堤防開削調査結果に基づく、堤防の安全性評価

SAFETY EVALUATION OF AN EMBANKMENT BASED ON EXCAVATION INVESTIGATION

古川和弘 *・照屋 純 *・伊藤民夫 *・田中健一 *・池谷 正* Kazuhiro FURUKAWA, Jun TERUYA, Tamio ITO, Kenichi TANAKA and Tadashi IKEYA

This paper provides information on the quantification of the stability of constructed river embankments in Japan. We used non-steady-state seepage analysis with soil hardness values obtained from field geotechnical investigations. The field investigation also included observations of excavated cross sections of the embankments to identify loosened soil. Our research emphasizes that the identification of loosened sections of soil and soil mechanic values are essential for quantifying the stability of river embankments.

Keywords: embankment excavation investigation, non-steady-state penetration style analysis, the slack domain of the embankment, embankment stability analysis

1. はじめに

河川堤防の安全性照査に関する標準的な方法が「河川堤 防の構造検討の手引き(以降 手引きと称す)」¹⁾として 提示されている。これは、これまでの各種調査や観測によ る河川および堤防の水理学的、土質工学的な特性や、堤防 の被害に関する調査・分析事例などの技術的知見をもとに まとめられている。

しかしながら、実務的に割り切った部分も少なからずあ り、適用にあたっては留意する必要があると言われている。

現在、国土技術政策総合研究所と(独)土木研究所では、 管理状況の違いが及ぼす堤防劣化への影響を検討するた め、植生管理が河川堤防の治水機能に与える影響の評価と 安全水準向上のための技術開発に関する研究プロジェクト として、全国規模で堤防の開削調査を実施している。

本稿では、その一環として実施した堤防開削調査(堤防 内部スケッチ、土壤硬度測定等)結果を示すほか、その結 果に基づいて、堤防の定量的な安全性評に向けての検討を 行った。具体的には、堤防の土質構成と土質定数を極力実 態に近づけた解析モデルによる非定常浸透流解析結果と手 引きに基づいて実施した既往解析結果と対比し知見をまと めたものである。

開削調査は、利根川左岸 123km 付近(長島堀樋管撤去 箇所)、永野川右岸 1.5km 付近の堤防を対象(図-1参照) に行った。



図-1 調査位置図

2. 永野川の堤防開削調査

永野川の堤防の開削は、堤防の表層から深さ 2m をバッ クホウによりトレンチ掘削を行った。

(1) 掘削方法

掘削は、突発的な出水を避けるため、図-2に示すとお り川裏側、天端、川表側の3測線を30m ピッチで開削し、 それぞれの調査断面を重ね合わせて同一断面とみなすこと とした(図-3参照)。また、本調査の着目点が堤防表層 の根の侵入状況・緩み領域の把握であることから、とくに スケッチ面、試験(土壌硬度測定)を実施する面は、人力 による仕上げ掘削を行った(写真-1参照)。

(2) 調査内容

堤体の土質構成を把握するため、目視調査と並行し堤体 の表層・内部の各層において試料サンプリングを実施し、 物理試験、力学試験を実施した。とくに堤体の緩み領域の 把握のため、深度方向10cmピッチ、横断方向50cmピッ チで土壌硬度測定を実施するとともに、表層部と堤体内部 を対比するため現場密度試験も合わせて実施した。

また、河川水位や降雨と連動した堤体内の水位(浸潤線) の変動を調査するため、図-4に示す3箇所で水位計(No.1 ~ No.3)、その近傍部に雨量計と河川水位計を設置し計測 を行った。

また、写真-2に示すような根が多く非常に緩んでいる 表層と比較的締まった内部の降雨浸透量を把握するため表 層より15cm、45cmの位置に土壌水分計を設置し計測を 行った。



図-2 調査位置平面図(永野川)



写真-1 川表側の掘削状況(永野川)



・試料採取等内部(締まった領域)

写真-2 土壌水分計の設置状況(永野川)

