

土構造物の自然災害と復旧

NATURAL DISASTER AND RECONSTRUCTION FOR EARTH STRUCTURES

ふく おか まさ み
福 岡 正 巳*

まえがき

編集委員会から「土構造物の自然災害と復旧」というテーマで総説を書くように依頼された。さて土構造とは何かと考えてみたが、これは今のところはっきりした定義はないようである。この小特集の題名が同じであり、さらにこの号に含まれているものに盛土、地すべりがある。地すべりは普通土構造物とはいえないようである。そこで筆者は常識的な定義よりも広く土と基礎に関するものはすべて土構造物としておきたい。次に自然災害であるが、これもまた定義が難しい。

そこで解釈を広くとることを許していただくことにし、多少人工的な匂いのするものを含ませることにして議論を進めさせていただきたい。

1. 土構造物の特徴

土構造物（広義）の特徴は土が土粒子という固体と、水や空気からできていて、水の量つまり含水比でその性質が著しく変化するということである。水の中には化学的物質が含まれていてその性質や量によっても土の性質は変化する。土中水つまり間隙水は圧力を持っているが、これが過剰間隙水圧といわれる程高くなってくると、土のせん断抵抗力を著しく減少させ、土はすべりを起こす。

土構造のなかにはダムのように絶えず水をせきとめる役目をしているものがあり、この水の量が増減することによって土中には非定常な浸透流が生じる。これがまた土構造物破壊の原因になる場合もある。

さて土構造物（狭義）にはどんなものがあるだろうか。

- (1) 盛 土—ダム、河川堤防、海岸堤防、道路盛土、鉄道盛土。
- (2) 壁体構造物—擁壁、地下擁壁、土留め擁壁、港湾岸壁。
- (3) 基 礎—建物、橋梁、各種河海構造物、工場の各種構造物。
- (4) 地下構造物—地下街、トンネル、縦穴、
広義の土構造物としては人工斜面がある。

2. 災害を起こす外力

わが国にはいろいろな種類の災害を起こす外力がある。世界中どこにでもある外力は重力であるが、特にわが国では動的な外力、地震力がある。地震力は地盤を上下左右に揺り動かすので、設計に当たっては重力が上下、左右、前後に増減するものとして計算を行っている。重力が静的な力であるから、地震力も静的なものに直して計算をしている。新潟地震、アラスカ地震以後（1964年）砂の液状化が問題になり、土の性質の変化によって建物が沈んだり倒れたりするということが分かり、液状化する地盤の判定やその対策についての研究が進められている。

次に大きな災害外力は台風と豪雨である。毎年夏になると必ず台風がやってくる。また梅雨期は長い雨があり、特に台風と重なると強い雨が降る。雨の水は地中に浸透して土のせん断強さを弱める。地表面を流れる水は浸食作用を起こし、河川というようなまとまった水流では、河岸を大きく崩し、洗掘現象を起こす。ダムや堤防の高さが足りないとその上を乗り越えて、いわゆる越水現象によって堤体全体を崩壊させてしまう。

豪雨は台風や梅雨だけによって起こるとは限らない。雷雨もまた短時間ではあるが強度の大きい雨を降らせる。上州（群馬県）は雷で有名なところであるが、碓氷峠で1時間 80—90 mm の雨が降ったことがある。

わが国の日本海側ならびに北海道、東北地方では冬季多量の雪が降る。雪が降り始める季節には急に温度が上昇して一度に雪が融けることがある。春先に雪が融ける際にも同様な現象が起こり、大量の雪融け水の一部は地中に浸透し、残りは地表水となり、河川水を急激に増大させる。地すべりの多い地方では長雨の季節とともに、雪融け水が地中に浸透する時期に地すべりが発生する。

以上のような地震や水のような自然的な外力に人工が加わった場合に初めて災害が発生するというケースもある。

風は上部構造に圧力を作用させ、そのため基礎もまた破壊力を受ける。わが国では風の構造物基礎に与える影響は地震ほど大きくないから、地震に耐えられるように設計しておけば、風には堪えられるものである。

