

堤防の地震災害と災害軽減工学



佐々木 康
JICE顧問
広島大学 名誉教授

1. まえがき

最近共感を持って読んだ書籍¹の一節に“天才の出る風土”が紹介されている。この書の著者である数学者、藤原正彦は、天才はどのようなところで生まれるのだろうかという疑問に思い、天才数学者達の生まれ育った故郷を訪ねている。そして、天才を生む土壌には三つの共通点があり、その一つは、美しい土地であり、第二の共通点は何かに跪く心がある場所であり、第三の条件は精神性を尊ぶ風土である……と記述している。

この観察結果は、人の思考や感性が、若いときに身を置いた場所によって強く影響されることを教えてくれる。ここでいう場所、というのは太古から続く自然のままの環境が残された地ではない。人為の力が加わった地である。おそらくその人為の力の加わり方が重要なのであろうと思わせる。ここでは、そのような身の回りの自然環境・地物・文化・社会秩序・世論等を全て含む周辺世界を、“場”と呼ぶことにしよう²。

土木技術はその地域をどのような方向に導こうとするのかという意思に即して、自然に人為の力を加える（大地を改変する）ことが使命である。大地の改変は単に無機的な空間の改変にとどまらず、上述の“場”の変化につながり、豊かな思考を育むことにつながることを“天才の出る風土”が示唆している。大地の改変に携わる者には“場”の管理者³の誇りを持つことが望まれる。

ところで、“場”の改変事業の一つに地域を自然災害から守る防災構造物の築造がある。河川堤防は防災構造物の一つである⁴。

1 藤原正彦著 「国家の品格」 新潮新書 2005

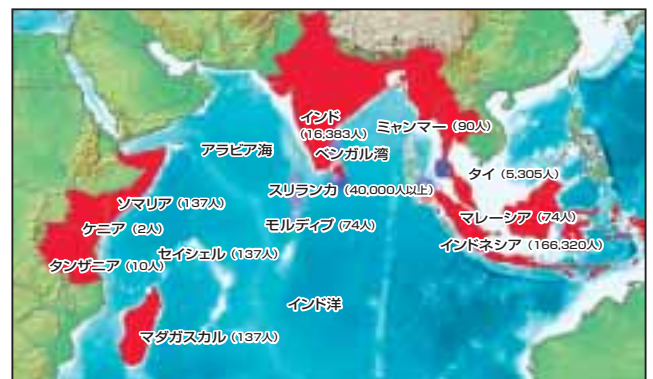
2 国を構成するのは、国民と国土と法である。国になぞらえて言えばここでいう“場”は国土に当たるが、もっと狭い空間的領域で捉え、さらに発想に影響を与える境界条件としての文化的側面も含めたいために“場”の語を用いる。風土と類似の概念かもしれない。意思による改変可能性を示すために風土の語を用いない。

防災構造物ではあるが、河川堤防もまた、災害因によって損傷や機能障害を生じる。災害因とは、災害をもたらす自然現象のことを指し、河川堤防に損傷をもたらす自然現象には、豪雨、洪水、地震、津波などがある。堤防の損傷・機能障害には、のり崩れ、破堤、漏水などの形態があり、その原因には雨水の浸透、流水の越水・浸透・浸食など水の作用や、地震力の作用があると認識されている⁵。

この認識は、河川堤防の築造と“場”の管理から見出された経験知に基づいている。経験知を手にするためには、常に「本質は何か」と問う姿勢が求められる。

図-1は2004年12月のスマトラ島沖津波災害の国別死者数である。この災害の1年後、2005年12月にシンガポールで、東南アジアの地盤工学者が中心となって巨大災害の軽減と復興に関する国際会議が開かれた。“災害”とは何かという前々からの気がかりに加えて、この会議の講演準備を始めたときから“巨大”とは何かという問いが頭から離れない。

心理学者の広瀬弘忠はその著書の中で、災害とは社会システムの破綻状態であると述べている⁶。巨大災害の定義は明確でなく、一説には1,000人を超える犠牲者が出た災害と位置づけられている⁷が、そうであろうか。



〔国名の後の（）内は死者数〕

図-1 スマトラ津波災害で被災した国々

※死者数はフリー百科事典「ウィキペディア」(<http://ja.wikipedia.org/wiki/>)のスマトラ沖地震(2006.3.1現在)のデータによる

3 場の管理者は、地域を導こうとする方向を定める意思決定者と本来は同一であるべきであろう。この意思決定者は現代社会では国民であるが、国民には場の管理者の意識は希薄なように感じられるのは杞憂であろうか。

4 国土交通省河川局治水課 「河川堤防設計指針」 2002.7

5 例えば、国土技術研究センター 「河川堤防の構造検討の手引き」 2002.7

6 「災害」とは、災害因をその原因とする環境破壊に対する個人、集団、組織、社会などの適応不全の結果もたらされる生命、財産、社会秩序などの破綻状態……(広瀬弘忠、災害への社会科学的アプローチ、1981)

7 河田恵昭 対談 21世紀と世界に向けた情報発信 ひょうごサイエンスVol. 22 2004.11

ハリケーン・カトリーナによるニューオーリンズへの浸水は、多くの死者・避難者を現出させた。浸水は、外水位が堤防の高さを越えたこと、I型コンクリート壁（堤防天端に建てられた大型のパラペットウォール）が破堤したことが第一の原因のようであるが、鉄道や道路の横過するところで局所的に堤防高の低い箇所もあったようである⁸。

低平地への都市化の進展は、いろいろな意味で場の管理を難しくする。場の文化に基づく協力や連携が肝要である。

わが国で洪水災害軽減のためにとられてきた連続堤方式を集中投資の可能な輪中堤方式に転換しようという提言が出されている⁹。連続堤・輪中堤のいずれも、工学的構造物であるなら、一連区間の堤防機能は均質であることが基本であろうが、長い歴史を経て築造された堤防の“質”を評価するための地盤や堤体の土質データは完備さ



