

河川堤防の浸透に対する安全性の照査基準について

京都大学 フェロー会員 ○岡 二三生

1. はじめに

河川堤防の耐浸透性評価に関して、局所動水勾配について調査、簡易解析および詳細数値解析からその見直しを行い、限界となる水平動水勾配について考察を行った。

2. 豪雨による堤防のパイピング被害と限界動水勾配

平成25年9月の台風18号によって京都桂川の堤防では、越流により浸水被害が発生したが、桂川や宇治川の堤防ではパイピングが発生した(淀川河川事務所(2014), 岡(2013))。幸い堤防の破壊には至らなかったが、浸透による裏法斜面や法尻付近で小規模のパイピングや漏水が発生した。このような浸透による変状が発生した地点は8か所であるが、これらの地点での動水勾配による照査では、動水勾配の基準値=0.5を下回っていた地点もあった。京大防災研究所中書島水理実験所の前の堤防でもパイピングが発生したが、基礎地盤は、下部に粘土層があり、基礎地盤の基盤漏水ではなく、堤体裏法斜面への浸出水によるものと考えられる。この事実は、現在の動水勾配による照査基準の0.5を下回っていても、浸透破壊が発生することを示しており、動水勾配の基準を見直す必要があることを示している。これまでの研究によっても、照査の水平動水勾配の見直しが指摘されている(例えば宇野, 2009)。先に述べたように現実の豪雨により基準値が整合しない事実は、現在行われている堤防の照査に関して、その信頼性に限界があり、見直す必要があると考える。

3. 簡易法による限界水平動水勾配

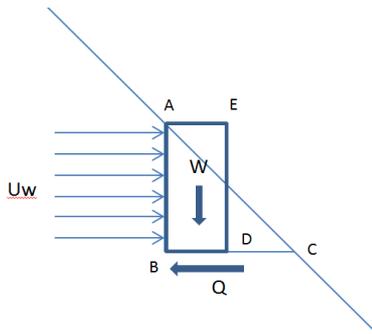
限界動水勾配については、鉛直方向の限界動水勾配として Terzaghi の限界動水勾配が用いられているが、Terzaghi の基準は、その導出が鉛直有効応力がゼロとなる条件であり、その導出は明快である。限界動水勾配については次のように考えられている、鉛直限界動水勾配に関して、Terzaghi の限界動水勾配 $i_c = \frac{G_s - 1}{1 + e}$

で評価すると、約1.0前後であり、安全率を2と考えると約0.5が照査基準となる。一方、水平動水勾配に関しては、赤井(1956)が斜面での単粒子の釣り合いから条件を求め、0.5以下であることを示し、実験と整合することを報告している。ここでは、より明かに検討するため、堤防斜面の局所的な釣り合いから水平の限界動水勾配を求めることとする。赤井(1956)は実験観察により堤防裏法斜面で三角形上の切欠きが形成され、裏法崩壊へと進むと報告している。この事実から、裏法斜面での三角形部の局所的な釣り合い条件を検討し、簡易な限界動水勾配を求めることにする。堤防などの斜面表面付近の水平限界動水勾配を次のように考える。図-1では、ACが法面であるとし、ABの長さを1とし、BCの長さをLとする。平衡にあるABCの安定を考える。浸透による水圧 U_w がABに作用すると、この三角形の部分の力の釣り合いは、
$$U_w = \frac{L}{2} \times \frac{G_s - 1}{1 + e} \gamma_w \times \mu$$

となる。ここで、三角形の代わりに同じ面積の四角形部分 ABDE の土と下部の土との摩擦を考える。摩擦係数を μ とした。上式より、法面表面付近の限界動水勾配は、斜面表面付近での限界動水勾配は

キーワード 河川堤防, 浸透破壊, 動水勾配

連絡先 〒606-8226 京都市左京区田中飛鳥井町 138-1 防災研究協会 TEL075-585-4445oka.fusao.38x@st.kyoto-u.ac.jp



$$i_c = \frac{U_w}{\frac{L}{2} \times \gamma_w} = \frac{Gs-1}{1+e} \times \mu$$

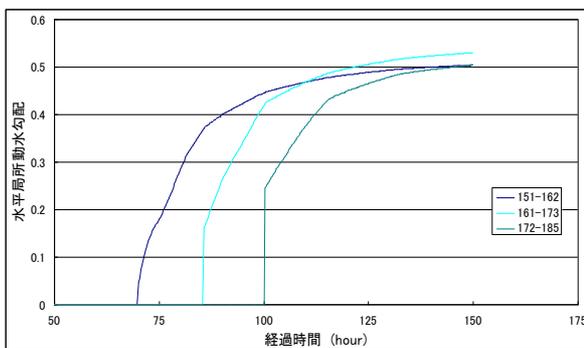
と評価される。摩擦係数 μ は 1.0 より小さく、緩い土で摩擦角 30° とすると、 μ は 0.58 となり、上記と同様、 $\frac{Gs-1}{1+e} \approx 1.0$ の

