

## 河川堤防技術の変遷

中島 秀雄  
中島秀雄技術事務所所長



弥生時代から12世紀までは、日本の河川というのは非常に穏やかな、平穏な時期だったわけです。これは12世紀ごろまでの堆積物で、今でも残っていますが、河川の後背湿地のピートが全然乱れていないということで、非常に静かな時代だったと思います。



### 構造物としての河川堤防の特殊性

- ・河川堤防は長い時代にわたって地域住民と当時の為政者によって作られてきた構造物
- ・既往の災害を超える洪水のたびに嵩上げと拡幅を繰返し、次第に大きくなってきた
- ・地域特有の自然条件に応じた構造で作られてきた
- ・材料と施工法が時代によって変わり、それらが同じ堤防の中に複合して内包されている

堤防の安全性を評価する上で、各河川における治水事業や築堤の歴史を把握しておくことは非常に重要

12世紀以後、地球の環境がかなり変わって、日本もその例外ではなく、非常に豪雨、災害、そういうものが発達してきたわけです。それを防ぐために、人間が堤防を少しずつつくったわけですが、堤防技術としてやったのは戦国時代から江戸時代です。特に連続堤がつくられた江戸時代に、現在の河川堤防の基本的な技術が整備されました。それから、基準類もこのときに整備されております。

昔の堤防はどうだったかといいますと、「千栗土居断面図」、当時、堤防は土居という言葉を使っていました。これは江戸時代の堤防の一般的なもので、前のり側を篠竹とかササで覆っていきまして、のり面の保護と、それから耐震性についてかなり考慮したものだという事です。裏側には全部、木を植えて、洪水のときの水防材料にするということで、杉、それから場所によっては、締め固めを民衆にさせるために、桜を植えて、桜堤を非常につくったということになります。

### 江戸時代

- 堤防技術が発達したのは戦国時代から江戸時代
- 特に河川の両側に連続堤が作られた江戸時代に現在の堤防の基本的な技術や規準が整備された
- 特筆すべき治水工事
  - ・利根川の東遷
  - ・木曾三川の宝暦治水

### 千栗土居断面図

400年前(江戸時代)に久留米につくられた堤防で、当時の一般的な堤防である。表法側に侵食防止の竹を植え、裏法側に木を植えている。高さ7.2m、敷幅54m

ついでに、この当時の締め固めの問題は、当時の日本人の体重が40キロぐらいですので、40キロの人間がもっこを担いで歩く。それはちょうど今のシープフットローラーと大体同じ荷重になります。それでもって締め固めたという形になっております。

江戸時代の堤防ののり面勾配ですが、定法という、いわゆる幕府の基準です。表のりが1割5分、裏のりが2割、これは正徳期ですが、享保の時代もそうです。寛政から幕末にかけて、土堤、砂堤、石堤というふうに分けておきまして、土防を1:1、2~1.3、それから砂堤は1.7割から1.8割という形でつくっております。

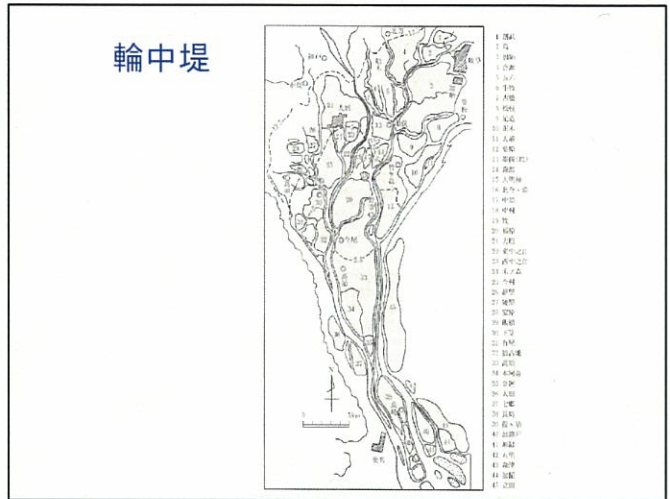
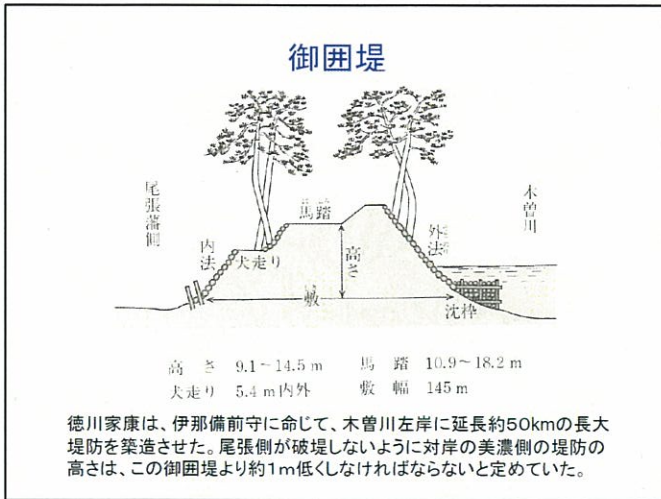
江戸時代の非常に大きな技術革新というか、仕事としては、今に残る木曾川左岸の御囲堤です。木曾川左岸の約50キロにわたって堤防を築造して、尾張側が破堤しないように、対岸は必ず3尺、1メートルを低くした。そのために、しょっちゅう洪水になる揖斐川のほうは、仕方ないから、自衛のために輪中堤をつくったわけです。江戸時代の定法でも、必ず右岸は3尺低かるべしということで、最低90センチは低くしなければならなかったということです。今でも、いつ

### 江戸時代の堤防のり勾配の変遷

時期	定法		備考	出典
	表のり	裏のり		
~正徳期	1:1.5	1:2.0	・表1:1.0、裏1:1.5の例もある ・小川では今少し急 ・石堤、砂堤などは表1:2、裏1:3の例もある	地方竹馬集 (1689)
享保期~	1:1.0	1:1.3	・大きな堤防では表1:1.2、裏1:1.4~1.5	地方凡例録 (1794)
寛政 ~幕末	土堤 1:1.0 砂堤 1:1.5 石堤 1:0.5		・堤防を丈夫にするには、土堤1:1.2~1.3、砂堤1:1.7~1.8、石堤1:1.0であるが坪数が多くなるのでだいたい定法	



も右岸側は被害者であったという感覚が残っていきまして、長良川が破堤のとき、裁判でも地元の人から、昔からおれたちはこういうところでひどい目に遭ったということを強調されていたようです。



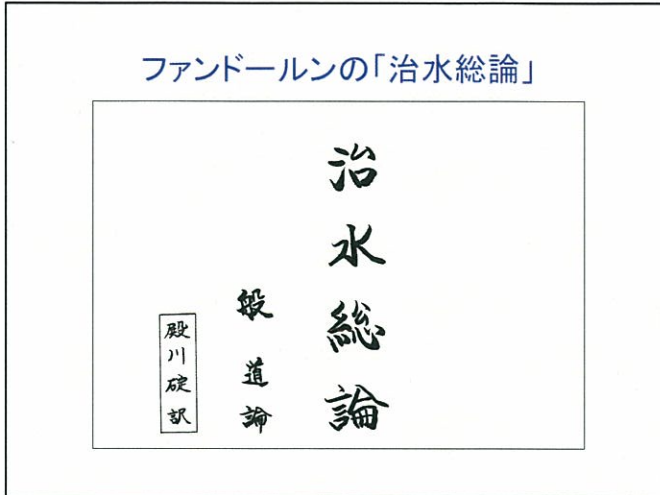
明治になりまして、外国からの技術を多くの分野で持ち込んだんですが、そのときに、オランダの技術屋、ファン・ドールンをチーフとして、リンドウ、チッセン、デ・レーケ、エッセル、ムルデル、こういう人たちが来て指導したわけです。この中で、ファン・ドールンは技術屋ですが、日本で有名なデ・レーケというのは、技能者といえますか、現場のことには非常に詳しくたんですけども、オランダに戻っても出世の見込みがないので、そのまま日本にずっと残ったということがあります。

### 明治時代初期

- オランダ人技術者の招聘による近代技術の導入
  - ファン・ドールン(明治5年~明治13年)
  - リンドウ(明治5年~)
  - チッセン(明治6年~)
  - デ・レーケ(明治7年~明治36年)
  - エッセル(明治7年~)
  - ムルデル(明治12年~)
- 利根川、淀川、木曾川等の調査、改修計画の立案・指導

ファン・ドールンというのは、理論というか、日本の川については非常に考えた人なんですけど、デ・レーケのほうはそういうことなので、とにかくファン・ドールンの言ったとおりにやったということです。ただし、彼らが知っていたのはオランダの大陸河川の話なんですね。ほとんど水平の川ばかりやっていたので、傾斜がある川というのは知らないということで、デ・レーケは結局、日本に来て、北陸側の河川に対してはお手上げだったわけです。「これは川でない。滝だ」と言った有名なせりふがありますが、それで、日本の河川で北陸側というのは、江戸時代の構造、あるいは江戸時代の考えというのをそのまま残してやっております。

ファン・ドールンで有名なのは『治水総論』で、漢字で「般道論」と書いていますが、ファン・ドールンです。これが書いた『治水総論』で、大体、当時の日本の河川の総括をしております。ファン・ドールンが明治6年に出した『治水総論』では、天端幅は4.8から6メートル、堤防高は高水位より0.6から0.9メートル高く、のり勾配も、表のりを1:2.5より緩く、裏のりは1:2割より緩くつくれということが書かれています。



