

1989年越前海岸落石災害における岩盤崩壊過程の考察

平野 昌繁・諏訪 浩・藤田 崇・
奥西 一夫・石井 孝行

INVESTIGATION OF THE CLIFF COLLAPSE PROCESS AT THE ECHIZEN COAST ROCK FALL HAZARD IN 1989

By *Masashige HIRANO, Hiroshi SUWA, Takashi FUJITA,*
Kazuo OKUNISHI, and Takayuki ISHII

Synopsis

Toppled rock blocks from the steep cliff along the Echizen Coast, Fukui Prefecture, hit a part of the shelter (rock-shed) below, and 15 persons in a micro-bus just passing there were killed by the breakage of the shelter on July 16th, 1989. The rock falls foregoing the toppling at least for one hour were reported by two eye-witnesses who had watched the full-process of the rock wall collapse. Their statements give clearly the mode of the collapse starting with the tilting (toppling) of a part of the joint block composing the partly over-hanged sea cliff. The joint block tilted about 30 degrees was then disintegrated, falling vertically on the earth surface. Distribution of the scattered blocks after the fall suggests the rotation of the blocks around an inclined axis at the base of the cliff. The rotation is also confirmed by the fabric analysis of the distributed blocks. A part of the disintegrated blocks hit the rock-shed roof at its edge. Intensity of the impact force given to the soil-covered roof is estimated to be 1100 ton-force, assuming the volume and size of the individual block deduced from the survey after the fall.

1. はじめに

1989年7月16日、福井県越前海岸で発生した落石により、直下の国道を通行中のマイクロバスが遭難し、15名の死者がでた。筆者らは事故発生後の7月19日に現地を訪れ、海上からその全般的状況を観察したのち、現地調査を試みた。その後も何回か現地に赴いて調査した結果の一部は平野ほか(1989)¹⁾として既に公表したが、その後明らかとなった事実を補いつつ、落石状況の分析結果、それに関連した地質・地形特性について以下に報告する。

事故の発生した越前海岸は東経約135度58分、北緯約35度58分に位置しており、福井県中西部のいわゆる丹生山地の西端において、海岸線が日本海に突き出た部分にあたる(Fig. 1)。険しい海蝕崖の連なる部分であるために、海岸に沿う道路はかつては梅浦から北にはなく、旧道は山腹をまくようにして集落をつないでいた。それが昭和29年に県道敦賀三国線として、玉川と左右の間が海岸沿いに自動車でも通行可能な道路と

なった。その後それが昭和45年4月に昇格して国道305号となったもので、交通路としての歴史は新しい。そして次第に、風景の良いルートとして、観光路線としての評価が高まった。そしてそれ以後、逐次的に道路の改良工事が重ねられてきていた。その間、何度か落石または崩落（崩壊）が発生している。

その中で、とくに今回の崩落現場に直接かかわるものは2つあり、ひとつは今回崩落した岩盤の直上部分

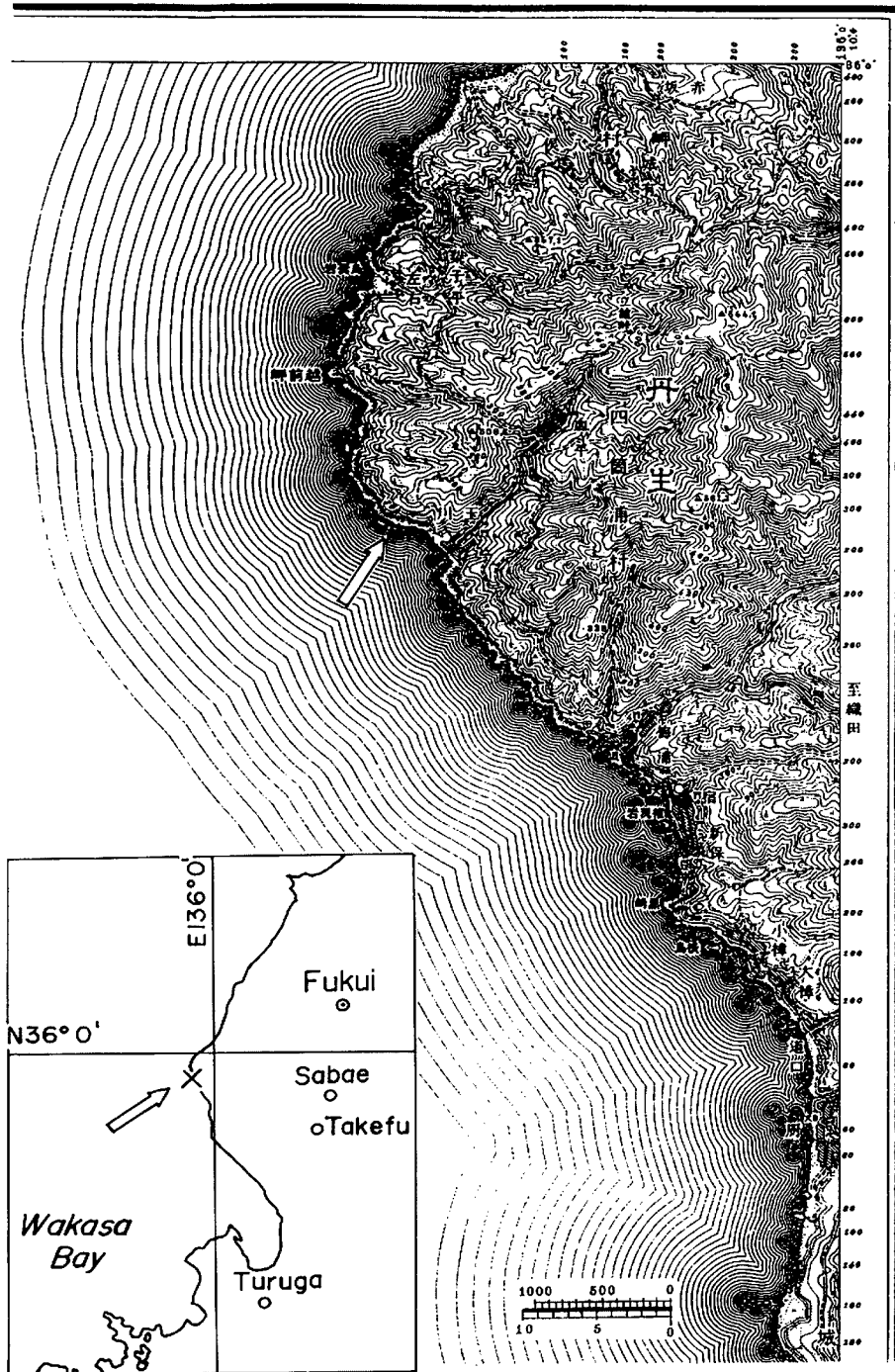


Fig. 1. Locality of the Echizen Coast where the rock fall hazard occurred in 1989, and the landform around the site before the construction of the Route 305. After Umeura quadrangle of 1/50000 by Geographic Survey Institute, Japan.

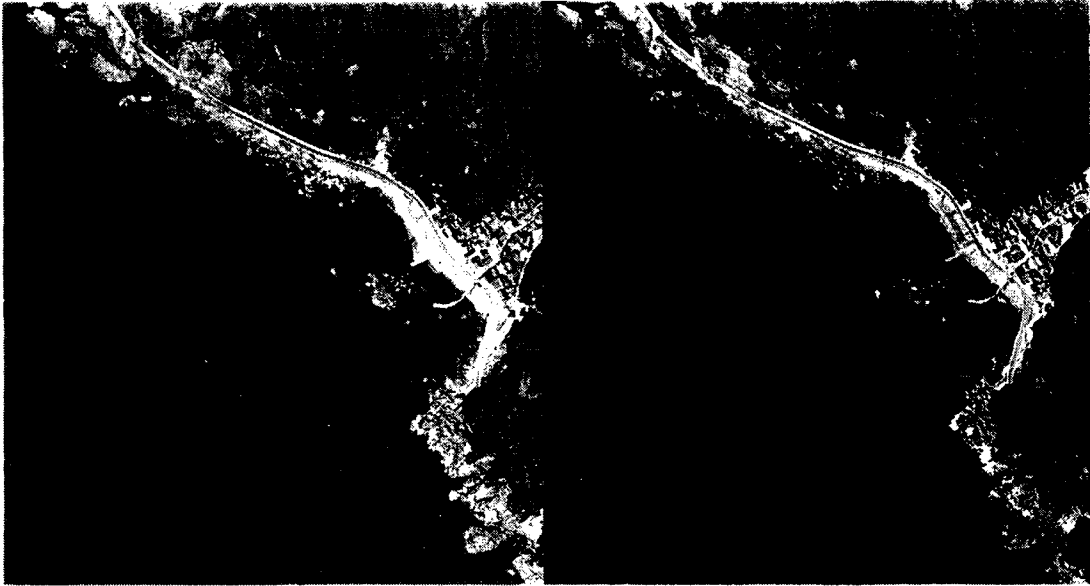


Photo. 1. Aerial photographs showing the Route 305 before the rock fall in 1977. After C CB-75-23, C10-1 and 2 by the Geographic Survey Institute, Japan. A tunnel over the road has been shown at left-up part.

