

平成 22 年 03 月 31 日現在

研究種目：若手研究 (B)  
 研究期間：2008～2009  
 課題番号：20710144  
 研究課題名 (和文) 埋没水害地形の同定にもとづく水害リスク評価と洪水ハザードマップの高精度化  
 研究課題名 (英文) Identification of flood-related sedimentary features and its environmental assessment  
 研究代表者  
 東 良慶 (AZUMA RYOUKEI)  
 京都大学・防災研究所・助教  
 研究者番号：50464201

研究成果の概要 (和文)：メソスケールの埋没破堤地形を対象とし、比抵抗探査および表面波探査の統合物理探査を適用することにより、物理的な同定に成功した。また、その物理探査結果から過去の破堤イベントのスケールを評価した結果、氾濫土砂量は  $100\sim 200\times 10^4\text{m}^3$  であった。過程を読み取り、水害地形環境の評価を行った。近年の破堤事例と比較して、非常に大規模な破堤イベントであると推察され、破堤当時の木津川河道には砂質堆積物が過度に堆積し、天井川化が著しい状態であったことがうかがえる。上記の氾濫土砂量を運搬するために必要な氾濫流量は  $10\times 10^8\text{m}^3$  (10 億トン) と推算された。これは伊勢湾台風 (5915 号) 来襲時の木津川における氾濫流量と同等の出水イベントであったことが考えられる。

研究成果の概要 (英文)：This study addresses procedures for identifying flood-related sedimentary features in view of their future incorporation into community-based hazard mapping. Considering the surrounding depositional environments and performance of geophysical explorations, the authors estimated that the sediment discharge associated with the levee breaching amounted to  $100\sim 200\times 10^4\text{m}^3$ . The related hydraulic calculations led to an estimate for the flooding discharge involved. Interestingly, the estimated discharge  $10\times 10^8\text{m}^3$  is comparable to, or even larger than, the recorded past maximum discharge ( $3\times 10^8\text{m}^3$ ) by the 1959 Isewan Typhoon.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2009 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学

キーワード：自然災害、洪水害、堆積環境、埋没水害地形、減災

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 過去の水害の痕跡である破堤地形や落堀などが地中表層に埋没した水害地形は、流域の水害特性と密接に関係している。それらを読み解き、現在の土地利用との関係性を防災的な観点から考えることは、地域の特性を

反映した水害リスク評価を行ううえで、非常に重要である。

(2) 2008 年 2 月、破堤地形や旧河道などの水害地形を空中写真や古文書等から判読・分類し、地形図上に示した治水地形分類図が公

開された。これらは流域防災の視点から非常に有用である。しかし、その水害地形の形成過程や堆積物の質等、物理的な要因はほとんど考慮されておらず、水害イベントの物理過程を復原するには不十分であり、高精度な水害リスク評価を行うことは困難である。

(3) 近年、物理探査は測定機器および解析技術の進展に伴い、地中を可視化する手法として極めて重要な役割を担っている。防災分野における適用事例としては、河川堤防の安全度調査や地すべり調査などが挙げられる。しかしながら、水害地形（破堤地形、落堀等）のように、地中浅層域において、広域に存在する堆積層を対象として、機動的（広域）かつ平面的な統合物理探査が実施された例は少ない。

## 2. 研究の目的

(1) 流域特性をふまえた水害リスク評価の高精度化を視野に入れ、人口や社会資産が集中する低平地（氾濫原）に着目する。

(2) その中でもメソスケールの埋没破堤地形を対象とし、比抵抗探査および表面波探査の統合物理探査を適用することにより、物理的な同定を試みる。

(3) 破堤イベント過程を物理探査結果から読み取り、水害地形環境の評価を行うことも目的とする。

## 3. 研究の方法

(1) 調査エリア（淀川河口から43~44km付近の木津川下流域の右岸堤内地（京都府城陽市荒州地区））において、非破壊物理探査である牽引式比抵抗探査および高精度表面波探査を実施し、地層表層に埋没した過去の破堤地形を物理的に同定する。

