情報が不可欠であるという観点から、国土交通省近畿地方整備局から木津川堤防のボーリングデータを提供いただき、GI-base を堤体と基礎地盤を統合したデータベースに更新した。更新した統合データベースを用いて、木津川左岸、

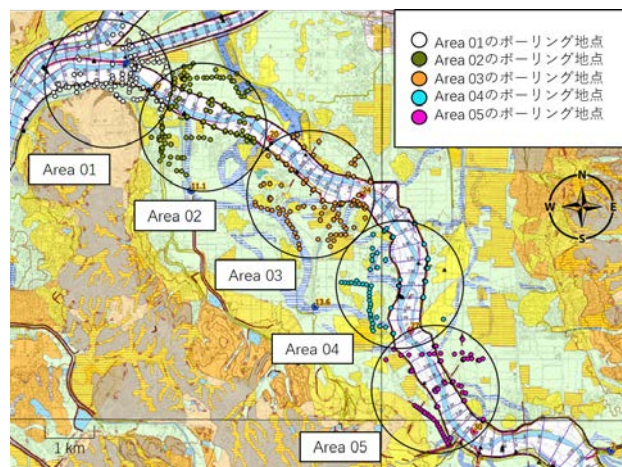


図 1 対象領域の地図とボーリング地点分布

更新した統合データベースを用いて、木津川左岸、

八幡市上津屋地区における一断面を図 2 に示す。同図において、測線 B-B' の B 側 (北側 ; 下流側) の 2 点は新たに追加された堤防堤体のボーリングであり、それ以南のものは既存の堤内地のボーリング情報となっている。同図より、当該地区の地盤標高はおよそ 14m であり、堤体部のボーリングの孔口標高はそれより高く、18~19m となっている。ただしこの 2 点については堤頂部からのボーリングではなく、堤体の台形横断面の中下部のもので、必ずしも堤防の高さを表すものではない。柱状図中、赤は礫質土を、黄色は砂質土を、青色はシルト質土を、緑色は粘土を示している。また堤体や堤内地表層は人工盛土として×印で示してある。木津川は領家花崗岩帯を流下する河川であり、花崗岩は風化によって容易に崩壊して礫質、砂質土に分解されるため、河道や流域には花崗岩起源の礫質、砂質土が広く分布する特徴を有している。堤防堤体は河道や周辺の土砂を用いて構築されてきた歴史があり、河川流域の土質が反映されたものになることが多い。木津川堤防については花崗岩起源の礫質、砂質土が使用されていると考えられ、図 2 のデータからも堤体部は砂質土による盛土という表記になっている。N 値についてもさほど高くなく、必ずしも強固な構造を有しているわけではないことが予察される。当該地区の自然地盤については、花崗岩起源の砂質土主体の地盤となっているが、旧河道と氾濫原が入り混じった複雑な地形区分となっており、標高 14m から下位については同じ標高であっても砂礫、砂、細粒土が混在し、側方に一様な連続した地層にはなっていないことがわかる。洪水時の河道の変更により、流路となる部分とその周辺で滞水域となる部分が面的に混在する形を繰り返してきたために、このような複雑な層構造が形成されていると考えられる。こうした地層構造は当該地区に限ったものではなく、河川中流域の平野部ではこのような地盤になっていると考えるのが妥当であろう。ボーリングの本数は減少するが、標高+4m 以深については砂・砂礫主体の構造が比較的側方に連続して展開していることがわかる。図より比較的礫質で十分な層厚を有しており、河道に限定せず広域の地下水の流動に寄与している可能性が高い。

従来は統合されていなかった堤防の地盤情報と基礎地盤の地盤情報を一体化することにより、堤体、基礎地盤の連続した地層構造を見ることができ、構造、浸透に関わる安定性を検討する際の地盤モデル、解析モデル構築への利活用と高精度化に資するデータベースに更新されたといえよう。