図-2 宮城県沖地震で被災した吉田川堤防

天端や法面に縦断亀裂がたくさん走っている。災害復旧のために実施される測量結果では、このような変形をつぶさに計測し、記録することが十分行われていない。延長の長い堤防の測量は天端中央や法肩を縦断方向に計測することが普通である。その作業に慣れていても、災害時に何を記録しなければならぬか理解できなければ、状況の変化に柔軟に対応することは難しい。

このような堤防の被災状況を集めて分析してみると、被災モードは一律ではないことも分かる。

れていない。いわんや“場”の形成への貢献の評価の視点¹⁰も不熟である。

われわれは堤防のことをどれだけ知っているのだろうか。堤防に守られている地域の人たちはどこまで知ってくれているのだろうか。

図-2は1978年宮城県沖地震で被災した吉田川・山崎堤防である。図-3は1995年の阪神淡路大震災で被災した淀川・西島堤防の背後地である。

いずれも幸いにして堤防の損傷が人命を傷つけることはなかったが、“場”の不安をもたらした。しかし、考えようによっては、現存する堤体の中味や機能限界（地震に対してのみならず、洪水に対しても）を知ることできる絶好の機会ととらえることもできよう。

長い歴史を経て築造された堤防の力学特性について資料は整っていない。地震時の性能についても分からないことが多い。それでも、地震地盤工学の進歩とともに、近年の地震被害からいくつかの新たな発見がなされつつある。新たな発見は管理に携わる人々の「本質は何か」という疑問と、その道の専門家の連携が生み出す。

近年の堤防震災時における観察から得られた、堤防の地震時挙動の経験知の一端を紹介し、地震災害の側面から河川堤防の災害軽減について考えてみたい。



図-3 兵庫県南部地震で被災した淀川堤防

背後地には多くの人口と資産が集積された河口近くの堤防区間である。震後の天端標高は朔望平均満潮位にせまった。

8 UCバークレー・ASCE資料 Preliminary Report on the Performance of the New Orleans Levee Systems in Hurricane Katrina on August 29, 2005 (http://www.berkeley.edu/news/media/releases/2005/11/leveereport_prelim.pdf)

なお、調査団に参加した田中茂信氏の報告（和文）が土木技術資料Vol.48, No.2 2006.2に掲載されている。

9 大規模降雨災害対策検討会提言「洪水氾濫時・土砂災害発生時における被害最小化策のあり方」2006.12.26

10 歴史的土木遺産の概念は、場の整備のための諸計画へ反映されているであろうか。治水経済調査には一部地域と河川施設とのつながりが意識されているが洪水安全度の視点からだけである。

2. 地震による天端沈下

河川堤防の地震被害については既にいくつかの報告がある^{11,12,13}など。よく知られた堤防の天端沈下特性の背景を眺め、既往の経験知を超える事象も起こることを紹介する。

2.1 堤防の天端沈下量

図-4は1923年に起こった関東大震災以降、1995年の兵庫県南部地震までの河川堤防の天端沈下量である。

この図を見て指摘できる特徴の一つは、これまでにわが国で起こった堤防震災のどの事例でも図中の $S = 0.75H$ の直線を超える天端沈下量にはならないという点である。

次に図-5を見て頂きたい。近年の事例しか整理していないが、震害を被った堤防の長さは限られている。

これらの2枚の図から、堤防の地震被害は規模も延長も限られていることが分かる。その理由は、地震動の大きさと地盤条件の影響である。まず、図-5から、遠いところで起こった地震では被害が少ないことが分かる。遠くなるほど地震動が小さくなるからであるが、宮城県沖地震では160gal程度¹⁴以上の最大加速度が作用した地域で被災した模様である。

次に、被害の発生した区間の地盤条件を調べてみると、旧川締め切り部などの液状化の発生しやすいところで多く発生していることが分かっている。

また、土をよく締め固めた堤防は、地盤液状化が生じなければ大きな地震動が作用しても甚大な被害を生じることはまれである。大きな天端沈下量をもたらされた事例は液状化が関与している。

天端沈下量が堤高の75%を超えない理由はこのことと関係している。もっとも極端な例として、地表から下の地盤が完全に液状化し、まさに液体のようになったと考

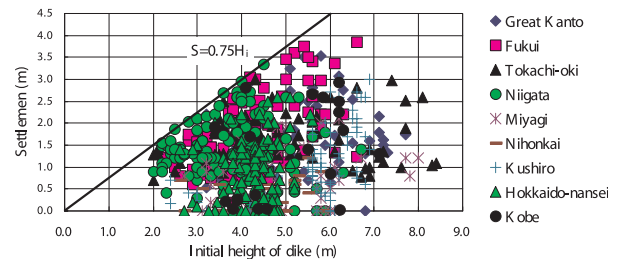


図-4 関東地震以来の天端沈下量

縦軸は天端沈下量、横軸は地震前の堤防高さである。地震後の天端は亀裂や段差があって一様に沈下してはいないので、地震前の天端幅が確保できる高さまでの沈下量を用いている。地震前の堤防の高さの正確な値は分からないことが多い。(建設省データ。類似の図は国土技術研究センター「河川堤防の構造検討の手引き」2002.7にも紹介されている。)

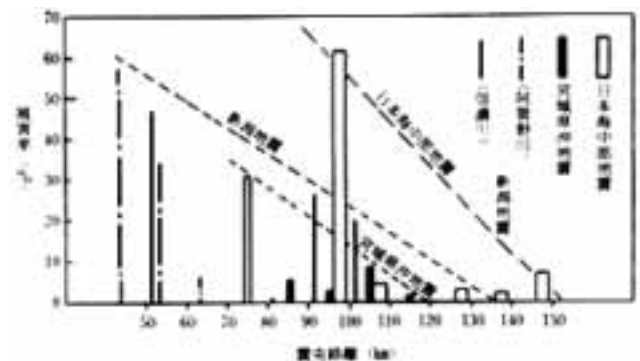


図-5 地震による堤防の被害率

縦軸は堤防被害率。ここでは、堤防延長に占める災害復旧を要する被災延長の百分率を採用している。横軸は震央から堤防までの震央距離。これを10km毎に区分し、その区間ごとの被害率を算定。(土木構造物の震災復旧技術マニュアル 1987)