(2) 上記物理探査結果にもとづき、破堤に伴う氾濫土砂量の算定を行う。

(3) その後、上記氾濫土砂量を流送した氾濫流量の算定を行う。

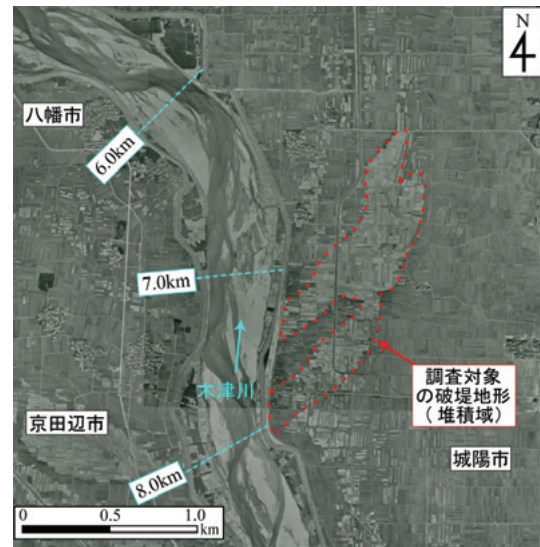
(4) これらの結果から、破堤地形を形成した洪水イベントのスケール、すなわち、水害地形環境を評価する。

## 4. 研究成果

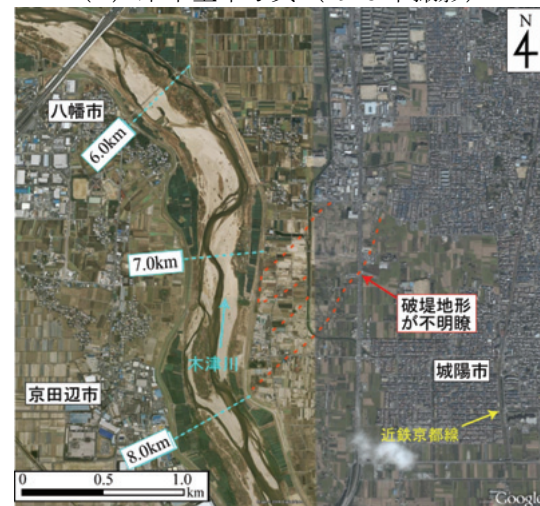
### (1) 埋没破堤地形の調査エリア

埋没破堤地形の同定の調査エリアとしては、淀川河口から43~44km付近の木津川下流域の右岸堤内地（京都府城陽市荒州地区）を選定した。木津川（流域面積1596km<sup>2</sup>）は、三重、滋賀、奈良県境の山地を源流とし、伊

賀、加茂盆地を西方向に流下したのち、京都盆地南部の低平地を北方向に流下する。山城盆地を流れる区間（流路長：約30km）における平均勾配は0.66/1000である。調査エリアより約7km下流の天王山と男山に挟まれた狭窄部において、桂川、宇治川と合流する（三川合流部）。上流に大きな集水域を有し、下流に狭窄部が存在する低平地は、水害リスクが高い地形システムの代表例の一つである。当調査地域は洪水災害ポテンシャルの高い典型的な水害環境にあると言える。



(A) 米軍空中写真（1948年撮影）



(B) 衛星写真（Google Earth, 現在）

図-1 木津川下流域の調査エリア（埋没破堤地形）周辺の空中写真

木津川下流域の調査エリア周辺（三川合流部から上流7.0~8.0km区間）の空中写真を図-1に示す。この荒州地区周辺では、過去、洪水氾濫災害が度々発生し、その被害状況は多くの古文書等に記録されている。本研究の対象とした破堤地形は、1859あるいは1876年