上記の諸力が重なり合うことによって災害が起こる場合もある。よく茂った森に強い風が当たって根の浅い弱い木を揺り動かし、時によってはこれらを押し倒し、降雨が地中に浸透しやすいような条件を形成する。次に降雨の地中

* 工博 東京理科大学教授 理工学部土木工学科

総 説

への浸透が起こって地すべりが発生するといったようなのはその例である。

3. 土構造の災害と復旧の例

災害の復旧には応急復旧と恒久復旧がある。また原形復旧と改良復旧がある。応急復旧というのはとりあえず行う復旧工事であり、設計は簡単な測量と調査に基づき極めて短期間に行われるものである。まず河川堤防の例について説明する。

例1. 昭和22年9月のカスリン台風で栗橋付近で利根川の堤防が決壊し、はらんした水は関東平野を通り東京湾に流れ込んだ。堤防は過去の洪水の経験から求められた河川流量をそ通するように造られていたが、予想をはるかに上回るような流量の水がどっと流れてついに堤防の天端を約1mも越水した。約2時間の越水の後ついに堤防は完全に決壊した。決壊後現地を訪ねたが、明治時代に築かれたと思われる堤防の土は約20~30cmの層状にいていねいに突き固められていた。土の質も余程よく選定されていたものと思われた。このように質のよい堤防であったからこそ2時間もの間水深1m以上の越水に堪えられたのだろうとつくづく感心した次第であった。筆者が現地に行った時はまだ川の水は濁っており水嵩（かさ）も多かった。狭い決壊口から平野に流れ出す水は流れが速く、そのために地盤は深く削り取られていた。深さは数メートルないし十数メートルにも達していたであろう。さて、このような堤防の災害に対して、どのような応急復旧をするかが問題である。当時は技術も進んでおらずまた資材も戦争直後のことで十分ではなかった。仮締切り工事は二段構えで実施された。

決壊口の幅は300mにも及ぶ大きなものであった。まず決壊口の上流に2列の仮水制工を設けて、それまで決壊口に向かっていた水の流れの方向を河心部に導いた。次に決壊口の上流側堤防の川側からスタートして弓なりに川床部

を通り、決壊口の下流堤防の川側に達する荒止め工（第1締切り工）を施工し、決壊口を流れる水量を大幅に減少させた。この工事は水深が浅く、流速もおそい所で、しかも決壊口に近いという条件で位置の選定が行われた。締切り工事としてはまず松杭を打ち並べ、その中に大きな割石を投入した。荒止め工の延長は460mであった。次にその後方、決壊口に近く第2締切り工を施工した。延長は303mで、工事は松杭打ち、粘土詰め、矢板打ちであった。このようにしてほぼ完全に水を川に戻し、堤防の破堤箇所流れがないようにして、もとの堤防の位置に仮堤防工を施工した。深掘れしたところにはサンドポンプで砂を吹き込んであるので透水性が大きく、そのまま放置しておく基礎漏水が激しく、そのために再び堤防が切れる恐れがある。そこで鋼矢板を打って止水を行い、堤防の川表には護岸を施すなどして強度の大きい堤防を造った。

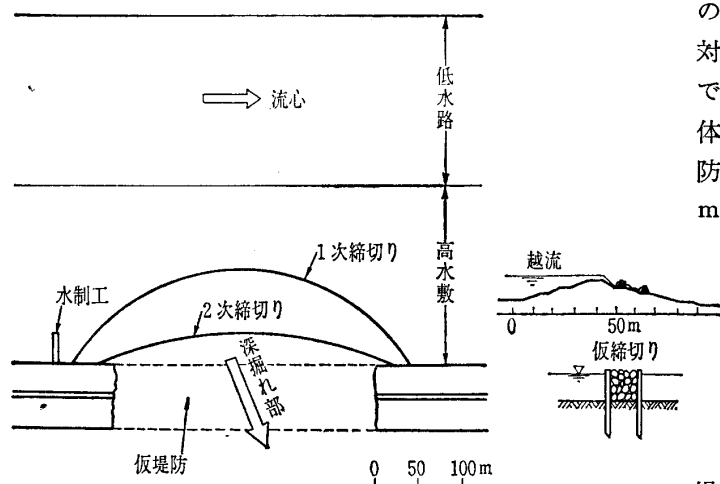
災害復旧としてはこれまでであるが、災害の原因は完全に取り除かれたわけではない。なぜかという洪水が堤防を越流して破堤したということは、洪水流量の見積もり方が過小であったということで、計画洪水流量を増加させなければ本当の復旧ができたことにはならない。破堤前の利根川の計画洪水流量は1万トン毎秒ということになっていたが、それが一挙に1万7千5百トン毎秒と引き上げられた。堤防のかさ上げと引堤による河川幅の拡大によって通水断面を大きくし、さらに上流に洪水調節用のダムを設け、渡良瀬遊水池の改修などが実施されたのであった。その後全国的な流量改訂の作業が進められ、もっと大きな洪水にも十分堪えられるようなものにされようとしている。