えよう。このとき地上にあった堤防は、この液体の中に沈み込むが、液体からは浮力を受ける。したがって、堤体の密度と、液状化した地盤の密度から沈下量が定まり、天端沈下量には限りがあることになる¹⁵。

天端沈下量の最大値は堤高の75%であるが、図-4を見ると既往事例における天端沈下量にはかなりばらつきのあることが分かる。全ての沈下事例の原因が液状化であるかどうかは確かめられないが、地盤液状化が主因となっている場合には、液状化した地盤の厚さと深さによって沈下量が異なることが影響している。

液状化した層の深さとは、地下水面の深さである。地

11 佐々木康 「河川堤防の地震被害」 土と基礎 Vol. 28, No.8 pp. 25-30 1980

12 折敷秀雄・佐々木康 「液状化により被災した河川堤防の地盤改良を併用した復旧」 土木学会論文集 No.686/VI-52 pp.15-29 2001

13 佐々木康 「液状化時に見かけた気になる現象」 地盤と建設 Vol.21, No.1 pp.1-21 2003

14 堤防が壊れ始める最大加速度は、地盤条件、堤防の材料特性、締め固め度、大きさなど多くの要因が影響する。この値は、宮城県沖地震のときの北上川水系での経験である。このほか地震動の継続時間も影響すると思われるが調べられていない。

15 地盤工学会 「液状化対策工法」p.38 2004.8

下水面と地表の間の不飽和の層では液状化が起こらないから、強度低下が生じない。堤体荷重はこの層の中で分散し、その下に存在する液状化層に伝達される。

したがって液状化する層に作用している荷重は、非液状化層が厚ければ低水準となり、液状化層の変形は小さくなる。逆に浅いところに液状化層が存在すれば堤防の天端沈下量は大きくなる。いずれの場合でも、液状化層の厚さが厚くなれば天端沈下量は大きくなる。

2.2 天端沈下量の縦断分布・・・蛇玉現象

図-5で眺めたように、地震による天端沈下は局所的に生じる。堤防の一連区間全部が被災した事例は少ない。地盤の悪いところで壊れるからである。

しかし、中にはそのようなならない場合もある。図-6は、地盤条件・堤体条件とも延長方向に一樣な分布をしているにもかかわらず、間歇的に被災区間が現れた釧路遊水地堤防の例である。まさに蛇が卵を飲み込んだかのような形状を示している。

このような被災分布になった理由は、堤防の動的な応答特性が関与しているのではないかと考えられるので、振動台実験をしてみると、一連の堤防延長内で振幅の大きいところと小さいところが現れる¹⁶（図-7）。

このことから、大きく揺れるところで堤体下部が液状化（後述）し、図-6のような間歇的な被災区間が出現したと考えることが出来る。地表の凹凸、すなわち地形による地震動の増幅効果は他の地震でも経験されているが¹⁷、まだ耐震計算の実務には取り込まれていない。

なお、図-8は、兵庫県南部地震による淀川の西島堤防と、釧路沖地震による釧路遊水地堤防の沈下縦断図を比べたものである。この図から分かることは、釧路遊水地堤防では間歇的な沈下であるのに対し、西島堤防では長さ2kmにわたってほぼ一樣な沈下量分布である。西島堤防では、水平地震動が大きかったことに加え、鉛直地震動も大きかったことが影響している可能性もあるが十分解明されていない。巨大災害対応のために今後の再吟味が望まれる。

16 別の解釈として、一説には、表面波の影響ではないかとの考え方もある。・・・河上・浅田 「軟弱地盤上に築造された八郎潟干拓堤防の耐震性について」 土と基礎 Vol. 23 No. 12 pp. 43-50 1975

17 2001年の芸予地震で呉市内の宅地被害は尾根の稜線近くに多く見られた。2005年のパキスタン地震でも山岳部の尾根付近で被害が多く見られている。



図-6 釧路遊水地左岸堤防の空撮写真



図-7 蛇玉現象の再現実験

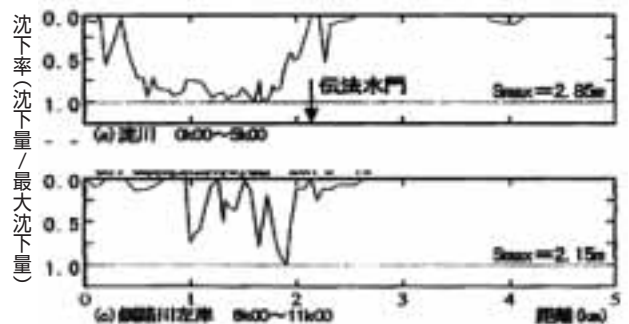


図-8 天端沈下量の縦断分布

3. 新たな発見・・・経験知から科学知へ

2章に紹介した事象のほかにも、地震時の堤防挙動の不思議を読み解くヒントが得られつつある。地盤液状化は水平地盤でだけ起こるのではない。また、液状化した地盤が変形するだけでなく、これに接した堤体内の応力変化も起こり、よく見られる縦断亀裂や天端陥没が起こるらしい。また、土は完全飽和と乾燥状態だけ考えていてはまずい。不飽和土の力学の進展が待たれている。

3.1 堤体底部の液状化・・・レンズ型液状化領域の発見

1993年釧路沖地震で被災した釧路遊水地堤防や、十勝川堤防は泥炭地盤上に築造された堤防であった。泥炭は飽和していても砂質地盤のように液状化しないことが分かっている¹⁸。泥炭地盤の上に作られた十勝川や釧路川の堤防が何故大変形を生じたのであろうか。

1993年の釧路沖地震に先立つ1968年ならびに1952年にも北海道東部には十勝沖地震が堤防被害をもたらしている。1968年十勝沖地震による盛土被害の調査記録¹⁹によれば、被害の大きい堤防は、①泥炭地盤の厚い区間、②堤防高さの高い区間で生じ、築堤材料に粘性土系の土を用いた区間と砂質土系の材料を比べると③砂質の材料を用いた区間に多く発生している、というきわ