に発生した洪水氾濫によって形成されたとされているが、詳細については未解明である。1948年当時は、木津川河道から氾濫流によって流送された砂質堆積物（白色）で形成された破堤地形（堆積域）が明瞭に観察できる（図-1(A)）。一方、当該調査エリアにおいて、市街地の発展とともに宅地化など土地利用の改変がなされ、現在では、破堤地形（堆積域）が不明瞭になっている（図-1(B)）。

淀川水害地形分類図においても、この破堤地形（堆積域および侵食域）が分類され、地形図上に記載されている（図-2）。同図より、後背湿地性の在来地盤（図中の緑色部）の上に、破堤により流送された土砂が堆積し、破堤地形が形成されていることがわかる。

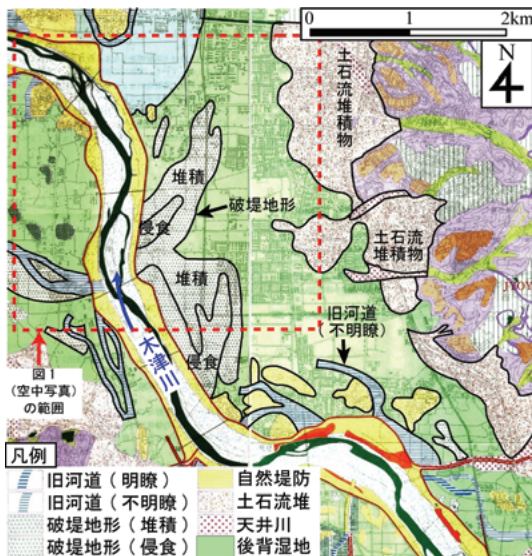


図-2 淀川水害地形分類図における調査エリア周辺の地形環境

## (2) 埋没破堤地形の同定

治水地形分類図は、流域防災を考える上で非常に有用である。しかし、1970年代に作成された後、更新されておらず、近年の急激な都市化には対応できていない。土地利用の変化により改変された水害地形は地中に埋没し、地表の情報からでは判読が困難となる（図-1(B)）。このような埋没水害地形は、洪水時だけでなく、地震発生時の“弱点”となるため<sup>7)</sup>、これらを精度高く物理的に同定することは、災害リスクの評価を行ううえに、非常に重要なプロセスとなる。

本研究では、上述を鑑み、埋没水害地形を同定するための非破壊物理探査として、□比抵抗探査、および、□表面波探査を実施した。具体的には、まず牽引式比抵抗探査を適用し、地中浅層域に埋没した破堤地形を平面的に同定する。この結果にもとづき重要調査測線を選定し、表面波探査により浅層域の堆積状況の鉛直断面を詳細に調査する。これらの探査結果を総合的に勘案し、地中浅層域に埋没

した水害地形を3次元的に同定する。

## ① 牽引式比抵抗探査の適用

比抵抗探査法は電気探査法の一つで、堆積物中に電流を流すことによりできる電位差を測定し、その比抵抗値に基づいて地下構造を調査する方法である。本研究では、広域かつ平面的に埋没破堤地形を同定するために、キャパシタ電極カップル型牽引式比抵抗探査手法の OhmMapper を適用し、調査を実施した（2008年10月2, 10, 28日）。この探査法は比抵抗探査の中でも機動性に優れており、本研究では三輪式原動機付自転車で牽引することにより、長さ2km、幅0.5km（総測線長11km）に及ぶ広範囲の探査を実施した（図-3）。