が崩落した事故で、それは昭和33（1958）年であった。そのときは直下の道路でコンクリート工事をしてしたが、朝からパラパラ落石があり、危いので仕事を止めて避難したという。そのあとに岩盤が落下したが、工事従事者が避難したことを知らなかった地元では、避難したのではないかと一時騒ぎになったという。

もうひとつは、今回の落石箇所の北方に当時あった玉川第2トンネル（長さ30メートル、Photo1）を幅4メートルの1車線から9.75メートルの2車線に拡幅するために行なわれた工事に関連したものである。そして、トンネル部分を中心として昭和52（1977）年5月21日午前4時すぎに約2万立方メートルの岩石が崩落した。その一部は、現在も今回の崩落箇所の北に隣接する崖の基部付近にあり、ロックシェッド裏側の盛土に接して残っている。この崩落が発生したときには、ドーンと音がして家が揺れて、窓ガラスもビリビリ振動したという。また、崩落は2回に分れて発生し、第2回目については、1回目の崩壊に伴われる地響きに驚いて外へ出た人や、沖でサシ網漁をしていた人など、目撃者も多い。

この崩落の発生原因等については、とくに工法あるいは発破による震動の評価などに関連して、2つの見解がある。その一方を紹介すると、「工事は、既存トンネルの両脇に先導坑を掘削したのち天井部を完成させる最も安全なサイロット工法を用い、海側をやや厚めに削って工事が70～80%完成した段階で起ったが、最終工事のための資材も発注済みであった。支保工や側壁がたわむといった前兆は無く、いわば一瞬に起こった。発生が午前4時すぎということで、現場に人はいなかった。日中に起こっていたら大事故であったと思う。肌落ちを防ぐためのモルタル吹き付け工事中でもあったので、その関係車両も沢山あったが、工事車両（バックホー）が1台埋っただけであった。早朝のことで、落石などの前兆現象はあったとしても、確認できなかっただろう。発破の使用については、拡幅工事の当初の掘削段階で用いたが、それは崩落の40～50日前であり、崩落前日の使用は斜面上の浮き石を予め落すためのものであった」というものである。

もうひとつは、「これは完全な人災だと思う。まず迂回路を作るのに、トンネルの壁の海側を大きくえぐっていた。その仮設道路は、観光バスが通るぐらいの断面があった。鉄製の枠を組んでキッチリやっていたが、素人が見てもあんな掘り方をしたら崩れると思った。そして仮設道路を作った段階で崩落した。この時、下部の岩を削り取ったので上の重みに耐えられなくなったため、上部の重量をへらす目的で発破をかけて石を削り取っていたということで、その次の日の早朝に崩落した」というものである。

このとき落下した最大のブロックは、約1500トンあったという。そして発生後2カ月間道路は通行止めとなり、崩落した岩石を避けるかたちで海岸の一部を埋め立てて迂回路を作ったが (Photo 2)、路面が海面上約7メートルであり波浪に対する安全性に問題があることから、昭和60、61年度にその部分にロックシェッド (rock shed; 以下ではこの用語を用いる) を作ってルートを若干直線的なものに戻し、かつ海面上約10メートルのレベルの道路として、今回の事故発生前の状態に至っていた。そして今回の事故 (Photo 3) は、昭和52年に崩落事故が発生した箇所の南に隣接する崖 (Photo 4 A) において発生したものである。

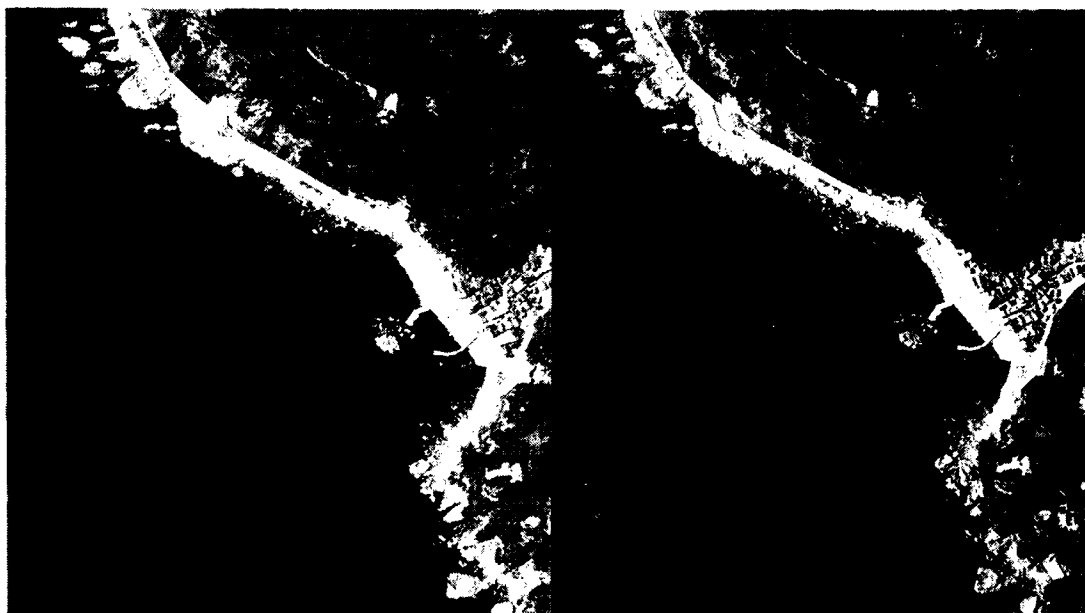


Photo. 2. Aerial photographs showing the temporary by-pass route after the 1977 rock fall. After CB-85-2X, C 8-1 and 2 by the Geographic Survey Institute, Japan. Curved route avoiding the fallen blocks has been shown at left-up part.

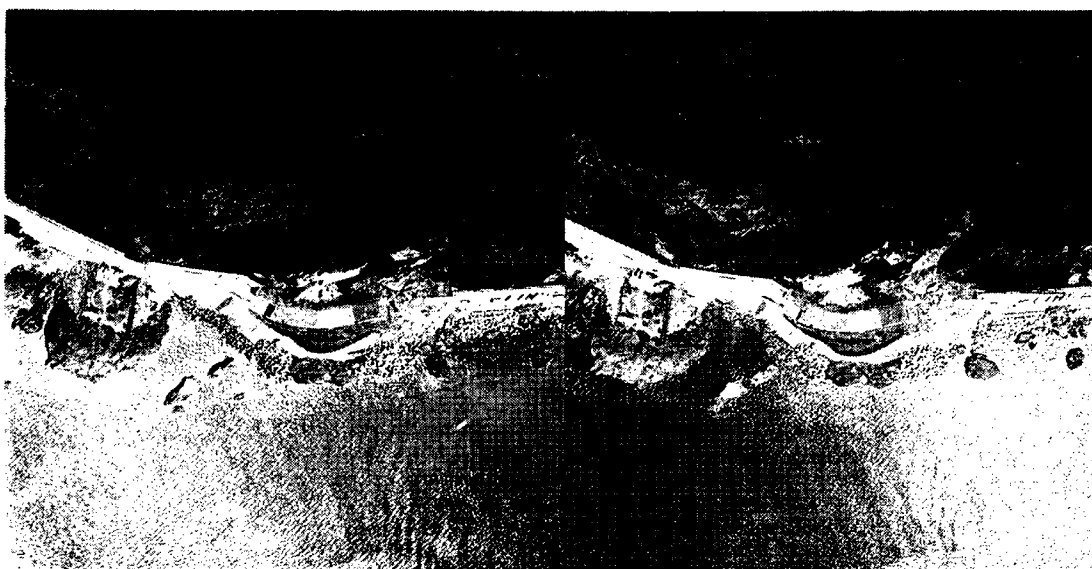


Photo. 3. Aerial photographs one day after the rock fall hazard in 1989. The right part of rockshed has been broken by the rocks and the rescue is going on. After 1499 and 1500 by the Asia Air Survey Co.