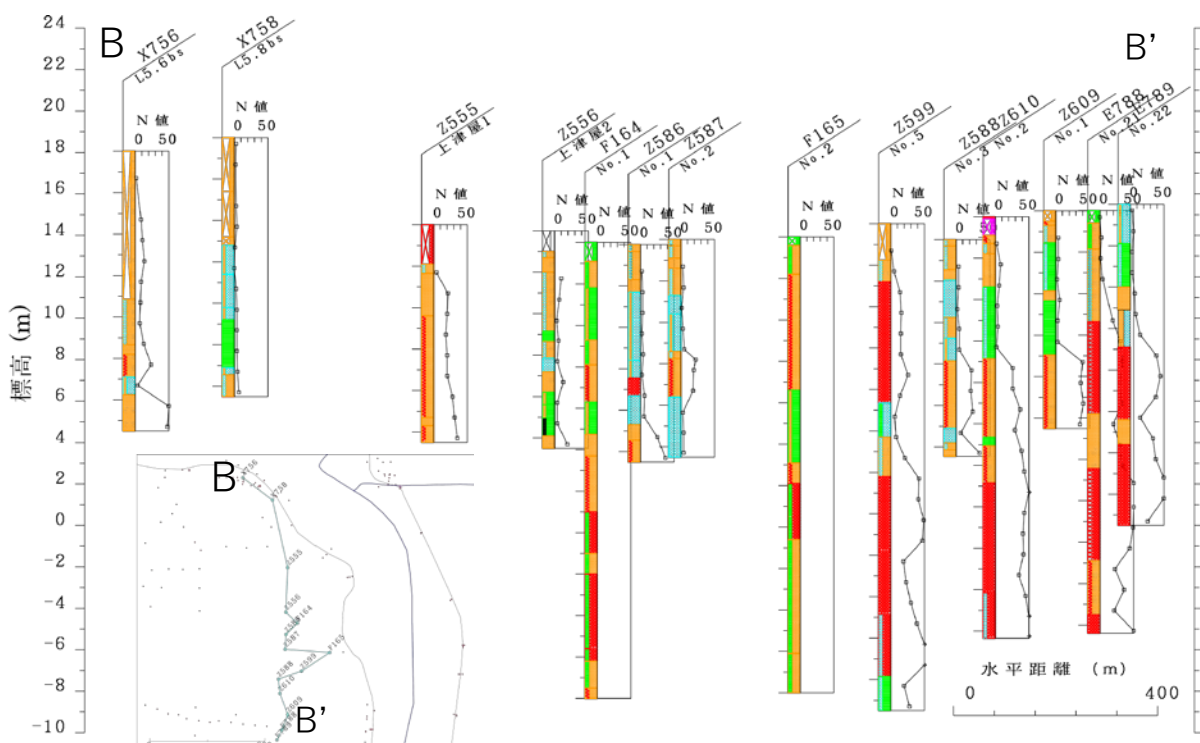


図 2 堤体基礎地盤統合データベースによる八幡市上津屋地区・木津川流域の地盤構造

地盤の三次元モデル作成にあたり、Aquaveo によって開発された Groundwater Modeling System(GMS)²⁾を用いた。地盤の三次元モデルの作成手順を、実際に作成したモデルを用いて図 3～図 6 に示す。なお、一連のモデルは図 1 中で示した Area 03 を対象としており、黄色が砂、緑色が粘土、茶色が礫、水色がシルト、黒色がその他の層を表している。まず、GI-base に格納されているボーリングデータから地層を砂、粘土、礫、シルト、その他の 5 つに分類し、それらを異なる色で表現し図 3 のような Borehole model を作成する。次に、個々の離散的な Borehole model の間の領域を補間する。まずはボーリング地点間を繋ぎ、図 4 のような Panel model を作成する。このプロセスには horizon method³⁾を用いており、Borehole model の各層の境界部分に対して堆積している順番を表す horizon ID を底から順に割り当て、同じ層の部分を繋ぐことで作成される。この時、シルト質や砂混じりなどの分類までモデルに反映させるのは無理なので、優勢土質をその深度の代表値とする。この割り切りは、いずれのモデル化でも遭遇する課題であり、細分することによる精度向上とモデル化に関わる技術的な問題とを比較して判断せざるを得ない。またこれらの土質分類は、通常、ボーリング時の目視判断によるものが多く、特に細粒土についての区別は沈降分析による正確な出力ではないため、区別はしていても実質上は細粒土という括りで見るのが妥当であろう。補間に際しては、未知の層境界部分の座標 (x, y, z) を決定するために以下の式(1)が用いられる。なお、A, B, C, D は 3 つの既知点の座標から算出される。

$$\begin{aligned}
 Ax + By + Cz + D &= 0 & (1) \\
 A &= y_1(z_2 - z_3) + y_2(z_3 - z_1) + y_3(z_1 - z_2) \\
 B &= z_1(x_2 - x_3) + z_2(x_3 - x_1) + z_3(x_1 - x_2) \\
 C &= x_1(y_2 - y_3) + x_2(y_3 - y_1) + x_3(y_1 - y_2) \\
 D &= -Ax_1 - By_1 - Cz_1
 \end{aligned}$$