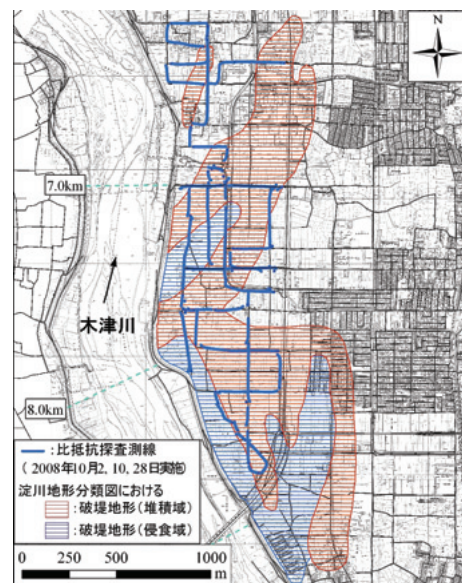


図-3 牽引式比抵抗探査の実施測線（2008年10月2, 10, 28日実施、背景図：城陽市都市計画図、淀川水害地形図における破堤地形（堆積域および侵食域、図-2）を併示）

探査深度2.8m（T.P.+12~14m）の比抵抗コンター図を数値地図2500と重ね合わせ、図-4に示す。図中の暖色部は比抵抗値が大きい領域、すなわち砂礫質を、寒色部は比抵抗値が小さい領域、すなわち泥質を表す。同図の比抵抗値分布を吟味することにより推論した観測結果を以下に列挙する。

- (i) エリア①周辺では比抵抗値が高く、砂質土の存在をうかがわせる。これは、水害地形分類図の破堤地形（堆積域）と整合する。
- (ii) エリア②周辺では比抵抗値が低く、地中表層（深度2.8m）に泥質土層の存在をうかがわせ、水害地形分類図の破堤地形（堆積域）とは整合しない。この不整合については、後述する。

(iii) エリア③周辺では比抵抗値が高く、砂質土の存在が推量できる。これは、水害地形分類図の破堤地形（堆積域）と整合する。

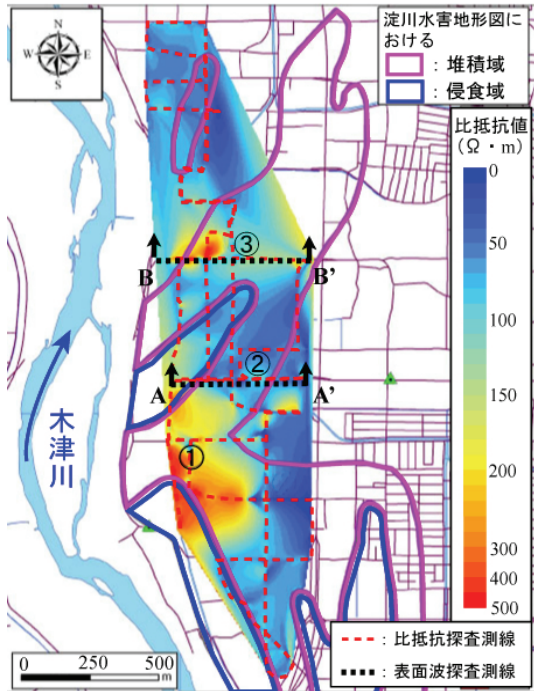


図-4 比抵抗コンター(探査深度; 2.8m)と数値地図 2500 との重合せ(淀川水害地形図における破堤地形を併示, 図中の A-A', B-B'は表面波探査測線を示す)

## ②高精度表面波探査の適用

表面波探査は、人工的に発生させた表面波を受振計(地震計)により記録し、波の位相速度を逆解析することにより、S波速度構造を求める手法である。地中浅層域における鉛直断面の堆積状況を調べることに適してい

る。前述の比抵抗探査結果にもとづき、木津川と概ね直交し、破堤地形を横断する測線 A-A'および B-B'を表面波探査測線に選定した(図-4)。本研究で用いた高精度表面波探査では、受振計を 24 個用い、その間隔は 1m とした(これに対応する探査深度は最大 12m 程度)。また、起振にはかけやによる地表面打撃を利用し、起振間隔は 2m とした(2008 年 12 月 18, 19 日実施)。

