

紀伊半島土砂災害現場見学印象記

(株)畑村創造工学研究所代表

畑村洋太郎

見学場所：2011年9月に発生した那智勝浦町及び十津川村周辺の水害。土砂災害現場

見学者：畑村洋太郎, 手塚則雄, 「危険学プロジェクト」の災害グループのメンバー, 他
計14名

手配・案内：国土交通省各部署

記録：2013年5月19日, 29日

行程：2013年5月12日(日)～15日(水) (図1)

- 5月12日(日) 11:17 天王寺駅発 くろしお9号
14:40 紀伊勝浦駅着
15:00 ホテル浦島着
18:00 寺本眞一那智勝浦町長, 国土交通省同行者と懇親会
- 5月13日(月) 08:30 出発
09:15 那智川地区土石流現場(那智勝浦町)
09:45 那智川上流土石流現場(那智大滝)
10:20 熊野那智大社 朝日芳英宮司より被災説明
12:20 昼食 すし
13:50 田辺市三越(みこし)地区大規模斜崩壊現場
15:40 大畑瀨(おおはたどろ)崩壊現場
16:40 十津川温泉郷ホテル昂着, 更谷慈禧十津川村長懇親会
- 5月14日(火) 09:00 出発
09:10 折立(おりたち)橋崩落現場
10:40 十津川村栗原地区深層崩壊現場, 昼食
13:40 五條市赤谷(あかだに)地区深層崩壊現場
14:45 五條市清水・宇井地区大規模斜面崩壊現場
18:00 新大阪駅着
19:00 会食
22:00 ホテル京阪着
- 5月15日(水) 09:00 出発
09:05 近畿地方整備局長面談
10:35 八尾飛行場着
11:05 離陸 国交省防災ヘリで紀伊山地被災地視察
12:05 紀南(新宮)ヘリポート着(給油のため)
13:20 離陸 紀伊山地被災地視察
14:20 八尾飛行場着
15:20 新大阪駅着

15:37 新大阪駅発 のぞみ 32 号

18:13 東京着



【動機】

2011年9月に紀伊半島で台風12号の大雨により、深層崩壊、土石流、洪水等による非常に大きな災害が発生した。この災害について2012年2月に話を聞くことができた。是非現地も見たいと思っていたところ、国交省の方のアレンジで現地視察がなかった。

【見学概要】

※ 本印象記では、一つの地点を説明するのに、まず上空から俯瞰した写真を、次に地上撮影した写真によって詳細を示すようにした。視察した順序とは逆になるが、人間の頭の動きとしてそうすることで被害の全体と詳細を知り、実態を把握できると考えたからである。

主な行程は下記の通りである。

12日(日)は那智勝浦のホテル浦島で、那智勝浦町の寺本町長はじめ、案内していただく国交省の方々と会食をし、寺本町長からは水害の被害等について話を聞いた。

13日(月)はまず那智川の土石流現場を見た後、熊野那智大社に行った。土石流で滝つぼが半分くらい埋まってしまったという那智大滝を見た後、宮司の朝日氏から社殿等の被災状況について詳しく説明してもらった(図2~4)。



図2 上空から見た那智大滝



土石流により滝壺が1/2ほど埋まってしまったとのこと。

図3 那智大滝と筆者(落差100m)



裏山で土砂崩れがあり、あわやというところで本殿は被災を免れた。

図4 熊野那智大社にて(朝日芳英宮司と筆者)

13日午後、田辺市の三越（みこし）地区で大規模崩壊の現場を見た。ここでは崩壊で川筋が変わり、土台がえぐりとられて家が傾いてしまっていた（図5, 6）。



図5 上空から見た田辺市三越地区の深層崩壊現場[1]



写真手前側の斜面が崩壊して対岸まで滑り上がり、川筋が変わった。

図6 三越地区の深層崩壊現場[2]

その後、大畑瀨（おおはたどろ）という明治の大水害でできた天然ダムを見学した（図7～9）。



明治十津川大水害で崩壊した土砂によりできた天然ダムの水が今回の大雨で堤を越流して削り取ってしまった。

図7 十津川村大畑瀨(おおはたどろ)[1]



明治十津川大水害による深層崩壊でできた天然ダムの湛水池、100年後の現在も残っている。

図8 大畑瀨(おおはたどろ)[2]



湛水が堤を越流した際に削り取ってできた水路を上流から下流方向に眺めたところ、水路はいったんV字形に削られた後、底に土砂が溜まって逆台形になっている。）

図9 大畑瀨(おおはたどろ)[3]

この日の夜は十津川温泉郷のホテル昴に泊まり、夕食の席で十津川村の更谷村長から十津川村の状況について話を聞いた（図 10, 11）。

14日（火）は台風12号で増水した川に約3分の2が流されてしまった折立橋（おりたちばし）に行った（図 12）。たまたま付近で橋梁工事が行われており、その重機を使うことができたので、応急の仮橋を素早く掛けることができたようだ。本格的な橋の架け替え工事も既に始まっていた。



図10 上空から見た十津川温泉の村営の「ホテル昴」



図11 宿泊した十津川温泉の村営の「ホテル昴」



図12 落橋した折立橋（おりたちばし、十津川村）の復旧工事現場



2013/5/15畑村撮影

図13 十津川村栗平地区の深層崩壊現場[1]

次に、十津川村の栗原地区の深層崩壊現場を見た(図13~15)。ここは高さ450m、幅600m、長さ960m、崩壊土砂量2513万 m^3 (斜面勾配33度、斜面方位・北西)という非常に大規模な崩壊である。天然ダム(図16, 17)が出来ていたが、ダム崩壊を防ぐ工事と推進管工法によって水を抜くための管を設置する工事を行っていた(図18)。様々な対策工事が行われている崩壊現場で弁当を食べたが、非常に暑かった。



2013/5/14畑村撮影

天然ダムの堤部分。道路の傾斜が30度近くあり、4輪駆動車が人を乗せては登れず、筆者らは下車し這いつくばって登った。

図14 十津川村栗平地区の深層崩壊現場[2]



2013/5/14撮影

崩壊斜面を背景に立つ筆者。

図15 十津川村栗平地区の深層崩壊現場[3]



2013/5/14畑村撮影

天然ダムの湛水池を堤の上から見下ろす。

図16 十津川村栗平地区の深層崩壊現場[4]