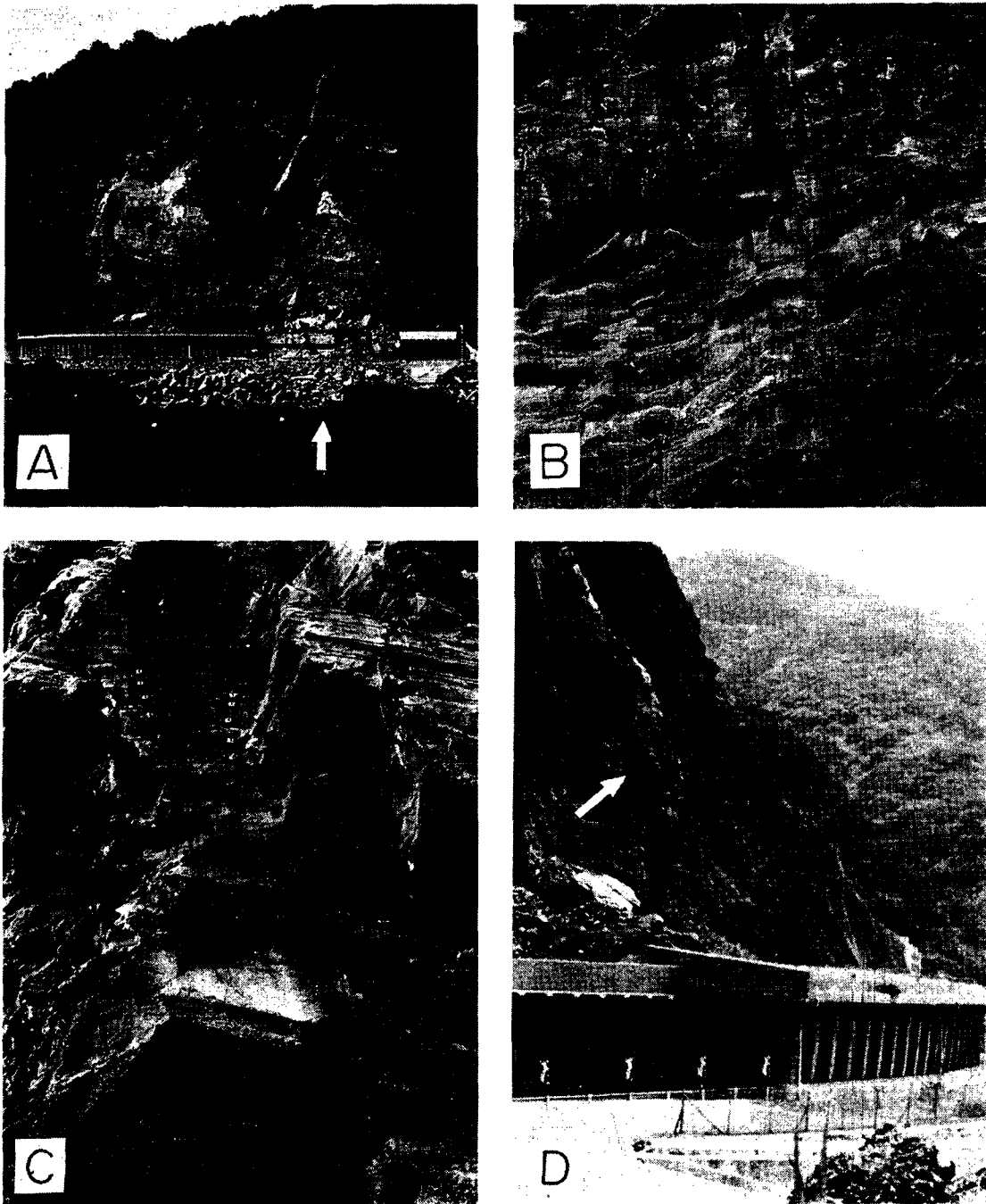


Photo. 4. A: The collapsed sea-cliff at the right side and the previous one in 1977 on the left side, viewed from the sea.
B: Outcrop showing the development of cracks in the rock wall neighbouring to the north of the 1989 rock fall.
C: Mortar and wire work on the rock wall northly neighbouring to the collapsed cliff.
D: The open crack (dark part shown by arrow) observed the day before the collapse. Re-produced from the photo by Koji Niwa.

現地における岩盤の状況であるが、昭和52年の崩落により生じた崖部分の落ち残りの岩盤（今回崩落した崖の北側の崖）は、下半分はオーバーハングして岩盤全体にクラックが入り、それはとくに基底に近い礫岩あるいは砂岩の部分で著しい（Photo 4 B）。岩盤上部の表面にはモルタルが吹き付けてあり、さらにアンカーボルトを打ってワイヤが掛けてあった（Photo 4 C）。崩落した岩盤も上部のわれ目の開口部に当たる罫所にモルタル吹き付けの跡が残り、したがって、岩盤あるいはわれ目の緩みについては今回の事故以前から知られていて、何らかの防護措置の必要性が認識されていたわけである。

さらに新聞に報道された事実として、1985年9月撮影のロックシェッドの工事用写真にも該当部分の岩盤に亀裂が写っており、事故前日の15日に撮影されたスナップ写真の背景にも問題の岩盤部が偶然写り（Photo 4 D）、それによれば深い亀裂が入った崩落前の岩盤の状態が示されていて、厚み最大5～6メートルの岩が浮いた状態となり、開口部は比高約25メートルに及んでいた（読売新聞7月21日）。建設省の調査団によると、崩落した部分は最大幅40メートル、（最大）厚さ約5メートル、（最大）高さ約25メートルとされている。

なお、今回の崩落事故当日の気象状況であるが、崩落現場から約2.5キロ東北へ離れた迺越地域気象観測所において、7月15日22時より降り始めた雨が16日の10時までに73ミリに達したことが記録されている。また、砂防研（1989）²⁾によると7月9日から断続的に3回の降雨があり、その降水量を積算すると230ミリに達していた。そのため、15日21時15分に大雨洪水警報が発令されている。ただし、次にのべる目撃者の談話の中でもふられているように、崩落の1時間前までに雨は完全にやんでおり、この降雨が直接的な誘因となったかどうかについては微妙である。

なお、今回の事故に直接関係した参考資料としては、事故発生後の各種新聞報道と、まとまったものとしては三浦（1990）³⁾による文部省科学研究費突発災害班報告書がある。とくに後者には、現場の斜め空中写真を含むカラー図版多数が収録されている。

2. 落石経過

当日の落石の様子については、2人の目撃者がいて、岩盤の崩落状況を知ることができる。従来の落石事故においては、その全過程が目撃された例は少ないので、その意味でも今回の落石事故は貴重な事例である。その目撃者の1人であり、崖のほぼ直下の磯で釣りをしていた大阪府立堺工業高校山元春夫教諭の談話（1989年7月27日聞き取り）によると、その状況（要旨）は以下の通りである。

「その当日は午前10時ごろグループで大阪を出て、現地には午後2時ごろに着いた。その道中はずっと晴れており、穏やかで海面には波も立っていなかった。現場の手前の川の水が増えて濁流となっていたため、雨の直後であることがわかる程度であった。この日は、潜水（素潜り）をする予定があり、水の濁りが気になったので特に注意して観察していたため、この点はよく記憶している。

そして海岸において、（あとで）崩落した岩盤部分の直下より約10メートル北の磯に着いたのが2時15分ごろかと思う。そこで釣りを始めて10分ぐらいして、最初の落石の音を聞いた。そのあと、およそ1時間ほどの間に7～8回落石があり、その都度カランカランという音がして、それはまるでマンホールの中で響くようであり、石は岩盤の割れ目に落ちていたと思われた。そして、亀の甲のようにオーバーハングしてせり出していた岩盤の両側から、一輪車（手押し車）で押し出すように落石がその度にザーッと音を立てて溢れていた。この落石がくさびになった感じであった。

そして最後に（これが最後であったことは後でわかったわけであるが）それまでより大きい落石の音が出たので見上げると、岩盤上部の隙間が開いて岩がゆっくりと音もなく倒れてきた。それもあらかじめ割れていたのが開いて倒れる感じであった。その間2秒ぐらいで、これは危ないこちらへくると思い仲間にも声を掛けたが、やがて岩盤は向かって右へゆっくり方向を変えた感じで、ロックシェッドの南東側の入り口付近

に置いてきた車のことが気になった。そして岩盤はビルを発破で壊すときのような感じというか、ダルマ落しの支えをなくしたときの感じで、真下へ沈むように落ち、1秒ほどあとにドーンと1回音がして、土煙が前方（海側）および側方へ向かって走った。ロックシェッドはまるで柔らかい紙の箱を横から押さえてつぶすように一瞬の間にペシャンコになり、その上に岩石が乗っていた。

岩が動き出してからロックシェッドがつぶれるまでの時間だが、仕事でストップウォッチをよく使うのでその経験からして、恐らく5秒もたっていないと思う。岩盤が落下する間は全く音はせず、こっちへくるぞと仲間に向かって叫んでから、最後にドーンと1回音がするまでシーンとしてまるでサイレント映画を見るような感じであった。崩落した時刻は、たまたま3時20分に時計を見て確認したあとであり、それから5～6分経過していたと思うので、3時25分から30の間だと思う。

落下のあと石は飛んではこなかった。海へ落ちた石はほとんどないと思う。それでもドーンと音がしたとき、道路上にとめていた自分の車は、石が横から当たったためだと思うが、押し出された感じでやがてもんどり打って転落していくのを目撃した。マイクロバスが通行中であったことは、後続車の人の掛け声で初めて知った。岩石の落下運動中に音がするという事は無かったし、崩壊後に現われた岩壁面にとくに水がしみ出したりしているということもなかった。ただし、前ぶれの落石による最後のやや大きな音の1回前のときに、落石が何か水たまりのような水気のあるところに落ちたような音がした、という仲間もいた。

もう一人の目撃者である孫谷正美氏（越前町玉川在住）は、上の談話に出てくる磯の北方の海上で釣りをしていたのであるが、崩落のあと船で磯のそばを通過して浜（玉川）へ行ってそれを通報したのち、再び現場へ戻っている。そしてその当時の状況を以下のように述べてくれた（1990年4月13日聞き取りの要旨）。

「当日は、あの場所で釣りをする積りではなくて、たまたま他所から移動してそこへついてほんの1分ぐらいあとのことであった。その場所は、自分では沖合200メートルぐらいと思っていたが、あとで聞くと崩落箇所からは斜めに400メートル以上離れていたという。前日からは雨だったが、その時は晴れていた。船のエンジンは止めていたし、波は静かだった。

最初、崖から20～30センチ程度の石が2、3個落ちてくるのが見えた。それは、岩盤の崩壊のおこる20秒ぐらい前だった。落石はロックシェッドのあたりに落ちていた。その下の磯には釣りをしている人が7～8人いたので、消防団員という自分の職業柄から危険防止という事で気になったが、そこまでは届かないなとその時は思った。やがてまた大きな音がして、2回目の落石があって、ちょっと大きな石が落ちてきた。さっきもあったのと思って見ると、岩盤のわれ目が広く開いた感じで、そこは黒く見えていた。下の磯の人は気がついていないなと思って、注意しようと思い、自分は釣りをやめて磯に向かおうとした。

