

石狩川の丘陵堤防に関する研究

A study on the characteristic of hill levee in ISHIKARI river basin

北海道大学工学部
北海道大学工学研究科
北海道大学工学研究科

○学生員 手島広樹 (Hiroki TEJIMA)
フェロー会員 鈴木英一 (Eiichi SUZUKI)
正会員 山口里実 (Satomi YAMAGUCHI)

1. はじめに

近年、今後の治水対策のあり方に関する有識者会議の中で、「出来るだけダムに頼らない治水」への政策転換が検討されてきている。ダムに頼らない為の代替案として既存の堤防の強化が考えられ、その中で新たに「壊れづらい堤防」という概念が新しい治水対策の一つとして立案されている。ここでいう「壊れづらい堤防」とは¹⁾計画高水位以上の水位(堤防高より高い場合を含む)の流水に対しても急激に決壊しないような粘り強い構造の堤防であるとされる。

堤防の安全度計算は一般に「河川堤防の構造検討の手引き(財団法人国土技術センター)」(以下「手引き」)を用いて数多く行われている。しかし、堤防形状や土質、また基礎地盤などを始めとする特性によって堤防の安全度がどのように変化するかという事をまとめる研究はあまり行われていない。その理由としては、堤防の形状や基礎地盤が多様である事や解析の際に用いる外力条件も堤防の条件によって異なるため一概にまとめるのが難しい事などが理由として挙げられる。

そこで、本研究では「壊れづらい堤防」の意義を明確にするために必要な基準を検討していく。すなわち、前述のような堤防の特性及び水位が計画高水位を越える場合などの外力条件によって堤防の安全度がどのように変化するかという事の検討を行う。「壊れづらい堤防」を検討する為のベース作りとしても、堤防の特性によってどの程度安全度が変化するかという事を定量的に示す必要性は大きいと考えられる。

今回研究のモデルとして採用した石狩川は北海道中央部に広がる、流域面積全国二位、長さは全国三位の一級河川である。本線の堤防は丘陵堤と呼ばれる非常に緩やかな法面をもつ堤防形状であり、今回はその堤防形状が浸透破壊、裏法すべり破壊に対してどのような影響を持つのかという検討を行う。同時に、従来のように計画高水位だけでなく天端高まで水位が上昇した場合の検討を行う事で外力条件が堤防の安全度に及ぼす影響についても検討を行う。

2. 石狩川の堤防の特徴

2. 1 石狩川流域の基礎地盤

石狩川の基礎地盤は上流部では砂や砂礫が中心の基礎地盤となっており、中流部では砂や粘土、下流部は泥炭や粘土が堆積した軟弱地盤となっている。これらの違いは、北海道の土地変遷に起因して起こったものである。

北海道の地形は第四紀更新世後期以降に大きな変遷を

遂げた。約38万年前の北海道は石狩低地帯で2つに分けられていたが、氷河期の終焉と共に起きた海進、高潮期の海退によって出来た潟湖に粘土やシルト、泥炭が主に堆積し、石狩川下流部に今日の厚い軟弱地盤が形成された。約3万年前に起こった支笏火山噴火の噴出物によって太平洋側の旧石狩川河道が埋め立てられ、それにより石狩川は現在のように日本海側に河口部を持つ事となった。また上流部では山岳地帯から流れ落ちた粒径の大きい土砂が堆積したため基礎地盤は砂礫が中心となっている。

2. 2 石狩川の堤防内部構造

図-1は石狩川下流部、KP37.0地点左岸側の築堤年次を示したものである。この図から分かるように昭和38年から平成2年にかけて繰り返し堤防の盛土が行われている。これに伴い堤体内部の土質構造は極めて複雑な内部構造となっている。これは石狩川下流部の堤防に多く見られる状況であり、前述の通り石狩川下流部の堤防は泥炭層を始めとした超軟弱地盤上に建造された堤防であり、頻繁に地盤沈下が発生していた。その都度盛土を行ってきた為このような複雑な築堤履歴を持つ。

2. 3 石狩川の堤防形状

石狩川の堤防は堤防高さに対して非常に緩やかな長い法面を持つ、丘陵堤と呼ばれる堤防形状である。広大な河川なので発生した掘削土の量も莫大であり、これを堤体の盛土の材料として使用したためこの形状が採用された。