2013/5/14畑村撮影

天然ダムの湛水池の水抜き水路

図17 十津川村栗平地区の深層崩壊現場[5]



堤部分の通水に推進管工法を使っていた。

図18 十津川村栗平地区の深層崩壊現場[6]

次の視察地に向かう途中の長殿（ながどの）地区では山崩れが起こって天然ダムが出来、さらに上流で崩壊が起こって湛水池に土砂が落ち込んだため、津波が起こって集落が破壊されたそうだ(図19)。車中からの見学であったが、水力発電所の建物が全部吹き飛び、3つの水車のコンクリート部分だけが残っていた(図20)。



土砂崩壊でできた湛水池にさらに上流で起こった崩壊の土砂が落下し、津波が起こって発電所を破壊した。

図19 十津川村・長殿地区の津波により破壊された長殿発電所跡[1]



土砂崩壊でできた湛水池にさらに上流で起こった崩壊の土砂が落下し、津波が起こって発電所を破壊した。

図20 十津川村・長殿地区の津波により破壊された長殿発電所跡[2]



2013/5/15畑村撮影

図21 五條市赤谷地区の深層崩壊現場[1]



2013/5/14畑村撮影

図22 五條市赤谷地区の深層崩壊現場[2]

次に午後は五條市の赤谷（あかだに）地区の深層崩壊現場を見た（図 21～23）。赤谷の深層崩壊は、高さ 600m、幅 460m、長さ 1100m、崩壊土砂量 935 万 m^3 、（斜面勾配 37 度、斜面方位・北西）という大規模なものであった。



2013/5/14畑村撮影

天然ダムの湛水池。

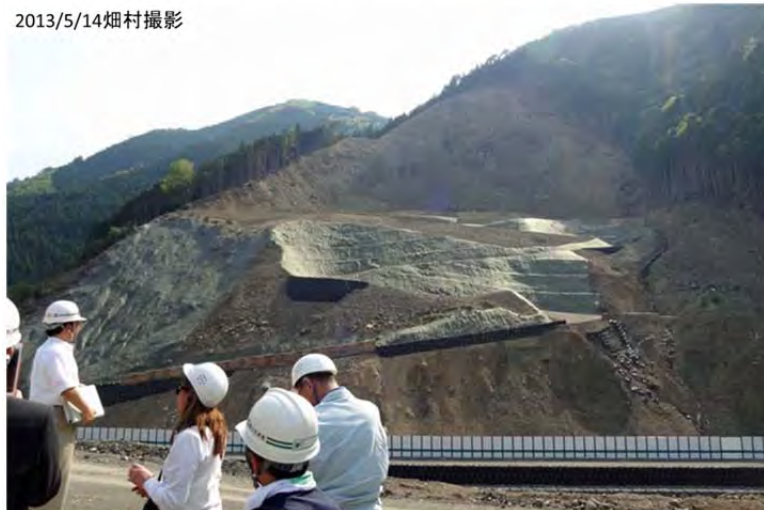
図23 五條市赤谷地区の深層崩壊現場[3]



写真右の清水地区の崩壊土砂が対岸の宇井地区を駆け上り、民家に達した。

図24 五条市清水地区の斜面崩壊現場[1]

2013/5/14畑村撮影



清水地区の斜面崩壊現場を対岸の宇井地区から望む。

図25 五条市清水地区の斜面崩壊現場[2]



清水地区の崩壊土砂が対岸の宇井地区に駆け上り、民家に達した。

図26 五条市清水地区の斜面崩壊現場[3]

その後、清水・宇井地区の崩壊現場を見た（図24）。清水地区の崩壊では、崩壊土砂が対岸の宇井地区に乗り上げて集落に達し、犠牲者が出たそうだ（図25～26）。

車で北上し6時に新大阪に着いて、14人のうち9人はここで解散して帰って行った。

15日(水)には近畿地方整備局で今回の視察のお礼を言った後、八尾飛行場から国交省の防災ヘリコプタに乗って、13日と14日に地上から視察したところを上空から見た(図27)。ヘリコプタに乗ったのは、私を含め5人である(図28)。まず崩壊現場を見ながら南下し、途中紀南ヘリポートで一旦着陸して給油し、弁当を食べた。次に崩壊現場を見ながら北上して、八尾飛行場に戻り、新大阪駅で解散した。



図27 紀伊半島土砂災害ヘリ視察ルート(2013/5/15)



途中給油のために着陸した紀南ヘリポート(新宮市)にて。

図28 ヘリによる紀伊半島被災地視察

【見学で得た知見】

今回の見学で見たり知ったり考えたりしたことを以下に記す。

A. 見学中に現地で感じたこと

- ① よくこんなことが起こったものだ

深層崩壊の現場の見学では、よくこんなことが起こったものだ、山というものは崩れるのだなというのが一番の印象である。近年、様々な山崩れの現場を見学する機会に恵まれたが、4年ほど前に岩手宮城内陸地震の跡を3回に亘って見学したことがある(図29)。そのときに一番大規模なのが荒砥沢の地滑りだった(図30)。この地滑りは長さ1,300m、幅800m、高さ148m、推定移動土砂量6,700万m³というもので、あの規模に比べればこの深層崩壊の方が規模が小さいように思う。同じく、湯浜温泉下流にも見事にお椀状に崩れ、円形劇場のようになっていた場所があった(図31)が、今回見た深層崩壊現場は標高差がそれよりももっと大きいように思う。岩手の崩壊現場は、崩落崖が垂直に切り立っており、縦にずり落ちたという感じがしたが、紀伊半島の崩壊現場では、斜面が滑り落ちるように崩れたという感じがした。これは崩壊土質の問題ではないかと思う。天然ダムができたために応急対策が大変だったことはどちらも同じであるが、岩手の崩壊場所には人が住んでなかったため、崩壊土砂による直接的な死者がいなかったのに対し、ここでは人が住んでいるところで起こったため、大災害になっているという感じがする。



図29 畑村が近年実見した大規模崩壊箇所



図30 空から見た岩手宮城内陸地震で起こった荒砥沢の大地すべり



図31 空から見た岩手宮城内陸地震での湯浜(ゆばま)温泉下2kmの大崩壊と天然ダム

② 津波の跡と同じ。原発にはない明るさがある。

深層崩壊による土砂が流れた一帯を見たときの印象は津波に襲われた地域を見たときによく似ていた。立木であれ建物であれ、その場にあったものの全部が流されてがれきの山になっていた。十津川での山の崩れ方を見ると、「深層崩壊」という言葉より「山崩れ」というのが私の感覚に合っているような気がする。