(3) 堤防開削調査結果

1) 堤防の土質構成

図-5に堤防開削調査時の①土壌硬度測定結果、②断面 写真、③スケッチを示す。図-5③より永野川堤防の土質 構成は、表層から礫混り砂質シルト層が分布し、その下位 には非常に締まった砂質シルト層であった。下位の砂質シ ルト層は川表側・川裏側で出現標高が異なるものの粒度特 性が類似していた。また、上位の礫混り砂質シルト層との 地層境界部に丁張りの様な木杭を確認したことから(図-5



図-5 堤防開削調査結果(永野川)

②参照)、下位の砂質シルト層を旧堤体と判断した。また、 堤防中心部には、砕石の廃材の様な角礫混り粘土が確認さ れた。これは川裏側のトレンチ掘削部のみで確認されたこ とから、施工時に局所的に混入されたものと判断し、解析 モデルでは考慮しないこととした。

2) 堤防の緩み領域

図-5①に示した土壤硬度測定結果では、土壌硬度測定 の貫入量(単位 mm)を色別に整理しプロットしているが、 表層の20cm程度は、水色・青色の貫入量10mm以下のデー タが多く、非常に緩く極めて根の侵入が多いと評価した。

その下位の表層より 20 ~ 70cm 程度の範囲は、黄緑・ 緑・黄色の貫入量 11 ~ 25mm のデータが多く、明らかに 表層 20cm より締まっていると評価できるが、根の侵入は多 い。天端直下部については、貫入量で 20mm 以上の値を示 すデータが多く、30mm 以上を示す箇所も見られる。これ は、車輛の通行の影響と考えられる。文献²⁰ によると「根 の成長の目安は、土壌硬度計が 23mm 以下で根の成長容易、 30mm 以上で根の侵入不可能」との記載があり、本調査結 果でも 20mm 以下の範囲では、比較的に根が多い傾向を示 した。ただし、粘土が多い層の上面沿いに根が密集して分 布している箇所もあり、硬度(締まり具合)のほかに土壌の

保水性や土相も木根分布に影響しているものと考えられる。 3)現場密度試験結果

図-6に永野川の現場密度試験結果を示す。試験位置は 図-5中段の写真に示すが、表層部の試験はGL-15cm、 内部はGL-45cmの地点において試験を実施した。図-6 より、表層部の試験結果は乾燥密度が低く、締固め度Dc(以 降、Dcと称す)は河川堤防の締固め基準である85%を下 回る箇所が見られる。これは、堤防表面の植生の根の影響 と推察される。

一方、内部については、いずれも Dc が 85% を上回っ ており、表層より 10% 程度 Dc が高いことが分かる。



図-6 現場密度試験結果(永野川)

4) 現場観測結果

図-7に土壌水分計の経時変化図を示す。同図より降雨 に反応して土壌水分量が増加する傾向が分かり、その反応 は内部より表層の方が大きいことが分かる。図-8には、 図-7のデータを降り始めからの累積降雨量と土壌水分 量の増分の関係図に整理した。図-8から、累積降雨量が 7.5mm 以降で土壌水分量の増分が、表層と内部で異なる 傾向を示しており、表層の方が降雨の浸透がし易いものの、 累積降雨量が増加すると徐々に内部にも降雨が浸透するこ とが判明した。



図-7 土壌水分計の経時変化図(永野川)



図-8 累積降雨量と土壌水分量増分の関係(永野川)

5) 永野川堤防開削調査のまとめ

堤防開削調査では、目視調査、スケッチ、土壌硬度測定、 現場密度試験、現場観測結果より、総合的に判断して、永 野川堤防の表層の緩み領域は、表層の20cm 程度と評価した。

3. 利根川の堤防開削調査

利根川堤防の開削調査では、昭和36年に完成した長島 堀樋管の撤去工事に伴い堤防の全断面掘削を実施してお り、施工段階ごとに堤防開削調査を実施した。図-9に堤 防開削調査時の①土壤硬度測定結果、②断面写真、③スケッ チ、既往報告書³⁾で作成している④推定地質断面図を示す。