決壊口の拡大を防ぐため、上下の堤防には木流し工、竹流し工、抱き付け川倉工などの欠け口止め工を施工する。低水路の掘削を行い河川能力を増大させるなどの工事も応急的に実施される。

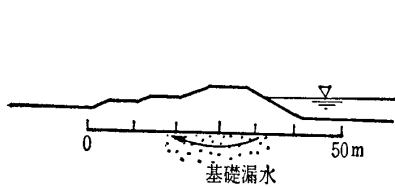
例2. 遠賀川植木堤防は昭和29年頃に破堤した。この堤防と利根川の堤防との違いは、利根川では高水敷が堤内地の田面より高くなっている、いわゆる、天井川であるのに対し、遠賀川では川側の地表面が陸側の地表面より低い点である。堤防の高さは低く、堤防敷も狭い。基礎地盤も堤体も砂質土である。この付近一帯は筑豊炭田であって、堤防の下にも坑道があった。このため付近一帯には約1~2mの地盤沈下が起こっていた。河川水位はもとの高さであ

ったと仮定すると、これに対する陸側（堤内側）の地盤の相対的な高さが低くなったことになる。結局堤防基礎の漏水により、基礎にパイピング現象が起こり、越水しないうちに堤防が切れたものと考えられた。一般に河川水が堤防の天端を越流した場合には破堤の原因が明りょうであるが、この例のような場合には原因を想像するしか方法がない。

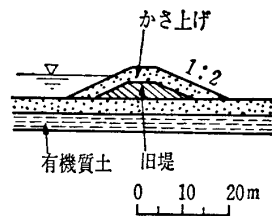
仮締切りは水深の浅い陸側において行った。これは利根



図一 利根川、栗橋上流東村における破堤箇所の概略説明図



図—2 遠賀川植木堤防



図—3 小貝川堤防

川と異なっている。決壊口の幅は約 110m であった。締切り工の延長は 183m で、杭打ち、土俵詰め、詰土、捨石を行った。

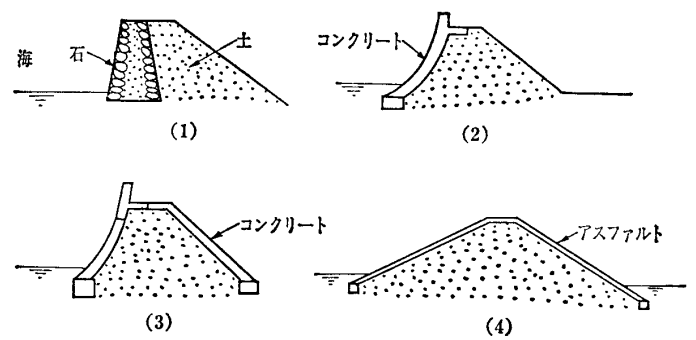
この例のように破堤の原因が堤防の基礎漏水にあると推定される場合には、破堤箇所の部分だけではなく、基礎漏水のある場所にも矢板打ちなどを行う必要がある。