今回の視察で特に印象に残ったのは、あちこちで山崩れがおこり、それにより天然ダムができたということの他に、天然ダムにさらに土砂が崩落して津波が起こったということである。このようなことが起こり得ることは今回行くまで全く知らなかったもので、これについては非常に驚いた。三陸地方で、海岸から川を遡上した津波が周囲を壊した跡と非常に似た景色になっていると感じたが、実際に津波が起こったのであれば、そのような印象を持つのも当然である。

人が住んでいるところで災害が発生したという観点からは、原発も同じである。原発周辺の海岸付近は津波に襲われた直後に人の立ち入りが禁止されたため、津波襲来の跡がそのまま残っている場所もある。福島原発事故は2011年3月、紀伊半島の災害は2011年9月におこり、どちらも災害から2年経つが、原発周辺地域では事故以来時間が止まってしまっている。一方、紀伊半島の被災地域は着々と復旧に向けて工事が行われ、人々の暮らしも動いている。そのような状態を見ると、原発事故の被災地にはない明るさがあるという印象を受ける。また、原発事故が起これば、避難を余儀なくされ、しかも放射性物質の放射能が減衰するまで非常に長期間かかるためにいつ避難生活が終わるかの見通しも立たない。そうしているうちに人の心も社会も何もかも崩壊してしまう。それに比べ、このような山崩れや水害には人の心を壊す作用はないのだろう。逆に、災害があることを数の内に生活している人たちの強さそのものがあるというのをとても強く感じた。

③ 放り出して逃げたくないのか？

深層崩壊の現場では土砂崩壊を止めたり、天然ダムが崩壊しないようにする工事が行われていた。しかし、崩壊や災害が余りに大規模だと対策をあきらめて逃げるしかないと考えるのではないかという気がするが、現実に対策が立案されて作業が行われており、自然災害の前で逃げてしまうという選択はされていない。これだけ大規模な崩壊を見て何もしないという選択肢を考えなかったのかと聞いてみたが、誰もそのようなことを考えたという人はいなかった。さもないければ、何か変なことを質問されているという顔をしていた。これがきちんと災害に向き合っている人たちの本当の姿なんだなと思った。

④ ヘリコプタから見る

私はこういう土砂災害現場を空から見るのは非常に大事なことだと考えている。俯瞰することで全体像を捉えることが出来るからである。ところが、一つ一つの詳細を知らずに全体を見渡しても、何を見ればいいのかかわからず、ただなんとなく見渡すだけになってしまう。すなわち、ヘリコプタから地上を見る時には、必ずその前に現地を自分の足で歩き見ておかなければならない。上空から見て、後から現地を歩くという順番もあるだろうが、たぶんそれでは無理だろう。こういう災害を見る時には、まず紙や映像などの資料で一応のことを知って、その後地上踏査、最後にヘリコプタで見るとするのが良いのではないだろうか。

特にそれを痛感したのは、長殿の山崩れによって起こった津波で破壊された発電所の水車の跡

である。車でその脇を通ったときに発電所の水車の跡が 3 基あるのを見たが、後にヘリコプタから見たときにもそれを見つけることが出来た。詳細を知っているから遠望したときにもそれと認めることができるのである。現地を見ていなければ、ヘリコプタの中で水車の跡ですと言われても何も分からなかったに違いない。

上空から見ると、地上で見ていたのではあまりよく分からなかったことがわかる。それは全体としての土砂の動きである。崩壊現場で崩れた様子を見上げると、まるで山が全部崩れたように見えるが、実際には崩れているのは一部分で、山全体の地盤が軟弱になったり崩壊の危険が増しているということがあるのかもしれないが、大半の場所は崩れていない。また、人間が手を入れて道を作ったようなところから崩壊が始まっている部分があちらこちらに散見された。下手に何かをいじるとそこが崩壊の起点になるということがあるのではないだろうか。

崩壊箇所の水量を見ると、稜線より崩壊した斜面側に降った水量だけでは説明できないほどの水量だったと見学時に説明があった。一般的には山の稜線が分水嶺となり、山のこちら側と反対側では別々の水系になると考えられている。一方、一つの深層崩壊に関わるのは同じ水系の水と考えられる。このことから考えると、必ずしも見た目の稜線が分水嶺とはならず、浸み込んだ水は稜線の下をくぐり、反対側の斜面の下に流れ込むというように、地下でもっと複雑な流れ方をしているのではないかと思われる。

B. 起こった現象について考えたこと

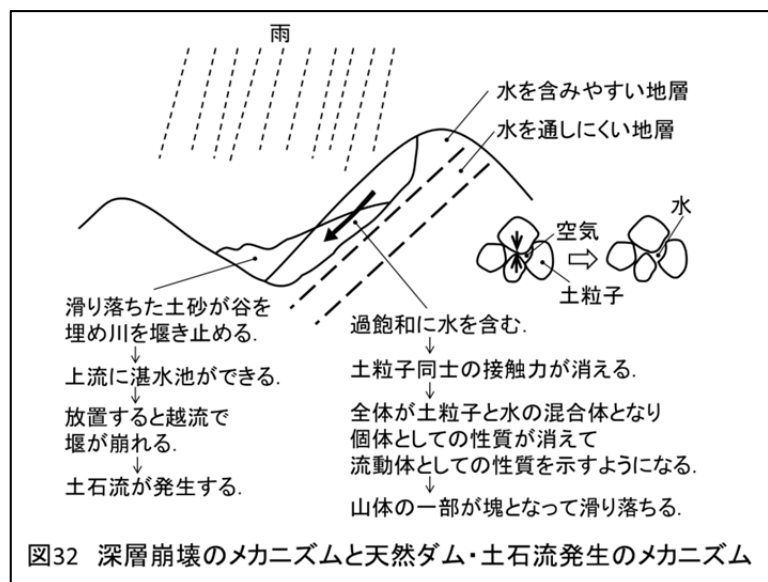
① 深層崩壊のメカニズム

深層崩壊では、がけ崩れと言われている表層の土砂が崩れるものと違って、山が深部から崩れ、山全体がそのまま斜め下にずり落ちていく。土質力学で教わるように、せん断面ができて、ぐるっと全体が回転するような動きでずり落ちるといふよりは、山体の一部が塊となって斜めに滑り落ちる現象が起こっている気がする。