そして岩が、グッと動いたような気がした。アレ？、何だろう、と思った。が、一瞬、目の錯覚かとも思った。岩盤は、動きだして一瞬止まったようにも見えた。それからまたジワジワ倒れて、ビョウブを倒すようにして角度が開いて、その角度が45度近くになって、バラバラになりドサッと3つか4つになって崩れて下へ落ちた。ゆっくり倒れる間、ギギギッと音がしたような気もする。これまで落石を見たことは何度もあるが、こんなのは初めてで、まるで映画の中の1シーンを見ているようだった。この間随分長い感じがしたが、実際にはわずかな時間だったようだ。

下にいる釣り人に当たるのではないかという気がしたし、岩盤が開いてゆく間に、北（越廼村方面）から来たマイクロバスの窓の部分から上だけが（海からは見上げる角度なので）、ロックシェッドの柱の隙間から見えた。そして、アッと思った時に岩が倒れ落ちた。最初の倒れ方だとマイクロバスは通り抜けられるかと思っていたが、岩盤は途中からバサッと落ちた。ロックシェッドの柱は、少しはもつかと思っていたけれど、瞬間的に飛ばされて海側へ何本かがはじき出された感じだった。落ちた石の端は、ロックシェッドの先端よりも海側に出ていたような気もする。

磯の人達は運が良かったというか、岩盤は斜めに倒れた。とりあえず磯のそばへ近寄って大声で叫んで合図をして、浜へ戻って連絡した。それから磯へ戻って、釣り人にまた落石が再発するかもしれない危険だ

から避難するように告げて、現場を確認した。マイクロバスは一瞬のタイミングで遭難し、落下した桁の下から80センチぐらいに圧縮された車の後部が出ていて、ナンバープレートが見えた」。

以上の2つの談話において、孫谷氏は船で目撃地点へ移動してエンジンを止めたあと、山元氏のいう7～8回あった前兆現象である落石の最後から2回目以後を目撃していることになる。そして、岩盤の運動に関する時間の評価については、若干差があるとしても、崩落過程に関する限りこの2人の目撃者のいうところはほぼ一致している。

すなわち、既存のわれ目があり、それがかなり以前から少しずつ開き続け、肉眼で確認できる程度になっていた。そして目撃者のいうように当日は、崩壊の少なくとも1時間前から前兆現象である小規模な落石が発生していた。そして最後に、それまでよりは大きい落石がありやや大きい音がして、やがて、オーバーハングしていた岩盤が扇を広げるように倒れ、そして支えを失った感じでそれは壊れて落下した。なお、崖を見通す位置にある玉川ビューホテルからの通報は15時24分である(三浦, 1990³⁾; p. 9)。

3. 地形・地質特性

事故発生箇所は険しい海蝕崖を作っているが、海岸沿いには複数の段丘面が発達しており、この地域が長期的には隆起傾向にあることを示している。しかし、現在の海岸の海蝕地形は、完新世縄文海進以来の相対的に安定した海水準に対応する沈水による波蝕によるものと考えられる。そして問題の場所の岩盤の基部にたまたま露出していた侵食に弱い凝灰岩の存在により、該当部分では岩盤はオーバーハングした形態をとるに至っていたものと判断される。

この地域は丹生山地の北西部に位置しており、いわゆるグリーンタフ新第三系から成り立っている(山下ほか, 1988)⁴⁾。三浦(1979)⁵⁾、三浦ほか(1982)⁶⁾によると丹生山地の新第三系は下位から西谷流紋岩類、糸生累層、国見累層、市ノ瀬凝灰岩に区分され、崩壊地点の周辺域には糸生累層と国見累層が分布しており、今回の崩壊部分は糸生累層上部である。

落石発生の背景、あるいは、崩落状況をさらに分析するためには、以上のような地形・地質状況を相応に把握する必要があるので、筆者らはこの部分および周辺地域の地形・地質状況について調査しその結果にもとづいて、本地域に分布する新第三系を上位(北部に分布)から、国見累層を上部の七ツ石層、中部の呼鳥門層、下部の越前岬層に、糸生累層上部を上位の玉川層と下位の弁天岩層に、分けることにする(Fig. 2)。各層(部層相当)は、礫岩に始まり凝灰岩もしくは凝灰質砂岩に終わる堆積サイクルを示すが、呼鳥門層、越前岬層においては礫岩が主体であり、玉川層は凝灰岩・凝灰質砂岩を相対的に多く含む。弁天岩層と七ツ石層は図の範囲では分布が僅かであるが、この範囲内ではやはり礫岩を主体とする。また、弁天岩層最上部にかなり顕著な凝灰岩があり、それは削り込まれてしばしばノッチを作っている。各層の概略の層厚は、呼鳥門層が約600m、越前岬層が約300m、玉川層が約290mであるが、小断層による変位が何ヶ所かで認められるので、今後の検討を要する。

広域的に見れば Fig. 2 に示されたように各層は北西へ傾斜し、ケスタ地形を作っていて、礫岩部分が急崖を形成している。しかし落石のあった海岸沿いには、玉川断層が N 50°~60° W 方向に走り、地層の走向も局所的にこの方向となり、北東へ約 30° 傾斜している。したがって、越前岬から南東の玉川に至る海岸線の方向とこの構造が対応して、崩落した崖部分は崖の方向と地層の傾斜方向が反対となる「受盤(逆盤)」の斜面となり、この区間で特に急峻な崖を形成していた。しかも現在の直線的な海岸線の概略位置は、この断層の影響を受つた波蝕に対する抵抗性の異なる岩石(玉川層の礫岩・砂岩と弁天岩層最上部の凝灰岩)が接することで決定されていた。

弁天岩層と玉川層はほぼ海岸沿いに走る玉川断層で切られているが、それは昭和52年に崩落した崖の山側を通り、その北東側部分で確認できる(Photo 5 A)。その北西延長は、玉川観音付近で海上に抜ける。南東

延長はそれが NE-SW 方向の断層としばしば交わることもあってやや明確さを欠くが、今回崩落した部分の上方の崖の中腹を通りやがて海中に抜け、玉川ビューホテルの背後に連続すると考えられる。この断層の走向は海岸の地層のそれと調和的で、構造的に見てこの断層を挟む一定幅の北東傾斜の撓曲帯が形成されているが、断層はこのような構造帯の中の顕著な滑り面（破断面）として位置づけられる。崩壊が起こったの

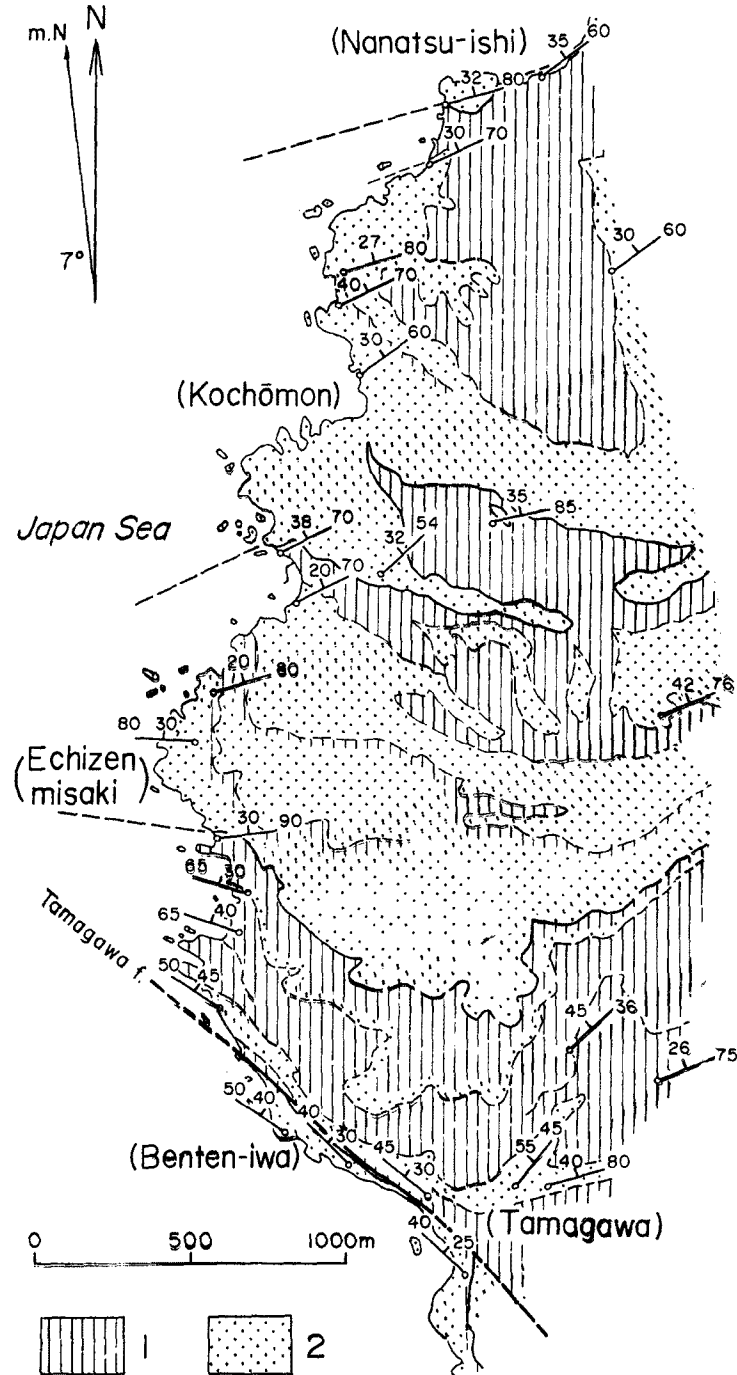


Fig. 2. Geologic map of the surrounding area of the hazard point, where 1 is tuff, tuffaceous sandstone, and sandstone rich portion and 2 conglomerate rich one. The member names are given in brackets.