例 3. 昭和30年ころ小貝川（利根川支流）の破堤は堤体からの漏水によるものと推定された。図—3 のようにこの堤防は高さが約 7m で比較的高いが、のり勾配が 2 割で、いわゆる、かみそり堤防といわれるもので、堤防断面積が小さい。図—3 のように旧堤の内外に腹付けし、さらにかさ上げをした。旧堤は透水性の低い、しかもよく締め固められた土堤であった。それを包むようにして増幅された部分は砂質土で透水性が大で、締固めも十分ではなかった。旧堤の天端より高くなった河川水は砂質土の部分を通して裏側の土を飽和させ、この部分にすべりを発生させた。その結果天端の高さが低くなり、せっかく堤防はかさ上げがなされていたがその効果はなく、堤防の天端を越流したと同様な形式の破堤が起こったものと推定される。基礎地盤に有機質土が含まれているのでりすべりが起こりやすかった。この場合も破堤のメカニズムは完全には明らかではない。しかしながら災害復旧に当たっては破壊の原因は堤体漏水であったと考えて、堤体漏水の起こらないように注意した。基礎の有機質土は洗掘により除去されたので、埋め戻された砂を通じての漏水を防ぐための矢板打ちをするだけで十分であった。

例 4. 昭和35年ころの信濃川の堤防決壊。基礎地盤、堤体、越流以外に堤防破堤の原因になるのは河川の洗掘である。河川の洗掘の速度は相当に大きく、1 回の洪水で堤防の全部または大半が洗掘によってなくなることがある。信濃川・長岡市地先の堤防決壊もこの例である。

災害復旧の方法としては洗掘防止を主とする。河状の整備をし、高水敷がある場合にはこれが洗掘されないような低水護岸を施工する。また低水路が堤防に接近しているところでは水制、根固めを施す。根固めとしては蛇かご、矢板打ちなどが用いられる。

洗掘の原因が堤防そのものにはない場合には、河川の流れ全体について検討を加え、水当たりが緩和されるような



図—4 海岸堤防

処置をとる必要がある場合もある。またせき（堰）などの構造物が原因になっているような場合には、堤防よりはむしろせきの造り直しをすることも考えなければならない。

例 5. 昭和28年ころの海岸堤防の災害。

九州方面の海岸堤防が台風による大きな災害を受けた。それまでの海岸堤防は図—4 (1) のような断面形であった。すなわち、海に面した側には石積みの直立堤が設けられて波の力を受け、陸側は透水を防ぐために土盛りが施された。(2) は石積みをコンクリートに変えたもので、この形は伊勢湾台風前の鍋田干拓の堤防にも使用されていた。この堤防が高い波を受けると、越波により裏のりが洗掘され、土が崩れ落ち、続いて堤防全体が壊れてしまうことである。このような被害を受けたので堤防の構造を全部変えてしまう必要があるのではないかとということで、研究が開始された。その結果図—4 (3), (4) のような構造の堤防が提案された。(3) は裏側の洗掘を防ぐために土堤を全部コンクリートで覆ったものである。(4) は表面をアスファルトで覆ったが、前後の斜面の勾配を緩くした。これは前面に当たる波の力を、勾配を緩くすることによって弱めようとしたものである。伊勢湾台風では(3) のような型の堤防が破堤した。その原因は大体次のようなものであった。

- (i) 堤防の高さが不足していること。
- (ii) 吸出しなどのためにコンクリート張りの内側の土がなくなっていたこと。
- (iii) 表のりの目地から侵入した水が裏のりのコンクリート張りを吹き飛ばしたこと。
- (iv) 表のり先の洗掘

災害復旧に当たっては再度潮位や波高を計算し、堤防の高さを増し、堤防の土をできるだけ締め固め、表のり尻をテトラポットなどで固め洗掘防止をはかった。また表のり先に鋼矢板を打ったが、これは基礎からの透水防止の効果を期待する外、破堤した場合の復旧工事の足掛りともなる。波の力の特に強いところでは堤防の沖合に防波堤を設置した部分もあった。