続いて図 5 のような Solid model を作成する。まず、地表部分に関して数値標高モデル (DEM : digital elevation model) から作成される不正三角形網 (TIN : triangular-irregular network) により Panel model の地表部分を覆う。そして逆距離加重法 (IDW method : inverse-distance weighted method) を用いてパネルで囲まれた内側の領域の補間を行うことで Solid model を作成する。逆距離加重法は昨今、点の情報を補間する手法として最も広く用いられているもののひとつであり、補間される点は最も距離の近い点から最も大きな影響を受け、距離が遠くなるほど受ける影響が小さくなるという仮定に基づいている。つまり、補間された点は既知点の重み付き平均である。逆距離加重法には重みの与え方などによっていくつかの種類があるが、本研究では式(2)に示す Shepard 法⁴⁾を用いている。

$$F(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i f_i \quad (2)$$

ここで n はデータ数、 f_i は既知点の情報、 w_i は各地点に割り当てられた重みを表しており、 w_i は式 (3) に示す重み関数で与えられる⁵⁾。

$$w_i = \frac{\left[\frac{R - h_i}{Rh_i} \right]^p}{\sum_{j=1}^n \left[\frac{R - h_j}{Rh_j} \right]^p} \quad (3)$$

p は重み指数と呼ばれる任意の正の実数で、本研究では 2 としている。 R は補間位置から最も遠い点までの距離、 h_i は補間位置から点 i までの距離である。

Solid model は地層境界と土質区分を有するモデルであり、いわば地盤モデルとみなすことができる。一方、浸透流解析を行うには、水頭計算を行う必要があるため、有限差分法 (FDM : finite-difference method) による計算が可能な 3D Grid model への変換を行う (図 6 参照)。3D Grid model は、地層構造に基づいて層境界の位置が変わらないように Solid model の上からグリッドをかぶせる Grid overlay という手

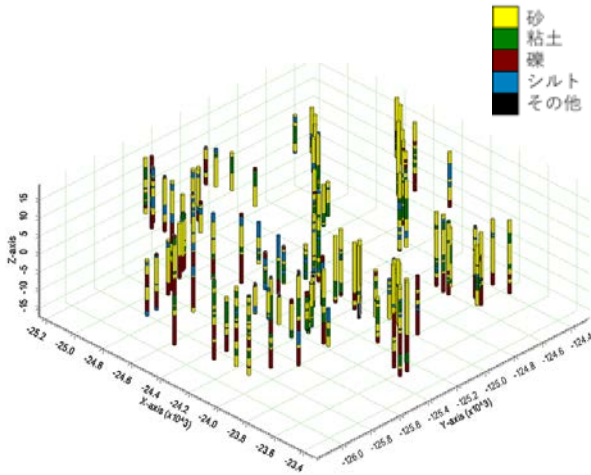


図 3 使用する対象地域のボーリングデータ

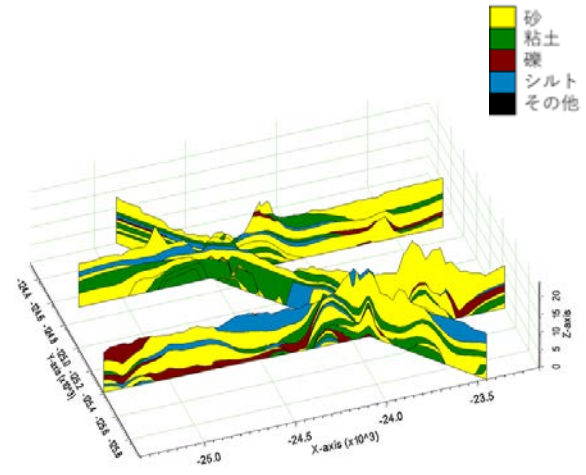


図 4 パネルモデル (Panel Model)

