

越流水による堤防法面の破壊特性

The characteristics of Slope failure of embankments by overtopping

建設省 土木研究所 正 吉野 文雄

正 土屋 昭彦

正 須賀 堯三

1. まえがき

河川堤防は通常、土砂で作られるため水流に対してきわめて弱く、越流によって裏法面や天端が洗掘され、堤体断面積が減少し、力学的安定を失い全面破壊へと進行する。堤防の破壊原因の大部分は越流によるものであって、これは堤体の構造的欠陥というよりは計画流量のとり方などの水文学的要因によるものといえるが、治水投資面の制約や河川周辺の土地の高度利用が河道拡巾や堤防断面の拡大を困難にしている現状から計画規模を上まわる出水に対しても被害を最小限に抑えるための堤防補強策が必要とされ、本来、越水を考慮していない堤防をいかにすれば、若干の耐越流性をもたせて、治水安全度を向上させられるか、ということが研究課題とされるようになった。越流氾濫した過去の事例を調査したところ、適切に管理された表面植生をもつ堤防、アスファルト舗装があつて越流水が1ヶ所に集中し浸食を増大する効果を防いだ堤防等では、小規模の越流に対し耐えて災害を減少した事例も見られており、堤防の越流破壊のメカニズムを明らかにし補強対策を考案する立場から、若干の実験的検討を加えたものを、以下に報告する。

2. 法面浸食およびその防止工に関する基礎実験

堤体の法面浸食現象は、越流水の災用力とそれに対する堤体土の耐浸食抵抗性とで評価できるものと考えられる。一般に非粘着性材料の流水による浸食特性は、水理学的には流砂量公式や限界掃流力等の解析で表現されることが明らかにされているが、これらは緩勾配の水路内でのものであつて、ここで問題とするような、法面勾配が、1割～2割といった急斜面の堤防法面には適用しえないだろうこと、堤体の土質が若干の粘着性をもつものが多いこと、を考慮し、小規模な堤防模型（高さ40cm、巾20cm、1～2割勾配）を用いて、基礎的な越流浸食実験を実施した。実験使用土は利根川高水敷掘削土（砂質ローム土）で、土の物理的諸性質は次の

均等保数 $U_c = 2.6$

最適含水比 $w_{opt} = 25\%$

最大乾燥密度 $\gamma_{dmax} = 1.42 \text{ g/cm}^3$

粘着力 $C = 0.02 \text{ kg/cm}^2$

透水係数 $k = 3.1 \times 10^{-4} \text{ cm/S}$

この越流浸食実験の結果は既に第33

回土木学会年講で報告済みであり重複をさけるため結果のみを以下に要約しておく。

越流水による浸食量を水路側面から観測した浸食面積 A で表わすと、 A は時間的にほぼ一定の増加傾向をもち、その増加割合 dA/dt は、法面勾配および越流量、堤防の締固めの程度（乾燥密度で表わす）、に左右されることが認められた。これを総括的に図示すると図-1となる。この図から、堤体の密度が大きくなると法面の浸食速度が小さくなることが考えられる。なお縦軸は浸食速度を単位巾越流量で除した、形式的な無次元数、横軸は乾燥密度、を表わす。また法面勾配が1割と2割の堤防については、1割堤防の初期