本研究では特にこの丘陵堤という構造が堤防の安全度にどのような影響を及ぼすのかという事を、二次元浸透流解析を行う事で浸潤線の位置や間隙水圧を算出し、その結果を用いてパイピング破壊やすべり破壊の安全度についての検討を行う。

3. 堤防の形状及び河道内水位が安全度に及ぼす影響についての基本的特性の検討

3. 1 比較検討の為のモデル堤防設定

基本的な特性を検討するために堤体及び基礎地盤には均一な砂質土を設定し、その土質係数は表-1に示す値を設定した。本研究ではこのモデル堤防を用いて、以下の2点について考察を行う。

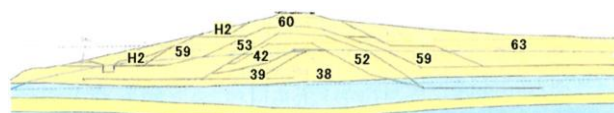


図-1 石狩川左岸 KP37.0 築堤年次

検討項目 a) 堤防形状の違いによる安全度への影響を確かめる。

検討項目 b) 河道内水位が計画高水位を越えた場合の影響を確かめる。

まず検討項目 (a) より、図-2 に示すように高さ：表法面をそれぞれ 1 : 10 (以下 10 割堤) 及び 1 : 5 (以下 5 割堤) とした堤体モデルを設定し、解析結果を比較する事で丘陵堤形状が安全度に与える影響を検討していく。ここで、両者ともに裏のり面は 1 : 5 としている。

次に、(b) では図-3 に示すように降雨の影響を排除して最高水位の継続時間を十分に長く 270 時間に設定した解析 (以下外力条件 1)、及び図-4 に示すように降雨の影響も考慮した解析 (以下外力条件 2) を行った。その中で水位は計画高水位の場合及び天端高まで上昇した場合の 2 種類を設定した。表-1 に示すように (a) と条件を組み合わせる事によりモデル堤防に対して 4 種類の解析を行う事となる。

表-2 に本検討の条件を示す。モデル堤防に対して 4 種類の解析を行い、結果を比較する事でそれぞれの堤防特性が安全度に及ぼす影響を検討する。本研究ではモデル堤防で行った解析の結果を基本的な丘陵堤の特性とし、それを実際の石狩川の堤防を再現した堤体で行った解析の結果を検討する際の指標とする。

3. 2 石狩川における実際の堤体の設定

対象とした地点は石狩川下流部 KP10.9 地点から上流部 KP89 地点までの計 8 地点である。北海道開発局による堤防調査結果 (以下「調査結果」) に基づき、浸透流解析及び斜面安定解析を行う事が可能な点を図-5 のように上流、中流、下流からそれぞれ 2~3 箇所選出して解析を行った。堤体構造や土質係数は「調査結果」に準じて設定し、(b) についての考察を行う為に外力条件は図-4 のような降雨波形と外水位波形の組み合わせを用いて検討を行った。

モデル堤防との比較は堤防形状のみで検討する。堤防形状が安全度に与える基本的な特性について類似点及び相違点を明らかにし、実際の堤防がもつその他の特性についても検討を試みる。なお、実際の堤防は KP68.6 と KP73 だけが 5 割堤で、それ以外は 10 割堤である。ここではモデル堤防と同様に堤防形状の違いによる影響を考察する為に 10 割堤は 5 割堤に、5 割堤は 10 割堤になるよう表法面の長さを変更したモデル堤防による解析を行った。

4 堤防安全度の検討手法

本研究では堤体安全度を評価する方法としてパイピング破壊及びすべり破壊に対する安全度を用いる。これらを実評価するためには堤体の浸潤線や間隙水圧が必要になるため、二次元浸透流解析を行った。

4. 1 二次元浸透流解析

非定常浸透流計算により、浸潤面の位置や水頭変化を追跡し、着目地点の浸潤面の形状と水頭分布から局所動水勾配等の計算を行った。堤体の安全性の詳細評価を目的とし

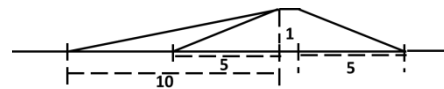


図-2 モデル堤防の堤防形状

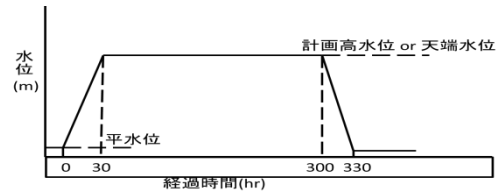


図-3 降雨条件を無視した外水位波形 (外力条件 1)