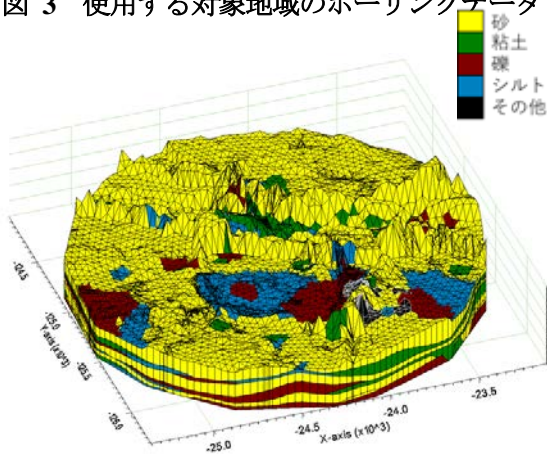


図 5 3D Solid model (地盤モデル)

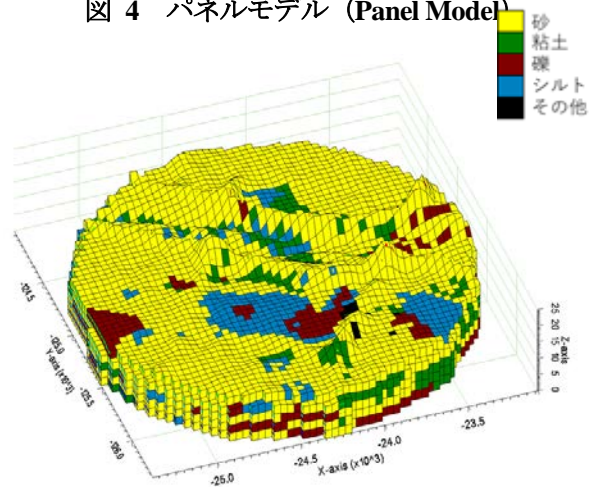


図 6 3D Grid model (浸透流解析モデル)

法を用いることで作成できる。グリッドの上面と下面がソリッドの上面と下面に一致するようにグリッドが配置され、その間の領域に関しては線形補間によって均等にグリッドで埋められる。そして各ブロックに対して中心点 (node) に初期水頭を、ブロック全体に水平及び鉛直方向の透水係数と境界条件を導入することで水頭計算が可能な解析モデルとなる。

堤体と基礎地盤を統合した地盤情報データベースを活用し、木津川流域を対象とした地盤の三次元モデルを構築した。モデル作成にあたり、ボーリング点間を補間し、三次元に展開することによって地盤モデルを作成し、土質定数と境界条件を付与することによって浸透流解析モデルへと更新する手順を示した。

3. 粒度・透水試験による砂層の透水特性の評価

対象領域内で実施されたボーリング調査で得られたボーリングコアを用いて、地盤内透水を支配する砂礫層について、詳細な粒径、粒度による分類を行い、定水位透水試験によってそれぞれの透水係数を求め、砂礫土の粒度特性との関係について検討を行った。本研究では図7に示した木津川流域で実施されたボーリングコアを用いて実験を行った。まず、土の粒径や粒度の違いが透水性に与える影響について詳細な検討を行うために、ボーリングコアに対して通常の土質区分よりも詳細な地質学的な分類を行った。通常ボーリング柱状図に示される土質区分は円柱状のボーリングコアを円柱状のまま観察して記録するものである。しかし、本研究ではボーリングコアを深さ方向に半割し、その断面を観察することで層の分類を行った。図8に通常のボーリング柱状図を示し、図9には地質学的分類に基づいて作成された地質柱状図を示

す。地質柱状図では各層を表す長方形の横の長さがその層の主成分の粒径の大きさと対応しており、横幅が長いほどその層の主成分の粒径が大きいことを示している。また、長方形内部の白丸、黒丸、点線はマトリックスを表しており、それぞれ礫、砂、シルトと対応している。この地質学的分類に基づいて半割後のコアの片側について主に中央部分を採取しサンプリングを行った。各試料の質量は層厚や含有する礫の量などによって様々であるが、300 g 程度である。