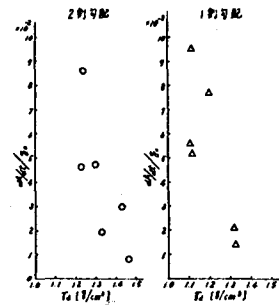


図1 浸食速度と単位体積重量

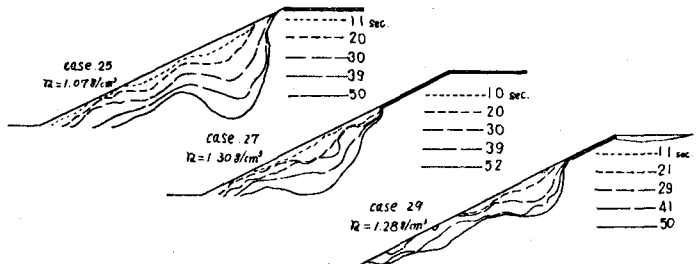


図2 被覆工の効果

の浸食速度とその後の浸食速度が変わらないのに比べ、2割堤防では、初期の浸食速度が小さく、時間の経過に伴ってやや早くなる傾向にある。

法面の被覆工の効果を調査するため5回の実験を行なった。図-2は被覆工を変えたことによる浸食速度を、10、20、30、40、50秒後の浸食形状で比較したものである。実験では各々の乾燥密度が異なるため量的な比較はできないが、定性的に「浸食域は被覆工の下流側に移ること、被覆工の効果は天端被覆の効果以上に、法肩からの法面被覆効果が大きく表われること」という傾向がある。ただしこの法面被覆だけのケース29では、法肩で渦を生じ時間の経過と共に被覆工の裏面に水が入り込むため、実際には被覆工本体の破壊を生ずるものと考えられ、基本的な対策としては天端、法面を共に保護する必要がある、と考える。また天端被覆は越流水の弱点部への集中を排除する意味からも必要であろう。

3. 堤防の越流破壊事例にみる浸食・崩壊特性

1) 昭和50年8月石狩川出水時の越流破壊

石狩川50年8月の洪水では長大な区間にわたって越流が生じ、数ヶ所で破堤が生じている。写真-1はそのうちの一部堤防の裏法欠壊状況を示すものであって、堤防裏法面が鉛直に近い形で崩壊していることに特徴がある。堤防は全面にわたり芝類の植生でおおわれ、最大越流深は約20cmであったと推定される。植生のある法面では前述のような法面浸食の形で破壊が進むものとは異なり、堤防法面のキレットの拡大→崩壊、といった形で、破壊が進行するものと推察される。写真-2は堤防坂路が越流で、浸食・洗掘された状況を示すものであるが、裸地の面と植生のある堤防法面の耐越水浸食特性の相違を見事に対比させている例として注目される。この裸地面での浸食の傾向は前述の小規模実験のケースで認められる現象に近いと考えて良いであろう。

写真-3はアルファルト舗装の道路面が越流を受けその裏法面が接合面から浸食・崩壊しているケースとして提示した。アスファルト舗装の背面まで越流水により洗掘をうけ、一部に破壊を生じている。このような固体と粒状体の接合部の処理を研究する必要があるものとして興味深い事例である。

2) 最上川支川真室川50年8月出水による裏法崩壊

図3は真室川の越流による堤防崩壊状況を示すものである。この川では流下能力 $1200\text{m}^3/\text{S}$ に対しその倍の $2300\text{m}^3/\text{S}$ の出水があったと推定されており、真室川堤防も数ヶ所で破堤、大きな災害となった。この堤防の天端は砂利道として利用され、堤体は河川の掘削土で作られており、かなり砂分の多い築堤であったが、図示のように約10cmの越流深で30分程度経過した後の、裏法の崩壊状況である。この例でもはゞ鉛直な崩壊形状をなしている。



写真-1 越流による法面崩壊(北海道開発局提供)



写真-2 越流による堤防坂路の浸食(同上)

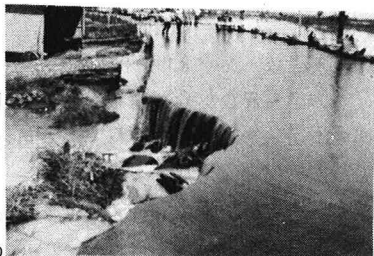


写真-3 アスファルト上の越流と浸食(同上)

3) 信濃川左支洩海川53年 6 月出水による堤防の崩壊

写真 4 にみるように洩海川の堤防は若干の越流水をうけ、堤体土が水分を含んで強度低下したこともあって、天端にキレツを生じている。この地点の上流側で越水破堤したため水位が低下し、大量の越流が生じなかったことで、天端キレツだけにとどまっているが、更に数分間越流が続けば、崩壊が生じ、破堤につながったものと考えられる。

