

洪水時における河川堤防の侵食と安定について

京都大学防災研究所 正員 村本嘉雄 正員 藤田裕一郎
建設省 正員 ○ 八尋 裕

1. まえがき：河川堤防の脆弱部は高水圧に接して亀裂となり、内部侵食によってパイプ状空洞として発達し、堤体内部に進入していくことが考えられる。本文では、そのような状況を想定して堤体の決壊過程の基礎実験¹⁾に用いた模型堤体に対して、空洞の進行が堤体の安定に及ぼす影響を検討するために、浸透流解析と法面の安定解析とを適用した結果を述べる。

2. 模型堤体とパイプ状空洞：解析の対象とした模型堤体形状は堤体高0.3mと0.5mの2種類であり、いずれも天端幅は堤体高に等しく、表法・裏法勾配はともに2割で、不透水性の強固な基礎地盤上にあるとしている。図-1、図-2の堤体底部に矢印で表したように、堤敷に沿って表法からパイプ状空洞が発生・進行し、脆弱化した断面に高水圧が作用した場合の堤体の安定性を、空洞の性状と先端位置、および外水位を変化させて検討した。空洞の性状は、先端0.05mの部分のみから漏水が生じる場合と全面から生じる場合の2種類を考えた。空洞の先端位置は、堤敷の10等分点のうち堤体内部の9箇所とし、表法尻に最も近い点をパイプ位置1番と呼び、裏法尻に向かって順に9番まで割り付けた。比較のために空洞のない健全な堤体も解析の対象に加え、この場合のパイプ位置を0番とした。外水位は、堤体高の90%、95%の2通りを用いた。

3. 解析手順：このような堤体の安定は裏法のすべり破壊に対する安全率によって検討できる。そこで、上記の堤体高、空洞の性状と先端位置、外水位の組合せ計38通りのそれぞれに対して、まず、四角形要素を用いた有限要素法（堤体高0.3m:341節点,300要素；同0.5m:561節点,500要素）により堤体内の等方性定常飽和浸透流解析を行い、堤体内の流速分布とピエゾ水頭分布、浸出流速、浸出流量、浸出点高さを求めた。ついで、得られた堤体内間隙水圧分布を用いて法面の安定解析をYamagami・Ueta²⁾の手法で行い、最小安全率と臨界すべり面の形状を求めた。この手法は、簡易Janbu法をBakerの考えに基づいて動的プログラミングで定式化したもので、非円弧すべり面に基づく最小安全率を比較的容易に評価できる。模型堤体の土質定数に関する知見が得られていなかったため、それらの値を適宜変化させて安定計算を行った。すなわち、実験に用いた堤体材料が砂であったことを考慮して、単位体積重量 γ は 1.8tf/m^3 で一定とし、粘着力 c は毛管サクションや空気閉塞等による若干の粘着力の発現を考慮して、 $c=0, 0.01, 0.02, 0.05, 0.1\text{tf/m}^2$ と小さな値の範囲で変化させ、内部摩擦角 ϕ は $\phi=25, 30, 35, 40^\circ$ と通常考えられる比較的広い範囲の値を与えた。

4. 浸透流解析の結果：堤体高0.3m、外水位0.27m、全面浸透型の空洞性状で、パイプ位置が0番、4番、6番、8番の場合の堤体内の流速ベクトル分布および等ピエゾ水頭線の分布を図-1、図-2に示す。空洞のない場合の浸潤面の位置と浸出点高さはともにCasagrandeの方法とよく一致し、既報¹⁾のものよりも解析結果が改善されていることが分かる。パイプ位置が0～4番の間では浸潤面の位置、裏法下部の流速とピエゾ水頭にはほとんど変化はない。

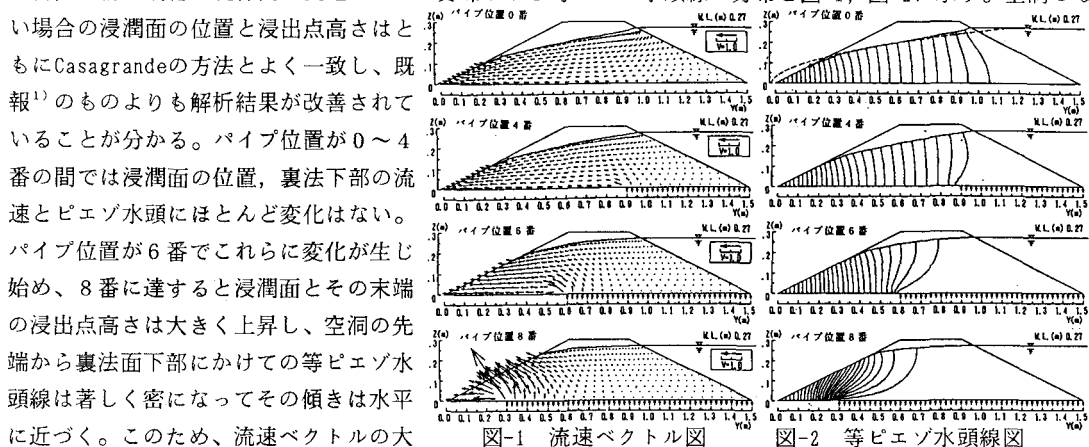


図-1 流速ベクトル図

図-2 等ピエゾ水頭線図

Yoshio MURAMOTO, Yuichiro FUJITA, Yutaka YAHIRO

きさは一様に増大して、その方向は裏法面にはほぼ直角となる。既報¹⁾と同様に、浸出面における透水係数で除した無次元浸出流速の分布は、空洞の裏法面への進行とともに高く鋭いピークを呈し、この分布を積分して堤体高で除した無次元浸出流量 q/kH は、パイプ位置が6番を越えると急増し始める。これらの結果に堤体高、空洞性状、そして若干の外水位の相違が及ぼす影響はほとんど認められない。以上から、空洞の先端が裏法肩を越えて進行すると、裏法面が急激に不安定化していくことが推察できる。