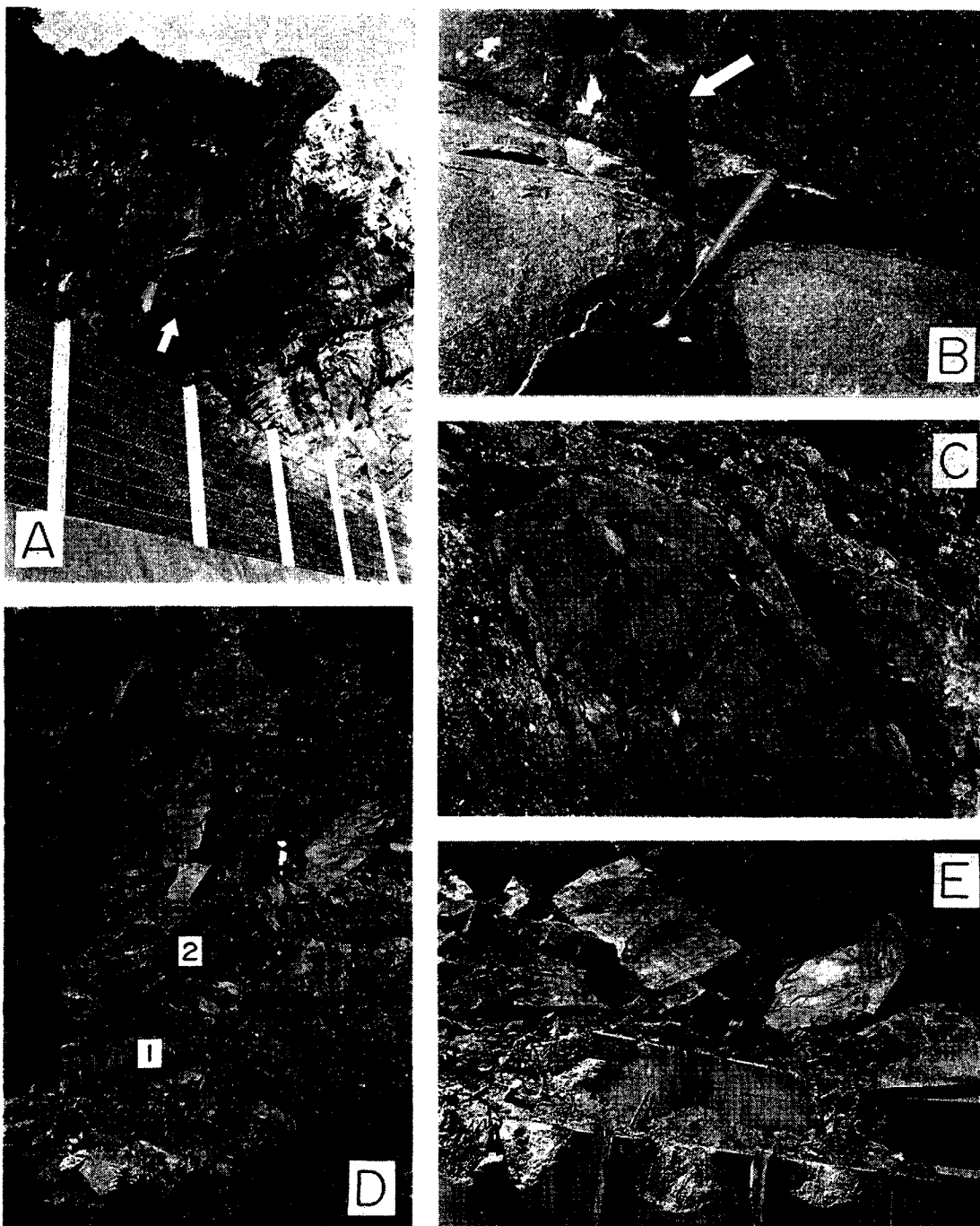


Photo. 5. A: The Tamagawa fault (shown by arrows) running behind the sea cliff.
 B: Minor faults developing in conjugate set in tuff of the uppermost Benten-iwa Member. The fracture shown by the arrow is runs in $N60^{\circ}\sim 70^{\circ}W$ direction.
 C: Head of the acidic dyke which intruded into the conglomerate of the Benten-iwa Member.
 D: Bended or kinked conglomerate layer at left base of the collapsed block.
 E: Conchoidal fractures formed at the edge of the side wall tilted seasides about 6 degrees after the impact of the fallen blocks.

は玉川断層より南西側にある玉川層の礫岩・砂岩・凝灰岩部分である。玉川断層にさらに平行して、構造的な節理ないし小断層が何本も発達している。崩落した箇所を含む岩盤部分は、背後の岩盤からは小断層もしくは構造的節理で切り離されたかたちになっていた。

一般的に見てこの地域では断裂系の発達が著しいが、それには NW-SE および NE-SW 方向のものと、N-S および E-W 系のものがある。前2者は東西主圧力による共役横ずれ断層系と考えられるが (Photo 5 B), 見掛け上は垂直変位を伴う。なお、NE-SW 系の見掛け上は北傾斜の正断層であることが多く、崩落した岩盤と昭和52年に崩壊した北側部分の境界にもそれがあり、数メートルの変位 (北落ち) を与えているのが認められた。N-S および W-E 方向のものについては、岩脈 (Photo 5 C) の方向と一致する場合が多く、成因的には引張り割れ目と考えられるが、とくに N-S 方向のものでは礫岩中の礫を切っていて微小変位が認められることもある。

今回崩落した部分と背後の岩盤の間は、NW-SE 系 (厳密には $N 50^{\circ} W \sim N 70^{\circ} W$) の小断層もしくは構造的節理であり、新たに露出した面上には水平に近い条線の発達が見られる。崩落後の崖面に露出する層準は、あとで述べる落石のメカニズムに関する分析にとって重要なので、後出の Fig. 6 において、とくに層準 I ~ IV に分けてある。

4. 落石の分布状況

岩盤の崩落過程を分析するための基礎データとして、落下した岩石の分布状況の把握が必要であると判断

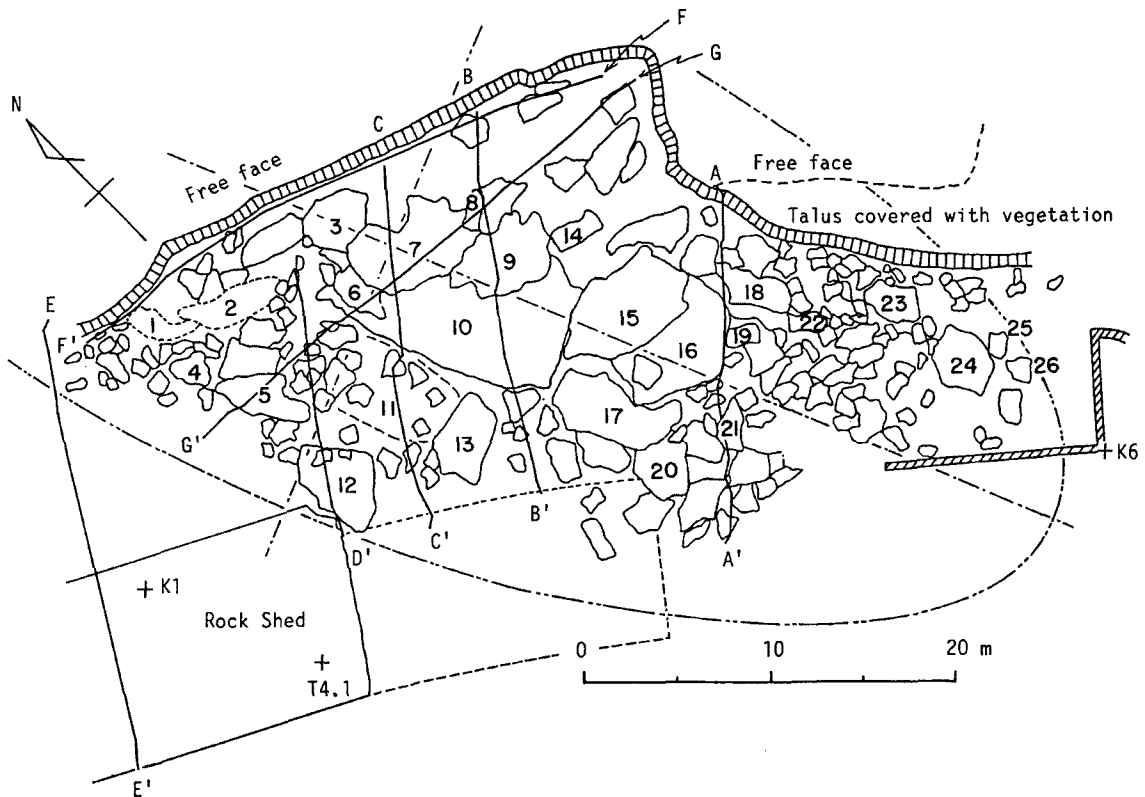


Fig. 3. Planar distribution of individual blocks brought from the collapsed sea cliff. Based on the aerial photographs one day after the hazard, with some modification according to the field measurement. Numerals correspond to those in Table 1.