「治水総論」(ファン・ドールン, 明治6年)

天端幅	4.8~6.0m	・堤防と道路を兼用するとよい ・排水のためかまぼこ型とする
堤防高	高水位より0.6~0.9m高く	
のり勾配	表のり1:2.5より緩く 裏のり1:2より緩く	・表のりが緩いのは水勢に抵抗しなければならないため ・植物が生育しないので、裏のりは1:2より急にしない方がよい
小段	なし	

この当時は、江戸時代と同じで、小段がありません。単断面の堤防をつくっております。天端を道路にしたのは、これは世界中、堤防を道路として使ったわけです。今、日本で堤防の天端を道路にしちゃいけないと言ったのは、山本三郎さんが本でちょっと書いたのがそのままになっているわけですが、天端幅は、今に比べてもかなり広いということで、江戸時代では、これを「馬踏」と言って、やはり道路として使っていたわけです。

ファン・ドールンが去った後、日本人の技術者がその教えずとやって、それからいろいろ考えて、天端幅3.6メートル、のり勾配は、表のり2割、それから1.5割、余裕高は0.9m、小段を設けてやるということだったんですが、小段ができた最初というのは、明治初期の淀川の改修のときに、当時のエキスカベーター、新しくアメリカから輸入した新鋭の掘削機が、非常に高能率で性能がよかったも

明治時代中期

●日本人技術者による改修計画の作成  
斐伊川改修計画(明治29年の堤防断面)

天端幅	3.6m
のり勾配	表のり1:2.0 裏のり1:1.5~1:1.8
余裕高	0.9m
小段	・小段を設ける ・堤脚に粗朶柵、礫、杭を利用して護岸を設置

のですから、全部掘削すると土砂が非常に余ったわけです。それで、余った土砂をどうしようかということで、しようがないから、裏はずっと土地があいていますから、裏側にそのまま土を捨てたというか、捨土をしたわけです。その捨土が、何となく余裕もありそうだとということで、小段という日本的な名前をつけて、つくったわけです。ですから、小段というのは、もともと残土処理のためにでき上がったというもので、特に意図して設計したり、つくったわけではないです。ただし、それが何となく調子がいいということで、淀川の改修が終わった後も、吉野川とかそういう改修のときに小段を使って、ついでに小段に粗朶の柵とか杭などを打って、立派な堤防の一部に仕上げたというのがあります。



明治の初めまで、日本の川は全部、天井川だったというのは、当時、河道を掘削する技術がなかったということです。日本の川ですから、ほうっておけば、どんどん土砂流出で天井川になります。今度は逆に、かんがいには天井川のほうが非常にいいわけです。天井川に穴をあけて、水を横へ流して、それをかんがい用水として分配するということで、満濃池の時代に、70メートルの大きな樋門をつくったりしていますし、江戸時代でも、樋門というか、穴を全部、中に石を詰めて、水が一遍に流れないようにして、かんがい用水の水路としてつくっておいたということがあります。ですから、天井川としては、当時の農業のためには非常に有利であったということがあります。

河道掘削が本格的に始まったのは明治以降、淀川以降ということになります。戦前の代表的な河川工学書、福田次吉、宮本武之輔、富永正義という方々の、余裕高、天端幅、表のり、裏のり、余盛、全部書いてあります。余裕高については、江戸時代は上流ほど高くする。というのは、日本の洪水というのは俗に1泊2日といわれるように上流は洪水の継続時間が非常に短いからです、浸透に対して考えなくていいから、とにかく上流は急な洪水のピークで、

それがすぐ下がるということで、上流ほど高く、下流ほど余裕高は小さい。下流になりますと氾濫して広がりますから、今、考えても、ある面では合理的な考え方があったわけです。

**戦前の代表的な河川工学書と堤防に関する記述内容**

		福田次吉 河川工学 (昭和8年)	宮本武之輔 治水工学 (昭和11年)	富永正義 河川 (昭和17年)
のり 勾配	表のり	1:2~1:3 特別な場合:1:3~5	同左	1:2
	裏のり	1:1.5~1:2.5 特別な場合:1:3~5	同左	直轄:1:2
余盛		堤防高の 1/8~1/12		
余裕高		相当な箇所:1.5m 重要な箇所:1.8m 小河川: 0.9~1.2m 稀に:0.6m	流量2000m <sup>3</sup> /s以上: 1.5m 特別な急流河川: 1.8~2.0m 稀に:0.6m	300m <sup>3</sup> /s以下:1.0m 200m <sup>3</sup> /sまで:1.2m 300m <sup>3</sup> /s以上:1.5m 流量極めて大、水面勾配極めて急:2.0m
天端幅		一般のもの:6~7m 重要なもの:8m 小河川:3~5m	普通:4~8m 特殊:10~15m 小河川:3m内外	直轄:4~10m 流量大、勾配急: 8m以上 普通の大河川:6~7m

それから、ファン・ドールンの基本になった考え方というのは、今の河川流量で言うと、大体3,000 m<sup>3</sup>/s から4,000 m<sup>3</sup>/s ぐらいの川に該当します。つまり、その当時の日本の代表的な川の堤防の形を集約すれば、この程度になったということになります。

明治29年に河川法が制定されて、10大河川が指定され、明治43年に発生した東海、関東、東北地方の大水害を契機に明治44年に治水調査会をつくって、第一次治水計画を策定した。全国の65河川を直轄改修河川にしたということになります。

明治時代中期～後期	大正時代～昭和初期
<ul style="list-style-type: none"> <li>●明治29年 河川法の制定</li> <li>●10河川(利根川、庄川、九頭竜川、遠賀川、淀川、信濃川、吉野川、高梁川)の直轄化、改修計画策定</li> <li>●明治43年 東海、関東、東北地方に大水害発生</li> <li>●明治44年 臨時治水調査会設置～第一次治水計画の策定 → 全国の65河川を直轄改修河川とした</li> <li>●北上川放水路工事、荒川放水路工事、大河津分水路工事、淀川放水路工事、吉野川本川工事等の大河川工事が集中して実施される</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●大正7年 中国、四国地方で大水害発生</li> <li>●大正10年 第二次臨時治水調査会の設置～第二期治水計画の策定 → 81河川を選定して20年以内の完成を目指す</li> <li>●大正15年 関東大震災</li> <li>●昭和初期 経済恐慌</li> <li>●昭和8年 土木会議河川部会設置～第三次治水計画の決定 → 緊急に改修を必要とする24河川の15年以内の完成を目指す</li> </ul>

戦争中はどうしようもなかったんですが、昭和22年にカスリーン台風による大水害がありまして、利根川が切れて、約1週間にわたって洪水が続いたわけですが、東京湾に達するまでに約1週間かかっています。このときに、利根川の堤防の復旧というのは、当時の日本の総力を挙げてやったわけです。昭和22年ですから、日本には全く資材がなかったわけです。それから労働力も、戦争でほとんどなくなったということで、当時、米軍にいた埼玉の軍政

部の司令官ライオン中佐という人が、アメリカの工兵隊の出身で、先頭に立って猛烈に働いていただいて、この人のおかげで、当時の日本の河川の工法について、ある面では革命的に、日本は満足にトラックもなかった時代ですが、占領軍で舟艇とかトラックを全部動員して、利根川の復旧に当たったということがあります。この人は昭和23年にアメリカへ帰りましたが、これは忘れられてはならないことだと思います。

昭和時代(戦後)
<ul style="list-style-type: none"> <li>●昭和22年 カスリーン台風による大水害 治水調査会設置</li> <li>●昭和24年 利根川、淀川等10河川の計画改定</li> <li>●昭和33年 建設省河川砂防技術基準(案)発行</li> <li>●昭和39年 河川法の改正 → 一級河川、二級河川の区分、工事実施基本計画(計画高水流量等)策定の規定化等</li> <li>●昭和51年 河川管理施設等構造令</li> </ul>



昭和33年に堤防の断面が大体決まったんですが、このときは、計画高水流量に応じて堤防の大きさを決めるということがありました。この高水流量に応じて堤防の大きさを決めるというのは日本だけなんです、外国ですと、中国も含めて、高水流量で堤防の大きさを決めるというのはないので、全部、後背地の資産の集積度に応じて堤防の規模を決めています。ですから、アメリカとかヨーロッパになると、とにかく本当に重要なところは、堤防のような土でできた当てにならない構造物じゃなくて、コンクリートでつくるといことで、コンクリートとか石垣でもってつくったわけです。これが、向こうは資産でもって区分していて、特に氾濫原にどれだけの資産が集積しているかということ、堤防の大きさとか強度を決めておられます。

これは中国が非常に詳しくやっています。今の政府になってから5分類しまして、後背地の人口とか資産、それから氾濫容積を指標として、細かく区分しております。同じようなことは、ヨーロッパでも後背地資産で決めていると思います。