5. 安定解析の結果：解析条件の相違による最小安全率

率 F_s の変化の例を、パイプ位置を横軸にとり図-3に示す。 F_s の値および臨界すべり面の形状は、浸透流解析結果と同様に空洞性状や若干の外水位の相違にはほとんど影響されず、空洞の先端位置に応じて系統的に変化しており、パイプ位置が6番を越えると F_s は急激に低下している。この変化状況は、浸出流量の増加状況とよく対応している。また、粘着力 c のわずかの増加に対して著しく F_s は大きくなって堤体は安定となり、このような小スケールの模型堤体の安定には毛管サクションや空気閉塞等による若干の粘着力の発現が大きな影響をもたらすことが分かる。一方、内部摩擦角 ϕ の変化に F_s はそれほど影響されず、パイプ位置が8番を越えて上向きに力の働く割合が大きくなると、 ϕ の増加が逆に F_s の減少をもたらす結果も生じた。これは、このような事例での特徴であると考えられる。

一般に、臨界すべり面の形状は、 ϕ が一定の時は c が大きいほど、 c が一定の時は ϕ が小さいほど大きく、深部に及ぶようになる。したがって、 c の増加が F_s の大きな増加をもたらした理由の一つは、堤体が堅固な基盤上に築かれていて深部に及ぶすべり面が形成されないとした実験条件にあると思われる。また、堤体高が大きいほど F_s は全体的に小さくなっているが、臨界すべり面の形状には大きな変化は認められない。

つぎに、これらの結果と既報の実験結果¹⁾との対応について述べる。まず、 $c = 0$ とした場合の臨界すべり面の形状は、図-4のようにパイプ位置が0～6番では裏法先付近のみの、パイプ位置が8番では空洞先端上部の局部的な表層破壊を示す。 F_s の極めて低い値から考えて後者は噴砂現象に対応し、これらの結果は裏法の土砂が容易に移動した粗砂の堤体実験に相当すると考えられる。一方、 $c = 0.02 \text{ tf/m}^2$ 、 $\phi = 40^\circ$ の解析結果は、図-5のようにパイプ位置が6番では安定であり、パイプ位置が8番では臨界すべり面が噴砂直後の堤体形状を表現しているようであって、 $F_s = 0.7471$ と1を下回っている。これらの結果には、細砂を用いた実験結果が対応している。すなわち、図-6に示すように空洞の先端位置が裏法肩の場合には、実験開始後17時間経過しても浸出水による若干の侵食が生じただけで堤体は安定に保たれたが、空洞の先端が裏法面中央に達すると急激に不安定となり、若干の堤体変形後わずか2分で噴砂現象が生じた。

6. あとがき：今後は、浸出水による裏法面の構成土粒子の侵食流送過程についても考察していきたい。

【参考文献】1) 藤田・村本・八尋：パイピングによる堤体の決壊過程，京大防災研究所年報，第31号 B-2，1988。

2) Yamagami・Ueta: Noncircular slip surface analysis of the stability of slopes, Journal of Japan Landslide Society, Vol. 23, No. 4, 1986, pp. 8～16。

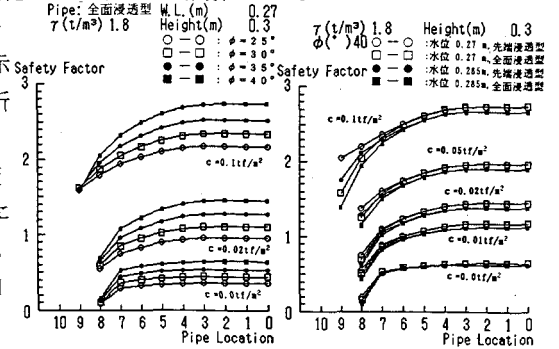


図-3 最小安全率の変化

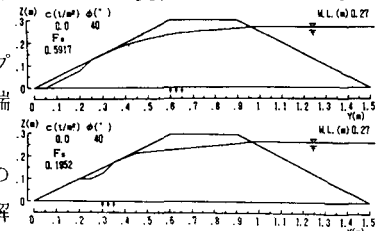


図-4 臨界すべり面の形状

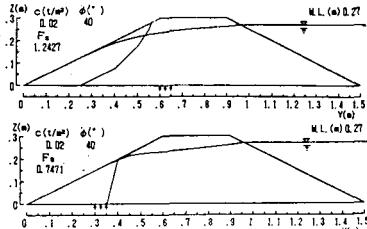


図-5 臨界すべり面の形状

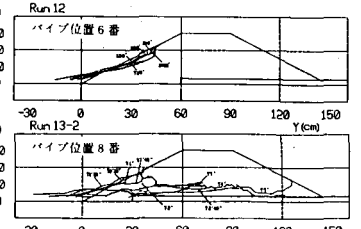


図-6 堤体形状の変化¹⁾