その他にも多数の越流による破堤、あるいは裏法崩壊事例が調査されたがその大部分は上述のように鉛直に近いキレツと崩壊から堤体の破堤へと進行したものと考えられる。このような事例については、狩野川台風時の災害直後の視察報告²⁾にもみられ、一般に越流水による堤体の浸食、破壊過程は、堤体材料が粘着性をもつこともあって、破壊形状が鉛直に近いクラック面をも

っていることに特徴がある、といつて良いであろう。このような崩壊は堤体内部の土中水分量の変化による堤体上の土質特性の変化に強く影響をうけるものと考えられ、単に越流水による堤体の浸食だけを問題にしているとは本質的な現象の解明にはつながらないと考察される。

4. 植生の耐越流抵抗特性に関する実験

土堤の補強対策工法を研究する一環として、芝生や雑草等の法面被覆効果を研究しておく必要がある。そのため芝生の法面被覆の有無による耐越水性の相違を実験により検討した。実験はあらかじめ、幅60cm、高さ2.5 m、法勾配が2割、の土堤、を6面作成し、その法面に張芝しておいた。芝生が完全に堤体土となじむように約6ヶ月間、屋外に放置し、時々肥料を与えて管理した。堤防盛土に用いた土の各種試験結果は表1に示すようである。実験では法面に張られた野芝の状態を変えるため、6本の堤体において、一杯に繁茂した芝を取除いたもの、芝の地表面上の部分を除き根だけを残したもの、等の状態を作り出した。越流量は最大116 l/S(0.19 m³/S/m)を供給した。この実験での計測項目は、越流水面形、流速分布、堤体の変形量、土中水分の変化量、である。実験ケースを表2に示す。実験に使用した堤体土質はシルト質砂、であって浸食性が高い材料である。実験中に観測された土の乾燥密度は1.22~1.46 g/cm³の範囲にあり、最大乾燥密度の1.656に比べ74%から88%の締固度に相当する。

実験における法面条件は、裸地の場合、芝の根だけの場合、芝が十分繁茂している場合、芝が踏み荒されて乱れている場合、の四種類に分けられる。

裸地の場合における浸食状況は前項に述べた小規模な土堤モデルによるものの結果と似ている。通水後しばらくして法面下流側が浸食をうけ、階段上に浸食が進行する。

表面に少しでも植生がある場合には著しく異った浸食形態を示し表面の

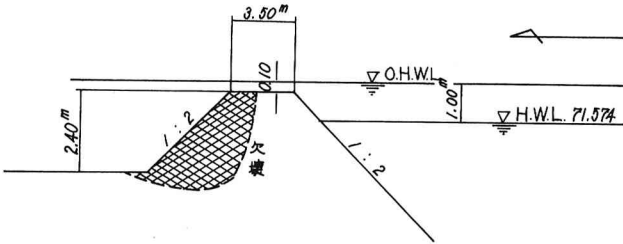


図 3 真室川 3.0 km 左岸堤の越流崩壊状況



写真 4 洩海川右岸の天端のキレツ

表 1 堤体材料特性

粒 度 組 成	レキ分 (%)	2 ~ 8
	砂 分 (%)	57 ~ 69
	粘土シルト分 (%)	29 ~ 35
	最大粒径 (mm)	4.76 ~ 9.52
	均等係数 U _C	3.17 ~ 6.00
液 性 界 限	液 性 界 限 (%)	N. P.
	比 重 G _S	2.733 ~ 2.739
	含 水 比 (%)	20.2 ~ 25.5
	単位体積重量 (g/cm ³)	1.614 ~ 1.619
	最適含水比 (%)	18.2 ~ 19.9
実 固 断	最大乾燥密度 (g/cm ³)	1.653 ~ 1.658
	粘着力 C (kg/cm ²)	0.06 ~ 0.12
	内部摩擦角 φ (度)	28 ~ 30°