今回の深層崩壊は雨が長時間多量に降ったために起こっている

ことから考えると、透水性の低い地層の上に集まった土の中に浸み込んだ水が岩の粒子同士の隙間を満たし、透水性の低い地層の上の層が流動化し、保持力が失われて、一気に崩れ落ちるのではないかと考えられる (図 32)。

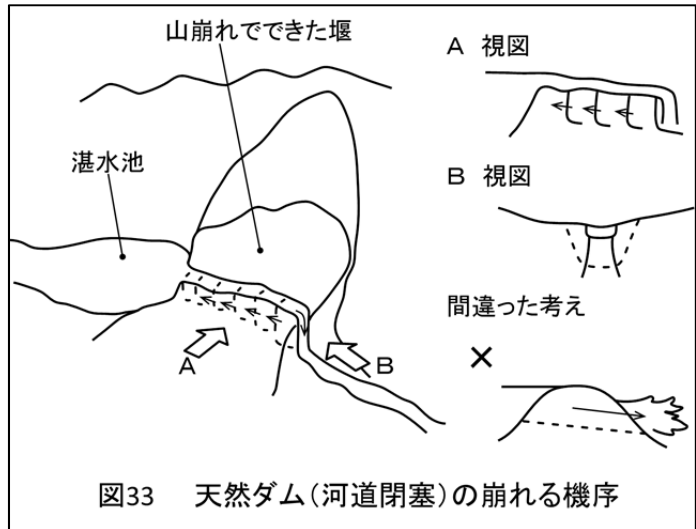
一度崩れ始めてからはほとんど自然落下に近いようなメカニズムで斜面を崩れ落ちるのではないかと考えられる。見学中の説明の中に、自然落下のようなものだと感じるという言葉が出てきたが、これは非常に大事なことを言っているのではないかと思う。地層が流動化して保持力を失



い、いったん動き始めてしまった後はほとんど保持力がないため重力で自然落下に近いようなことが起こったのではないかと考えられる。

② 天然ダム崩壊の機序

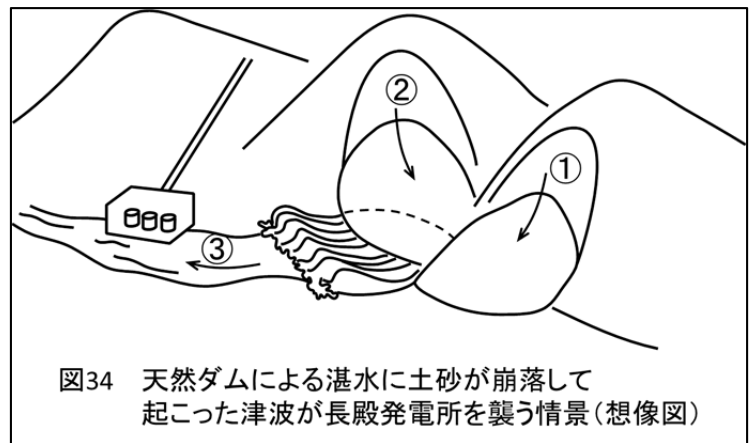
山が崩れて谷の流れを堰き止めたのが天然ダム(河道閉塞)である(図33)。谷が完全にせき止められてしまうと、湛水池の水量はどんどん増える。満水になって水がダムを越流すると、ダム天端に水の通り道となる溝ができる。溝は浸食されて次第に深くなり、幅も広がっていく。一方、ダムの最下端から流れ落ちる水はダムの下流側の根元を少しずつ浸食する。浸食は下流側から上流側に遡り、遂には天然ダムが崩壊し、一気に土石流が下流へと流下するのである。よく知らない人は、堰になった部分が水の勢いで上流から順に崩されて、天然ダムが崩壊するというイメージを持つが、実際にはそうではない。



このように天然ダム崩壊のメカニズムを考え、実際に取られている対策との関係を考えなければならぬ。

③ 天然ダムの津波

今回の見学で一番驚いたことは山崩れでできた天然ダムで津波が起こったことである(図34)。天然ダムがいったんできた後、そこにはじめの崩壊箇所よりも上流で発生した崩壊土砂が急速に流れ込んで津波が起こったようだ。その津波が3~4kmも上流に遡り、しかもその波の高さは10m以上という説明だったように思う。この津波によって、発電所も壊れ、上流の集落で何人かの人が亡くなっているというのを聞いて、非常に驚いた。



こんなことが起こるのだということを全く知らなかったし、考えてみたこともなかった。しかし考えてみれば、これと同じような例を聞き知っていたのである。5, 6年前に有珠山を見学したとき、北海道大学名誉教授の岡田弘先生が洞爺湖で過去に起こった津波について教えてくれた。噴火物が水の中に崩れ落ち、その衝撃で津波が起こって対岸を襲ったとのことだった。

また、“島原大変、肥後迷惑”と呼ばれる事例もある。1792年5月21日に島原で起こった雲仙岳の火山性地震により眉山の山体が崩壊(島原大変)し、その土砂が有明海に落ち込んで津波が起こり、島原や対岸の肥後国(熊本県)を襲った(肥後迷惑)というものである。

もう一つは、アラスカのリツヤ湾で起こった高さ 500m を超える史上最大の津波である。これは地震で斜面が崩落し、土砂や氷河が水の中に落ち込んで起こった津波である。

津波は海底を震源とする大地震が起こって発生するものといつの間にかステレオタイプに考えていたが、それとはまったく違って、水が溜まっているところに物が落下してその衝撃で波が起き、それが伝播するというモデルも考えに入れておかなければならないということである。

④ 跡を見て起こった現象を推察する

起こった跡を見て起こった現象を推察することが大事だ。言い換えれば、時間軸を逆に辿るということである。

今回私たちが見たのは、2年前に起こったことの現在の姿である。私たちは現在の姿から、そこで何が起こったかを時間軸を遡って考えなければならない。その時に想像するのが難しいことが2つある。