場合、 $i_c = 0.58$ となり、安全率 2 を考えると、 $i_c = 0.29$ となる。したがって、水平動水勾配は、0.5 以下でも不安定になることになる。

図一 1 堤防法面での釣合い この簡易解析は、基本的に赤井 (1956) の方法に同様のものである。

4. 浸透—変形解析による変形と水平動水勾配

淀川流域の木津川の実堤防に対する浸透—変形有限要素解析を行い、浸透時の水平動水勾配とひずみの発生との対応を解析した⁶⁾。解析手法は不飽和浸透—変形連成解析であり、用いた構成式は砂の繰返し弾塑性構成式 (Oka et al., 1999) であり、使用したプログラム名は LIQCA2D-SF2 である (加藤ら, 2009, Oka et al., 2010)。解析に用いた地盤定数は 3 軸試験などの土質試験から決定した。透水係数と土質定数に関して 3 ケのケースを解析した。堤防は 2 割の勾配で、堤防高さは川裏側からみて 8.3m である。水位上昇速度は 1/3(m/hour) とし、初期水位 1m から約 20 時間で天端付近約 7.7m まで水位を上昇させ、その後水位を一定に保って浸潤および変形を解析した。図一 2 に示すように、川裏側の法尻付近 (斜面, 基礎地盤) で、120-240 時間で局所水平動水勾配はほぼ 0.5 に収束し、その時の偏差ひずみは 2-4% に達した。これより、法尻で大きなひずみが発生するときの水平動水勾配は約 0.5 であると評価できる。安全率 2 をとると、動水勾配の照査地は 0.5 以下となる。この解析に対して、上記 3. の簡易法を適用すると、内部摩擦角 = 33.9° , $G_s = 2.75$, 間隙比 = 0.923 で、水平限界動水勾配 = 0.612 となり、解析結果に近い値となる。また、Terzaghi の限界動水勾配は 0.91 であり、かなり過大である。以上より、局所水平動水勾配の基準値は 0.3 等、0.5 以下に設定することが望ましい。



図一 2 法尻付近での局所水平動水勾配 のひずみが大きくなる時点での動水勾配は 0.5-0.6 となった。

5. 結語

1. 2013 年 9 月の台風 18 号によって、桂川、宇治川では漏水やパイピングが発生したが、従来の浸透に関する安全照査においては安全と判断された地点でも発生している。

2. 簡易浸透解析から、水平動水勾配は 0.5-0.6 程度であり、従来どおり安全率を 2 とすれば、水平動水勾配の照査値は約 0.25-0.3 と評価することができる。

3. 浸透—変形連成解析法による堤防の解析から、法尻

4. 安全率を 2 とすると、水平動水勾配の照査値は現在照査値の 0.5 より小さいと考えるのが妥当である。簡易法で危険な場合は詳細な解析によって照査することが望まれる。また、水平動水勾配が 0.5 以下から 0.3 前後の場合は要注意レベルとすることも考えられる。
5. 今後内部浸食の影響も考慮する必要がある。

謝辞：台風 25 号の被害調査にあたっては国土交通省近畿地方整備局淀川河川事務所のお世話になった、記して感謝する。

参考文献：国土交通省近畿地方整備局淀川河川事務所，平成 25 年台風 18 号による被害調査，2014. 2) 岡二三生，平成 25 年台風

18 号による豪雨災による漏水調査報告，2013. 3) 河川堤防の構造検討の手引き (改訂版)，国土技術研究センター，2012.

3) 赤井浩一，浸透水流による盛り土裏法面の局部破壊について，土木学会論文集，36, pp. 44-49, 1956. 4) 宇野尚雄，浸透破壊現象の展望，地盤工学会誌，57-9, 1-9, 2009. 5) 加藤 亮輔他，土木学会論文集 C, Vol.65, No.1, pp.226-240, 2009. 6) 岡他，河川堤防の調査，再生・強化法に関する研究，平成 16 年—平成 18 年度建設技術研究開発費補助金研究成果報告書，平成 19 年 3 月。