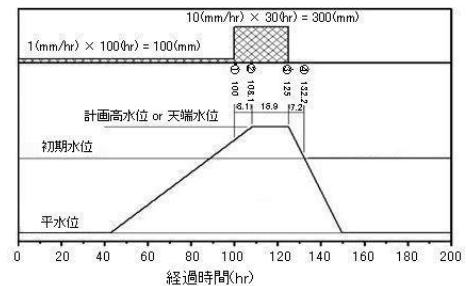


図-4 降雨条件を考慮したと外水位波形 (外力条件 2)



図-5 解析対象地点プロット図

表-1 モデル堤防の土質係数

	透水係数 k(m/s)	比貯留係数 Ss(1/m)	湿潤密度 γ t(kN/m3)	粘着力 c(tf/m2)	内部摩擦角 (°)
堤体モデル	5. 0×10 ⁻⁴	1. 0×10 ⁻⁴	16.9	0	35
基礎地盤	1. 0×10 ⁻⁵	1. 0×10 ⁻⁴	17.2	0	30

表-2 比較検討の為の条件

	堤防形状	水位高さ
Case.1	10割堤	計画高水位
Case.2	5割堤	計画高水位
Case.3	10割堤	天端高
Case.4	5割堤	天端高

て非定常の飽和・不飽和の二次元浸透流計算を実施し、浸透流計算結果から任意時間の浸潤面を求めて局所動水勾配の算出を行うものとする。

なお、解析に用いた計算ソフトは「VGFlow2D」(Forum8)である。非定常の飽和・不飽和浸透流計算の基本式は次のとおりである。

$$\frac{\partial \phi}{\partial x} \left(k \cdot \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \cdot \frac{\partial \phi}{\partial z} + k \right) = (C + \alpha \cdot S_s) \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (1)$$

ここで、 x ：堤防横断面の水平方向の軸、 z ：堤防横断面の鉛直方向の軸、 k ：透水係数(m/hr)、 ϕ ：圧力水頭(m)、 C ：比水分容量(1/m)=水分特性曲線の接線勾配、 α ：1

の場合飽和領域, 0 の場合不飽和領域, S_s : 比貯留係数 (1/m), t : 時間(hr)である。

また, 有限要素法による浸透流計算では, 要素の分割度合によって得られる浸潤面の形状や流速ベクトル等が変化する. 分割要素等については「手引き」に準じて, 堤体の鉛直方向の要素分割高さは堤防高の 1/10 以下とした。

4. 2 パイピング破壊

パイピングに対する安全性は, 裏のり尻近傍の基礎地盤の状況により異なる. 浸透に対する安全性の照査基準は「手引き」によると表-3に示すとおりである。

なお, 今回選出した 8 地点は全て被覆土層が無い場合なので浸透破壊に対する安全性は局所動水勾配 (以下動水勾配) で判定する. 裏のり尻近傍の基礎地盤が表層から砂質土や礫質土などの透水性地盤である場合は, 図-6に示すように浸透流計算の結果から, 裏のり尻近傍の基礎地盤における鉛直方向および水平方向の動水勾配を求め, これが照査基準値の $i < 0.5$ を満足できるかどうかにより安全性が判定される. モデル堤防では降雨終了時である 130 時間の時の動水勾配を算出し, 石狩川の実際堤防には「調査結果」に則り最高水位終了時の時間で算出した。

$$iv = \frac{\Delta\phi}{dv} = \frac{\Delta\phi - dv \cdot \gamma W}{dv} \quad (2)$$

$$ih = \frac{\Delta\phi}{dh} = \frac{\Delta\phi}{dh} \quad (3)$$

ここで, iv : 鉛直方向の局所動水勾配, ih : 水平方向の局所動水勾配, $\Delta\phi$: 節点間の全水頭差, $\Delta\phi$: 節点間の圧力水頭差, dv : 節点間の鉛直距離, dh : 節点間の水平距離, γW : 水の密度 ($\gamma W = 1.0 \text{ t/m}^3$), ϕ : 各節点の全水頭, ϕ : 各節点の圧力水頭 である。