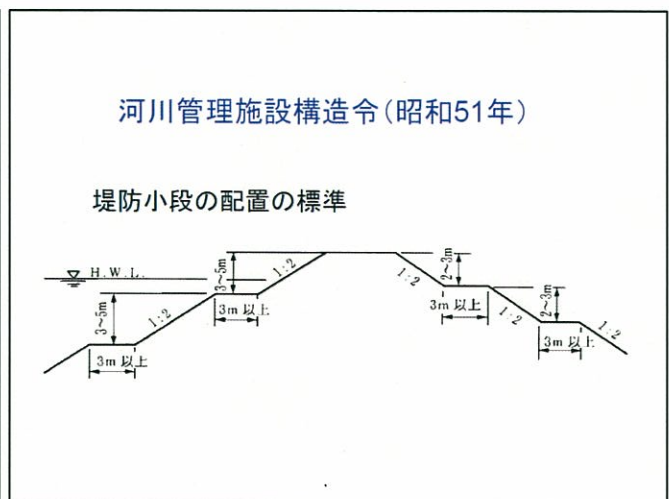
昭和51年に河川管理施設構造令ができたんですが、これでもって堤防の断面というものを決めたわけです。ところが、河川管理施設構造令は、文章を読むと比較的自由度があったんですが、土堤、土の堤防を原則とする。それからもう一つ、堤防の断面の図を書いたわけです。

**河川砂防技術基準(案)(昭和33年)の堤防の断面**

項目	記述内容
余裕高	0.6~1.5m(計画高水流量に応じて設定)
天端幅	直轄河川:4~8m(計画高水流量に応じて設定) 中小河川:3~5m
のり勾配	1:2~1:3
小段	のり面の崩落の防止、漏水防止、基礎の安定ならびに水防のため必要に応じ小段を設ける

**河川管理施設構造令(昭和51年)の堤防の断面**

項目	記述内容
余裕高	0.6~2.0m(計画高水流量に応じて設定)
天端幅	3~7m(計画高水流量に応じて設定)
のり勾配	1:2より緩く
小段	堤防の安定を図るため必要がある場合においては、小段を設ける。小段幅は3m以上とする。



以後、何も考えないわけでもなかったんでしょうけれども、何も考えないで、堤防の大きさをこれで決めた。決めるのは流量だけですから、流量を決めて、のり面を決めれば、あとは自動的に堤防の大きさも決まるということです。

それで土堤原則と書いてあったので土構造物として一番基本のフィルター、ドレーン構造物がなくなったのです。ドレーンについては、妙な話ですけれども、後ろにドレーンをつけると、洪水のとき裏から水が出ると人心に不安を与えるというような妙な説明があって、ドレーンをつくっちゃいけないということになったわけです。今だとお笑いになりますけれども、この当時、ドレーンをつくるというのは大問題で、つくっちゃいけないというのが原則だったんです。だから、堤防から洪水のときに水が出るなんてとんでもないことだということもありますし、小段がないと作業ができない。もともとは建設残土で、余った土を盛っただけの構造物ですが、締め固めも、そういう規定も何もなくてできたということになります。

この構造令には締め固めの規定もないんです。日本では小型ブルが建設機械の主力ですから、締め固めというか、まき出し機械のブルドーザーですね。それを全部、堤防の締め固め、まき出し、盛土をブルドーザーでやってしまったということがあります。ですから、機関車でもってやっていた時代はもっとひどかったんですが、ブルドーザーになってから、それでも最大乾燥密度80から90%ぐらいまでの間になったわけです。

それ以前はどうしていたかという、機関車でトロッコを引いて、後ろから横の盛っていないところに、トロッコを回転させて、全部下に土を落としたということで、高まき工法と言っていますけれども、上からバーッと落としていく。大体2メートルぐらい落としたら、今度、線路を移しかえて、また反対側に盛るということをやったわけです。

ですから、現在の堤防というのは、この当時につくられたものが一番弱いということになります。大体、締め固め度で、ひどいものは最大乾燥密度70から75ぐらいですね。そのぐらいから始まって、せいぜい80%ぐらいの締め固め度になっております。その締め固めも、つくった後、雨が降って2割ぐらい沈下しますから、自然に雨と自重でもって沈下して、締め固まったということになります。ですから、今でも堤防でチェックしなきゃならないのは、この時代、昭和25年から35年ぐらいの間の堤防というのは、一番欠陥が多いというか、締め固め度が緩いわけです。





掘削方法の変遷



『スクレーパー』(昭和30年代)  
運搬距離が短い施工箇所に使用

掘削方法の変遷



『ドラグライン』(昭和30年以降)  
ブームが長く、施工範囲が広いため河川工事に多く使用、水中掘削も可能

掘削方法の変遷



『バックホウ』  
昭和40年代より使用(締固めにも使用)

掘削方法の変遷



『炭運船』  
深達した土砂をポンプで圧送

運搬方法の変遷



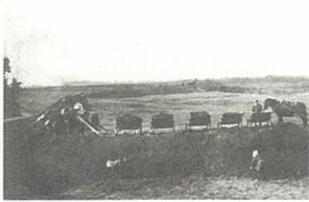
『人力・馬力による運搬』  
馬や人力により『もっこ』等を使用し行われてきた(江戸～明治)

運搬方法の変遷



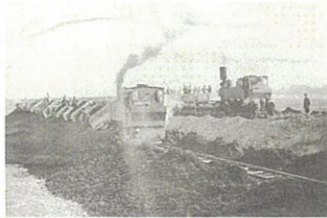
『人カトロッコ』  
大正～昭和初期では『トロッコ』により土を運搬するようになった

運搬方法の変遷



『馬カトロッコ』  
運搬距離の長い箇所や人夫の少ない所で使用(大正～昭和初期)

運搬方法の変遷



『蒸気機関車』  
大正～昭和初期に使用

運搬方法の変遷



『ディーゼル機関車』  
昭和20年代より機動性のよいディーゼル機関車が導入

運搬方法の変遷



『ダンプトラックによる運搬』  
エキスカベーターと機関車による組み合わせ施工が少なくなってからダンプトラックによる運搬が主役になった

撒き出し～締固め方法の変遷



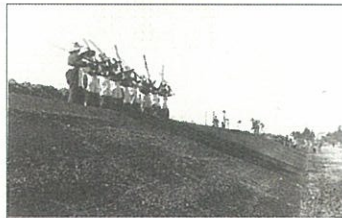
『撒き出し』(大正～昭和30年代)  
機関車を用いて土を運搬する場合、特に締固めは行わなかった

撒き出し～締固め方法の変遷



『タコつきによる締固め』(～昭和30年代)  
重さ10～15kgの石タコを6～8人掛で引張り上げた後に落下させて締固める

撒き出し～締固め方法の変遷



『土羽打ちによる締固め』(～昭和30年代)  
土羽打ち棒を手にした人夫が一列になってのり面の表面を叩く

敷き均し～締固め方法の変遷



『ブルドーザーによる敷き均し・締固め』(昭和30年代以降)  
戦後は、米軍のブルドーザーの払い下げがあり、施工効率を上げることができた

敷き均し～締固め方法の変遷



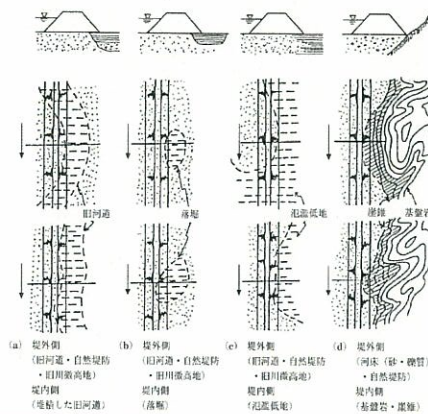
『タイヤローラーによる締固め』(昭和30年代以降)

堤防というのは、一番問題は、中身が何だかわからない。時代によって、次から次へと堤防をつくったわけですが、つくっている人、時代、金によって全部変わります。堤防の安全性に何が影響するでしょう。基本的には浸透の問題、あるいは締め固めの問題なんですが、堤防の安全性に問題のある地形・地質というのは、この図のように整理できます。普通の構造物ですと、まず基礎地盤がいいか悪いかを見て、その次に、それに応じた構造物をつくるわけですが、堤防の場合は、基礎地盤を選ぶことができませんので、河道に沿ってつくるということになります。

### 河川堤防の特性

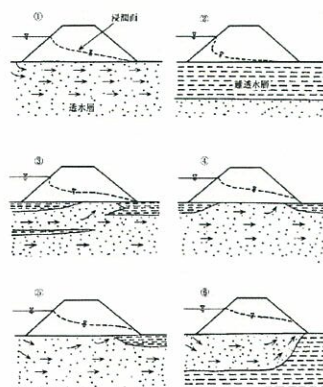
- 1) 堤防の基礎地盤は多様な土質地盤条件下にある。
- 2) 堤体は種々の土質材料が混在している。
- 3) 河川堤防は築造の履歴がある。
- 4) 河川堤防の規模、形状が多様である。
- 5) 堤体は土工によっても不均質になる。
- 6) 降雨、河川水の作用外力は場所によって異なる。
- 7) 水の浸透により土の強度や性質が変化する。