測線 A-A'および B-B'(図-4)に沿う S 波速度構造を図-5 に示す。図中の暖色部は S 波速度が大きいことを示し、剛性率の大きい硬質土(砂礫など)の堆積をうかがわせる。寒色部は S 波速度が小さいことを示し、剛性率の小さい軟質土(泥など)の堆積が推定できる領域である。同図より得られた結果を以下に列挙する。

### ○測線 A-A'

$x=0\sim 200\text{m}$  区間 : T.P.+8m 以深において S 波速度が大きく、砂礫など硬質土の堆積を示唆される。表層付近(T.P.= +13~15m)においては、S 波速度が比較的小さく、泥質の堆積物の存在が推量される。

$x=250\sim 485\text{m}$  区間 : T.P.+10~13m の間に S 波速度が小さい泥質の堆積層が挟在しており、その上部領域の表層付近に層厚が 2m 程度(T.P.= +13~15m)の S 波速度の大きい、砂質の堆積物が存在することが示唆される。

### ○測線 B-B'

$x=0\sim 240\text{m}$  区間 : T.P.+10m 以深において、S 波速度が大きく、砂礫など硬質土の堆積が示唆される。T.P.=+10~12m の間に S 波速度が小さい泥質の堆積層が挟在しており、T.P.+12m より浅層域には砂質土の存在が推量される。

$x=295\sim 540\text{m}$  区間 :  $x=0\sim 240\text{m}$  区間と比較

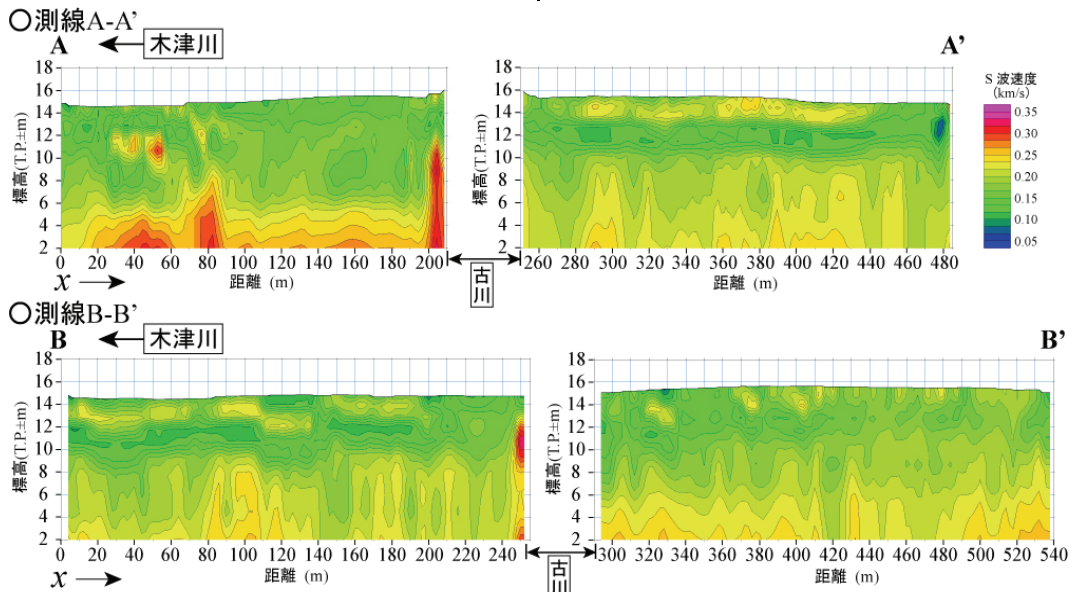


図-5 埋没破堤地形の S 波速度構造(上図: 測線 A-A', 下図: 測線 B-B', 地表地形はトータルステーションによる地形測量結果にもとづく(2009 年 9 月 11, 12 日実施))