図-9 釧路沖地震による釧路遊水地堤防の被害

この写真は高所作業車を用いて上空から撮影。撮影方向は下流から上流を臨む。高さ8m、法勾配2割の堤防全景を天端から撮影することのできるカメラはない。・・・北海道開発局資料

18 1976～1978年に実施した泥炭の繰り返し三軸圧縮試験結果から、泥炭では液状化現象が起こらないということをすでに確認済み。

19 北海道開発局土木研究所報告 第49号「1968年十勝沖地震被害調査報告」

20 開発局管内の直轄河川では1976～1977年頃、橋梁、樋管など構造物築造時のボーリングデータを用いて地盤縦断図を作成していた。

めて重要な観察事実が残されている。そしてこの被害報告では、地震動が泥炭地盤によって増幅され大きな地震動が作用したためであろうと結論付けている。

1993年の地震直後に観察した堤防の被災区間は、確かに泥炭層の厚い区間であり、堤高も大きいことが事務所の有する堤防地盤縦断図²⁰から明瞭に読み取れる。

しかし、現地の堤防は、開口亀裂や段差を伴う大きな変形を呈しており、泥炭層における地震動の増幅だけでは説明できない大変形であった。そこで、被災区間周辺を注意深く観察した結果、液状化の痕跡を示す噴砂を確認した。

泥炭は極めて大きい圧縮性を有しているところから、その圧密沈下量も大きい。結果として堤体底部は泥炭の中にめり込み、堤体内に浸透した雨水はサクション²¹の作用も働いて、周辺地下水位よりも高い位置に留まり、堤体底部にはレンズ状の飽和域が形成されていたのであった。痕跡の残された噴砂は、堤体底部のレンズ状の飽和領域が液状化した結果と考えられ、1968年十勝沖地震の被害記録に記された先述の三つの特徴とも整合する。

その後の復旧時の土質調査によって堤体のめり込み量、レンズ状に盛り上がった地下水位が確認できたことから、この解釈は間違いのないことが判明した。図-10は、変形メカニズムの説明図である。泥炭地盤上の盛土の液状化は、道路盛土でも経験されている²²。レンズ型液状化領域の発見は、現行の被災形態分類の見直しに反映されることが望まれる。



図-10 釧路沖地震による堤防の変形メカニズム

釧路川遊水地堤防左岸KP9850をモデル化したもの。震後直ちに行ったボーリングから求めた堤体内水位と表層の凍結状況を図化。

21 不飽和の土では、間隙水の毛管現象のため間隙水圧は大気圧に対して負圧となっている。この負圧をサクションという。

22 佐々木ほか Embankment failure caused by the Kushiro-oki earthquake of January 15, 1993, Performance of Ground and Soil Structure during Earthquakes 1993

3.2 堤防に生じる亀裂と天端陥没・・・ストレッチ破壊

図-11は、1996年北海道南西沖地震による後志利別川左岸の兜野築堤における被災状況を示す写真と開削調査結果である。天端陥没は、まさに図-12に示すテルツァギのストレッチ破壊と同じ形状である。北海道南西沖地震は、後志利別川堤防の基礎地盤の浅いところにある砂層を液状化させ、その結果として天端陥没を伴う大変形をもたらしたのであった。

しかし、テルツァギはストレッチ破壊が起こることがあると記載はしていても、何故このような変形モードになるかは説明していない。変形メカニズムを考えてみよう²³。

盛土の基礎地盤が液状化し有効応力がゼロとなった瞬間には、盛土底面と液状化層上面との境界面ではせん断応力はゼロとなり、この境界面が主応力面となる。この応力変化は盛土内にいわゆる主動ランキン状態をもたらす。

そこで、主動すべり面に沿うすべり安全率を調べると、一般に法肩付近を通るすべり面がもっとも小さくなり、水平面と $(45^\circ + \phi/2)$ の角をなす主動すべり面によって亀裂が発生することとなり、天端陥没の変形モードが起こるのである。このときの亀裂の傾斜面は堤体中央

部に向かい、通常安定解析に仮定されるすべり面の傾斜方向とは逆の方向を向く(図-13)。

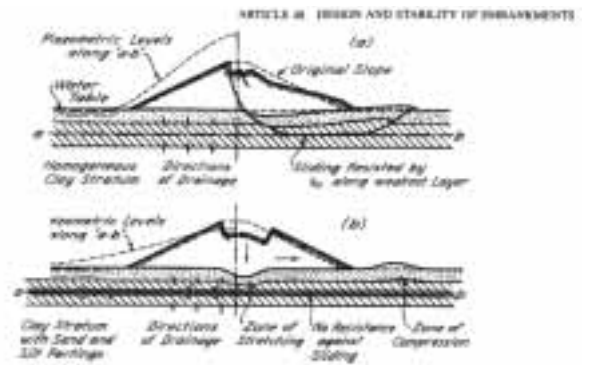


Figure 48.5 Type of failure of base of fill containing thin clay strata (a) if clay stratum contains no horizontal pervious parting and (b) if clay stratum contains previous sand or silt parting.