芝に法面が保護され微細土粒子がわずかつ吸い出されて行く。そして時間の経過に伴って芝裏に空間ができて来る。このような状態になると芝は裏から持ち上げられるような形で法面からはがされ、ちぎれて行く。芝がちぎれて流され裸地の状態の部分ができると浸食速度は著しく早くなる。

この法面崩壊の状況を観察した限りでは、通水開始後相当長時間にわたって芝生面以下の堤体土に水が浸透してゆき、土粒子間の空隙を水がうめるにつれて堤体強度が低下すると共に、芝生面に作用する剪断力が堤体法面に張力として働らくことによって、クラックを法面に垂直に発生させ、崩壊する、という形をとっているものと思われる。したがって堤体土の強土の含水比による変化、が強く影響していると考えられるが、今回は植生効果を主に検討するため、土質の相違については深く追求しなかった。これはひとつには今回用いた堤体土が全て同一条件であること、さらに実験方法も同一であり、かつ観察による堤体法面の破壊形態もほぼ同一である、ことなどから、今回の結果を左右する程のものではないと判断したことによる。

堤体の欠壊過程は途中数回の測量で計測されている。この計測結果を洗掘面積の時間変化として図示すると図-4となる。これによればケース6の裸地にした法面の洗掘速度が非常に早いこと、ケース3の芝の根だけにしたものがこれに次ぎ早く洗掘をうけていること、この場合 $T < 2.5\text{hr}$ の時には芝生が密生しているものと大差がなく、これ以上の時間が経過すると急速に浸食が進むが、これは法面が急激に崩壊してしまうことによること、を示している。ケース2、5、7、は共に芝生が法面を被覆している。法面崩壊の生ずる時間はケース5で約4.4時間、ケース2で約12時間、と長くなるが、この差は芝生の状態の差が影響していると考えられる。ケース5、ケース7、では芝の状態はケース2よりも悪く、踏み荒されているため、崩壊が早く始まっているものと考えられる。

図-4の關係は、一般に植生等で被覆されている場合の法面浸食が、ある段階まで時間に正比例し、堤体がゆるんでクラックが生ずるようになると急激に増大し破壊に至ることを示している。

表2 実験条件一覧表

No.	流 量 L/S	芝の状態	単位体積重量 γ (g/cm ³)	含水比 ω %	乾燥密度 γ_d (g/cm ³)	全破壊までの時間
1	116.2	全法面芝で被覆	1.55 (前・法尻) 1.58 (*)	21.9 27.1	1.27 1.24	
2	112.5	“	1.68 (後・法尻) 1.69 (*) 1.91 (後・天端)	26.2 21.3 31.1	1.33 1.39 1.46	758分
3	115.0	芝の表面を取り模のみで被覆	1.59 (後・法中) 1.68 (中・法中) 1.67 (後・法中)	30.5 24.8 31.5	1.22 1.35 1.27	175分
4	112.0	全法面芝で被覆				
5	112.0	“	1.70 (前・天端)	34.9	1.26	280分
6	42.0 57分後より 112.0	芝の被覆なし	1.54 (前・天端) 1.58 (前・法尻) 1.74 (中・法中)	16.4 15.5 21.0	1.32 1.37 1.44	60分
7	73.0	全法面芝で被覆	1.50 (中・法中)	22.8	1.22	