して明瞭ではないが、T.P.=+12m から地表までの間に S 波速度が大きい、砂質の堆積物が存在することがうかがえる。

### ③物理探査結果の対比と検証

比抵抗探査と表面波探査は相補的である。なぜならば、比抵抗探査により平面的な堆積状況を調査し、その結果から重要調査測線を決定する。表面波探査により、その測線に沿う鉛直断面の堆積状況を把握する。これらを総合的に考察することにより、3次元の堆積環境の同定が可能となる。前述した物理探査結果を対比・検証することにより得られた結果を以下に列挙する。

- (i) 比抵抗探査結果のエリア□における、高比抵抗値領域の分布（図-4、探査深度 2.8m）は、表面波探査測線 A-A'の結果（図-5）における、 $x=30\sim 60m$  の地点の S 波速度の大きい領域（T.P.=+9~12m）と整合性を有し、木津川由来の破堤堆積物が同定された。この結果は、水害地形分類図に示された破堤地形（堆積域）と整合する。
- (ii) 比抵抗探査結果のエリア□においては、比抵抗値の小さい領域が分布しており、水害地形分類図の示す破堤地形（堆積域）と整合しない。しかしながら、表面波探査測線 A-A'の結果（ $x=240\sim 440m$ ）においては、表層近くに砂質土の堆積（T.P.=+13m 以浅）が推察される。したがって、比抵抗探査においては、上記の表層砂質層の下部に存在する在来の後背湿地性の泥質土層（図-5、測線 A-A'、 $x=240\sim 440m$ ）を捉えたと考えられる。
- (iii) 比抵抗探査結果のエリア□においては、比抵抗値が大きく、表面波探査測線 B-B'の結果における、表層付近（T.P.=+12m 以浅）の S 波速度が大きい領域と調和的であり、これは、水害地形分類図に示された破堤地形（堆積域）と整合する。

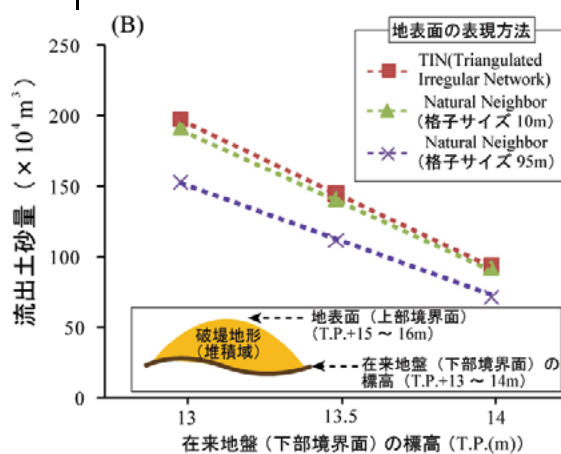
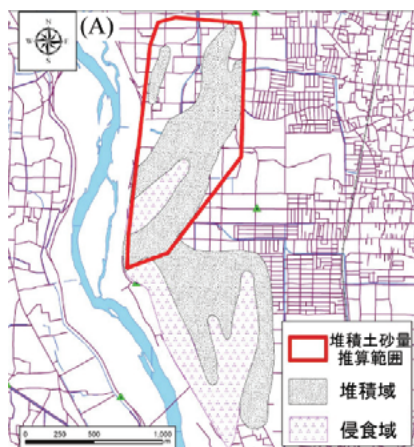


図-6 破堤に伴う流出土砂量の算定：(A)流出土砂量の算定範囲，(B)在来地盤（下部境界面）と流出土砂量との関係

### (3) 水害地形環境評価

本章では、物理探査による同定の対象とした埋没破堤地形が形成された過程を推察する。具体的には、まず、破堤氾濫によって堆積した土砂量を算定する。その後、その土砂を流送した氾濫流量を推算し、破堤イベントのスケールを評価する。