1) 堤防の土質構成

図-9③に示す利根川堤防(左岸123km)の土質構成 は、堤防基礎が地山のLm層(ローム)であり、その下 位にDv1層(凝灰質粘性土)が堆積している。本調査では、 樋管基礎部の Dv1 層を確認し、Dv1 層と Lm 層の境界部 付近からは、地下水の流出を確認した。

地山のLm層の上位には、旧堤体のBk-c1層(凝灰質 粘土混りシルト層)、その上位には旧堤体のBk-s1層(粘 土混り砂質シルト層)を確認した。これらの旧堤体は、既 往調査報告書²⁾によると昭和11~28年に築堤されたこ とが判明している。また、旧堤体を被覆するBk-s2層(砂 層)は、昭和40年以降に築堤されており、本調査で実施 した現場透水試験の結果から、砂層の透水係数は2.2× 10²cm/sであった。この透水性は中位に分類され、河川 堤防の浸透対策としては適さない材料である。このため、 Bk-s2層は、砂質シルト層で被覆されているものと推察さ れる。

図-9④には、既往報告書の推定土層断面図を示すが、 本調査の図-9③と旧堤体のBk-c1層、Bs-s1層の形状・ 位置が異なっており、点で実施するボーリング調査では、 堤防開削調査と同様の精度で、土層断面図を作成すること が困難であると言える。

また、**写真-3**に示す通り表層には多くの根が見られ、 GL-2m 付近までは太い根の侵入が見られた。**写真-4**に は川裏側の掘削状況の写真を示すが、地表面から0.7~ 2m 程度にモグラの巣跡の痕跡が見られ、堤体の表層より 2m の範囲については、根やモグラが侵入できる範囲であ ることが判明した。



写真-3 川表側の掘削状況(利根川)



写真-4 川裏側の掘削状況(利根川)







図-9 既存調査結果と堤防開削調査結果(利根川)

2) 堤防の緩み領域

図-9①に示した利根川の土壌硬度測定結果では、表層 の20cm程度は、貫入量0~15mmの値のデータが多い。 表層下位のシルト層は、貫入量10~20mmを示すデータ が多く根の侵入が多い。このため、根の侵入が測定結果に 影響したと判断した。なお、Bk-s2層は全体に10mm以 下が多いが、砂層であるため開削に伴う緩みが影響したも ので、堤防自体の緩みが進んだものではないと判断した。 一方、天端直下部、川裏側小段部については、車輛の通行 の影響で貫入量20mm以上が多いと判断した。土壌硬度 測定の結果、根の侵入状況等から、利根川堤防の緩み領域 は、永野川同様に表層より20cmと評価した。

4. 永野川の非定常浸透流解析結果

(1) 解析入力条件

本調査の解析では、①表層の緩み領域に着目し表層の 20cm 部をモデル化し、表層、内部の礫混りシルト層、旧 堤体の砂質シルト層と要素を区分して解析を行った。②各 要素の土質定数は、原位置での現場密度試験、室内透水試 験結果より設定した。

また、手引きでは、洪水時の入力条件(降雨強度、洪水 波形)を設定して解析を実施するが、本解析では解析モデ ル、解析結果の妥当性を確認するため、実測降雨・実測河 川水位データを解析の入力条件(図-10参照)とし、非 定常浸透流解析を実施し、解析結果と堤体内水位計の実測 値を比較検証することで、解析モデルの妥当性を確認した (図-11参照)。なお、本検討では、表層の緩み領域が解



図-10 解析の入力条件とした観測結果

析結果にどのように影響を及ぼすかを確認するため、表層 の透水係数をパラメーターにした感度分析を実施した。パ ラメーターは、堤体に不適切な材料で盛土した場合から、 堤体に表面遮水工法を適用した場合を想定し、 1.0×10^{-2} ~ 1.0×10^{-7} cm/s に変化させて解析を実施した。