### 堤防の安全性に問題のある地形・地質



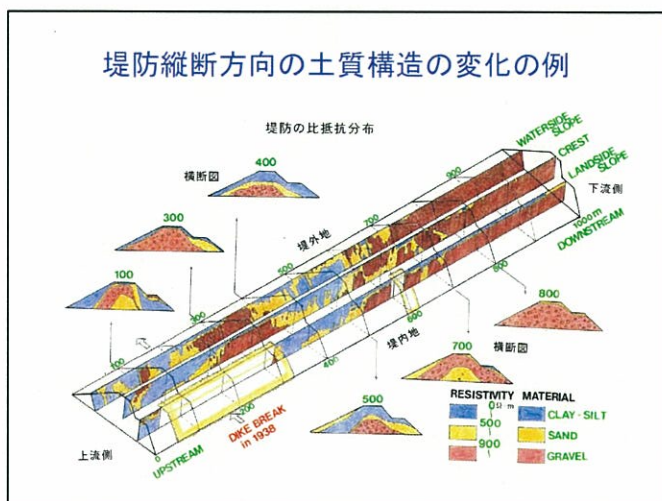
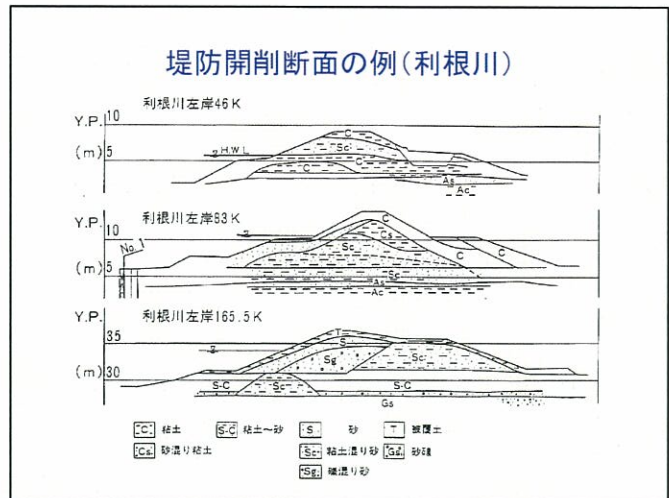
こうしますと、そのこの図にありますように、堤防下の基礎地盤が川側から砂があって、後ろに粘性土がありますと、そこでもって一種のせきとめになります。基礎地盤の浸透水がせきとめられて水位上昇する。そして、裏のりの問題なところ、水圧が高くなって、そこから破堤というか、損傷を起こすということになります。地盤の形で言うと、行き止まり型という言葉で総称しております。

### 基礎地盤の一般モデルと浸潤面上昇の関係



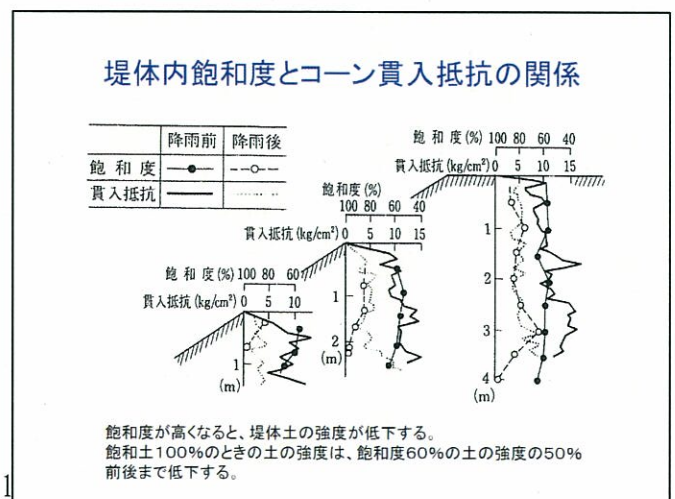
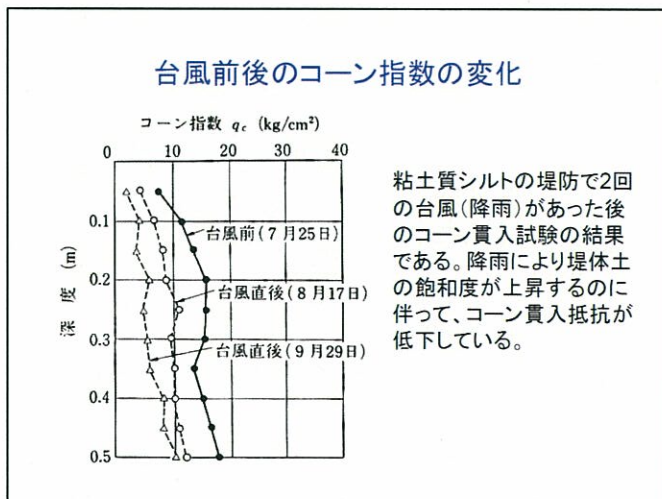


一方、堤体のほうも、土をいろいろな時代に盛っていますから、簡単に言うと、ひどいのは、盛った土が堤防の前のりから後ろのりまで全部、砂質土で貫通していたような例もあります。こういうのは洪水になったらあっという間に水が抜けるわけです。ただ、現在は前のりに、非常に頑丈な護岸をやってあります。だから、前からはなかなか入りにくいという構造になっています。



堤防縦断方向の土質構造の変化については、比抵抗映像法によって検討した例があります。堤防のいろいろな所に、いろいろな土が入っているというのがわかりますし、昔の工事というのは200メートル間隔、1ブロックが200メートルの区間で施工しているわけです。ですから、200メートルごとに堤防の土が変わる。横断方向だけでなく、縦断方向にも変わります。知られた限りでは、200メートルぐらいが、ある区切りとなっているのがあります。

堤防の土質で何が問題かという浸透による飽和です。これは江戸川の測定なんです。最初に、台風前の堤体の飽和度というのはこういう状態であったわけです。そして、1回台風が来て、8月17日になると、土の強度、コーンの強度が一挙に3分の1ぐらいに落ちちゃう。もう一回台風が来て、そうすると半分になる。つまり堤防の強度というのは、雨が降ると非常に落ちる。何もしていないと非常に強度が落ちることになります。これは、山村さんが土研で研究した結果でも同じです。降雨前と降雨後では非常に変わる。

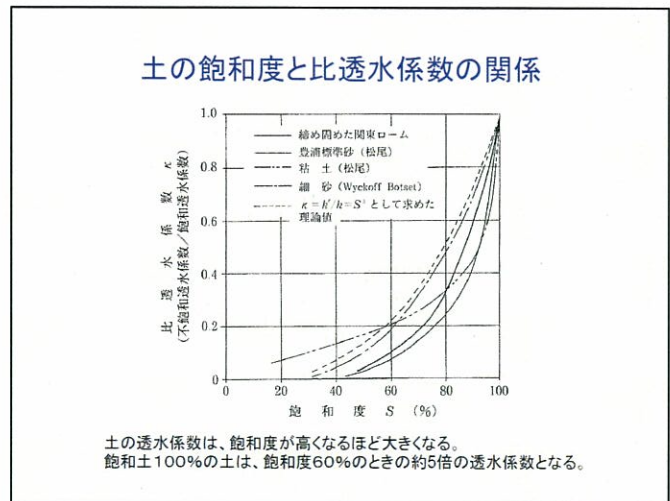


何が問題かという、飽和度が上がると、剪断強度が低くなり、かつ土の浸透速度が非常に速くなる。そこに比透水係数と飽和度の関係を出してありますが、乾いている堤防というのは、水のしみ込む、比透水係数がゼロに近いんですが、飽和した土の堤防というのは、透水係数が5倍ぐらいになるんです。浸透速度があつという間に速くなるということがあります。

ここで日本と外国の堤防の関係を見てみます。まず、洪水流量では堤防規模は決まらず、堤内地資産を重要視していることです。それから、日本では同一河川は同一安全度を保つようにする。資産があろうがなかろうが、後ろが田んぼだろうが、高層ビル群だろうが、同じ100分の1の確率の洪水に対して、全部同じ安全度を持つ。これはある面では、非常に考え方としては筋が通っているんですが、全部の堤防をそれで守る必要があるのかということになると、必ずしもそうでないということがあります。

日本の場合は河道を守るということが中心で、外国のように、被害規模によって堤防の強度を変えるということはないわけです。ミシシッピ川のピックスバーグあたりの洪水堤防は洪水防御壁です。刑務所の塀みたいに、高さが6メートルでずっと連続しているわけです。中にいる人間はたまらないなと思うんですけども、彼らに言わせると、城壁として、昔から城の中で守られているから、そういうことに抵抗感がないんですね。むしろそれが安全だと言います。

そういうことで、洪水防御壁というのは、日本人の思想では、緑がないとか、土の温かみがないとか、いろいろご託を並べるんでしょうけれども、それが無い。それで、やりやすいように合理的につくってしまうというのがあります。



### 日本と外国の堤防の違い

日 本	計画洪水流量で規模が決まる 同一河川は同一安全度を持つ 均一型堤防が原則であった 堤防の安全性を規模で決めている 洪水防御壁の思想はない
外 国	堤内地資産で重要度に差をつける 場所によって安全性に差がある 複合型堤防に変わりつつある 安全性は機能別に決める 最重要地域は洪水防御壁で守る



最近の日本とオランダとアメリカの土堤ですが、土だけでつくっている堤防というのは、いろいろありますけれども、外国の堤防というのは機能を重視しています。それぞれの機能を、例えば耐震性であれば耐震性をうんと上げておくとか、あるいは洪水のピークが非常に高い、そういうのにはそういう堤防をつくるということで、その一つのケースとして、一種のゾーンタイプの堤防ができていくわけです。

こういうことを一番最初に始めたのはハンガリー

なんです。国の3分の1が、もともとのハプスブルクの時代の堤防を上流からつくり出したわけなんです。第一次大戦でもって戦争に負けて、上流側が全部独立しちゃったわけなんです。下流の湿地帯というか、低地が全部

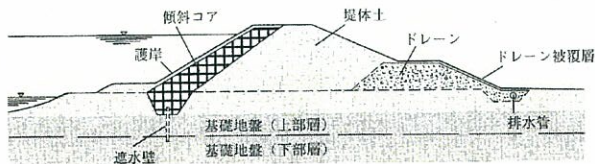
### 均一型堤防の日・欧・米の比較(形状と基準)