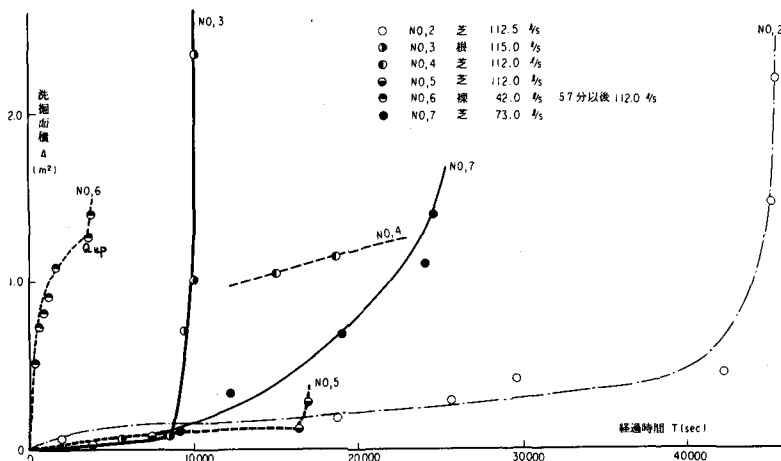


図4 植生法面の洗掘面積の時間変化図

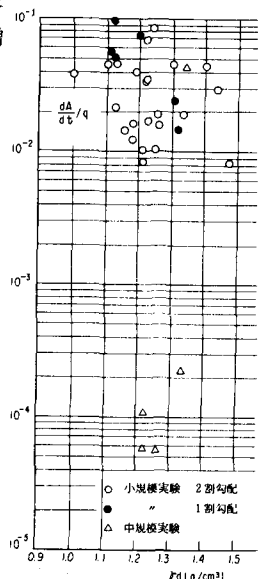


図5 $dA/dt/q \sim \gamma_d$ 図

初期の浸食速度は前項の研究によると、裸地法面では堤体土の乾燥密度に支配されることが指適されている。図-5はこの関係を見たものであって、初期の浸食速度 $[dA/dt]_{t=0}$ を、単位幅越流量で形式的に無次元化して表示してある。

これによれば、芝生をもたない裸地の法面のデータがオーダー的には小規模な越流実験で得られているものと同じ値を示しているのに対し、植生をもつものでは浸食速度がほぼ100~1000倍遅いことを示している。これは勿論、植生による法面の越流水に対する保護効果を示すものであるが、法面の破壊は降状点を越えると急速に進行する性質をもつので、初期浸食速度の違いだけで、耐越流性を評価するのは妥当でないと考える。

この一連の実験では川表側の法面がなく、越流水は天端上を10~25cm程度の越流深であふれ、法面を流下する形となっているため、現実の堤防でのような川表側からの堤体浸透水の影響がなく、かつ洪水時のような降水による堤体浸透水の効果も考えられていない。したがって今回の実験の結果を直ちに植生の対越流抵抗性として評価するには難点があるが、適切な植生（特に今回は芝生）をもつ法面では、図-4に示す程度の時間範囲（破壊に至るまでの時間範囲）までは実験条件の範囲内で安全である、といって良い。一方現実の堤防では植生管理も実験によるもの程完全には行なえず、植生の根の張り方も土粒子を実験に用いた芝生程完全には補促していないことから、対越流抵抗性も異なると考えられ、今後明らかにしていく予定である。

5. 大規模越流実験

堤体の越流破壊現象は以上にみてきたように堤体土の力学的性質と表面植生の耐越流性といった、物理的なメカニズムが不明確なものが含まれるため、通常のような実験手法での研究は困難である。すなわち現象に内在する力学関係に基づき相似率を考えて、小モデルで研究することは不可能に近い。また堤防を耐越流型に補強する工法の開発やその評価、といった問題をも研究する必要があることから、ほぼ現寸大に近い土堤防の越流破壊特性を研究することとした。実験堤防は、堤内地盤からの直高3m、天端巾4m、表・裏法勾配2割、越流巾5m、の大きさで、第1回目の越流実験用としてローム土を用い、法面には張芝を施し、

約7ヶ月間維持したものである。使用土の土質特性は、液性限界84%、塑性限界52%、単位体積重量 $1.47 \sim 1.57 \text{ g/cm}^3$ 、最適含水比53~60%、粘着力 0.87 kg/cm^2 、内部摩擦角 0° のものである。