図-12 テルツァギの記載したストレッチ破壊

軟弱地盤上に盛土すると、普通は(a)のようなすべり破壊を生じる。軟弱地盤内に砂の薄層があると、(b)図のように、盛土荷重による発生間隙水圧が法尻付近まで伝達され、天端部分が陥没することがある・・・と記されている。

・・・テルツァギほかSoil Mechanics in Engineering practice, John Wiley & Sons, Inc.,1996

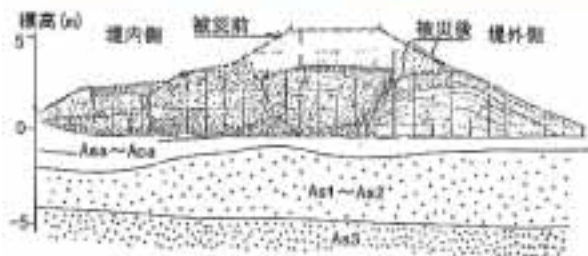


図-11 北海道南西沖地震で被災した兜野築堤

法肩付近から堤防中心部に向かう明瞭な二つの亀裂に沿って堤防中心部が陥没している。



図-13 ストレッチング破壊のメカニズムを検証する
実験結果

4枚の板を水平方向にお互いに押し付けておいて、その上にわずかに湿らせることによって見かけの粘着力を持たせた砂で盛土を作った。盛土を作った後に、基礎においた板の押し付けあう力を解放すると、自重による水平力のために盛土底面が股裂き状態に側方に広がり(ストレッチング)、天端が陥没した。板と板の間には、砂が落ち込まないように薄いフィルム状の幕が敷いてある。・・・大林・佐々木による 第53回土木学会年次学術講演会 1998

23 佐々木ほか：Deformation process of an embankment resting on a liquefiable soil layer, proc. IS-Nagoya 1997



図-14 大津市街樋門の継ぎ手部の開き

樋管内部からの観察で継ぎ手部のゴム製可撓継ぎ手が開いていることが確認された。函内から撮影した継ぎ手のひとつ。基礎杭の杭頭は破損し川表側に傾斜している。継ぎ手部の開きを合計すると約3m近くになる。(北海道開発局資料)

ストレッチ破壊は、堤体の中に築造された樋管に悪影響を及ぼすことがある。

図-14は、2003年十勝沖地震で被災した十勝川大津築堤の大津市街樋門の継ぎ手部の開きである。1995年に築造されたこの樋門は、内空断面1.5m×1.5m長さ14mの函体6函を可撓継ぎ手で連結した構造で、川表側の半分が旧河道を埋め立てた地盤の上に作られており、杭基礎で支持されている。

この樋管は外部からの目視では無被害と見られていたが、管渠内から観察すると可撓継ぎ手部が開いていることが確認された。図-14に示す各可撓継ぎ手部の開きを合計すると約3mに達した。

この伸張量を、少し離れたところで生じた小段崩壊断面の変形再現結果と比べてみると、図-15に示すように川表側への伸張量は2.8mで、同程度であったことが分かる。

外見上変形していないように見えるところでも、堤防は地震の影響を被り液状化によってストレッチ変形していること、ストレッチ変形量や堤体内の樋管の伸張量を、堤体変形計算から求めることができることなどがわかる。

3.3 不飽和の土

2003年7月26日に発生した宮城県北部地震により鳴

24 中山修・鈴木善友「宮城県北部地震による堤防の被災メカニズム」JICEレポート 第7号 pp. 7-14 2005・・・この報告では、堤体変形のメカニズムを図解しようと試みられている。「本質は何か」に迫ろうとする姿勢は評価されて良い。

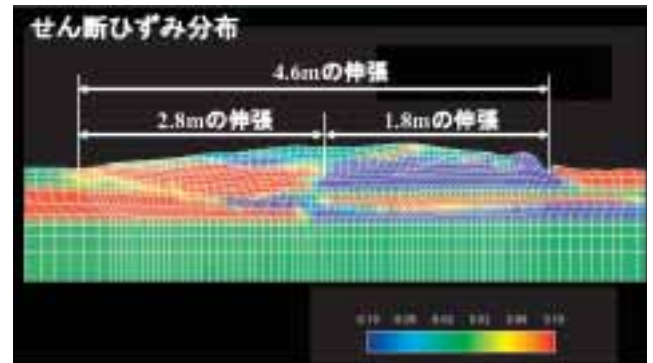


図-15 大津市街築堤の変形解析結果

LIQCAを用いたこの解析は、小段がはらみだした区間を対象に実施したものの。この計算結果から、堤体内の堤内側にある旧堤付近で液状化が発生し、小段を押し出したことが分かる。また、堤外側の堤体基礎部でも液状化し、その影響で堤体底部が川表側に移動し、その伸張量は2.8mであったことが分かる。(北海道開発局資料)

瀬川の左右岸堤防に被害が生じた²⁴。

図-16に鳴瀬川右岸木間塚堤防の被災状況を示す。裏法面の崩壊土塊ははらみ出し、法尻の舗装道路上を覆って滑り出していた。

この区間の木間塚堤防の直下の地盤表層には粘性土層が堆積しているところから、その上に裏腹付けされた堤体底部が液状化したための変形と考えられている。しかし、法面の下の浅いところで液状化すれば、その上の土塊には先に示した図-11のような主動崩壊面が現れていてもよさそうに思うが、残された痕跡はそうではない。地震発生に先立つ5日間の降雨によって堤体の含水比が高くなり、浅いところでは軟化したのではないかと思わせる変形モードを示していた。



図-16 木間塚堤防の崩壊状況

堤内側法面が3-5mのはらみだし、法尻部を走る道路を覆っている。ほかの被災箇所でも、崩壊土砂から水が染み出し堤体の含水比が高かったことを示していた。・・・北上川下流河川事務所資料

従来の土質力学では、浸透問題に関しては不飽和状態も考慮しているものの、強度や変形特性に関しては完全に飽和した土、あるいは乾燥した土、のいずれかの単純な条件のもとでしか扱ってこなかった。近年斜面崩壊の分野においては、含水比の増加によりサクシオンが変化し、強度特性が変化することへの関心が集まっている。

サクシオン低下に伴う変形特性の変化についてはまだ分からないことが多いが、堤防の安定性、天端高さの確保という視点からは降雨による土の軟化の問題がもっとクローズアップされても良いように思われる。

4. 堤防の災害軽減工学

自然災害の根絶は至難のことである。想定を超える災害因の発生があり、その影響を被る社会システムの進化があるからである。しかし、根絶できなくても軽減は可能である。そのため、“防災”に代わって“減災”又は“災害軽減”の用語が多用される。

未経験の巨大災害に備えるには、体験した災害経験を敷衍し、その先にあるさらに深刻な状況を洞察する努力が要る。まず、“災害軽減”に必要とされる事項を眺め、河川堤防の災害軽減に必要な努力の方向を考えてみよう。