したので、光波測距機を用いて主要な岩石ブロックについてその位置を測量し、空中写真を参考にしつつその分布図を作成した (Fig. 3)。得られた平面分布と落石の到達範囲をみると全体はほぼ楕円状の平面形を示し、かつその中央部に巨大なブロックが位置している。縦断形 (Fig. 4) に示された地形断面の特性をも考慮に入れると、崖面基部にある右 (南東) 上がりの回転軸 (Fig. 3 および 4 の測線 F-F' に相当) を中心として、下半分が斜めに欠けたほぼ楕円形 (長軸は鉛直) の形態をもつ中央部の厚い岩盤がトッピングをおこし、傾斜した地表面上に分解しつつ落下して散乱した、と解釈することが可能である。

落石の分布範囲を楕円で近似すると、その長軸は崖の基底とは約45度で交わる (Fig. 3)。トッピングの回転軸が水平面に対して約30度傾斜している (南東側が上っている) と考えられるので、トッピングで

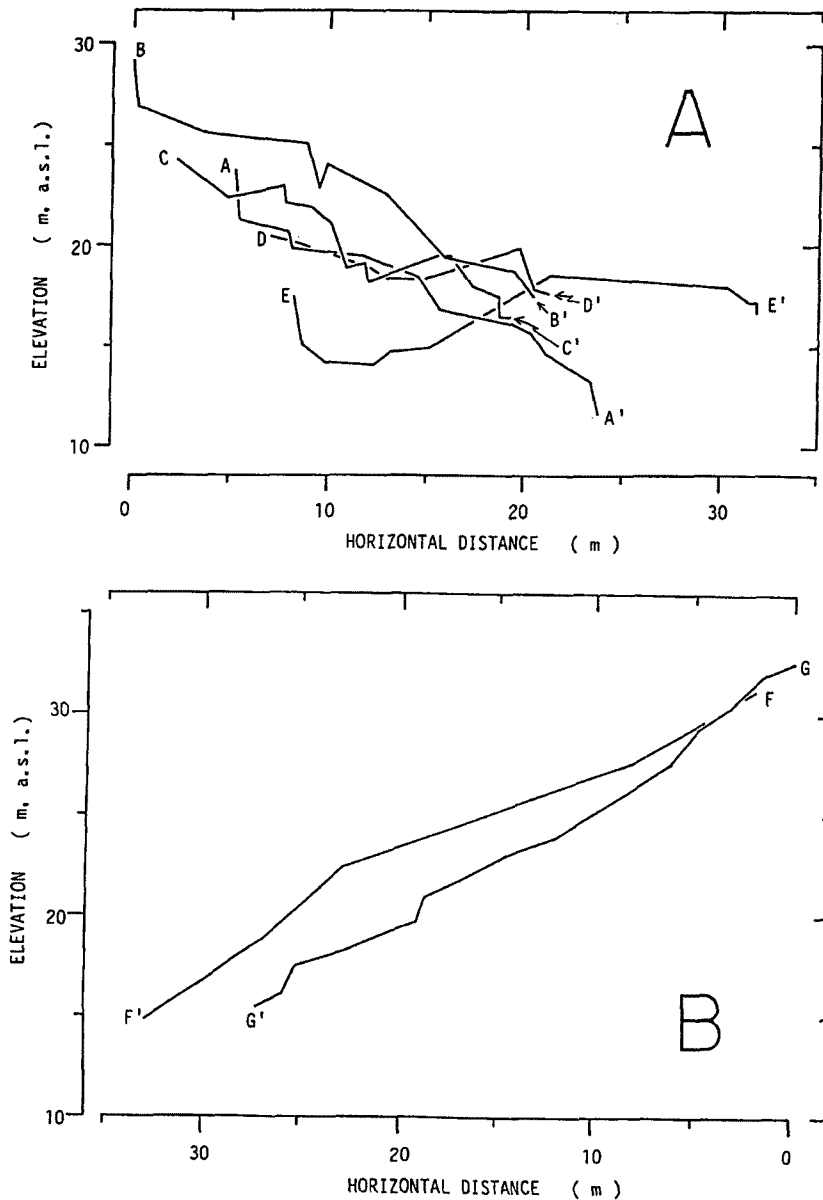


Fig. 4. Representative topographic profiles of the site after the collapse of the rock wall. See Fig. 3 for the location of measure lines.

岩盤が90度回転した状態から鉛直に落下したものとすると、分布楕円の長軸と崖面は約63度で交わることになる。すなわち一般に、回転軸の傾きを θ 、そのまわりのもとは鉛直であった楕円の長軸の回転角（トップリングの角度）を α としたとき、水平面上に投影された両者の交角を ϕ とすれば、

$$\tan \phi = \sin \alpha / \sin \theta$$

となるので、 $\theta=30$ 度としたとき $\phi=45$ 度であるためには、 $\alpha=30$ 度となる。したがって上記の分布状態は、トップリングによる回転は90度よりはかなり小さい角度、恐らく30度前後で、その状態から岩盤はさらに鉛直に落下したとして説明できる。

岩盤基底の回転軸からロックシェッド山側側壁もしくは桁（天井）部分までの距離は約20メートルで、着地後の転動を別にすれば、各岩石ブロックはまず妥当な分布状態を示している。その事実にもとづいて少なくともロックシェッドの上に達したであろう岩石の量ならびに推定到達位置を評価することが可能である。落下位置について、大きなブロックは桁（天盤）の中央よりは山側の擁壁に近い部分を直撃したと考えられる。

Table 1. Size, dip and strike, and related remarks of the fallen blocks. The blocks are listed following the approximate distance from the cliff (free face). See Fig. 6 for the horizons. The size is in meters, and the class is LL; very large, L; large, M; middle and S; small.

No.	dip & strike	horizon	size (class)	No. and size by Miura (1990) ³⁾
1	(N85E, 65S)	I	...	
2	(N35E, 30S)	I	...	
3	(almost horizontal)	I~II	10.2×3.8×3.5 (L)	A; 9.0×4.1×3.3
4	N75E, 50S	II?	(M)	
5	N30E, 30E	I?	4.5×2.3×0.8 (L)	I; 4.4×2.4×1.2
6	N40E, 48S	II	(M~L)	
7	N52E, 26N	III	(L)	
8	N60E, 35N	III?	(S)	
9	N30W, 20S	IV	4.0×3.0×2.0 (L)	E; 4.2×3.2×2.5
10	N44E, 86S	II~III	11.0×5.7×4.0 (LL)	B; 18.5×5.5×3.2
11	N70W, 70S	II	(LL)	J; 4.5×4.0×1.8
12	N60E, 86S	III?	3.5×2.6×2.2 (L)	G; 3.2×2.6×1.7
13	N65E, 60S	II~III	(L)	H; 3.2×2.6×2.0
14	N55W, 15N	III?	(M)	O; 3.2×1.5×1.5
15	(?)	III?	2.3×4.6×7.0 (LL)	F; 4.6×3.2×1.9
16	N65E, 80S	III	7.0×7.5×5.0 (LL)	D; 4.9×3.9×2.5
17	N84E, 82S	III	3.0×2.7×2.3 (L)	C; 5.0×2.2×2.0
18	N40E, 20S	III	(L)	L?; 3.0×1.35×1.3
19	N50E, 30N	III	(S)	
20	N68E, 50N	III	(M)	
21	N4E, 76E	III?	(M~S)	
22	N45E, 90	III~IV	(S)	
23	N44W, 56S	III~IV	(M)	M; 2.8×1.8×1.7
24	(N10W, 35E?)	IV	(M)	N; 3.1×2.8×0.95
25	N80W, 54N	IV	(S)	
26	N86W, 45N	III~IV	(S)	

また、落石ブロックの分布状況からみて、ロックシェッドの上に直接落下したものは量的にもごく一部で、救出作業のため海側へ捨てられた合計 100 m³ の全部がこれに相当すると思われる。岩石の平均密度を 2.4 トン/m³、崩落後の状態における空隙率を 0.4 とすると、約 140 トンが落下したと推定される。三浦 (1990)³⁾ によって今回の崩壊は、全体積が 1500 m³ 程度、全重量は約 3500 トンと推定されているので、単純計算で 1/25 となるが、落下した岩盤のサイズから計算した全体積である 1500 m³ は過大であることを考慮しても、全体積の 1/10 程度あるいはそれ以下であろう。

各岩石ブロックの主要なものについては、番号をつけてその概略の大きさを現地で巻尺で測定した。とくに大きいものはあまり遠くまでは到達しておらず、それらは崩落した崖面の直下に発達していた崖錐面とロックシェッドの裏込めの盛土の間に大部分が分布している。とくに一連番号を与えた岩石ブロックについては、その概略サイズのほかに、その岩相的特徴ならびに層理面の走向傾斜を測定したが、そのうちの主要なものを **Table 1** に示す。明瞭な風化面あるいは節理面が認められる場合には、それらの方位も測定した。なお、比較のため三浦 (1990)³⁾ が記載している岩石ブロックの番号 (A~O) とサイズを付記した。

岩石ブロックがどの部分からきたかについては、問題の岩壁部分の岩相がわかっているのので、落石の岩相的特徴から、少なくともその概略層準 (I~IV で示す；後出 **Fig. 6** 参照)、したがって高さがわかる。とくに **Table 1** におけるブロックの配列は、崖の基部に近いものを若い番号で、それから遠くなるにつれて