例 6. 干拓堤防、河川堤防、道路及び鉄道盛土の沈下。

総 説

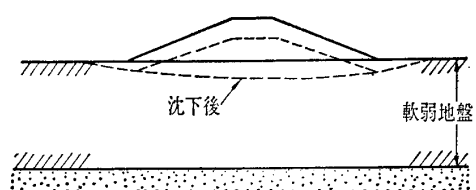


図-5 盛土の沈下

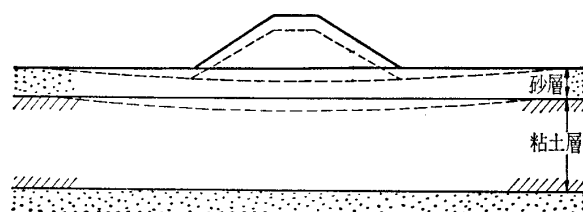


図-6 盛土の沈下

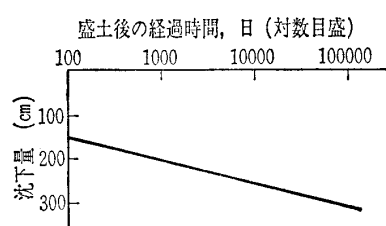


図-7 盛土の沈下量と時間との関係

有明海、八郎潟等は軟弱地盤で有名である。粘土層の厚さは数十mでその上に造られた堤防は毎年数 cm ないし数十 cm 沈下し、それが10年ないし数十年継続する。粘土層が地表面近くまで存在する図-5のような場合には、地表面沈下の形は点線のようになるが、地表面付近に10m程度のゆるい砂層がある場合には沈下は図-6に示すように遠方まで及ぶ。軟弱地盤の圧密沈下量は図-7のように横軸に時間の対数、縦軸に沈下量をとればほぼ直線になることから、予測が可能である。従ってこの予想沈下量をもとにかさ上げをしたり、天端にバラベツトをつけたりする。

道路盛土と橋梁の橋台との取付け部には段差ができる。このような場合には一定期間ごとに舗装表面に新しくオーバーレーして補修する。設計段階であらかじめ処置できる場合にはアプローチクッション、踏み掛け板を設ける。

例7. 地震による河川、海岸堤防の沈下。

昭和21年の南海地震によって四国の北部は最高約1mに達する地盤沈下が起こった。逆に南部は隆起した。吉野川の河口部は約90cmの沈下が生じた。図-8に示すように堤防は陸地の水田と一緒に沈下したが、川側水面は海水面と同じ高さであって地震の前後で変化がない。潮位の日変化は約150cmであるが、高潮位の時に川側から浸透水が陸側に流れる。低潮位の時には浸透は停止する。塩分を含んだ水が田面に吹き出したため、水田に塩害が生じた。堤防のかさ上げをしても塩害の問題は解決しない。対策と

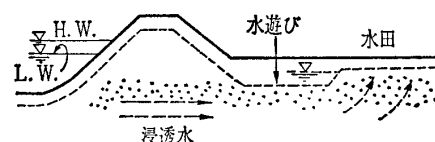


図-8 地盤沈下と塩害

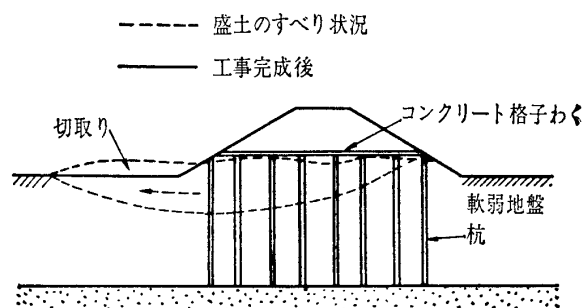


図-9 杭打ちによる復旧

しては、

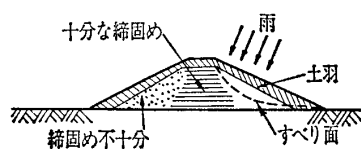
- (1) 裏のり先に幅の広い潮遊びと称する池を造り、浸透水を受けとめる。
- (2) 上流に取水せき(堰)を設け、かんがい用水量を増加させる。
- (3) 塩害に強い品種の稲を作る。

例8. 軟弱地盤上の盛土の破壊。

軟弱地盤上に盛土をする場合には、サンドドレーン等を施工して緩速施工をするが、それでも盛土がすべり出すことがある。対策としては押さえ盛土、サンドコンパクションパイル等による基礎の強化が行われる。盛土が横に広がることを防止するという意味でのり先に杭や矢板を打ち、鉄筋や鉄の棒で頭をつなぐというような方法も採用されている。図-9は特殊な場合の処理工法である。すべりによって低くなった盛土の上から杭を打ち、その上に格子状のコンクリートわくを載せ、さらにその上に盛土をする。この場合、押さえ盛土の必要がなくなることで、この盛土が橋梁の橋台に接していたため、橋台の横方向移動、盛土と橋台の不同沈下による段差の発生が防止できた。