ひとつは、長時間にわたって雨が降り続いたということ。もう一つは凄い量の雨が川に集まったものすごい高さで速さで流れていったことである。そのときの水面の高さをいくら説明されても、想像することができない。

同じ思いを他の場面でも感じたことがある。津波から約半年後に訪れた常磐線の新地駅のことを思い出した。4両編成の電車に乗務していて、津波の際に駅の跨線橋に避難し、たまたま水が首の所で止まったので助かったという人が携帯で撮った写真を見せてもらったことがある。跨線橋の上（地面から7~8mの高さ）から撮ったものであるが、地上にある建物も林も水に吞まれ、山の方まで見渡す限り一面水であった。水の引いた後の駅のホームに立ってみたが、その様子はとても想像できなかつた。このように考えると、跡を見て時間を戻し、そのときに起こったことを推察することがいかに難しいかということである。それでもそれをしなければ何もわからない。

“跡を見てその時に何が起こったかを考える”といえれば、岩手宮城内陸地震の被災地を見たときに思ったことがある。静的な情景を思い浮かべるだけではなく、動的な状況を想像することの重要さである。土石流が山の谷を折れ曲がりながら流れ下った跡を見ると、必ず谷の外側が谷底から100m近い高さまでえぐられ、木々がなくなっていた。それを見て、私は土石流がスキーのスラロームのように左右に乗り上げて向きを変え、流れ下る様子を想像した。跡を見て起こりつつあるときの動的な様子までを想像しなければならないのである。特に今回のように山が崩れたときには、崩れてきた土砂などが反対側の山の斜面を駆け上る様子や、谷を堰き止めて天然ダムとなる様子などを動的に思い浮かべなければならない。

【自然災害の定量的考察】

* 以下の考察においては、現象を非常に単純化して考えた。そのため、実際の現象を詳細に考えれば、これに一致しない点もあると思われる。

① 対象とする事象

今回2011年に起こった紀伊半島の土砂災害の視察で、起こった跡を見て現象を推察するとき、そのメカニズムや定性的なことに注目するだけでは不十分で、水や土石流による破壊を定量

的に考察し、一般化する必要性を強く感じた。そこで、これまでに 3 現（現地・現物・現人）や座学を通じて知り得た、次のものを統一して理解しようと試みた。

土石流	岩手宮城内陸地震, 駒の湯
深層崩壊	十津川, 岩手宮城内陸地震
天然ダム	十津川, 岩手宮城内陸地震
津波	両石湾堤防 (津波の速度 110km/h = 30m/s)
	十津川
台風	明石大橋 (風速 80m/s)
竜巻	羽越線
	ムーア竜巻 (米) (90m/s)
滝	那智大滝

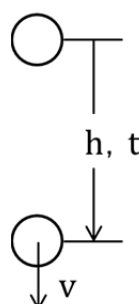
特に今回見学した山崩れや洪水全てに言えることは、衝撃力と自然落下の 2 つの力学を正しく理解することの必要性である。運動しているものが静止するまでの間に対象物に対して与える力、すなわち衝撃力と、静止していたものが自然落下し、再び静止するまでの落下現象の 2 つが支配的な要因だということである。

運動していたものが止まるまでの間に働く力と時間とをかけたものが力積, 速度と運動していたものの質量をかけたものが運動量である。運動している物が何かにぶつかって静止するとき、ぶつかられたものが受ける力は質量と加速度を掛け合わせたものなので, そのときの質量と動いていた運動量を止まるまでの時間で割ったものになる。障害物にぶつかってそれが止まるようなときに作用するのはこの衝撃力そのものである。これを実際に当てはめてみると, 非常に大きな力が作用しているということがわかる。

② 量的に考えるべき現象

ここで考えなければならないのは基本的には①自由落下と②衝突による衝撃力, および①, ②を組み合わせて理解される③衝撃による面圧の 3 つである。

① 自由落下

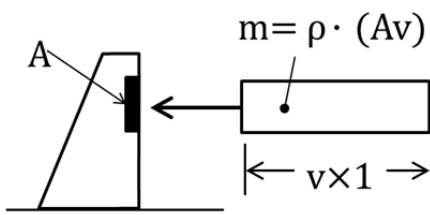


$$\begin{cases} \frac{1}{2}mv^2 = mgh \\ v = gt \end{cases}$$

h だけ落ちるのに要する時間 $t = \frac{v}{g} = \sqrt{\frac{2h}{g}} = 0.45\sqrt{h}$
 (0.4517)

h だけ落ちたときの速度 $v = \sqrt{2gh} = 4.5\sqrt{h}$
 (4.427)

⑥ 衝突による衝撃力



運動量と力積の関係 $\Delta mv = f \Delta t$

進行方向について考えると、速度 v で動いたものの速度がゼロになるので、

$$(\Delta v) = v$$

次に速度が変わる物体の質量 m を考える。

面積 A の壁に当たる筒状の水を考えると、例えば1秒間に壁に当たる筒の長さは、

$$v(m/s) \times 1(s) = v(m)$$

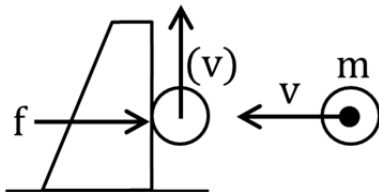
となるので、1s で速度が v から 0 になるときの

体積は $v \cdot A$ 、質量 m は $\rho v A$ となる。

従って、

$$\rho \cdot Av \cdot v = f \cdot t$$

となる。



連続して水平方向に移動しているものが1秒間に進行する距離に相当する長さの筒状の物体が、

時間 t の間に速度が v から 0 になるのだから、力 f が働く時間 t を1秒と考えると、

時間 t の間に速度が v から 0 になるのだから、力 f が働く時間 t を1秒と考えると、

$$f/A = \rho v^2 = \rho \cdot 2gh$$

となる。

⑦ 衝撃による面圧

滝の底の面圧や津波が防潮堤に当たった時の面圧を考える。

連続した流れが壁に当たり、進行方向の速度が0(ゼロ)になる(元の進行方向と直角の方向に流れの向きが変わるが、速度の大きさそのものは変わらない)とき、元の流れに垂直な壁が受ける力 f は