4. 3 すべり破壊

浸透流計算の結果によって得られた最も危険と想定される浸潤面をモデル化した断面の設定を行い, 図-7に示す全応力法に基づくすべり破壊に対する最小安全率の算出を行った. なお, 解析に用いた計算ソフトは「斜面の安定解析 Ver.8」(Forum8) である。

$$Fs = \frac{(cl + (W - ub) \cos \alpha \cdot \tan \phi)}{W \cdot \sin \alpha} \quad (4)$$

ここに, Fs : 安全率, u : すべり面の間隙水圧(kN/m²), W : 分割片の重量(kN), c : すべり面に沿う土の粘着力(kN/m²), l : 円弧の長さ(m), ϕ : すべり面に沿う土の内部摩擦角($^\circ$), b : 分割片の幅(m) である。

なお, 円弧の中心点は形状や水位が堤防に与える基本的特性を確かめるためにモデル堤防では全ての条件において同一な点にして解析を行った. 石狩川の実際の堤防モデルでは「調査結果」に準じて複数の中心点, 円弧の長さで解析を行いその内の最少の値を安全度として算出した. なお浸潤線, 等ポテンシャル線の位置は前述の二次元浸透流計算で局所動水勾配を算出した時刻の結果を利用した。

必要安全率としては, すべり破壊に対する安全性の照査基準は「手引き」では, 表-4のように示されており, 表のりと裏のりの違いや築堤履歴および基礎地盤の複雑さを考慮して断面毎に設定を行った。

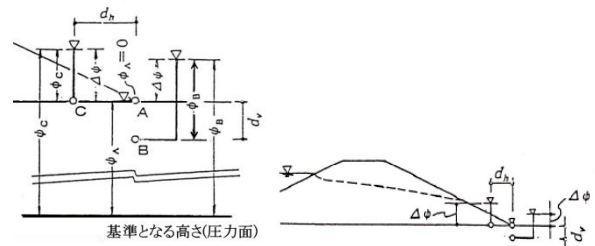


図-6 局所動水勾配の算出の考え方

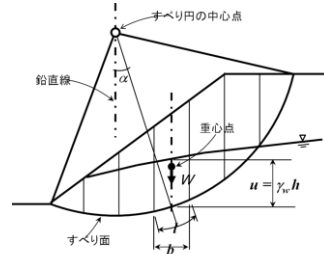


図-7 分割法による安定計算図

表-3 浸透に対する安全性の照査基準

項目	部位	照査基準
すべり破壊 に対する安全性	裏法	$Fs \geq 1.2 \times \alpha 1 \times \alpha 2$ $\alpha 1$: 築堤履歴の複雑さに対する割増係数 複雑な場合1.2, 単純な場合1.1, 新設堤防の場合1.0 $\alpha 2$: 基礎地盤の複雑さに対する割増係数 被災履歴あるいは要注意地盤がある場合1.1, 被災履歴あるいは要注意地盤が無い場合1.0

表-4 すべり破壊に対する安全性の照査基準

項目	部位	照査基準
パイピング破壊 に対する安全性	被覆土なし	$i < 0.5$
	被覆土あり	$G/W > 1.0$ G : 被覆土層の重量 W : 被覆土基底面に作用する揚圧力

5 モデル堤防の検討

まず外力条件 1 の時の堤体モデルについて, 図-7に堤体モデルの各 Case 毎の浸潤線が時間によってどのように変化するかという事に注目した. 図にあるように, 浸潤線は初期段階では時間経過によって大きく変化するが, 100 時間を過ぎた辺りから変化が小さくなっていく事が分かる. また (a) と (b) における 100 時間の時点での浸潤線を比較すると, (a) では浸潤線が裏法尻に到達していないが (b) では到達しているのが分かる. これは水面の位置から裏法尻までの距離の違いによるもので, この図からも 10 割堤の方が 5 割堤よりも長い時間安全度を保ていられるという事が言える. (c) と (d) の浸潤線を比べると 130 時間以降の浸潤線はどちらもほぼ同じ位置にあり, 漏水が起きている事を示している. この事からも水位が天端まで達した後はパイピングより漏水に対する安全度は 10 割堤でも 5 割堤でも等しいと言える。