越流実験に先立ち堤体の浸透特性を調べる湛水実験を行った。これは堤体の川表側に水を貯め、堤体内部への水の浸透現象および堤体土が水を含むことによる軟弱化の傾向を貫入抵抗を調べて把握する実験である。図6は堤体内部の浸潤面の時間変化を示すものであって、左側壁沿いの一側線に沿っての変化を示している。これによれば、No.6地点の水位が、他の地点の水位に比べて非常に早く上昇していること、これはこの地点へ側壁づたいに早く水みちができて、その影響をうけているらしいこと、を示していると考えて良い。なお堤体の盛土はブルドーザーでの転圧のみであり、人力で転圧しながら行なったものではないため、このような不均質性が生じたものであろう。なおこのことと関連して越流時の破壊もこの付近で最も早く発生しており、浸透水と越流水の組み合わせで急速な破壊を生じていることが判断される。図7は堤体土が水分を含んで静的貫入抵抗値（コーンペネトロメーターによる）が変化する様子を示すものであって、湛水開始前の支持力に対して、堤体に浸透水が入り込むと徐々に抵抗値が低下

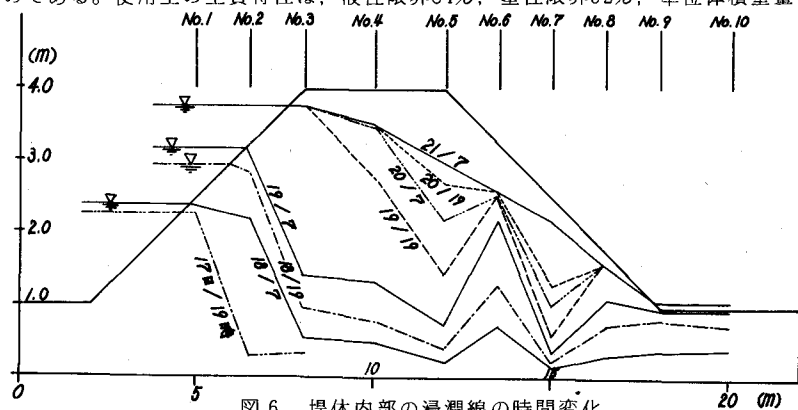


図6 堤体内部の浸潤線の時間変化

向を貫入抵抗を調べて把握する実験である。図6は堤体内部の浸潤面の時間変化を示すものであって、左側壁沿いの一側線に沿っての変化を示している。これによれば、No.6地点の水位が、他の地点の水位に比べて非常に早く上昇していること、これはこの地点へ側壁づたいに早く水みちができて、その影響をうけているらしいこと、を示していると考えて良い。なお堤体の盛土はブルドーザーでの転圧のみであり、人力で転圧しながら行なったものではないため、このような不均質性が生じたものであろう。なおこのことと関連して越流時の破壊もこの付近で最も早く発生しており、浸透水と越流水の組み合わせで急速な破壊を生じていることが判断される。図7は堤体土が水分を含んで静的貫入抵抗値（コーンペネトロメーターによる）が変化する様子を示すものであって、湛水開始前の支持力に対して、堤体に浸透水が入り込むと徐々に抵抗値が低下

し、浸潤面以下では急激に減少することが示されている。

堤防の越流実験はこのような浸潤作用の影響下で行われた。先述したように流下方向に向かって左側壁沿いの堤防の浸潤面が水みちによる影響をうけてかなり軟弱となっていたため、越流開始後、1分程度で左側壁沿いに図8にみるような崩壊が発生した。この時の越流量は、 $1.0 \text{ m}^3/\text{S}$ 、越流水深は天端上16~18cmであった。この初期の崩壊面が給水を打ち切っても浸透水の影響で徐々に拡大し、全面崩壊のおそれが生じたため、表法側の水位を下げて、崩壊の拡大を防いだ。実験の主目的はこのような極所的な崩壊による法面の変形を調査することではなく、均質に仕上げられた土堤防の法面の洗掘状況を観察することであったため、この初期崩壊部を土のうで埋め戻し、新たに浸食崩壊の経過を調べることにした。このようにして得られた結果の崩壊進行状況を示すものが図8である。これによれば前述の現地堤防の越流破壊の特徴である縦方向のクラックの発生と塊状になった土の崩落による破壊の進行、の現象が認められ崩壊面はほぼ垂直に切り立っていることがわかる。なお初期の越水で最も早く破壊した部分を土のうで保護したため、それ以後の崩壊は非常に遅くなり、途中から流量を $2.3 \text{ m}^3/\text{S}$ （越流深30~33cm）に増大して実験を行なった。