#### ①破堤に伴う流出土砂量の推算

本研究で対象とした破堤地形は単独イベントにより形成されたと仮定し、流出土砂量を推算する。まず、城陽市都市計画図（2002年作成）の標高値を地理情報化した。次に、物理探査結果から、破堤イベント以前の地盤面の標高を便宜的に下部境界面（T.P.+13~14m）と仮定した。その後、ArcGISを適用し、算定範囲内（図-6(A)）における、下部境界面より上部の土砂量を破堤に伴う流出土砂量として算定した。表面地形の取り扱いについては、TIN および Natural Neighbor（空間補完法の一種）格子サイズ 10m、95m の3種の方法を用いた。

下部境界面を T.P.+13~14m で変化させた場合の流出土砂算定量の関係を図-6(B)に示す。この結果、破堤に伴う流出土砂量は  $100\sim 200\times 10^4 m^3$  と推算される。これは、2004年10月に発生した円山川立野地区の破堤事例での流出土砂量  $1.7\times 10^4 m^3$  と比較して2オーダー程度大規模である。土砂収支の観点から、流送された土砂は堤体材料のみならず、河道内からの大量の土砂が流出（供給）したことが推察され、当時の木津川が極度に天井川化していたことがうかがえる。

#### ②破堤氾濫流量の推算

前節において算定された流出土砂量  $V=100\sim 200\times 10^4 m^3$  が等流および掃流砂形態条件下で流送されたと仮定し、氾濫流量  $Q$  を次式のように定義する。

氾濫流量  $Q = \text{水深} h \cdot \text{平均流速} U \cdot \text{氾濫時間} t$  (1)  
以下に水深  $h$ , 平均流速  $U$  および氾濫時間  $t$  を算定する。

氾濫流の水深  $h$ : 破堤発生時 (19 世紀後半) の木津川下流域の堤防高は 2 間 (3.6m) 程度であったことから, 氾濫流の水深  $h$  は 1.0~3.0m とする。

氾濫流の平均流速  $U$ : 次式のマニングの平均流公式から求める。

$U = (1/n)R^{2/3}I^{1/2}$ ,  $n \cong (1/24)d^{1/6} = 0.016$  (2)  
ここに,  $n$  は粗度係数,  $R$  は径深,  $I$  は水面勾配,  $d$  は砂粒の平均粒径である。破堤幅が水深と比較して十分に大きいと仮定し, 径深  $R$  は 1.0~3.0m とする。調査エリア付近の木津川河床高は, 1931 年当時で T.P.+14.92m であり, 年平均低水位が 1930 年以前はおおよそ一定であることから, 破堤発生時の河床高を T.P.+15.0m に仮定した。在来地盤高 (堤内地高) が T.P.+13.0~14.0m, 破堤地形の長さが約 1500m とすると, 水面勾配  $I$  は 1/1500~1/750 となる。また, 調査エリア付近における木津川河床堆積物の平均粒径  $d$  を 0.3cm とすると, 式 (2) から氾濫流速  $U = 1.6 \sim 4.7 \text{ m/s}$  と推算できる。

氾濫時間 (氾濫土砂の流送に要する時間)  $t$ : 無次元限界掃流力  $\tau_c^*$  はシールズ図表より  $\tau_c^* = 0.045$  と算定される。無次元掃流力  $\tau^*$  は次式で表される。

$$\tau^* = \frac{\tau_0}{(\sigma - \rho) \cdot g \cdot d} = \frac{R \cdot I}{s \cdot d} \quad (3)$$

ここに,  $\tau_0$  は底面せん断応力,  $\sigma$  は砂粒の密度,  $\rho$  は水の密度,  $s$  は砂の水中比重である。式 (3) から  $\tau^* = 0.13 \sim 0.81$  と算定される。次に, 単位幅当りの掃流砂量  $q_B^*$  を次式 (芦田・道上の掃流砂量式) より求める。

$$q_B^* = 17 \times (\tau^*)^{3/2} \left( 1 - \sqrt{\frac{\tau_c^*}{\tau^*}} \right) \left( 1 - \frac{\tau_c^*}{\tau^*} \right) \quad (4)$$