裏法面の安全度については表-6に示した. 表より, 安全度は動水勾配の時と同じように堤防形状や水位の高さの違いによって変化している. 堤体モデルの解析断面は Case を変えても同一なので条件によって変化するのは間

隙水圧のみであり、これは図-7に示した浸潤線の位置によって説明出来る。

6. 石狩川の堤体における検討

表-7の中で値がマイナスを示しているものは、川裏側から川表側への動水勾配又は地表から地下に向けての動水勾配を示している。これは雨水の影響と考えられ、降雨条件の方が河川水位の条件よりも強い影響を及ぼしているのだと考えられる。

また10割堤と5割堤を比較すると水平方向の動水勾配の差が大きく断面の拡大が浸潤長を長くし勾配の緩和に寄与しているものと考えられる。この事は表-8の裏法面安全度の差にも表れており、裏法勾配はどちらも5割であるが10割堤の方が裏法面のすべり面の間隙水圧が小さい事を意味している。

7. 終わりに

今回の解析では一般的な丘陵堤モデルを設定し、堤防の形状及び河道内水位などの外力条件を変化させて複数の解析を行う事で丘陵堤という構造が堤防の安全度に及ぼす影響を検討した。その解析結果を石狩川の堤体で行った解析の結果と比較する事で石狩川の堤防の特性を導き出し、得られた知見を以下に記す。

1) 河川の水位が計画高水位までの場合には5割堤より10割堤の方が法尻までの浸透長も長く浸潤線も上昇し難い事より、パイピング破壊に対してもすべり破壊に対しても安全度は高い。

2) 天端高まで水位が上昇した場合は浸潤線が裏法面まで到達する時間は極端に短くなるため堤体からの漏水が発生する事となるが、その時間は10割堤も5割堤もほとんど差が無い。

謝辞：今回の研究を行うにあたって、岩崎理樹氏には論文の道筋を立てる際に多くの貴重な意見を賜りました。笠原猛には論文の構成等において丁寧なご指導を頂きました。お二方に心よりの感謝の意を示し本文の結びとする。

参考文献

- 1) 今後の治水対策のあり方に関する有識者会議：今後の治水対策のあり方について 中間とりまとめ（修正案）、2009
- 2) 財団法人国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き、2004
- 3) 北海道開発局：岩見沢河川事務所管内堤防調査検討業務、同江別河川事務所管内堤防調査検討業務、同滝川河川事務所管内堤防調査検討業務、2008
- 4) 北海道開発局：石狩川下流外堤防調査検討業務報告書、同石狩川中流外堤防調査検討業務報告書、2008

図-7 モデル1（外力条件1）の浸潤線図

a) Case 1



b) Case2



c) Case3



d) Case4



表-5 モデル堤防の局所動水勾配 (130hr)

	Case.1		Case.2		Case.3		Case.4	
	ih	iv	ih	iv	ih	iv	ih	iv
外力条件1	0.012	0.032	0.131	0.068	0.137	0.135	0.137	0.137
外力条件2	0.135	0.096	0.135	0.102	0.136	0.134	0.137	0.136

表-6 モデル堤防の裏法面安全度

	Case.1	Case.2
外力条件1	2.39	2.09
外力条件2	2.06	2.03

表-7 現状再現モデルの局所動水勾配 (130hr)

KP	Case.1		Case.2	
	ih	iv	ih	iv
10.9	0.08	-0.148	0.108	-0.107
15.2	-0.071	-1.255	-0.054	-1.243
41.113	0.085	-0.055	0.101	-0.002
52.33	-0.113	0.093	-0.123	0.118
68.6	0.248	0.332	0.314	0.662
73	0.246	0.18	0.4	0.48
76.5	-0.081	0.039	-0.103	0.05
89	0.118	0.091	0.12	0.178

表-8 現状再現モデルの裏法面安全度

KP	Case.1	Case.2
10.9	3.13	2.01
15.2	1.53	1.1
41.113	3.21	3.11
52.33	4.02	3.96
68.6	1.45	1.11
73	2.92	2.47
76.5	3.66	3.34
89	1.73	1.53