項目	日本	オランダ	アメリカ
堤防高	HWL+余裕高	DHW+最小必要余裕高+余盛	HWL+余裕高
余裕高	堤防の構造上必要とされる高さの余裕で、計画高水流量以下の洪水を越流させないよう設けるもの。	重大な越流の防止 設計水位の計算の不確実性に対する補正	計画高水位の計算で合理的に説明できない要因に備えるもの 農業用堤防 0.6m 市街地堤防 0.9m
天端幅	計画高水流量によって段階的に決められている。 機能としては (1) 常時の河川巡視 (2) 洪水時の水防活動	特定の基準なし 公道のない堤防は検査用道路として4m以上の幅を確保する	道路条件によって決める。 管理用や水防作業用には3-3.6mが最低幅 天端がさらに上級の道路に使用される場合は責任を負うべき機関が設定する。
法勾配	単傾斜(一枚法)で2割以上、できるだけ緩傾斜とする。	基準なし。表法面は護岸のある場合は2割またはそれより急。護岸のない場合は表法面は2割5分より緩くする。 表法面3割以上。 安定性に懸念のあるときはHWLとGLの差Hの2-3倍の幅で柳え盛り土をする。	基準なし。一般的には農業用堤防 表法面 1:4 裏法面 1:5 市街地堤防 表法面 1:4 裏法面 1:5

残っちゃったので、そのために堤防技術を一生懸命にやって、今のいろいろな堤防のモデルをつくったわけなんです。

ドイツの技術基準のモデル図です。これで見ますと、前のりが傾斜コア、そして護岸はある。それから堤体土は砂質土が、その次に、非常に大きなドレーンをつくります。そして、排水管を入れるのはオランダなんかの考え方ですが、排水管でやる。

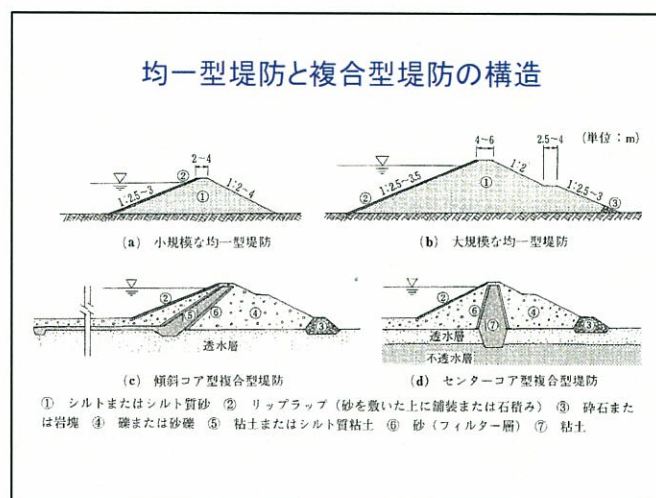
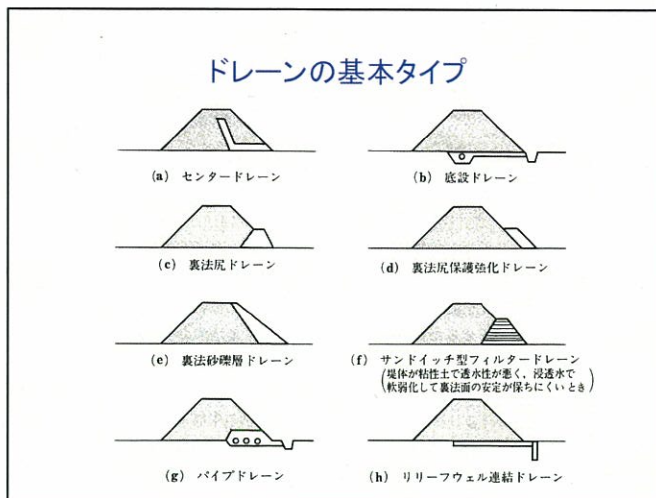
ドイツの技術基準の堤防モデル図



ドイツ水資源管理・構造物協会(DVWK)・河川堤防専門部会作成

一方、同じヨーロッパでも、オランダは礫がありませんから、ドレーンを排水管だけで処理している。ドレーンの基本タイプで、中央から後ろ側に横の底設ドレーンをつくって、それで水を抜くというようなものとか、パイプドレーンを幾つも並べて水を抜くというのが、オランダの堤防のドレーンの基本になっています。そうすると、パイプを入れて水を抜く間隔ですが、 $10^{-3}$ 以上の大きな透水係数を持つ堤防は、排水口に抜くのを、ドレーン間隔で80メートル、それ以外の透水係数の場合は、300メートルの間隔で、横の排水ドレーンをつくるということをやっています。オランダの技術を入れた日本では、八郎潟の干拓堤防が同じような形づくっております。

そこにありますように、複合型堤防と均一型堤防の型ですが、複合型堤防は、改築、施工がやりやすいように、前のり傾斜コアが多いです。アメリカでは、ドイツ人の技術が入ったんだと思いますが、初期の段階からセンターコアが多い。非常に大きなものをつくって、そこで遮水するという考え方でやっております。



ドナウ川支流ティサ川における破堤の瞬間  
(2001. 3. 6)