上式 (4) に  $\tau_c^* = 0.045$ ,  $\tau^* = 0.13 \sim 0.81$  を代入すると, 単位幅当りの掃流砂量は  $q_B^* = 0.21 \sim 8.9$  となる。これを次元を持った値に換算すると,  $q_B = 1.4 \sim 59 \text{ cm}^3/\text{s}/\text{cm}$  となる。破堤堆積物の正味の体積  $V_S$  は, 間隙比  $e$  を 1.0~0.6 と考慮すると,  $V_S = V/(e+1) = 50 \sim 125 \times 10^4 \text{ m}^3$  となり, 単位幅当りの掃流砂量  $q_B$  で, 土砂体積  $V_S$  を運搬するのに必要な時間  $t$  は,  $t = V_S / q_B = 0.84 \sim 88 \times 10^8 \text{ s}$  と推算できる。

上述の手順で算定した諸量を式(1)に代入し, 氾濫流量を求めた。この結果, 氾濫流量は  $10 \times 10^8 \text{ m}^3$  (トン) 程度と推算できた。これは, 伊勢湾台風来襲時 (1959 年 9 月 26~27 日) の木津川下流域における総流量約 3 億トンと同じオーダーであることは興味深い。

#### (4) 主要な結論

①比抵抗探査および表面波探査は相補的であり, これらの統合物理探査により, 地盤

表層に埋没した水害地形 (破堤地形) を機動的 (広域) かつ高精度に同定できることを実証した。地表情報から判別が困難な場合, 非常に有力な探査・同定手法である。また, 堤防等が整備されていない海外の河川管理 (リスクマネジメント) において, 非常に有用な手法である。

②物理探査結果にもとづき, 破堤に伴う氾濫土砂量を算定した。その結果, 氾濫土砂量は  $100 \sim 200 \times 10^4 \text{ m}^3$  であった。これは, 近年の破堤事例と比較して, 非常に大規模な破堤イベントであると推察され, 破堤当時の木津川河道には砂質堆積物が過度に堆積し, 天井川化が著しい状態であったことがうかがえる。

③上記の氾濫土砂量を運搬するために必要な氾濫流量を, 等流および掃流砂形態条件を仮定し, 算定した。その結果, 氾濫流量は  $10 \times 10^8 \text{ m}^3$  と推算された。これは伊勢湾台風 (5915 号) 来襲時の木津川における氾濫流量と同等の出水イベントであったことが考えられる。

今後, 本調査エリアにおいて, 破堤地形の堆積相観察を実施し, 破堤時の堆積物の流動・堆積過程のダイナミクスについて検討していきたい。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 2 件)

- ①東良慶・関口秀雄・釜井俊孝, 埋没破堤地形の統合物理探査による同定とその水害地形環境に関する考察, 水工学論文集, 査読有, 第 54 巻, pp.637-642, 2010.
- ②東良慶・関口秀雄・釜井俊孝, 埋没水害地形の同定: 非破壊物理探査法の適用, 土木学会論文集 B, 査読有, Vol.65, No.2, pp.141-150, 2009.

[学会発表] (計 3 件)

- ①東良慶, 埋没破堤地形の物理探査による同定—木津川下流域を対象として—, 第 44 回地盤工学研究発表会, 横浜 (関東学院大学), 2009 年 8 月 18 日.
- ②東良慶, Geomorphological evolution and sediment budget analysis with the Uji River, Kyoto, 第 4 回洗掘・侵食に関する国際会議, 東京 (中央大学), 2008 年 11 月 6 日.
- ③東良慶, 非破壊物理探査法を用いた埋没水害地形の同定に関する研究, 第 43 回地盤工学研究発表会, 広島 (広島国際会議場), 2008 年 7 月 11 日.

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

東 良慶 (AZUMA RYOUKEI)  
京都大学・防災研究所・助教  
研究者番号: 50464201