4.1 巨大災害

災害対応を準備するときには、災害因の規模を予め限定するのが通例である。無限の大きさの災害因への対応は、経済原理が許さないからである。防災力には限界がある。

また、災害因による社会システムへの影響は、個別の施設の損傷や機能不全ばかりでなく、個別システム同志の相互依存性によって社会システム全体の機能不全に陥り、人命の損傷や社会秩序の破綻を来たすことがある。

これらのことを考えると、“巨大災害”には、設定した災害因の規模・水準を遥かに超える大きな外力が作用する場合と、設定水準内であっても社会システムの被る影響が想定を遥かに超える場合の二つの種類があると考えられる。

すなわち、第一種の巨大災害は、超過外力と複合作用による新たな破壊様式や被害の相互依存性である。設定水準を超える大規模な災害因は極めて低頻度でしか襲来しないが、影響は深刻かつ広域になる。このためその影響の想定は容易でない。深刻な影響とは、構造物の損傷の規模・モードの甚大さを意味し、広域とは損傷区域の空間的広がりと重層的・複合的機能不全を指す。

第二種の巨大災害は、社会システムの進化の影に潜む相互依存性による広域的な被害の影響である。

一つの地域とその外部世界とが有機的に結びついた状況では、影響を受ける地域のみならず、影響はそのときのその地域群にとどまらず、時空を超えて外部世界にも波及する。想定規模をはるかに超える災害因ではなくても、社会構造の変化のゆえに影響が時空を超えて広域に及ぶ場合も起こることを、ハリケーン・カトリーナや新潟県中越地震から学ばなければならない。

4.2 災害文化と“新”災害文化・・・災害科学への疑問

災害は、地域の地形・地質・都市施設などの地域固有の特徴に影響され、知識の普及や知恵の働かせ方などにも地域特有の習慣、文化が影響する。すなわち、災害は極めて強い即地性があるといえる。台風常襲地帯の屋根の作り方、洪水常襲地域の民家の軒先につるされていた小船、豪雪地帯の雁木に、地域に根付いた固有の知恵を見ることができる。災害文化である。

しかし、都市化の進展と新住民の増加は、こうした従来型の災害文化の伝承を難しくしている。

社会は分業と役割分化により効率性、利便性の確保を目指してきた。常時の最適性を強く指向する現代社会では、災害軽減に当たる公的な専門システムとして、気象観測、救急救命、治安維持以外には常設されておらず、臨時の専門システムとして自治体ごとに災害対策本部が設けられる。災害対策本部に所属する人々は常時にはそれぞれの担当業務に従事し必ずしも全員が災害の専門家ではない上に、災害軽減業務に携わる人々とその家族もまた、被災者の一員となることを免れない。それが災害である。

したがって、「自助・互助・公助」が災害軽減の基本と

され、災害発生直後の身の回りの異常の有無確認と救援救出は市民一人ひとり、それぞれの施設管理者が当たらざるを得ない。自助である。

過去の災害事例を見ると、災害発生直後は愛他精神が発揮され²⁵、傷つかなかった人々あるいは軽傷の人々による互助活動が行われる。そして、災害対応システムによる公助はその後に力を発揮し始める。

阪神淡路大震災や新潟県中越地震、今冬の豪雪災害など長期にわたり多数の人々が避難生活や、高齢世帯が隔離された生活を余儀なくされる大規模災害時には、従来型の公助の陣容では被災社会からの要請に応えきれなくなっている。このためであろうか、「自助・互助・公助」に代わって「自助・共助・公助」の表現が用いられるようになった。その根源を正確には筆者は知らないが、不足する公助を支援するのがボランティア活動、すなわち共助への期待である、とするところから来ているのであろうか。

筆者にはそのような意味での共助は公助の一部であると思えてならないが、考えは整理がつかないでいる。公助は行政機関だけが担うものではない、災害対応は自助・互助・公助・共助と四つ並べる方が本来の姿のようにも思うがいかなものであろうか。共助は、共存のための直接的な資源再配分の新たな姿なのかもしれない。

ところで、阪神淡路大震災以降の近年の災害時の状況を振り返ってみると、“新”災害文化の構築とこれを支える災害軽減学の必要性が浮かび上がってくる。

既往災害の分析は大切である。しかし、進化する災害に適切に対応するには、従来型の災害科学・災害技術をさらに深化させるだけでは十分でない。従来の災害分析においては、災害の甚大さへ及ぼす“場”の変化や違いの影響は認識されていないからである。これについての分析を推進することが望まれる。これらの深化・分析を通じて、先見性につながる認知能力を涵養し、“場”の改善を心がけなければならない。

“新”災害文化は、災害因の過酷化、人口減少・高齢化などの社会構造の変化、孤立集落の出現、情報技術の浸

透・映像の力による世論形成の動向など、近年加速している“場”の変化を反映すべきものではなからうか。時代に即した“新”災害文化の構築のために筆者が重要と考える事項は以下のとおりである。

一つは、市民・施設管理者・行政のいずれもが、災害の発生機構、影響要因、軽減方策に関する知識とその活用の知恵を、教育ではなく学習によって獲得する風土を醸成する事である。

災害の即地性を考慮すると、全国一律の災害文化よりも地域固有の災害文化の方が実効の上がるものと思料される。この意味では、地域ごとのハザードマップづくりは評価されるが、あわせて、地域ごとに実効の上がる作り方が期待されるところである。

二つ目は、“場”の改変を目指す風土である。冒頭に述べたような、天才を育む場になるまでの時間はかかるであろうが、災害に強い“場”は、常時の営みにも快適な“場”であることを知り、地域の災害脆弱性を改善しようとする意思を持ち続けなければならない。神戸には地震に対する災害文化は存在していなかったことも反省しなければならない。

三つ目は、場の管理のための連携・協働である。

常設される災害対応組織には、場の管理に必要な知識や資源は必要十分なだけ保有されてはいない。現代社会は常時の最適性原理が優先している。その縦割り思考から脱却し、公助・共助を含め、円滑に連携する風土が望まれる。この意味では、新災害文化を担う一員としての