サンプリング後の試料に対してふるい分けによる粒度分析を行った。試験方法は JGS 0131-2009 (JIS A1204:2009) に従った。なお、本研究では砂礫層を対象としたため、7.42 m から 10.62 m にかけて分布していた粘土層に関しては試験対象からは除外した。29 サンプルに対して試験を実施しており、その結果をもとに粒径や粒度が似通っていたものをまとめたところ 6 種類に分類できた。各試料に対する粒度試験の結果を①から⑥の分類ごとにまとめてそれぞれのふるいの残留試料質量を足し合わせることで図 10 のような粒径加積曲線を得た。なお、①～⑥はそれぞれ図 9 中に示した各深度と対応しており、①が細砂、②～④が粗砂、⑤と⑥が礫である。さらに、①～⑥それぞれに対して定水位透水試験を行い、透水係数を求めた。試験方法は JGS 0311-2009 (JIS A1218:2009) に従い、供試体の密度に関しては現地で実施された原位置孔内挿入型 RI 密度検層の結果を参考にして現地地盤に近い密度で供試体を作成した。粒度試験の結果から得られた粒径や均等係数、曲率係数と透水試験で得られた透水係数をまとめて表 1 に示す。ここで、透水試験では 10 分間での透水量の計測を各 3 回ずつ行ったが、連続して試験を実施していると、越流水槽内の水が徐々に濁っていく様子が認められ、この現象は①で顕著であったが、②～⑥でも確認することができた。水が濁るのは供試体内の細粒分が流出することが原因だと考えられるが、供試体に通水させ続けることで細粒分が移動、集積することで試験中に透水性が低下したり、逆に水みちが形成されて透水性が上昇したりすることが懸念される。そこで、表 1 では供試体の構造に対する透水性を示すと考えられる 1 回目の計測で得られた透水量から求めた透水係数を示している。まず、①から⑥を比較した際の大きな違いとして、①に関してのみ透水係数が一桁小さく、②～⑥に関しては透水係数のオーダーが同じであったことが挙げられる。透水係数は cm/s の単位で、①は 10^{-4} 、②～⑥は 10^{-3} のオーダーであった。これは粒径加積曲線や表 1 から分かるように、細粒分および細粒砂の含有率が①とそれ以外とで大きく異なることが原因であると考えられる。また、②～④の粗砂と比較すると、②が最も



図 7 ボーリング地点

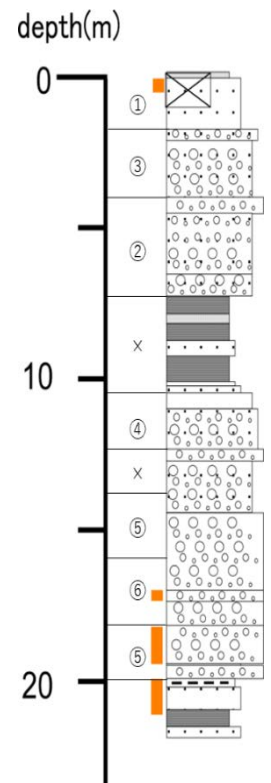
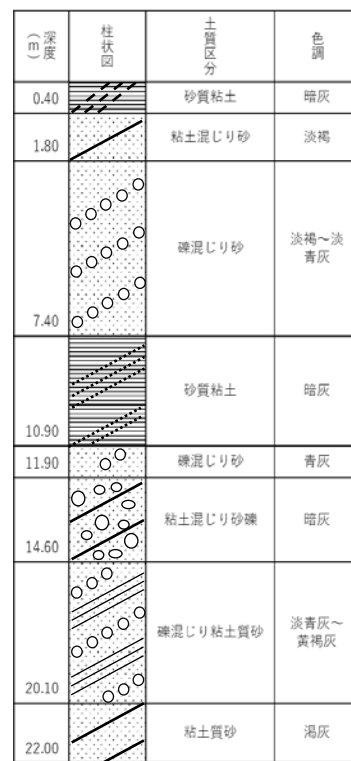


図 8 ボーリング柱状図

図 9 地質柱状図

透水試験では 10 分間での透水量の計測を各 3 回ずつ行ったが、連続して試験を実施していると、越流水槽内の水が徐々に濁っていく様子が認められ、この現象は①で顕著であったが、②～⑥でも確認することができた。水が濁るのは供試体内の細粒分が流出することが原因だと考えられるが、供試体に通水させ続けることで細粒分が移動、集積することで試験中に透水性が低下したり、逆に水みちが形成されて透水性が上昇したりすることが懸念される。そこで、表 1 では供試体の構造に対する透水性を示すと考えられる 1 回目の計測で得られた透水量から求めた透水係数を示している。まず、①から⑥を比較した際の大きな違いとして、①に関してのみ透水係数が一桁小さく、②～⑥に関しては透水係数のオーダーが同じであったことが挙げられる。透水係数は cm/s の単位で、①は 10^{-4} 、②～⑥は 10^{-3} のオーダーであった。これは粒径加積曲線や表 1 から分かるように、細粒分および細粒砂の含有率が①とそれ以外とで大きく異なることが原因であると考えられる。また、②～④の粗砂と比較すると、②が最も