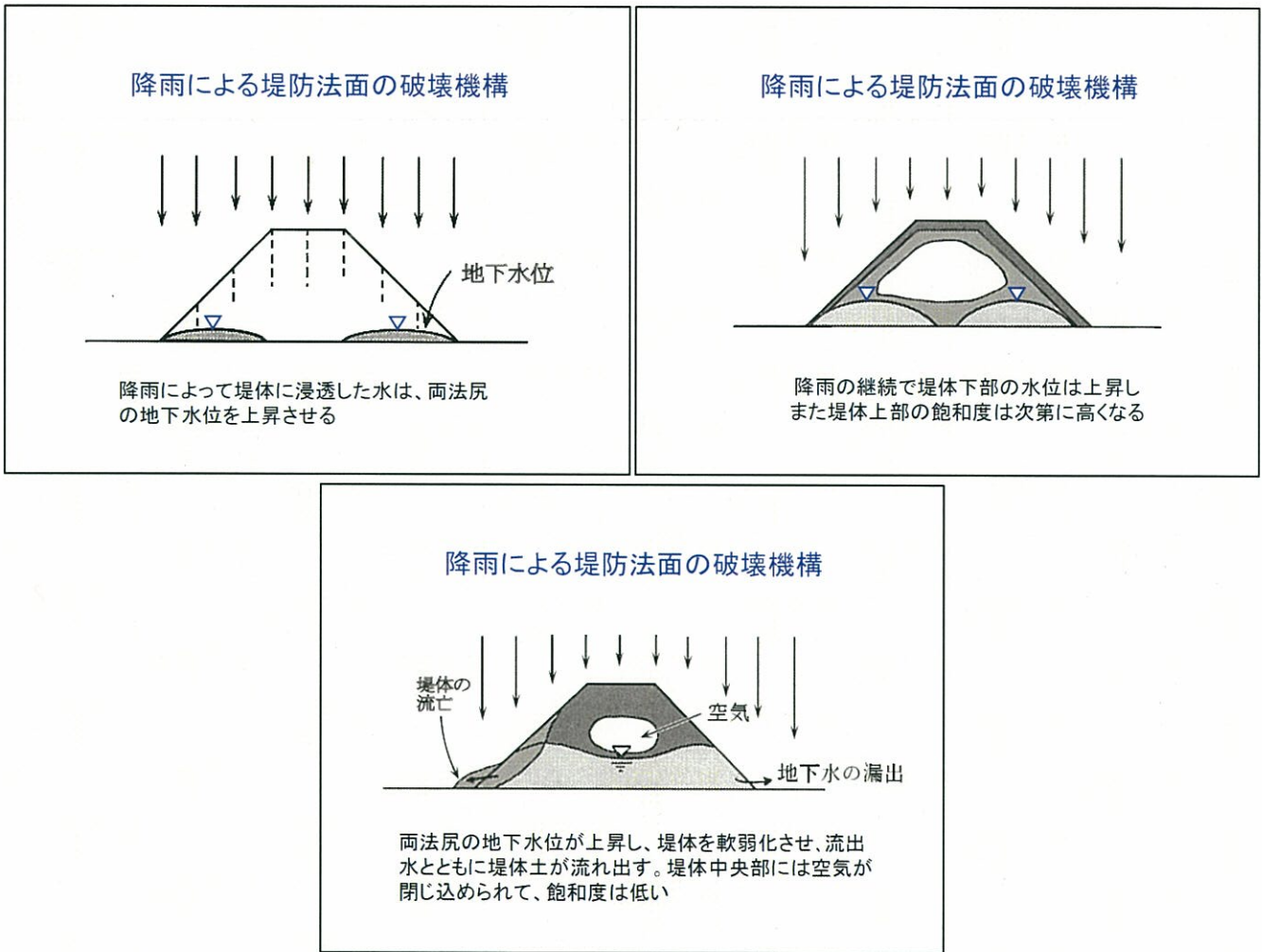


ハンガリーのMr. Nagy Laszlo (OVF上級顧問)を通じてMr. Gyorgy Magyari のご厚意により提供された写真

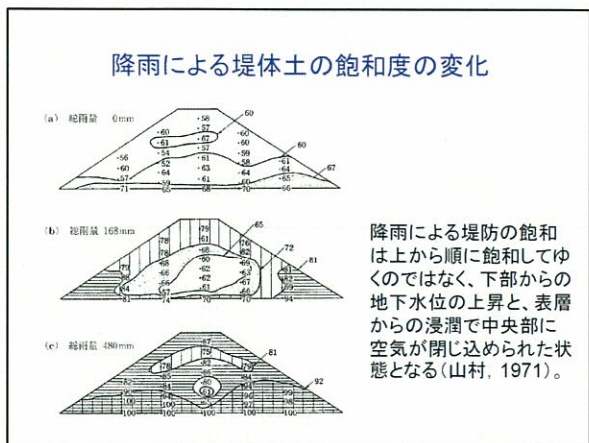
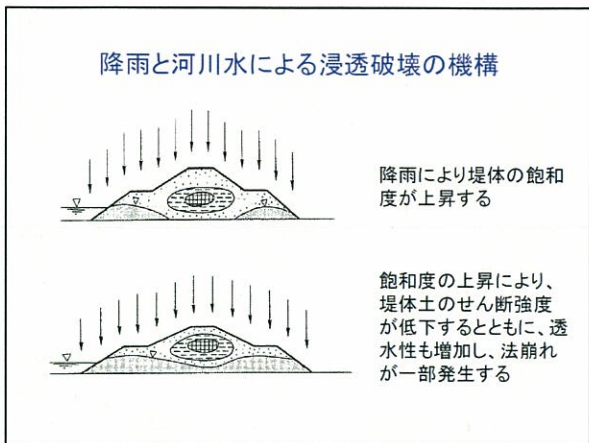
写真はティサ川、これはドナウの最大支川です。ハンガリーの真ん中を通過しています。これは浸透破壊です。長く続いた洪水で水位が上がって、それで破壊したんですが、これはハンガリーの知人が送ってくれたものです。



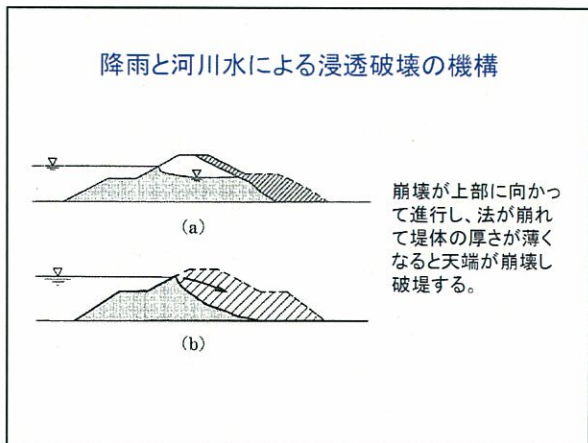
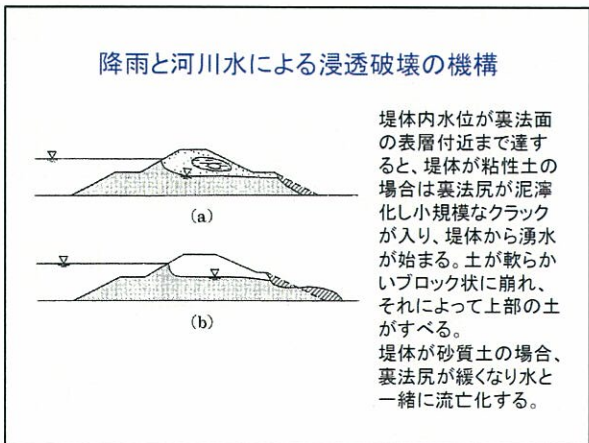
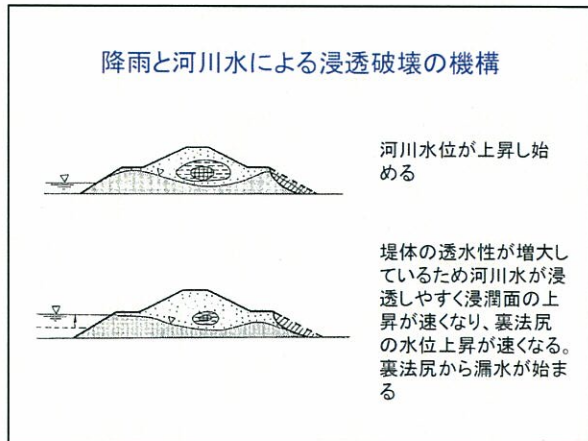
雨によって堤防は非常に弱くなる。堤防が破壊する原因というのは、幾つかあるんですけども、よく誤解されている方がいるんです。雨は上から降りますが、雨によって堤防の水位が、中身がどう湿潤するかという、上から浸透するわけじゃなくて、上から浸透するのは浸透するんですが、実際には、堤体内の地下水というのは、まず到達距離の短い両端から高くなっていくわけです。浸透水というのは、フィンガリング現象でもって、すき間を先に水が抜けていくわけです。そして、それが底にたまっていくということで、上からの距離に応じて両側の水位が上がっていくという形になります。



堤防ののり面の破壊機構です。地下水流出があるんですが、堤体内の水位がどんどん上がって、最後には一番乾いた、空気が閉じ込められたところが、マグマみたいに空気が残ってしまうんです。ですから、決して一様に弱くなるんじゃなくて、飽和度が図にもありますように、だんだん両側から上がって、真ん中に、最後に空気が閉じ込められたような形で残るわけです。これは実験でも、あるいは実測でも、確認されています。

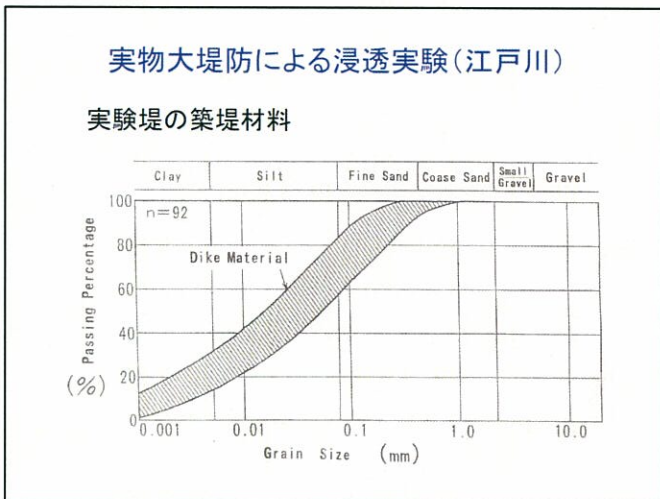
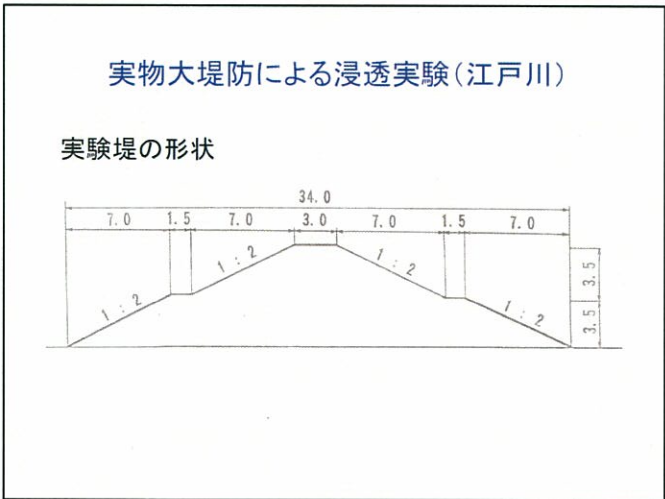
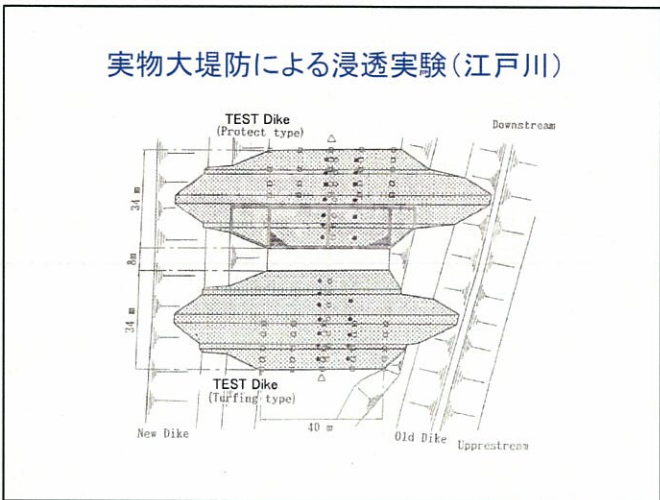
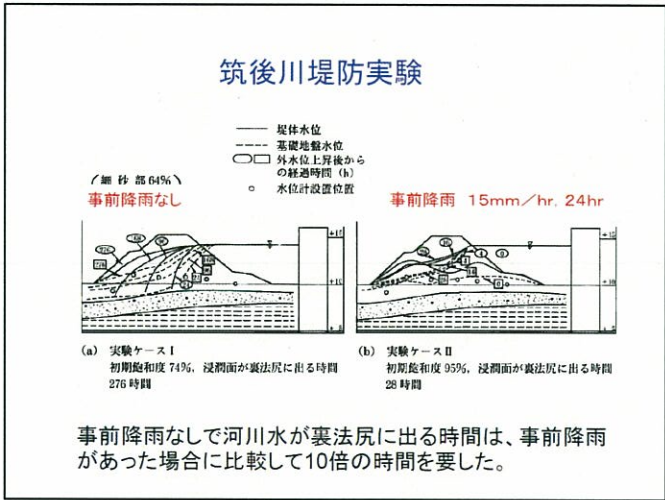