$$p = f/A = \rho v^2$$

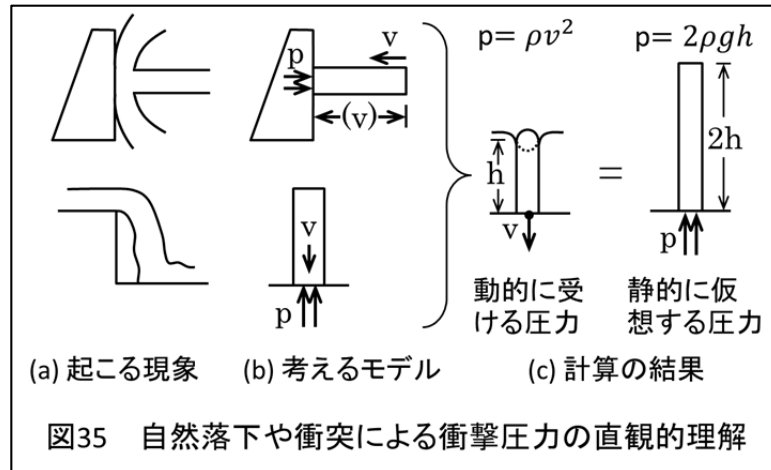
となる。これを自然落下(⑧)での v と h の関係 $v^2 = 2gh$ と組み合わせると、

$$p = \rho v^2 = \rho \cdot 2gh = 2\rho gh$$

となり、以下に示す2つのことがいえることになる。

- ・ 落下による衝撃圧力は落下高さに比例する。
- ・ 衝撃圧の大きさは静止荷重による圧力の2倍に m 単位で測った高さを掛けたものになる。

次に示す図 35 はこれを分かりやすく示したものである。



ここで現象を理解するのに必要となる連続体としての水，空気，土石流の密度を概算で求めておく。

空気 $\rho = \frac{1\text{m}^3}{22.4\text{l}} \times 28.8\text{gr} = 1\text{kg/m}^3$

水 $\rho = 10^3\text{kg/m}^3$

土石流・岩屑流 $\rho = 1 \times 0.4 + 2.5 \times 0.6 = 1.9 = 2 \times 10^3\text{kg/m}^3$

\uparrow 水 \uparrow 空隙率 \uparrow 充填率
 安山岩 ($\rho = 2.3$) と玄武岩 ($\rho = 2.7$) の平均

③ 具体的な検討

空気 ($\rho = 1\text{kg/m}^3$)， $v = 90\text{m/s}$ (アメリカの竜巻の例) とすると，

$$f/A = v^2 = 90^2\text{kgm/s}^2 = 8100\text{kgm/s}^2 = 0.8\text{tonf/m}^2$$

→ 通常の建物の壁では対抗不能

水 ($\rho = 10^3\text{kg/m}^3$)， $v = 30\text{m/s}$ (両石湾の津波の推測) とすると，

$$f/A = 10^3 \times 30^2\text{kgm/s} = 900 \times 10^3 = 90\text{tonf/m}^2$$

→ どんな強固な土木構造物でもたいていは対抗不能

土石流 ($\rho = 2 \times 10^3\text{kg/m}^3$)

$v = 30\text{m/s}$ (駒の湯のスラロームの推測) とすると $f/A = 180\text{tonf/m}^2$

$v = 45\text{m/s}$ (駒の湯のスラロームの推測) とすると $f/A = 400\text{tonf/m}^2$

→ 何をやっても対抗不能

天然ダム越流 $h = 10\text{m}$ とすると (十津川・栗原地区の例)，

$\rho = 1$ (水) $f/A = 20\text{tonf/m}^2$

$\rho = 2$ (土石流) $f/A = 40\text{tonf/m}^2$

深層崩壊

$h = 100\text{m}$ とすると， $v = 45\text{m/s} = 160\text{km/h}$ ， $t = 4.5\text{s}$ $p = 400\text{tonf/m}^2$

→ すべて壊れる

$h = 600\text{m}$ (十津川・赤谷地区の例) とすると，

$v = 110\text{m/s} = 400\text{km/h}$ ， $t = 11\text{s}$ $p = 2400\text{tonf/m}^2$ → 何をやっても対抗不能

以上の考察をまとめると次のようになる。

$$\begin{cases} h = \frac{1}{2}gt^2 \\ v = gt \end{cases}$$

$$\begin{cases} h = \frac{1}{2}g\left(\frac{v}{g}\right)^2 = \frac{v^2}{2g} \\ v = \sqrt{2gh} \end{cases}$$

$$\rightarrow p = \frac{f}{A} = \frac{2\rho h}{A}$$

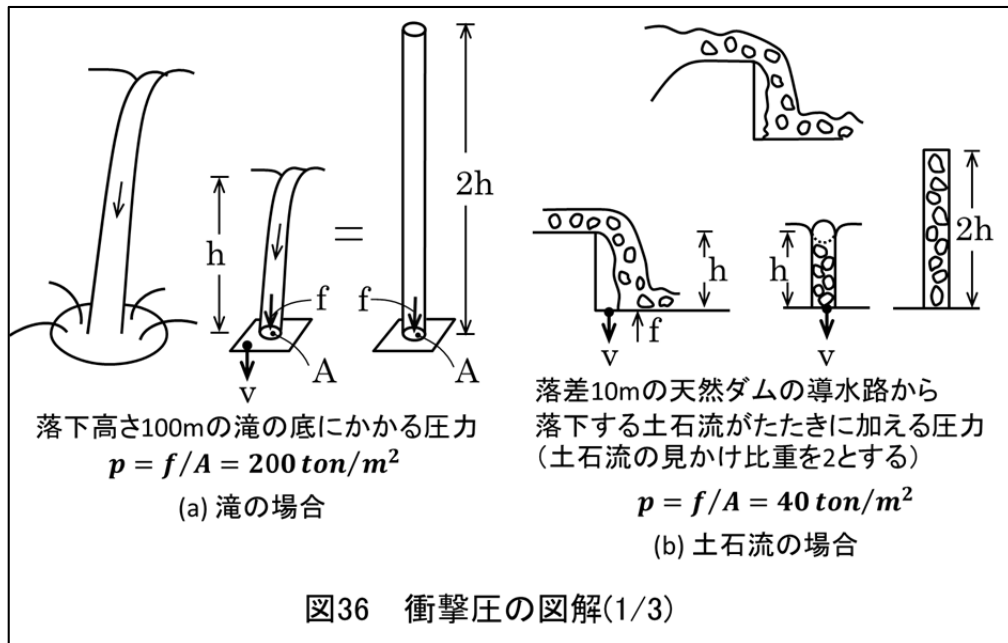
底にかかる衝撃圧
 = 底にかかる衝撃力÷底の面積
 = 高さの2倍に積み上げた物体の重さ÷底面積