透水係数が大きく、④が最も小さかった。粒径だけに着目すると、 D_{10} から D_{60} までの全てにおいて④が最も大きくなっており、粒径の大きさと透水係数の大きさは対応しておらず、他の要素に着目すると粗粒砂の含有率の高さと透水係数の大きさが対応していた。さらに、最も均等係数の小さかった②が最も透水係数が大きくなっており、粒度が悪いほど透水係数は大きくなる傾向があると考えられる。逆に、主成分が礫である⑤と⑥を比較した際には、均等係数は⑥のほうが小さくなっているが、全体的な粒径としては⑤の方が大きく、透水係数も⑤の方が大きいという結果であった。したがって、礫では、透水係数に与える影響は粒度よりも粒径によるものの方が大きいと考えられる。ただし、礫に関しては試験に用いたモールドの内径が 10 cm という制限があったためこの条件では実地盤の再現が難しく、今後さらに大型の装置を用いた実験などによる検討を加える必要がある。

これらの結果をまとめると、層を構成する主成分による分類では、細砂よりも粗砂、礫の方が透水係数は大きくなることが確認できた。また、主成分が同じ場合について、粗砂に関しては全体的な粒径の大きさが透水係数の大きさと

対応しておらず、粗粒砂の含有率の高さと透水係数の大きさが対応していた。また、粒度が悪い砂ほど透水係数は大きくなると考えられる。逆に、礫に関しては、全体的な粒径の大きさと透水係数の大きさが対応しており、粒度よりも粒径による影響の方が大きいと考えられる。

4. 浸透流解析の適用例

上でも述べたように、木津川周辺は大きな被害をもたらす水害が昔から発生しており、河川水が堤内地に出水することによる水害を減らすためには定量的なリスク評価を行う必要がある。ここでは堤体・基礎地盤統合型データベースをもとに作成した浸透流解析モデルを用いて水頭計算を行う手法と実際の計算結果を示す。本研究ではアメリカ地質調査所によって開発された MODFLOW という三次元地下水解析モジュールを用いて対象領域の全水頭分布図を作成し、解析結果に基づいて漏水の危険性に対する評価を行った。MODFLOW で用いられている支配方程式を式 4 に示す。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - W^* \quad (4)$$

ここで H は水頭、 W^* は単位体積当たりの流束、 S_s は比貯留係数、 k_x 、 k_y 、 k_z はそれぞれ x 、 y 、 z 方向の透水係数であり、 t は時間を表している。解析にあたり、各透水層の透水係数は表 1 に示した実験値に基づいて決定した。

堤内地への漏水の発生リスクを評価するためには、最も地表に近い層を流れる水の挙動が最も重要であ

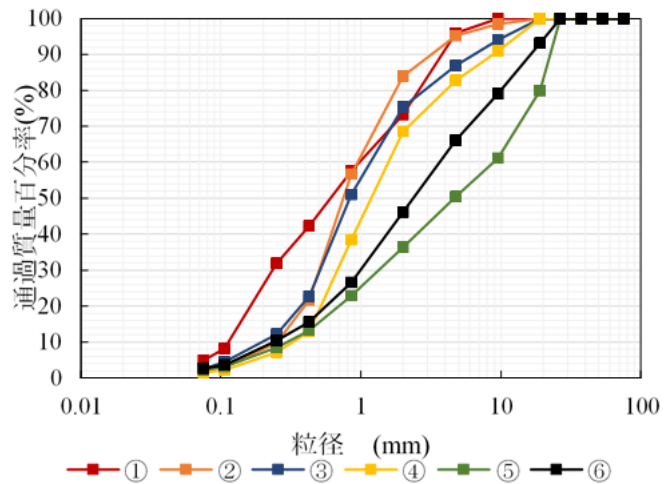


図 10 礫質土および砂質土の粒径加積曲線

表 1 各試料の粒度分布および透水係数

| | ① | ② | ③ | ④ | ⑤ | ⑥ |
|----------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| D_{60} | 0.972 | 0.945 | 1.165 | 1.570 | 8.819 | 3.633 |
| D_{50} | 0.603 | 0.745 | 0.828 | 1.181 | 4.632 | 2.360 |
| D_{30} | 0.234 | 0.501 | 0.508 | 0.676 | 1.339 | 0.985 |
| D_{20} | 0.163 | 0.394 | 0.371 | 0.515 | 0.692 | 0.562 |
| D_{10} | 0.113 | 0.252 | 0.196 | 0.325 | 0.295 | 0.237 |
| 細粒分含有率 | 4.88 | 2.12 | 2.56 | 1.54 | 2.25 | 2.69 |
| U_c | 8.595 | 3.751 | 5.952 | 4.826 | 29.942 | 15.304 |
| U_c' | 0.497 | 1.055 | 1.133 | 0.894 | 0.690 | 1.125 |
| 透水係数 | 5.48×10^{-4} | 3.97×10^{-3} | 3.00×10^{-3} | 2.59×10^{-3} | 3.43×10^{-3} | 1.22×10^{-3} |