このような状態になると、裏のりから次第にどろどろに崩れていくわけです。ですから、ああいうふうに崩れていくというか、雨が降って堤防が崩れ出す一番の危険なのは、最初、裏のりじりがぐだぐだになって、それが解けて流れ出すという形になります。これは、堤防破壊のときに、飽和して、よく円弧滑りと言っていますが、円弧滑りで破壊するんだという、あれはないです。大体、非常にどろどろになって下から行く。そして、後ろから少しずつ切れたような形になって、小段の付近から大きく、滑るというより流れ出して壊れます。

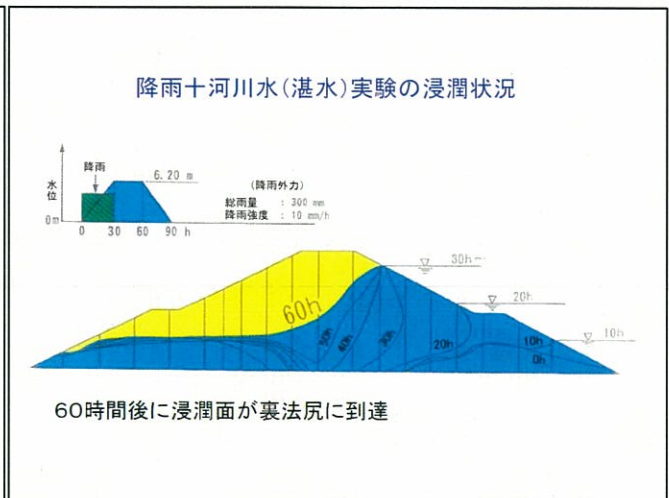
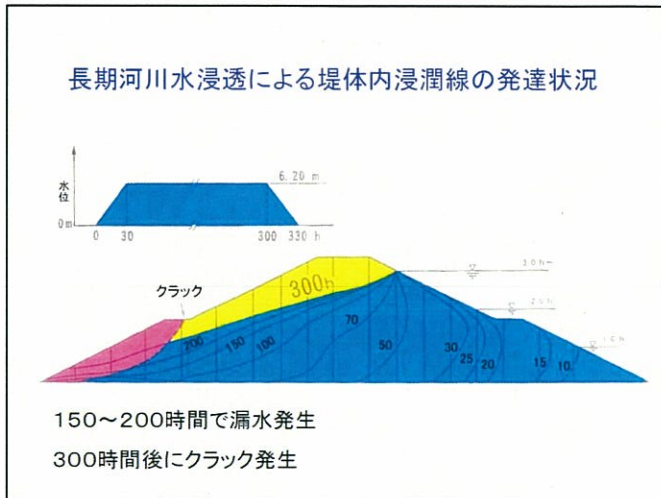




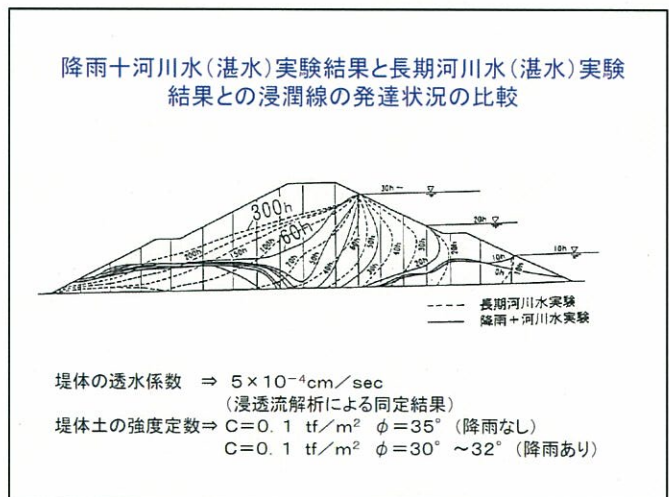
次に、浸透破壊です。浸透破壊の実験は、筑後川とか江戸川で実物大でやっております。江戸川では、旧堤と新堤の間に締め固め度で75%ぐらいの非常に弱いモデル堤防をつかって、これに湛水したわけです。水をためて、それによって、浸透したときにどのぐらいの速度で堤防が浸潤するかというのを実験したわけですが、これは約5年間、毎年いろいろな実験をやりました。



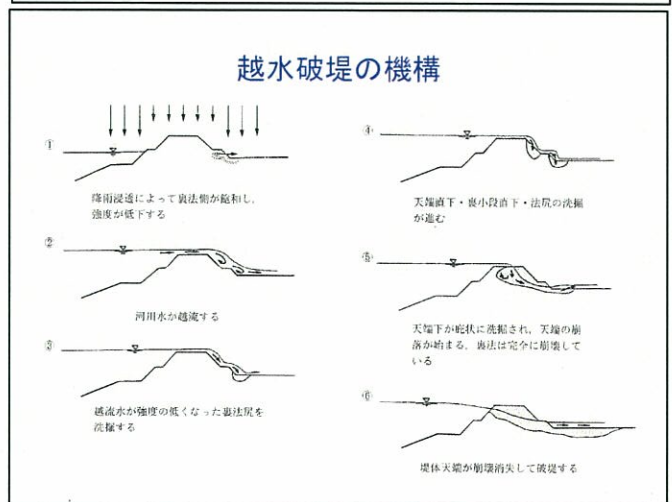
それで、水だけためて、浸潤線がどこまで行っているかというのをやります。そうすると、湛水だけでやりますと、300時間かかってやっと裏のりに行きます。次に、ある程度の雨を降らせてやりますと、結局、同じ裏のりに行くのに60時間で行く。つまり5分の1の速度で堤体が地下水で飽和されて、後ろから水が出るという状況になります。



このときは観測用のデータも非常によくとりまして、堤防の浸潤面がどう動くかというのが分かりました。



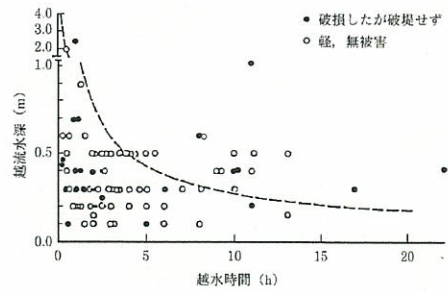
それから、堤防が壊れるので一番大きいのは、中小堤防の越水で壊れるものです。越水破堤の機構というのは、アメリカの土木学会が非常に詳しい調査をやっています、約8,000カ所のデータを集めて、それを解析していますが、大体堤防裏面が同じような形になります。





それから、土研で行われた、越流水深と破堤との関係です。越流水深が60センチ、越水時間が3時間、これで総流量一定ラインの中では、80%の堤防が破壊しない。だから、耐越水堤防は、この線を超えることが一つの目安になるという結論を得ております。

### 越水したが破堤しなかった事例



越流水深60cm、越水時間3時間、総流量一定ラインの中では80%の堤防が破壊しない。したがって、耐越水堤防ではこの線を超えることが一つの目安となる。

次に地震の話です。地震による堤防被災は砂地盤でないと起きないということがほぼはっきりしておりまして、液状化でもって全部壊れているということになります。壊れる形もいろいろあります。亀裂が入って低くなるということ、日本海中部地震の八郎潟干拓堤防では、多くのデータを得られております。

### 地震による堤防の被害

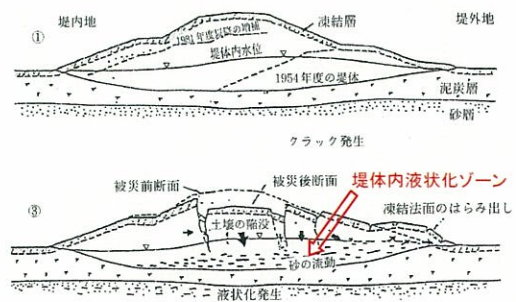
兵庫県南部地震による淀川左岸西島地区の被害状況



それから、釧路沖地震のときに壊れた堤防で、砂がないところ、泥炭地のところの堤防が液状化で破壊したんです。これは泥炭地なものですから、土を盛るとどんどん圧縮するわけです。堤体の断面としては、そこにあるように、沈下した砂がずっとめり込んで、液状化して、そこから壊れたという、非常に妙な形の被害があります。

### 地震による堤防の被害事例

釧路沖地震における釧路川堤防の被害

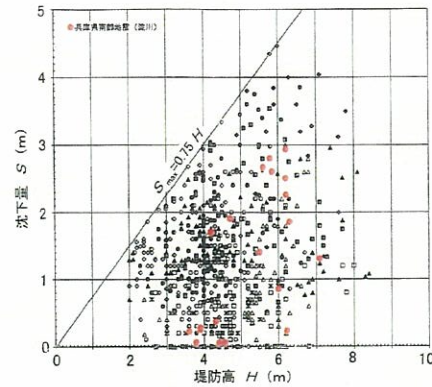


既往の地震と堤防の沈下量、こうするとどれだけの沈下量でもって堤防が危ないかというのがわかりますから、データを入れますと、大体25%までは、高さが何とかもつんだらうということがあります。