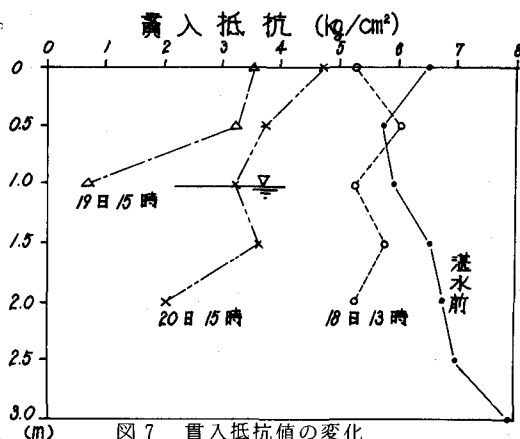


図7 貫入抵抗値の変化

察することであったため、この初期崩壊部を土のうで埋め戻し、新たに浸食崩壊の経過を調べることにした。このようにして得られた結果の崩壊進行状況を示すものが図8である。これによれば前述の現地堤防の越流破壊の特徴である縦方向のクラックの発生と塊状になった土の崩落による破壊の進行、の現象が認められ崩壊面はほぼ垂直に切り立っていることがわかる。なお初期の越水で最も早く破壊した部分を土のうで保護したため、それ以後の崩壊は非常に遅くなり、途中から流量を $2.3 \text{ m}^3/\text{S}$ （越流深30~33cm）に増大して実験を行なった。

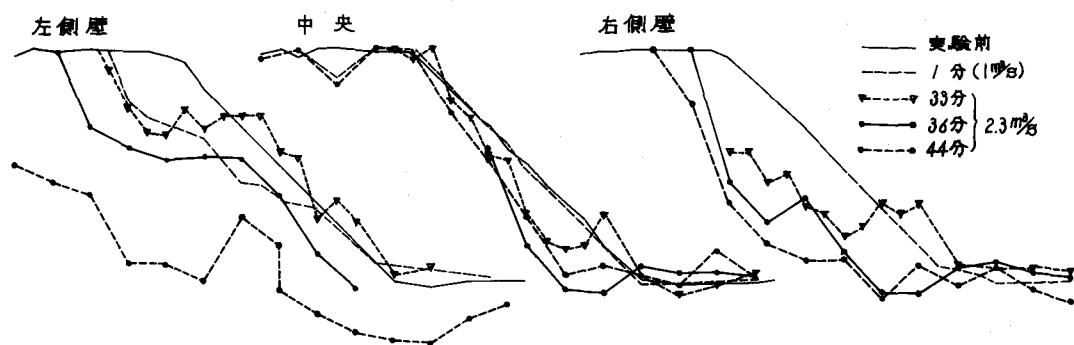


図8 越流水による法面の崩壊過程

6. むすび

以上に土堤防が越流破壊される過程を実験を中心として研究したが、要約すると以下ようになる。

- 1) 堤防の越流破壊は、法面の浸食による場合と法面のキレツの発達による崩壊による場合に区別されるが、一般にクラックの発生と崩壊、といった過程をたどる場合がほとんどである。
- 2) 堤体が浸透水の影響を受け、土の強度が低下していると越流によって非常に早く崩壊・破堤に至る。
- 3) 前記のような条件がなければ、通常の堤体の流水による浸食は芝生程度でかなり減少させうる。また芝生の耐越流効果はかなり大きいと考えられる。
- 4) 越流破壊に及ぼす土の力学的性質の変化を研究することが必要である。したがって小実験ではこのような現象を研究することは困難と思われる。

おわりに、本研究を行うにあたり貴重な資料の提供をいただいた、北海道開発局、東北地建、北陸地建の関係者の方々に厚く謝意を表します。

参考文献 1) 第33回土木学会年次学術講演会概要集

2) 土木技術資料 1巻1号 狩野川の災害を視察して、福岡、吉川、芥川

3) 文部省科研費報告 河川堤防護岸の破壊条件に関する研究 No A-51-1