$D_{10} \sim D_{60}$: (mm), 細粒分含有率 : (%), 透水係数 : (cm/s)

る。ここでは桂川、宇治川、木津川の三川合流地点から上流 7 km 辺りで半径約 1 km の領域（図 1 の Area 04 で示した地点）を例に実際の計算結果を示す。Area 04 の微地形区分図と作成した浸透流解析モデルをそれぞれ図 11、図 12 に示す。2013 年 9 月 13 日、台風により木津川流域の地下水位と河川水位が急激に上昇した。実測されている河川水位の水頭値を初期条件として平常時と 2013 年 9 月 13 日の台風によって増水したケースを比較して検討を加えた。

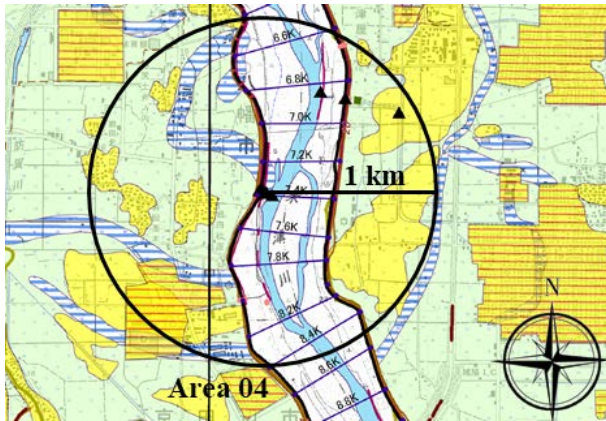


図 11 Area 04 の地図

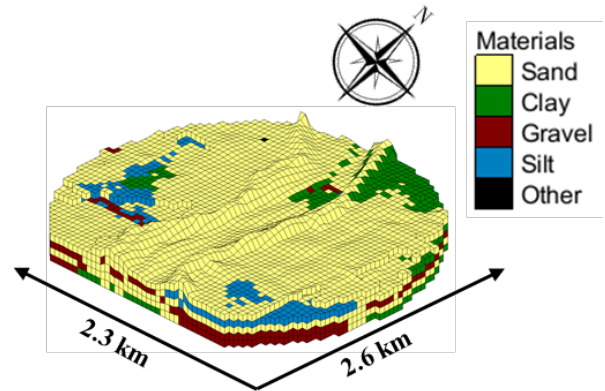


図 12 Area 04 の浸透流解析モデル

解析結果の一例を図 13 に示す。上図は平常時の水頭分布を、下図は水位上昇後の水頭分布を示している。メッシュにオレンジ色で記された△印は水が流れていないことを示しており、中央部を北に向かって流下する河道に沿って記されている紫色の◇印が河川流を表している。また、図中河川左岸側に丸で囲んだ領域は、畑地として使われている部分で、水位上昇時に実際にパイピングによると思われる泥流が噴き出した地点を示している。平常時における水頭値はエリア上流部から下流に向かって漸減するが、およそ河道流路に沿って流下し、河道から外れると水頭値は下がり堤内地下では水の流れは認められない。一方台風に伴う大雨によって水量が増した後は、左右岸ともに堤内地下でも地下水流が現れ、特に着目している地点（黒い丸で囲んだ領域周辺）では堤内地における水頭値が高く、等水頭値線が密に混みあっていることがわかる。図 2 より当該地点の堤内地の標高は約 14m であり、場所によっては被圧された地下水が噴出する危険性があることがわかる。多くは農地として利活用されており、水田の場合は表層に滞水できる泥土が存在し、畑地でも砂質土ではなく細粒分を含む土で覆われているため、直ちに噴水することがないが、潜在的な弱部、地割れ、また過去の噴水痕の空洞などを通して泥水が吹き上げる危険性が高い。