堤防に関する基準類はいろいろなものがありますが、平成9年に、河川砂防技術基準を新しく作りまして、平成11年に『改定 解説・河川管理施設等構造令』が出てくるわけです。平成14年に、治水課から出された河川堤防設計指針、これを解説する『河川堤防の構造検討の手引き』が国土センターから出されています。これで大体、一つの堤防の指針というのができたんです。これができた理由なんです、従来のように土堤原則、断面ができればいいというのをやめて、堤防に加わる外力の大きさをまず規定しよう。構造物の設計というのは、まず外力を規定するわけですが、どんな力が加わっているのかということで、降雨条件、それから締め固めなんかも考えた。

そして全部、単断面、のり面を一枚のりにして堤防の形にするということで、今度の新しい基準では、浸透に対して非常に重視しております。雨と浸透は、堤防が一番影響が大きいんだということでやっています。もう一つは地震です。しかし、まだこれについてもいろいろな問題があります。

既往の地震による堤防の沈下量と堤防高の関係



### 河川堤防に関わる最近の動き

平成9年 「改訂新版河川砂防技術基準(案)同解説」発刊  
 平成12年 「改定 解説・河川管理施設等構造令」発刊  
 平成14年 河川堤防設計指針(河川局治水課長通達)  
 平成14年 「河川堤防の構造検討の手引き」発刊



- ・形状規定から性能規定への転換(均一型堤防から複合型堤防への転換)
- ・機能別外力設定方法の基準化(耐浸透機能、耐侵食機能、耐震機能)
- ・機能照査の理論化と機能別安全度の評価方法の規定化(堤防の安全性能の客観化)
- ・河川ごとの堤防の最適化設計(地形、気象、河川形状等の条件の考慮)
- ・一枚のり化と緩勾配化(不要な小段の廃止)
- ・堤防設計・施工の国際的技術との整合性

### 河川堤防設計指針

#### 堤防の基本断面形状

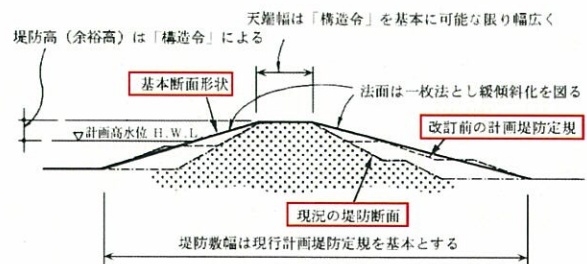
- ・堤防の高さ及び天端幅は、構造令により設定する。なお、構造令に規定されている余裕高及び天端幅は最低限確保すべき値であり、河川の特性に応じて適宜設定する。
- ・堤防のり面は、表のり、裏のりともに、原則としてのり勾配が3割より緩い勾配とし、一枚のりの台形断面として設定する。(小段は雨水の浸透を助長するため、浸透面から一枚のりのほうが有利)

### 河川堤防設計指針

#### 堤防の安全性確保の基本的な考え方

堤防の安全性を確保するためには、堤防に求められる機能を明確にした上で、それぞれの機能毎に堤防の安全性を照査し、所要の安全性が確保されていないと判断される区間については強化を図る。しかしながら、洪水あるいは地震による堤防の不安定化、あるいは変形のメカニズム等については、現時点においても全てが解明されているわけではなく、本指針で採用した設計法は、十分に確立された技術的知見であるとは必ずしもいえない。したがって、適用にあたっては未解明な部分が残されていることに留意するとともに、モニタリングを並行して実施することにより、水防活動とあわせて洪水等に対する堤防の安全性の向上を図ることが重要である。

### 改訂後の標準的な堤防の断面





これまでの建設省で出したというのか、ここまで来るまでに堤防でどんな研究をされたのかというのがあります。一番最後の長い図ですが、これは、応用地質さんがつくっていた資料です。(資料掲載省略)

研究は昭和51年から始めたんです。国土センターが事務局でやったんですが、これで見ると、最初は越流なき破堤、耐震をやっています。これだけの研究を一生懸命やったというのは、アメリカの土木学会とハンガリーの水利庁ぐらいだろうと思うんですが、こんなに細かくいろいろなことをやられたというのは例を見ないということです。

問題は、これがあまり一般化していないということで、この辺はまた別な問題があると思います。それで、河川堤防の特に越水とか浸透については、これで知識としては大体、今の段階ではまとまっておりますが、問題ないのかといいますと、まだ残っている問題というのはいっぱいあります。

これはこれからのテーマと言えるんですが、1つは、許可工作物の樋門とか樋管のクリープ浸透とそれによる損傷があります。樋門、樋管とか横断構造物については堤防の上を通せというふうにやっています。オランダ、それからミシシッピでも、ハンガリーのドナウでも、みんな堤防の上を通してあります。日本だけ、堤防のど真ん中に穴をあけて、水を出し入れしている。これについては、オランダに行ったときに、どうして止水構造物の堤防に穴をあけるんだと、向こうのやつが一生懸命聞くんですね。聞かれたって、こっちだって、役所が決めたんだとしか言えないんですが、それはクレージー・ストラクチャーだと言うんですね。

樋門、樋管は、一つの問題としては、勾配をつければいい、傾斜を内側から外側に。そうすれば今みたいな問題は起きないんです。それから、クリープ浸透ですね。

次に、天端の道路の利用。今の天端幅というのは非常に狭いです。災害があったとき、片側通行しかできないとか、災害の現場にブロックだとか土を持ってくるとき、トラックが片側しか走れない。1車線で走るとのことだと非常に手間がかかるんですね。だから、道路の幅が広ければ、2車線でやるほうが速いということがあります。

これは世界中、全部道路で使っているんですが、明治時代まではそうだったんです。ところが山本三郎さんが、別に根拠がなくて言ったんじゃないですけども、道路の高速性と堤防の強度というのは一致しないとかそういうことをちょっと書いたんですね。それがいつの間にか定説になっちゃったという問題があります。

それから、円弧滑りの問題です。円弧滑りの解釈ですね。円弧滑りというのはもともと、ノルウェーの連中が、言い出して、いろいろな式ができたわけです。円弧滑りというのは、何もそういうふうには壊れるんだとはだれも決めていないんですね。ただ、ノルウェーのスカンジナビアの土で、ああいう壊れ方をすることが多いから、円弧滑りを考えたというだけす。

一方、有効応力法には、剪断時の剪断面に発生する間隙水圧が抜けていますから、いわゆる円弧すべりの

式の分子で言う、U1、U2を足さなきゃならないので、剪断時、剪断面に働く有効応力というのは、今、日本で使っている式は無視していますから、それを入れるともものすごく抵抗が弱いことになりますので、そうすると、その片方を抜いた式にしている。だけど、言い出したケンブリッジの連中でも、全応力でいいんじゃないかという考えもありまして、必ずしもそうじゃないということです。

それからもう一つ、日本の土が違うんですが、日本の土というのは、外国に合わせれば、特殊土なんです。

河川堤防の浸透、安定問題の難しさ	河川堤防における地盤工学上の課題
<ul style="list-style-type: none"> <li>●不飽和土、中間土、締固めた土を扱う</li> <li>●不均質な堤体のモデル化の限界</li> <li>●浸透と安定の問題を同時に扱い、しかも非定常の現象を扱う</li> <li>●堤体への浸透水と基礎地盤内の地下水が相互に関係し、場合により三次元的な挙動を考慮する必要がある</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●堤体土の飽和状態における強度の評価方法</li> <li>●のり面崩壊、パイピング破壊に対する安全性評価手法</li> <li>●堤体内土質構造の効率的調査手法およびモデル化技術</li> <li>●モニタリングにもとづく安全性評価手法</li> </ul>

非常に酸性で、風化が多くて、しかも雨がべらぼうに降るといふ。土質力学というのは大体、研究した連中の土地の土に合わせて、いろいろ結論が出ているわけです。スカンジナビアといつても、バードクレーみたいな、とんでもないクイッククレーみたいなものがありますし、通常の土もある。大体ヨーロッパ、アメリカの乾燥地帯の土というのは低塑性なんですね。日本は塑性指数が非常に大きい。だから、カサグランデの図表を見ても、塑性指数が120なんていうのはないんです。カサグランデだって、そんな土を考えていなかったんですね。

ところが実際に、彼らが戦後、東南アジアの復興で来たときに、得体の知れない妙な挙動をする土があるという。それで、彼らの土質力学では解釈がつかないからというので、バンコック粘土と名前をつけたわけです。それがバンコック粘土の始まりですけれども、これは高塑性なんですね。ですから、外国にも高塑性の土はないかというのと、メキシコシティには、塑性指数が400なんていう土もあるんです。だけど日本の土では、大抵、カサグランデの塑性図に入ると、それから一部分が高塑性の土だと。だから、100を超えるような土が結構あるということですね。

それで土の挙動が全然違うんです。例えば高塑性の土というのは、盛土自体、構造物を設けると、時間がたつとクリープが進んで破壊するわけです。これが最初にわかったのは八郎潟なんですけど、夜、工事が終わって、ブルドーザーを置きっ放しにして帰るわけです。翌日、ブルドーザーがどこかへ行っちゃった、消えちゃったということで、江戸時代もそういうことで、化け物丁場と言っていたわけですけども、そういうことからいっても、日本の土の特質というのは考えなきゃならないということが言えます。



あとは、日本に非常に多い地震ですが、これも液状化の形をどう考えるのか、東畑先生なんかいろいろさ  
れているんですが、破壊の形態について研究する必要があると思います。