図-17 新潟県中越地震時の人命救出活動

崩壊土塊の安定性を診断するために、レスキュー隊とともに行動した独法土研の三木研究推進本部長、救出された優太君を寒さから守ろうと思わずライフジャケットを脱ぎかけている。……ドキュメント新潟県中越地震、イカロス出版 2005

25 愛他精神は心理学的な人間の行動特性である。・広瀬弘忠「人はなぜ逃げおくれるのか」集英社新書 2005

マスコミの自覚も重要である。マスコミの素早い報道は情勢把握に貢献する。俯瞰的な取材を期待したい。

災害軽減の連携の一例を図-17に見ることができる。図-17は新潟県中越地震で生じた崩壊斜面から皆川優太君を救うために、レスキュー隊の人たちにどの岩を動かしてはならないか、どのようなルートで近づけばよいかを指示した土木技術者の姿である。

4.3 災害軽減学

2004年11月、筆者の主宰していた広島大学災害軽減プロジェクト研究センターは地域の自治体等とともに、文部科学省の地域貢献特別支援事業による防災ネットワークシンポジウムを開催した。6・29広島県豪雨災害、鳥取県西部地震、平成13年芸予地震など地域における災害の即地性を意識し、3年間にわたって進めてきた地域防災ネットワーク構築事業の活動の一環であった。



図-18 地域貢献特別支援事業による防災ネットワークシンポジウム2004のパネルディスカッションの様子

このシンポジウムでは、約520人の参加者を得て、地域における花崗岩斜面の分布、活断層分布、芸予地震時の地震動特性、豪雨時の斜面危険指標としての雨量特性、救急医療など、災害因の発生、災害の発生過程と対応策について議論し、名古屋、仙台などで進められている市民への知識の普及交流活動などについても学んだ。

その後の台風災害、高潮災害など豪雨災害・地震災害以外の自然災害が発生したことも考慮し、地域における災害軽減に関する知識の体系化と普及の活動が続けられ

ている。

こうした活動を通じて、“災害軽減学”の確立が望まれる。

“災害軽減学”は災害因に関する知識、外部世界との関わり方に関する知識を常に更新整理し、災害対応システムの性能評価、社会の被災度の予測や計量方法（たとえば新たなチャンスロスの概念の導入）、災害因ならびに災害の発生検知技術などを開発し、限られた人的・物的資源、縦割り社会という制約の中で適切に災害軽減に寄与できるシナリオを描ける能力を育成する学問でなければならない。

しかし、災害軽減学は学問としてまだ体系化されていない。実務者、市民、学術分野の研究者が協働して体系化していくことが望まれる。

さまざまな制約条件の下でも、持っている資源（データ、モニタリング結果、知識、人材、資材、機材、工法）を活用し、ゴールを目指して限界に挑戦するのがプロフェッショナルであろうと思うが、災害軽減のプロフェッショナルを育成する災害軽減学の構築は、学者だけでは荷が重いように思われる。ゴールをどこに置くか、持っている資源の限界を知る方法も含めて検討していかなければならない。災害軽減学を構築する過程自体が、自助・互助のための知識の深化や、公助・共助の行動規範の確立に寄与し、新災害文化の定着に貢献すると期待される。

4.4 河川堤防の災害軽減工学

新災害文化と災害軽減学を念頭に置き、次に河川堤防の災害軽減“工学”を考えてみよう。

冒頭に工学的構造物であるなら、一連区間の堤防機能は“均質”であることが基本であろうと述べた。

堤防の耐震性能という“質”を表現する指標は何であろうか。この小文では、一応天端標高の低下量（天端沈下量）を指標として既往事例を紹介した。

しかし、既往事例には巨大災害ともいえる事例は兵庫県南部地震による堤防被害しか触れていない。歴史を振り返ってみると、地震動がもたらした斜面崩壊による河道閉塞とその引き起こした氾濫（善光寺地震・千曲川）、河道への津波の遡上と護岸の損傷（日本海中部地震・能

代川、2003年十勝沖地震)などの複合災害の例がある。

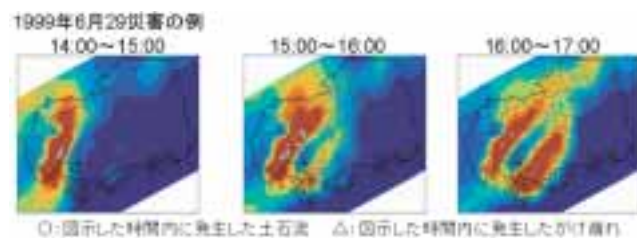
これらの分析を含めて、解決の急がれる課題を漏れのあるかもしれないことを恐れず、次に列挙する。

- ① 巨大災害への備え
- ② 堤防に関するデータの整備
- ③ 堤防の性能規準（性能の確保水準値とその定め方）
- ④ 被災モードの洗い直し
- ⑤ 新技術の活用、ツールのレベルアップ
- ⑥ 技術文化の形成

①、②についての説明は不要であろう。③以下について若干の補足的記述を行う。

河川堤防の性能規準を確立する上では、場の状況によっては修復の容易さ、損傷に対する粘り強さ、地域の発展にあわせた強化の容易さなどの点からも考えなければならない。場の管理者の視点である。こう考えると、被災度の指標は天端沈下量だけで十分であろうかとの思いがわいてくる。地震時あるいは地震後の氾濫原内の治水安全度²⁶と「天才の出る風土」度を計量し、それを支配する堤防区間ごとに施設被災度を計量する技術を期待したい。

地震時の堤防の破壊モードにストレッチ破壊があることや、蛇玉現象のあることを紹介した。さらに、不飽和の土の力学特性についても意を用いる必要性に触れた。復旧工法・補強工法の選定、ならびに巨大災害時の複合要因による影響の推定などにも活用できる、被災モード