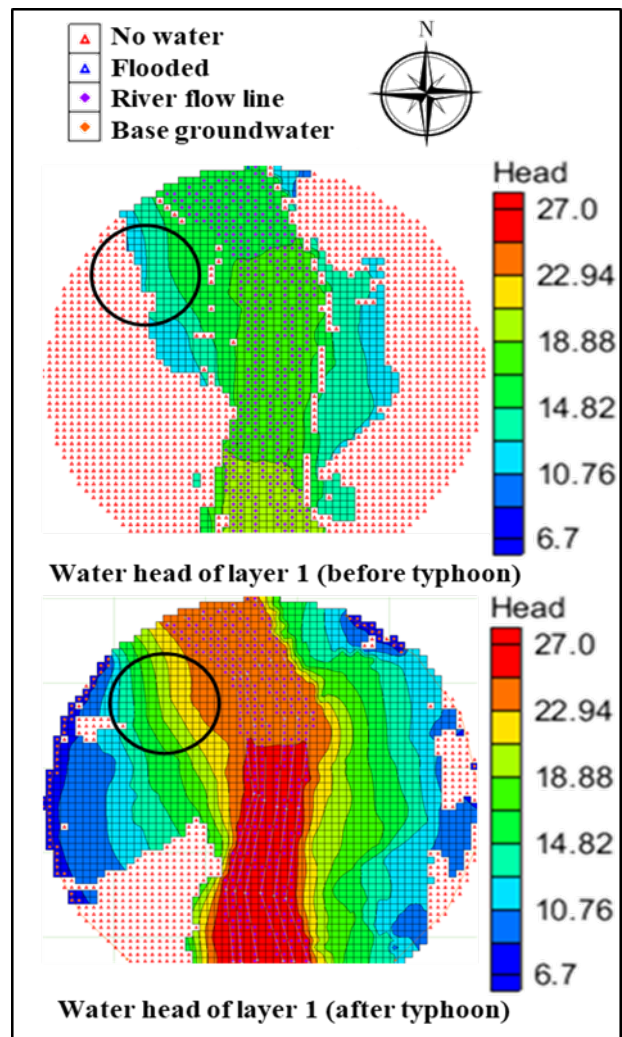


図 13 MODFLOW 解析結果

5. おわりに

多発する豪雨による水害、特に河川起源の堤内地の浸水に対し、堤防と基礎地盤の両面から浸透問題を検討する必要に迫られている。本研究では従来それぞれ別々に管理されてきた、堤防本体の土質情報と基礎地盤の土質情報を統合化することにより、堤体・基礎地盤を統合した地盤情報データベースを構築した。これにより、堤防本体天端から自然地盤の一定深度に至る地盤データを一元的にデジタル情報として活用できる環境となった。パイロットスタディとして桂川、宇治川、木津川の3河川が合流する京都府南部八幡市の三川合流部から木津川上流部を取り上げ、当該地区の堤防を含んだ三次元地盤モデルの作成を行った。ボーリング間をつなぎ、補間することによって地盤モデルを作成し、浸透問題に特化した解析モデルとして3Dグリッドモデルを構築した。土質情報を得るために新たにボーリング調査を実施し、採取試料に基づいて当該地区の透水層を構成する砂・礫層の状態を詳細に検討するとともに、透水に関わる土質定数を実験によって求めた。一連の結果を統合する形で三次元浸透流解析を行い、地下水の流動に起因する水害発生危険性の端緒を見出すことができた。次のステップとして、原位置の地盤状況に基づいたパイピングによる堤内地における噴水・噴泥のメカニズムを明らかにするための検討を行う必要がある。

末筆になりますが、堤防の地盤調査データを提供いただいた、国土交通省近畿地方整備局の関係者、および採取試料の地質分析をご教示いただいた（一財）地域地盤環境研究所・北田奈緒子氏に深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 関西地盤情報活用協議会：新関西地盤—京都盆地—、196p., 2002.
- 2) Aquaveo Inc.: GMS User Manual, Ver.10.3, 2018.
- 3) Lemon, A. M. and Jones, N. L.: Building solid models from boreholes and user-defined cross-sections, Computers and Geosciences, Vol. 29, No. 5, pp.547-555, 2003.
- 4) Shepard, D.: A two-dimensional interpolation function for irregularly-spaced data, Proc. of the 1968 23rd ACM National Conf., 1968.
- 5) Franke, D. and Nielson, G.: Smooth interpolation function for large sets of scattered data, International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 15, No. 11, pp.1691-1704, 1980