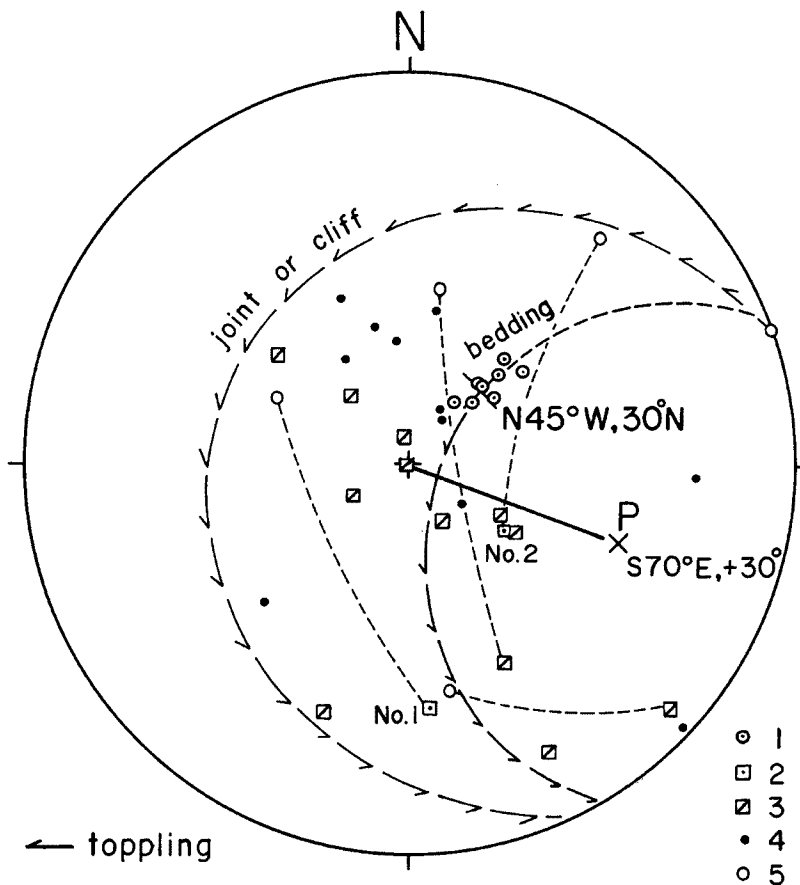


Fig. 5. Stereo-net projection of π -poles of the original bedding planes of the strata at the outcrops near the hazard point, and those of some fallen blocks. Upper hemisphere projection on Wulff-net with 1 the pole for original bedding, 2 for banded conglomerate, 3 for larger blocks, 4 smaller ones, and 5 for joint plane. Arrows show the rotation by toppling.

大きい番号で、それぞれ示してあるが (Fig. 3 参照)、表の上のものほど層準が I に近く、下部にくるほどそれは IV に近づいている。このような概略層準と分布位置の関係から、岩壁において上位にあったものほど遠方に達しているという、トップリングで始まった運動形態ならびに着地順序からみていわば当然の結果が出ている。

また、岩石の走向傾斜を地山岩盤のそれと比較することにより、本来の姿勢からの動きがわかる。このような観点から、崩落ブロックの層理面と地山岩盤のその関係をステレオネット (ウルフネット 上半球投影) で示したのが Fig. 5 である。その結果はかなりのバラツキを伴うものの、とくに大規模な岩石ブロックについては層理面が P 軸のまわりに回転するトップリングの一般特性を備えていて、少なくともスランプ運動に特有の形態を取ってはいない。ただし、図に示したものにおいて、むしろ崖面とその下の崖錐の表面の位置関係が影響して、地表に落ちた後の長軸のまわりの回転運動はあると思われるが、扁平な形状をしているブロックではそれは余り大きくはないであろう。

ここで特に注目に値するのは、Table 1 の No. 1 と No. 2 で、これらは崩落した岩盤の向かって左の基部付近にある礫岩層がねじ曲げられたものであるが (Fig. 3)、No. 1 は層理が $N 85^{\circ} E, 65^{\circ} S$ であるのに対し風化面が $N 26^{\circ} E, 47^{\circ} N$ 、No. 2 は層理が $N 35^{\circ} E, 30^{\circ} S$ であるのに対し風化面が $N 50^{\circ} W, 75^{\circ} N$ である。いずれも本来の姿勢に比較して、その背後の隙間にくさびを入れてテコでこじ曲げたように変形した状態を示している (Photo 5 D)。そしてそれらは、Fig. 5 では風化面・層理面ともに $S 70^{\circ} E, +30^{\circ}$ の軸 P のまわりに図の矢印方向に回転したこと (トップリング) を明確に示している。

5. 岩盤の運動経過とロックシェットの破壊

目撃者の話を総合すると、岩盤は扇を開くように傾き、支持を失ったような状態になって (多少方向を変えるような感じで) 落下、その途中においては落下音を立てることなく、最後に 1 回大きな音を立てたのち地表面上に横たわることになった。したがって、きっかけは崖面に向かって右上がりの軸のまわりのトップリングであったが、あとは自由落下ということで説明できる。崩落ブロックの分布状況や層理面の姿勢もそれを裏付けており、方位に関するバラツキも崖面下の崖錐斜面と落下ブロックの角度関係で説明可能な範囲にあると考えられる。

以上の点をまとめて、崩落過程を示す模式図 (Fig. 6) と対応づけながら崩落過程における各段階を簡条書きすれば、以下の通りである。すなわち、断層で背後から切り離されたかたちを取っていた問題の斜面部分の内部には構造的な節理が多数発達し、崖面基部の凝灰岩は波蝕を受け、全体はオーバーハングした形態を有していた (Fig. 6 A)。そして、

1) 開口していたわれ目が拡大し、その部分に落石のかかなりの部分が落ち込みつつ割れ目はさらに拡大し、やがて崩落ブロックはトップリングと呼べる状態となり、Fig. 6 B における角 α がおそらく 30 度程度となった。

2) 確定的とはいえないが、崩落ブロックが一瞬止まった、あるいは、反時計回りに少し回転した、ともいわれているので、それに対応するひとつの可能性として、崩落ブロックが崖面に向かって左が沈みこむような動きをまず行ない、岩盤基部に右上がりの水平に近い割れ目が開いた。この段階で岩盤は磯の方向に倒れるようにみえた、あるいは左基部の礫岩部の背後の割れ目に入って支えられ一瞬停止したように見えた、がそのあとトップリングがさらに進行したために、磯から見上げると南東方向へ倒れるように見え、かつ岩盤の左基部を支えていた礫岩層はねじ曲げられた、のかもしれない。

3) やがて崩落ブロックは支持を失ったかたちとなり、破断・分解が進行し (Fig. 6 C)、そのためブロックはバラバラになりながら、ビルを爆破して解体したときのような感じで急速に落下した。

4) 落石はロックシェットの山側の岩壁と擁壁の間の部分に集中的に落下し、とくに擁壁の裏込め盛土の

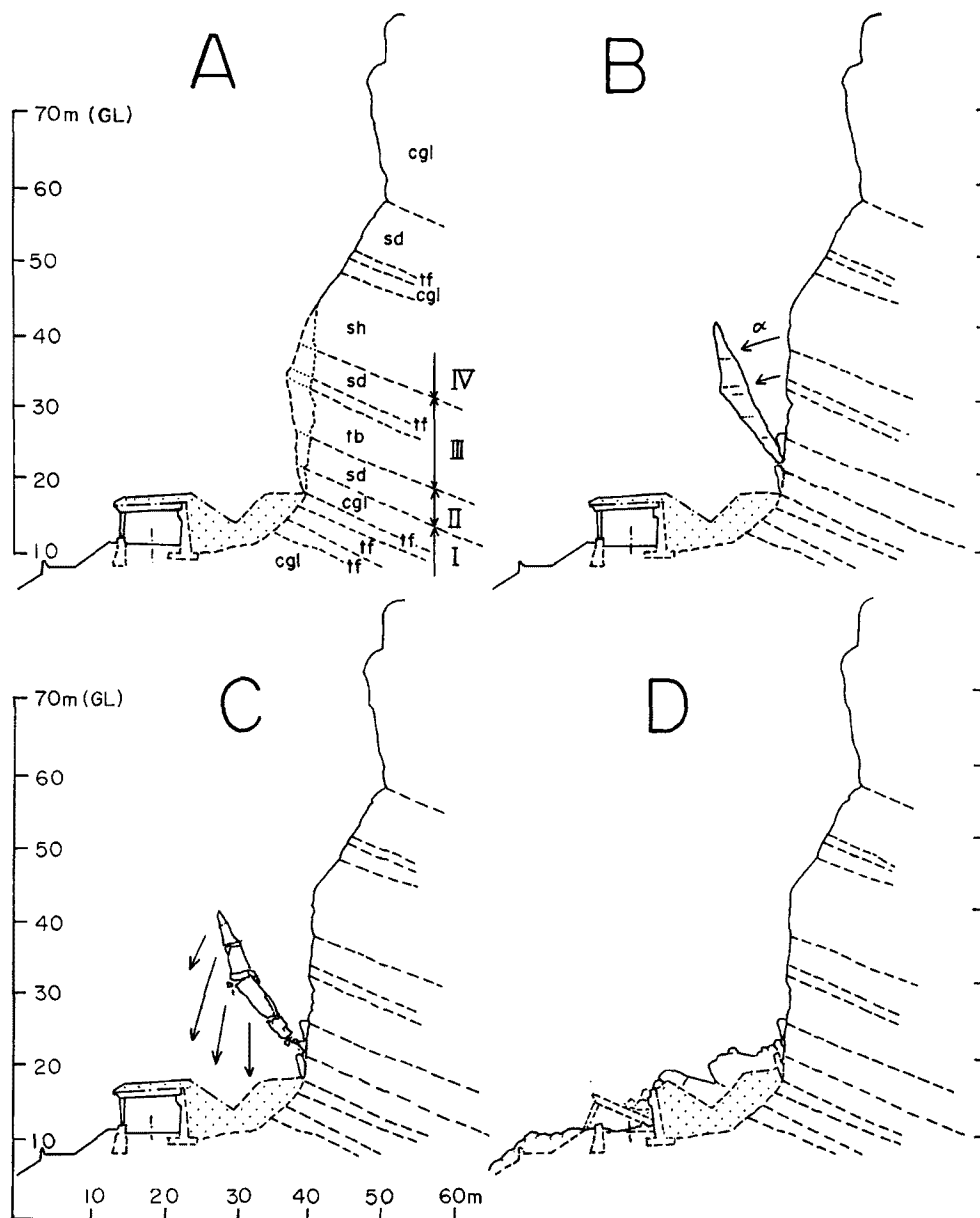


Fig. 6. Schematic illustrations showing the re-composed falling process of the rock wall starting with toppling. The original profile with lithologies in A, the toppling phase in B, the falling phase in C, and the final state in D.