図-11 解析のイメージ図

(2) 解析結果

図-12に土質試験結果を適用した解析結果を示す。同 図は、図-11に示す堤体内水位計No.1(観測位置は図-2、 図-4参照)の実測値のピークとなる解析上の着目時間(61 時間)の浸潤線図を整理した。同図より実測値と解析値が おおむね近いことが分かる。



図-12 土質試験結果を適用した解析結果(永野川)

図-13に表層をパラメーターとした解析結果を示す。 浸潤線は、表層の透水係数に現地材料の室内試験を適用した Case1 以外に、表層の透水係数をパラメーターにした 感度分析結果(Case2 ~ Case7)もプロットしている。同 図より、現地の材料の透水試験結果を適用した Case1 が 最も実測値と近い浸潤線を示す結果となった。また、表 層の 20cm 部の透水係数を変化させることで、浸潤線が大 きく変わり、とくに表層 20cm の透水係数を 1.0 × 10³ ~ 1.0 × 10⁵ cm/s に変化させることで、浸潤線が大きく変動 する結果が得られた。手引きに準拠して堤防の安定性評価 を行う場合、「土質調査結果や築堤履歴等を考慮して土質 断面図をモデル化し、土質定数は、原位置における土質試 験および室内の土質試験に基づいて定数を設定する」とさ れている。しかし、実際の解析では、土質調査や土質試験 結果が不足することが多く、浸透流計算に必要な土質定数 は、経験的に知られている値を適用するケースが多く見ら れる。例えば飽和透水係数は、シルトを主体とする場合で ks=1.0 × 10⁻⁵ cm/sec、粘性土を主体とする場合で ks=1.0 × 10⁻⁶ cm/sec を適用し、不飽和の透水特性についても、実 務的に割り切って手引きの図表より設定して解析を行う。

解析の結果、土質構成と土質定数を極力実態に近付けた 解析モデルで、解析値と実測値がおおむね近い値を示した ことから、解析モデルの有効性が検証できたと考える。



図-13 表層をパラメーターとした解析結果(永野川)

5. 利根川の非定常浸透流解析結果

(1) 解析入力条件

利根川堤防の解析では、既往の堤防安全性評価業務にお いて同断面(利根川 123km)で、手引きに基づき浸透に 対する堤防安全性評価が実施されている³⁾。そこで、本 解析では、解析モデルの設定において堤防開削調査結果を 反映した解析を実施し、既往解析結果と対比することで堤 防の安全性評価に差異が表れるか確認した。

解析は、手引きに基づき、洪水時の入力条件(降雨強度、 洪水波形)を設定して非定常浸透流解析を実施し、川裏側 は最も危険側となる計画高水位終了時点の浸潤線において 安定計算を実施した。一方、川表側は、最も危険側となる 洪水終了時点の浸潤線において安定計算を実施した。なお、 図-14に本解析で適用した解析モデルを示す。同図には、 既往解析ならびに本解析で適用した透水係数を併記してい るが、本解析では堤体の各土層に現場透水試験ならびに室 内の透水試験結果を適用している。



図-14 解析モデル(利根川)

(2) 解析結果

図-15 に解析結果を示す。同図には、既往解析結果を 点線で併記している。対比の結果、既往解析と本解析で浸 潤線に大きな差異は認められない。ただし、計画高水位終 了~洪水終了に際して、今回の解析結果の方で残留水位が 若干高い結果となった。

本解析と既往解析の差異を整理すると、①土層モデルで Bk-s1層の形状が本解析の方が大きく、川表側にシフトし ている。② Bk-s1層の透水係数は本解析が 10⁻³cm/s オー ダーに対し既往解析では 10⁻²cm/s オーダーである(1 オー ダーの差が見られる)。③表層の透水係数は、本解析が 10⁻⁴cm/s オーダーに対し、既往解析では 10⁻²cm/s オーダー である(2 オーダーの差が見られる)。