図一十九 6・29災害時の雨量指数R' と崩壊地点分布

1999年6月29日に発生した広島県豪雨災害時の崩壊地点は、雨量強度と、先行雨量の両方を考慮した新しい雨量指数R' と強い相関を示すことが見出されている。R' の算出に複数機関の観測結果を活用することによる観測地点密度の増加が精度向上に寄与したことも新たな経験であった。・・・中井・佐々木ほか 「警戒・避難のための雨量指標の改良」広島大学大学院工学研究科報告 第53巻 第1号 pp. 53-62 2004

26 これに関する類似技術には治水経済調査の手法がある。しかし、地震時あるいは地震後の氾濫原内の任意地点の治水安全度を評価する技法は確立されていない。

分類を見直すことが望まれる。

不飽和の土の雨による不安定化に関しては、堤防の災害軽減に役立つと思われる斜面崩壊の二つの現象がある。その一つは、風化花崗岩斜面で表層すべりに結びつく地下水位の上昇は遷緩線²⁷付近で最初に起こる可能性があるという観察²⁸と、雨の影響は雨量強度と先行雨量の両方を考慮しなければならないという経験知である（図一十九）。河川工学、土質力学などの領域外で得られた成果や、活用できる他領域の新技術を取り入れる総合性が望まれる。

次に堤防に関する新技術の活用、ツールのレベルアップが挙げられる。地震時の堤防変形量を計算するツールは完全無欠ではないにしても、実務処理に力を発揮できる水準にまで達しつつある。しかし、その計算に用いる入力データの整備状況と計算モデルの設定技術は不十分であり、計算結果の活用に関してもさらなるレベルアップが望まれる。

河川堤防の災害軽減工学にとって堤防に関するデータの整備と、上述の堤防の性能規準の確立は緊急の課題と思われる。

最後に、常に「本質は何か」という意識を持ち続ける文化の形成に言及したい。

堤防沿いの地盤縦断図が、地震による被災という複雑な自然現象のメカニズムを読み解くことに貢献したことをレンズ型液状化領域の項で触れた。1993年釧路沖地震の復旧に従事した担当技術者達は、泥炭層での地震動の増幅という解釈で納得しきれない法尻の噴砂を、不思議のままにしておかなかった。図一二十は、釧路沖地震直後の被災原因解明のための現地踏査用に、直ちに準備された被災箇所の概略説明図である。この地に継承されている技術文化は、その後の2004年十勝沖地震による被災についても教訓を得ようと堤防塾を開催している。

マニュアル技術者には、新たな工夫の創出は期待できない。“法は最低の倫理である²⁹”ことを理解できる、誠実で、真摯な取り組みが期待される。

27 斜面の中で、急な勾配から緩い勾配に遷移する位置を連ねた線。

28 Dissanayake A. K. & Sasaki Y. 「Analysis of ground water fluctuation during precipitation in hillside slopes with relation to initiation of shallow landslides」 広島大学大学院工学研究科報告 第50巻 第1号 pp. 53-62 2001

29 難波紘二「覚悟としての死生学」文春新書 2005

また、施工品質の向上は道具の進歩に依存する。河川堤防の特性にあった密度改善の道具の開発、ならびに企業における技術力の向上も望まれる。

かつて堤防は掘削土を置き土しただけに過ぎず、十分な締め固めはされなかった時代がある。基礎処理と材料選定ならびに締め固め管理が行われれば、土の堤防は十分な耐震性能を有することができる。浸透対策の工法の中にも、裏法排水のように堤体内水位を下げる工法は、場所によって耐震性能の向上に寄与する場合も少なくない。

耐震性能の計量や評価方法と並んで、具備すべき目標水準の設定をどのような考えで行うか、もう一度考えてみる必要性を感じている。

方円の器に従うのは水だけではない。人の思考もまた、その住む“場”に強く影響される。安全で安心できる“場”の価値をどのように表現したらよいのだろうか。

5. あとがき

この小文では、土堤以外の特殊堤やその他の河川構造物について触れなかった。図-4, 5についても古いまま引用した。お許しいただきたい。

新しい発見に関して、やや専門的になりすぎるきらいはあるが、変形原因やメカニズムの解釈に少し余分に紙数を割いた。その理由は、「本質は何か」を実践する第一歩は現象を良く観察する姿勢が大切なことを強調したいと思ったからである。

車の運転には、車の部品として使われているネジがプラスネジかマイナスネジかは関係ないかもしれない。しかし、車を作る企業の経営者は、プラスネジの方が自動化を進めやすい、ひいては安く上質な商品を社会に提供できるということを知っていないとてはならない³⁰。たとえ、自分でネジを締める作業をしなくても・・・。

場の整備・管理に携わる公務員への風あたりが強い。



図-20 釧路沖地震時の現地調査用野帳

帯広開発建設部では、被災後の調査結果をもとに、原因解明のための現場への携行に便利な形に編集していた。この野帳と地盤土質縦断面は、原因解明に少なからぬ貢献をした。

いろいろなところに、変化・改革が求められている。技術の進歩や、社会の要請にあわせて変化・改革を進めることには異論はない。しかし、変化・改革の元となった技術の進歩や社会的要請の変化を無批判に出発点として全て受け入れてよいのだろうか。やはりこれに関しても「本質は何か」を忘れない姿勢が大切であると思われる。

ややもすれば、前提条件・境界条件の説明なしに、そして前提条件・境界条件の変化に付随する諸々の問題の処理に言及することなく、経済原理優先を背景とする変化・改革の主張や、二者択一の分かりやすい議論の進め方が好まれる風潮に一抹の危惧を感じる。プラスネジかマイナスネジかを意識しない（ひよっとしたら認識さえしない）議論のように思うからである。

場の整備・管理は、意思決定者である国民の意向に沿ったものであるはずで、官が勝手にやっているのではない（はず）、と思うのは間違いであろうか。混沌の時代ではあるが、場の整備に携わるテクノクラートは、コードライターとして萎縮することなく、技術の力を発揮して欲しいとおもう。

国家の品格を高め、場の文化の形成へのシンクタンクの貢献と、場の管理のプロフェッショナルの活躍を期待したい。