自然災害を定量的に考えるとき、崩壊した土砂の衝撃力、また土石流がぶつかったときの衝撃力、滝の水の衝撃力、これら全てを次のような式で表すことができることが非常に面白い。

繰り返しになるが、始めに取り上げた実際の例に当てはめて考えた結果を以下に述べる。

那智の滝は落差 100m だが、滝の底では 45m/s=160km/h にもなっている (図 36(a))。

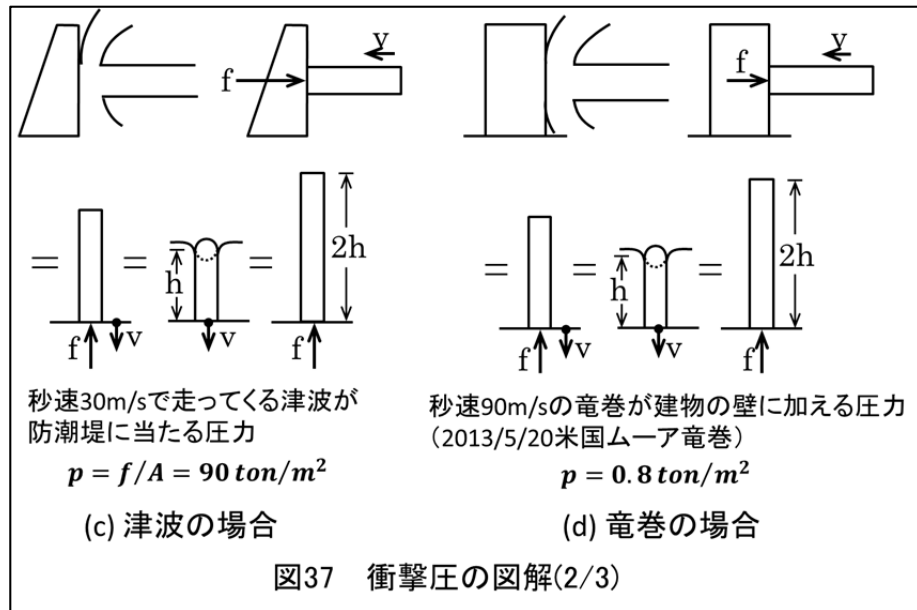
土石流を考えると、土石流の空間構成を 60%が固体、40%を液体とする。通常の水は比重 1 であるが、岩石の比重を 2.3~2.7 の平均値をとって仮に 2.5 とすると、 $0.6 \times 2.5 + 0.4 \times 1 = 1.9$ となるので、土石流は見かけの比重が約 2 の流体と考えることができる。これが何かにつかかって止まったとすると、その時の衝撃圧は同じ計算で求められる。また、天然ダムを越流した水が天然ダムの下流側の根元を削り取る力も水の落下と考えれば同じ計算で求められる (図 36(b))。



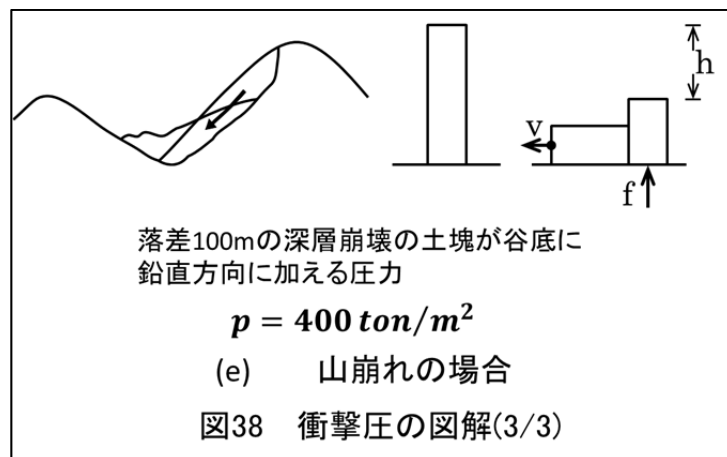
また、津波の斜流の衝撃圧もこの計算で求められる。例えば三陸の両石湾の堤防は木端微塵に壊れてしまったが、津波を秒速 30m と考えると、 1m^2 当たり約 90 トンの力が加わることが計算で求められる。どれほど頑丈な堤防を作っても、人工物でこれを抑えるのは非常に困難である (図 37(c))。

突風とか竜巻の風の衝撃圧も同じである。紀伊半島に行った直後 (2013 年 5 月 20 日) にアメリカで非常に大きな竜巻 (「ムーア竜巻」と称される) が起こった。その時の最大風速が秒速

約 90m と報道された。この竜巻の風の衝撃圧は恐らく 1 トン/m² 近くになっているのではないだろうか (図 37(d))。



また、深層崩壊で 600m の高さの斜面が崩壊したとすると、崩壊の源頭部が谷底まで落ちたときの速度を単純に自然落下と考えると、 $100\text{m/s} = 360\text{km/h}$ と、非常に高速になる。実際にはこんな高速は生じないと考えるのなら、仮に落差を 100m としても下部での面圧は莫大なものになる。また、山が崩壊して対岸に乗り上げる現象は位置エネルギーと運動エネルギーの変換で説明できる (図 38(e))。



蛇足

戦後 10 年経った 1955 年、中学の修学旅行で仙台と中尊寺に行った。そのときのバスガイドの女性は今考えてもすごいバスガイドだったなという気がする。仙台を出て、どこかの吊り橋 (たぶん高さが 70~80m あったのではないかなと思う) の上まで行ったときに、そのバスガイドはこの吊り橋の高さは、上から石を落して下まで落ちる時間を測るとその時間から計算できるということを教えてくれた。2.5 秒か 3 秒程度だったような気がするが、すごい人だなと思ったことを覚えている。物理学の知識を使って中学の生徒に吊り橋の高さの求め方を教えるというようなこんな知的レベルの高い人たちがバスガイドをしているという日本の教育のレベルの高さに思いを致す。