例9. 降雨による河川堤防のすべり破壊。

昭和36年木曾川流域に連続降雨量600mmを超える大雨が降った。そのため木曾、伊斐、長良三川で合計150箇所以上の崩壊が生じた。盛土の崩壊は盛土の高さとのり勾配によって大きな影響を受け、高さが高い程、勾配が急な程すべりやすいと考えられている。これは内部摩擦角と粘着力、円弧すべり面による解析計算法を信じている人にとっては正に疑問の余地がないところであろう。しかしこの時に起こったのり崩壊は全く予想を裏切り、高さが1~2mの低い盛土でも崩壊していた。崩壊するかしないかは雨



図—10 土羽がすべり落ちた例

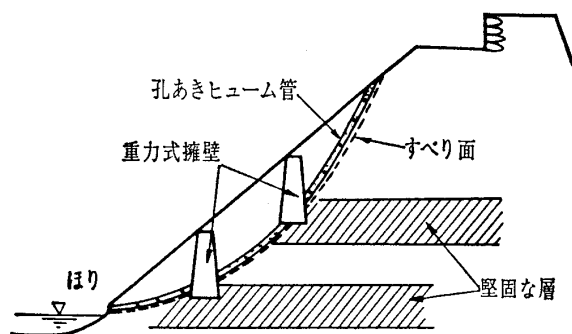
水が土中に浸透しやすいかどうか、浸透水によって土が軟化するかどうかにかかっているようであった。その対策として筆者が考えた方法は堤防の天端や小段にアスファルトの簡易舗装を施工して、堤防の中へ雨水が浸透しないようにすることであった。もちろん表のりには護岸を張る。

昭和25年ころに建設機械による土工が盛土工事にも適用されるようになった。盛土の中央部はよく締め固められたが、外部の締め固めは不十分であり、のり面には土羽打ちをして水密にしたため、雨水が締め固められていない部分に浸透し、この部分がすべり面になって土羽がすべり落ちるというような災害が発生した(図—10)。江合鳴瀬の新堤、国鉄金町線などがこの例である。災害復旧工法としては、再度土羽打ちをして修理することになるが、鉄道盛土では崩れた部分の排水をよくするという工法が採用できるが、河川堤防のような止水構造物ではそのようなことはできない。良質の土を選んで、よく締め固めるようにするしか方法はない。

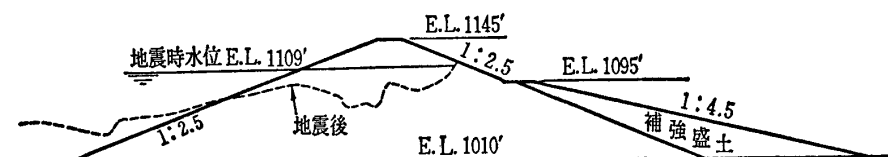
道路盛土でも同様な災害が発生したことがあるが、蛇かごで押さえ、これを土で包むというような方法をとったことがある。

例10. 環境を破壊しないように崖崩れを修復する。

昭和33年狩野川台風の際皇居のほりに面した斜面が崩壊した。当時はまだ環境破壊、公害などというような言葉が全然なかった時代であったが、少なくとも皇居のようところでは景観が重んじられ、マスコミでも復旧工法を注目していた。復旧工事が始まるとこれを大きな記事に取り上げ、説明図を加えて詳しく報道した。崩壊は一度江戸時代にも起こったことがあるらしく、崩壊斜面には擁壁の石垣が残っていた(図—11参照)。



図—11 景観を破壊しない斜面の修復法



図—12 バンノーマンダムの震害

復旧作業としては、崩壊斜面の基盤で、比較的硬い粘土質の岩(洪積層)の上に基礎を置いたコンクリートの重力擁壁を設けて斜面のすべり力を制止した。さらに砂質のフィルターで包んだヒューム管を埋めて地下排水を行った。地表面には土羽を打ち、草を生やした。月日の経過とともに埋戻し土は圧縮され、擁壁の下方にクラックが発生したが、これを埋めて水が入らないようにした。