表面への衝撃力、ならびに擁壁上端へ斜め方向に作用する衝撃力のために、擁壁は海側へ倒れかかる（海側へ6度回転）。このために、ロックシェッドの桁は擁壁の支持部から海側へ押し出され、桁は落ちやすくなった。

5) 上記のステップ4と同時または一瞬の遅れで、ロックシェッドの桁（天井）部分を落石が直撃した（Fig. 6 D）。このとき、上方から落下した石は下方の石と衝突しながら落下するので軌跡が斜めに海側へ向かうことになり、ロックシェッドの桁および擁壁上端に落下した石は、海側へ向かう水平速度成分を持っていたと推定される。

ロックシェッドの桁部分が落下したのは、前項4の擁壁が倒れたことが原因となって横から押し潰される

感じて壊れたためなのか、前項5の落石の衝撃力そのものが原因で外れ落ちたのか、現時点においては著者らは決め手をもたない。しかし、常識的には2つの原因が複合した結果であると考えられ、その場合ロックシェッドの破壊過程は以下のようになる。

すなわち、落下した岩石の分布から明らかのように、落石は主として桁の山側の支持部付近と擁壁の裏込め盛土の上に集中した。擁壁に近いロックシェッド桁に加わった落石の衝撃力でその海側は瞬間的に跳ね上がり、柱もまた浮き上って、ヒンジ部分から外れて海側へ少し振り出す形となり、かつ擁壁が倒れることで桁は横に押されたため、全体は海側にずれた。海側に押し出された桁は、擁壁上のごく幅の狭い部分で支持されるに過ぎなくなったが、この瞬間、衝撃力により桁の支持部は貝殻状断口を作って破損した。そのため桁はとくに山側の車線を直撃するかたちで落下し、柱は海側に若干振り出しかつ横にずれた状態で落下して地面にやや斜めに突き刺った、と考えられる。目撃者の話や現場の状況から、この解釈は妥当なものと思われる。なお、ロックシェッドの桁の東南寄りにあったものは山側の支持部から少し中央よりの部分で折れており、この部分では落石による衝撃力は主として桁の中央部から加わったと考えられるが、このことはFig. 3に示した落石の平面分布からみても納得できる。

以上の点を明確にするには、擁壁の桁支持部のコンクリートに残された傷（貝殻状断口、Photo 5 E）と、かつて桁に通されていた鉄筋の一部のものはごく僅かしか曲がっていないという事実が鍵であり、とくに前者が桁の自重とその上に載った岩石の静荷重の和のみで生まれる性質のものか、それともさらに桁（天井）にかなりの衝撃力が加わる必要があるのかわかれば、それに対応する落下した桁に残された傷の状態と比較することによって、ある程度の結論を得ることができると考えられる。

6. 落石による衝撃力の推定

落石による衝撃力の見積りのために、崩落直後の7月16日撮影の写真から落石のおよそのサイズを判読して推定したところ、擁壁より海側へ落下した石のなかに質量が10~40トンのものが8個以上あった。このうちの数個はロックシェッドの桁（天井）部分へ落下したと推定される。

そこで、極わめて便宜的かつ簡単な手法ではあるが、落石相互の衝突ならびに摩擦を無視して自由落下として衝撃力を見積ると、実験結果に基づいて求められた土木学会（1966）⁷⁾の半経験式により、最大衝撃力は

$$P_{\max} = 2.455 W^{2/3} \lambda^{2/5} H^{3/5}$$

となる。ただしここで、 W ；落石重量（tonf）、 λ ；ラーメの定数（tonf/m²）、 H ；落下高さ（m）、であり、落石の形状としては球を仮定している。とくにロックシェッド上に土かぶりがある場合には、土のような柔らかい物に対する値を用いて $\lambda=100$ （tonf/m²）と仮定すると、落下高さおよび落石重量の組み合わせに対応して、Table 2のような衝撃力の大きさが得られる。なお、この表における比高と重量は、今回の落石に対して全く任意に選べるわけではなくて、重量の大きいものほど比高は小さくなることに留意する必要がある。また、落石がコンクリートを直撃したと仮定すると、堅い物質に対する最大値である $\lambda=1000$ （tonf/m²）を用いる必要があるが、この場合にも衝撃力は表

Table 2. Estimation of the impact force (ton-force) given to the roof of the rockshed. The force is calculated for some probable combination of the size and height with $\lambda=100$ tonf/m².

weight (ton)	height of fall		
	5 m	10 m	20 m
5	118	180	273
10	188	286	433
20	299	454	688
40	475	721	1093

の数値の3倍程度にしなければならない。

目撃者の談話や落下した岩石の分布状態、あるいは巨大なブロックの存在位置からみて、さきほど推定した約140トンがひと塊のままロックシェッドの天盤部分に落下衝突したとは考えにくいので、岩盤はいくつかに破断したのち個々に落下衝突したと考える方が自然であろう。そして **Table 2** に示したような衝撃力が離散的に（不連続的に）あるいはパルス的に加わったと推定される。

7. あとがき

急峻な海蝕崖の一部を構成する岩盤は、構造的節理あるいは小断層で切られた受盤構造のオーバーハングした斜面を形成していた。その岩盤中の割れ目は開口していたが、それは少なくとも1時間前から落石という前兆現象を伴いつつさらに開き、やがてトップリングにより運動をはじめ、途中でブロックに分解して落下した。ロックシェッドの桁（天井部）を直撃した岩石の総重量は約140トンで、それは崩壊した全岩石量の1/10以下である。これらの岩石ブロックが衝突前に分離した状態にあったとすれば、そのなかの最大のものを1個40トンとして、そのもつ衝撃力は比高20メートルに対して約1100トン重である。

落石到達距離についていえば、岩盤の上端は道路面からは約30メートルぐらいの部分から落下してきたが、トップリングであればこれが水平到達距離の一応の目安となり、崖面からロックシェッドまでの水平距離にはほぼ対応している。しかし、ロックシェッドが対象とする落石は、この地点における昭和33年の例を引くまでもなく、さらに高い比高80メートル以上に達する崖面全体から発生し得るのであるから、通常の落石なら崖面から30メートル以上の距離に達することが十分考えられる。その意味では、今回の落石の到達距離はこの崖面について常識的に考えられるものよりむしろ小さいといえる。

したがって到達距離の問題というよりは、ロックシェッドの上に加わった力が、このように厳しい自然条件を前提とした場合に予期せぬものであったかどうかの評価が今後の問題となろう。それに加えて、ロックシェッドが存在するが故に却って安全性を大前提として受け入れるという、これら工作物が人間に対して与える心理的効果も議論されるべきであろう。

なお落石に関して、トップリングという運動形態は稀な事例であると一般に言われているが、急斜面における落石運動の初期の段階ではそれは何らかの程度のトップリングを伴うはずである。にもかかわらず事例が少ないということは、今回のように落石運動の全過程が完全に目撃された事例が少ないことも大いに関連していると考えられ、その意味でもこれは学術的に重要な事例であるといえよう。

謝辞：本研究をまとめるに当たって、貴重な目撃談を話して頂いた山元春夫、孫谷正美の両氏はじめ、関連資料を提供して頂いた福井県朝日土木事務所、福井地方気象台に謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 平野昌繁・奥西一夫・諏訪 浩：1989年越前海岸落石災害に見られる地形地質特性と岩盤崩壊過程，第8回日本自然災害科学会学術講演会要旨集，1989，pp. 60-61.
- 2) 砂防調査技術研究会：空からみた土砂災害（22），砂防と治水，22（No. 70），1989，pp. 65-68.
- 3) 三浦 静：越前海岸山崩れとその災害に関する調査研究，平成元年度文部省科学研究費補助金（総合研究A）研究成果報告書，1990，128 p.
- 4) 山下 昇・粕野義夫・糸魚川淳二：日本の地質5「中部地方Ⅱ」，共立出版，1988，310 p.
- 5) 三浦 静：北陸地方新第三系下部の火山層序について，地質学論集，No. 16，1979，pp. 149-155.
- 6) 三浦 静・服部 勇・東 洋一：5万分の1表層地質図「鯖江・梅浦」および同説明書，福井県，1982，53 p.
- 7) 土木学会（編）：土木技術者のための振動便覧，技報堂，1966，435 p.（とくに pp. 320~325）.