C. 見学に関連して考えたこと

① 避難地の選択

こんな災害に遭遇したら、一体どこに逃げればいいのか。十津川の見学で一番強く感じたことのひとつがこれである。谷から10数mの高さに住居があれば、ほとんどの人はまさかそこまで水が来るとは考えないだろう。しかし台風12号による激しい雨は何日も続き、こんなに水かさが増えることなど考えたこともないし、過去にも例がないというような状況で、どの位まで川が増水すると考えればよいのだろう。どれくらいの速さで、しかもどれくらいの高さまで増水するのか想像もつかない。結局、どの程度の高さのところまで逃げたらよいか全くわからない。しかも、山崩れが起これば、逃げようもない。逃げ場がない、考えようがないというのは、非常に怖いものである。

② どこまでを想定すべきか

避難の問題だけではなくて、住居、橋や道路などの構造物、その他諸々をどの高さにとどのくらいの規模や構造のものを作ればいいのかというのがわからない。地域を計画するとき、何をどこまで想定するかというのは非常に難しい問題で、答えが見えない感じがする。今回の見学の途中、風屋ダム手前で道路が3kmに亘ってずっと高架橋になっているところを通った。山の斜面を削って道路を作ることができないのでこういう風にしたのだという説明であった。しかし、高架橋ではまだ安心できず、道路を全部トンネルにしてしまうしかかたがないのではないかという話が出ているようだ。しかも、本当にそうするならば、避難所も非常用の備蓄倉庫もトンネルの中に始めから設置してしまうのがよいのではないかという議論がでていとそうだ。人間がいつまでここに住み続けるのか、そのためには何が必要か、何を想定すべきかがよくわからない。それでも地域の人はこちらに住もうとする。そして、それはそれで大事にせざるを得ないのではないかという気がする。

③ 限界集落に住む

昔は山地に人が住むことはできなかったが、だんだんと人が山地に住むようになった。農地は猫の額ほどしかないため、農業で生計を立てることはできず、基本的には林業で生計を立てていた。結局、林業による生産物を地域外に運び出し、生きていくのに必要な物資を外から運んでくることで、この地域で生活することができるのである。言い換えれば、この物流が林業を可能にしたのではないだろうか。

日本航空の御巢鷹山の事故のあった上野村に何回か行ったが、神流(かんな)川の上流地域は十津川よりもっと人口密度が高く、急峻な谷にへばりつくように人が生活している。そのような風景を見て考えたのが、江戸時代には江戸やその他の大きな町が必要とする材木と燃料の供給地域として、山林の経済価値が大きく、多くの人が住むようになっていったのだろうということである。今回の十津川の見学でも、上野村ほどではないが、それに近い感じを受けた。

人は住んでいるところから離れたくない、そこに死ぬまで住み続けたいと考える。一方、社会全体が変わっていく中で、地域が林業に依存するだけでは生きていけなくなって、だんだんと人々が山を離れていくようになる。人がいなかった時代、人が山に住みつくようになった時代を経て、現在はまた人が山を離れる時期に来ているという気がする。

山に住み続けることを望む人は当然そこに住み続けることが許されるべきであると考えたくなる。しかし、高齢化が進み、人口が減っていくと、山に住んでいる人に通常と同じサービスを与えようとすれば、社会の負担が非常に大きくなる。人数が減れば減るほど、一人当たりにかかる労力や費用は加速度的に増えていく。さらに、危険までを考慮に入れると、そこに人が住み続けられるように無限に労力や金を掛けるべきなのか、それともその限度を設定すべきなのか。という難しい問題に答えを出すことが迫られている。このような社会の変化と過疎の問題は根本的に考えなければならない時期にきていると思われる。

三陸の津波被災地も福島原発事故被災地も、住民の減少が問題視されている。しかし、これらの地域では津波や原発事故が起こる前から高齢化と社会構造の変化がどんどん進み、様々な地域で過疎の問題が起こっていた。そこへ津波や原発事故が起こり、被災地では事故や災害とはかわりなく進行していた現象が10年とか20年早く次のステップに進んだにすぎないのではないか。

津波や原発事故の被災地を訪れてみると、そのようなことを考えずにおれなかったが、今回の十津川を中心とする紀伊半島の山地を見たときにもそのような印象を拭うことはできなかった。

④ 村山貯水池

東京の狭山丘陵に東京の水源である村山貯水池というのがある。昔小学校の遠足で行ったことがあるが、2、3年前に小学校の同窓会で同じ村山貯水池に行ってみた。東京の水の1/5とか1/10はこの貯水池を通過している。このダムはアースダムで、第2次世界大戦中には爆撃対策として堤体がコンクリートで補強されたそう。また、近年耐震補強も実施されたそう。

今回の見学で越流による天然ダムの崩壊について色々説明を聞いたが、村山貯水池にも越流による崩壊の危険性があることを一度は考えておかなければならないのではないかと。村山貯水池は多摩川から導水管で水を引いて貯水している。直接この貯水池に流れ込む水の流域面積は極めて小さいため、越流の心配はほとんどない。しかし、何かで貯水池が増水して越流が始まるとすると止めようがないのではないかと。越流がないとしても、振動による堤体の流動化や、またはラットホールのようなものから水が堤体内に入り込んで軟弱化して崩れる可能性もある。堰堤の下は高度成長期に宅地化が進んだため、見渡す限り住宅で埋まっている。もし堤防が崩壊し土石流として流れたら、西武線沿線の周辺地域一帯が一気に全部が流される。避難が全く行われなかったとすれば、数万を超える人が犠牲になる可能性がある。どうも気になって仕方がない。

“あり得ることは起こる”ということ的前提を考えれば、このようなことを検討しておくことが必要だと考えられる。

蛇足

以前私の小学校の同級生が、東大の土木の教授を務めた曾祖父から村山貯水池の計画を立案したという話を聞いたことがあると言っていた。もしそうだとすると、この人が何を考えてこれを作ったのか、どんな計画を立てたのか、を調べてみると非常に勉強になるのではないかと。思う。

謝辞

一度、現地・現物・現人の3現を実行して紀伊半島の災害の実態をしりたいと思っていたが、関係した皆様のお蔭でこのような見学をすることができ、とても有難く思っております。有難うございました。

以上