表層の透水係数が2オーダー異なるのに対し、計画高 水位終了時の浸潤線の高さが変わらない理由は、堤体内に 10⁻²~10⁻³cm/sと比較的に透水性の高い材料が広範囲で 分布しているためと推察される。また、計画高水位終了~ 洪水終了に際して、今回の解析結果の方で残留水位が若干 高い原因としては、堤体内に広範囲に分布するBk-s1層 の透水性の差により、浸潤線の低下速度に差が見られたも のと推察される。

なお、表-1に堤体の安全性評価結果を示す。同表の左 側には盤ぶくれの検討結果、同表中央には計画高水位終了 時の川裏側の安定計算結果、同表右側には洪水終了時の川 表側の安定計算結果を示している。安定計算の結果、本解 析は残留水位が高いため、すべり安定性の安全率が低く なる結果となった。堤体の安全性評価については、既往 解析と評価は同じ結果となったが、既往解析に比べ安全 率が0.56も低下している。結果の要因としてあげられる Bk-s1層の透水係数については、今回、現場透水試験の結 果を適用しており、堤体材料の物性値を正確に把握するこ とが重要であると言える。また、盤ぶくれの評価は異なる 評価となったが、これは、土層、単位体積重量、水圧の相 違によるものである。



図-15 本解析結果と既往解析結果の比較(利根川)

表-1 堤体の安全性評価結果)

			③計画高水位終了時			④洪水終了時			
区分	被覆土層 G/W			Fs 川裏側			Fs 川表側		
	結果	評価	許容	結果	評価	許容	結果	評価	許容
H21解析	1.41	OK	G/W>1.0	1.77	OK	Fs≧1.6	1.28	ОК	Fs≧1.0
既往解析	0.92	NG	G/W>1.0	2.0	OK	Fs≧1.6	1.84	ОК	Fs≧1.0

6. まとめ

- ① 堤防開削調査によって、堤体表層 20cm 程度には、緩 み領域が存在することを確認できた。
- ② 表層 20cm の透水係数を $1.0 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-5}$ cm/s と変化させた場合、解析結果の浸潤線は大きく変動す る傾向が得られた。
- ③ 堤体の安全性を評価するには、堤体表層の緩み領域を 考慮することと、堤体材料の物性値を正確に把握する

ことが重要である。

④ ボーリング調査は線の調査であり、ボーリング調査数本で堤防開削調査と同程度の精度の解析モデルを作成するには限界がある。このため、堤防断面や縦断方向の詳細な情報が得られる物理探査とボーリング調査を併用することが有効と考える。

7. 今後の課題

本稿で得られた知見の有効性をさらに検証し、今後の堤 体の安全性評価に活用するためには、以下の検討課題が挙 げられる。

・データの蓄積・収集

本調査では永野川に観測機器を設置し、降雨、河川水 位、堤体内水位、土壌水分を観測することが可能となり、 貴重なデータを収集することが出来た。しかし、堤体内 水位が反応したのは3月初旬のみであり、降雨量の多い 時期も含め貴重なデータを継続的に収集することが重要 である。

・堤内地側の地下水位把握

観測や解析の精度を上げるためには、解析の境界条件 である堤内地側の地下水位の変動を通年で把握する必要 があり、周辺での地下水位の観測孔設置が望まれる。

・物理探査の有効性確認

堤防開削調査では、堤体内の複雑な土層構成を把握す ることができた。この貴重なデータを活用するためには、 堤防開削調査付近において物理探査を実施し、物理探査 結果と堤防開削調査結果を対比することで、物理探査の 有効性の検証や物理探査での緩み領域の把握の可能性に ついて検討することは、有効と考えられる。

・表層を考慮したモデルの検証

他の河川で実施している堤防開削調査結果等も踏ま え、堤体表層以下の下層の土質条件(透水係数)が異な るモデルで浸透流解析を実施し、表層を考慮したモデル の有効性を検証することは重要と考える。

参考文献

- 国土技術研究センター:河川堤防の構造検討の手引き、 H14.7月
- 日本道路公団:設計要領第一集 土工・舗装・排水・造園、 S53.4 月
- 3) 利根川上流堤防安全性評価検討業務 報告書、H18.3 月