例11. ダムの破壊。

昭和46年アメリカのバンノーマンダムが決壊した。シード教授によると、サンドポンプで盛土し水締めによって盛り上げた堤体土が液状化のために軟化してすべりが発生したものだということである。図—12はバンノーマンダムの断面図である。地震時には幸いに水位を下げていたため、越水による破堤を免れた。取水路が破壊されたため、ポンプによって貯水池の水の排水を行った。大都市の上に大きな貯水池がある場合には同様な危険にさらされる。この貯水池はロスアンゼルス市の水道用の貯水池である。復旧に当たっては専門家による原因の探求と再建計画の立案がなされた。専門家の意見はわが国よりも尊重されるようである。ハイドロリックフィルというのは古い施工法で、現在では使われていない。なおこの地方には近代的な Rolled fill dam があつたが被害はなかった。

例12. 地震による堤防の被害。

液状化が起こるような地盤の上の堤防は地震時に被害を受ける。天端にはクラックが発生し、横方向にすべり出し、堤防の高さが低くなる。被災の状況は図—12と似ている。復旧に当たっては良質土でよく締め固めて堤防を造るとともに、基礎地盤も緩んで透水しやすくなっているので止水矢板を打つ。

筆者は、地震時に堤防の高さが結果として減少することになるので、その対策として余盛りを多くすること、災害後の応急復旧に際してのかさ上げに対処するため、土取り場を指定しておくなどの処置を提唱している。

む す び

災害の予知については土質工学の知識がまだ十分ではないと思われる。せん断試験や圧密試験の結果を使って解析をしても、予知の精度はそれ程高くない。そこで高い安全率を採用したいのだが、そうするためには経費がかかりす

ぎる。仕方なしに放置しておくとは自然災害にあうというのが現状である。

災害を受けた後においては、原因を十分探究して、再び同じ原因で破壊が生じないようにしなければならない。その際、土質基礎工学の知識を十分活用すべきである。土構

造物の機能を考え、関連構造物についても調査し、災害の原因を総合的に判断して災害対策を立てることが必要である。

(原稿受理 1978. 6.19)

SI 単位, 重力単位の単位換算について

つぎに示す単位換算率表は、土質工学で普通よく出てくる単位についてのみに示しています。さらに詳細な換算が必要な場合には“JIS Z 8203—1974 (1977確認)「国際単位

系 (SI) 及びその 使い方” “日本規格協会: JIS 計量単位換算表, 日本規格協会, 1974, 288p” をご参照ください。なお、下表の () の中の数値は近似値を示しています。

単 位 換 算 率 表

	SI 単 位	重 力 単 位	備 考
力	N	kgf	○1N(ニュートン)=1 kg・m/s ²
	1	1.02×10 ⁻¹ (10 ⁻¹)	○kgf (重量キログラム) は従来質量の kg (キログラム) と区別せずに用いられていた。
	9.8 (10)	1	○正確には, 1 kgf=9.80665 N, 近似的には 1 kgf=10 N。
圧力および応力	kPa または kN/m ²	kgf/cm ²	○1 kPa(キロパスカル)=10 ³ Pa
	1	1.02×10 ⁻² (10 ⁻²)	○1 Pa(パスカル)=1 N/m ²
	9.8×10 (10 ²)	1	○kgf/cm ² は従来 kg/cm ² と記されていた。
単位体積重量	kN/m ³	tf/m ³ または gf/cm ³	○単位体積重量は力を体積で除したものである。
	1	1.02×10 ⁻¹ (10 ⁻¹)	○1 kN(キロニュートン)=10 ³ N
	9.8 (10)	1	○tf (重量トン) ○gf (重量グラム)
密 度 (単位体積質量)	Mg/m ³	t/m ³ または g/cm ³	○密度は質量を体積で除したものである。
	1	1	○1 Mg(メガグラム)=10 ⁶ g
周 波 数	Hz	s ⁻¹	○Hz(ヘルツ)
	1	1	