花崗岩地域における地震時落石の発生場所・落下方向・到達距離の予測

Prediction of location, falling direction and falling distance of earthquake-induced rock falls in granite area

横山俊治^{*)}・水口真一^{*)}・藤田勝代^{**)}・嘉茂美佐子^{***)}・菊山浩喜^{****)}

Shunji YOKOYAMA, Shinichi MIZUGUCHI, Masayo FUJITA, Misako KAMO and Hiroki KIKUYAMA

Abstract

This paper examined a prediction method of location, falling direction and falling distance of rock falls caused by horizontal earthquake motion in granite area. Many rock falls took place on mountain ridges and near convex break of slope where earthquake motion was probably amplified. Earthquake damages were bigger in comparatively fresh and fracture-poor granite than in strong-disintegrated or fracture-rich one. Then dominant movement types of earthquake-induced rock falls were of toppling and tumbling of large granite boulders on mountain ridges, jumping of large jointed blocks from fresh granite-outcropped scarps near convex break of slope and jumping of weak-disintegrated blocks from strong-disintegrated granite cliff near the top of road-cuts. The falling direction tends to orient perpendicular to the seismic faults. The distance of free falling from road-cuts tends to become equal about to height of falling position. On the basis of these features this paper has proposed a tool for selection of location of earthquake-induced rock falls in granite area.

Key words : granite, earthquake, rock fall, prediction

和文要旨

本論文では、花崗岩地域において水平地震動によって引き起こされる落石の発生場所や、落下方向、落下距離を予測する方法を考察した。多くの落石は、地震動がおそらく増幅したと思われる尾根や選急線近傍で発生した。地震被害は風化した岩石や割れ目の多い岩石よりも比較的新鮮で割れ目の乏しい岩石で大きかった。それで地震時落石の卓越する運動タイプは、尾根上にあった花崗岩巨礫の転倒・転落と、選急線近傍に位置する新鮮な岩石が露出している崖で発生する節理で囲まれた岩塊の横跳び、道路切土法面の頂部付近で発生する強風化花崗岩中の弱風化岩塊の横跳びであった。落下方向は震源断層に直交する傾向がある。道路切土法面から自由落下した落石の到達距離は落石発生場所の高さとほぼ等しくなる傾向がある。これらの特徴に基づいて、花崗岩地域

の地震時落石発生場所の選定ツールを提案した。

キーワード：花崗岩、地震、落石、予測

1. はじめに

最近、西南日本内帯で発生した地震、たとえば、1995年兵庫県南部地震や2000年鳥取県西部地震、2001年芸予地震では、強震動領域に複数の地質体が分布しているにもかかわらず、山地斜面における斜面変動は花崗岩地域に集中した。たとえば、兵庫県南部地震では、空中写真で判読された斜面崩壊だけでも700箇所を越えている¹⁾が、空中写真では判読の難しい小規模なものを含めると、発生箇所数はさらにその数倍になると思われる。そしてそれらのほとんどが花崗岩地域で発生している。小規模なものは径1 m前後から5 m程度の単独岩塊の落石である。発生数では落石が斜面崩壊をはるかに上まわっている。しかもその斜面崩壊も、現象は滑落というよりも崩落がふさわしい形態を示している。すなわち、兵庫県南部地震では、花崗岩地域において落石・崩落が多発したということである。こういったことは鳥取県西部地震や芸予地震でも認められる。

落石は地震時でなくとも発生し、道路を走行中の車に直撃して惨事になることもある。移動体の規模が小さいにもかかわらず、時に惨事を招くのが落石である。地震時にはその落石が花崗岩地域において瞬時に多発するので、その予測と対策が地震防災の重要な課題になってくるのである。

ところで、兵庫県南部地震で大きな被害が出た六甲山地では、豪雨時には過去に何度もマサ（強風化花崗岩）の表層崩壊－土石流が発生し、流出した土砂・流木が甚大な被害をもたらしてきた。このように同質の地質体の、しかも近傍域で、豪雨時にも、地震時にも災害が多発するといったことは、花崗岩以外ではあまり見られないことである。地形・地質条件の異なる豪雨時斜面変動と地震時斜面変動が花崗岩地域において多発した要因は、花崗岩の風化帯構造とそれを反映した特有の地形にあるものと考えられる。

本論文では、はじめに兵庫県南部地震と鳥取県西部地震、芸予地震を例に²⁾³⁾⁴⁾、花崗岩地域で発生した地震時落石・崩落の変動形態とそれを規制した花崗岩地域に特有の地形条件と地質条件を明らかにする。つぎにその結果に基づいて、地震時落石・崩落の発生場所や、落石の落下方向、落石の到達距離などの予測方法を検討する。

*) 高知大学理学部自然環境科学科防災科学コース
Natural Hazard Prevention Science Course, Department of Natural Environment
Science, Faculty of Science, Kochi Univ.
〒780-8520 高知県高知市曙町2-5-1
2-5-1 Akebono-cho, Kochi, 780-8520 Japan
**) 財団法人地質研究所
Fukada Geological Institute
***) 鶴地研
Chiken Co., Ltd.
****) 川崎地質(株) 北日本支社
Kawasaki Geological Engineering Co., Ltd. Kita-Nihon Branch

2. 地震時落石・崩落の変動形態

図-1のタイプ1～タイプ6は、兵庫県南部地震による六甲花崗岩の斜面変動を変動形態に基づいて分類したものである²⁾。タイプ1, タイプ2, タイプ3は新鮮な岩石の分布する地域で観察されたもので、タイプ4, タイプ5, タイプ6はマサの分布する地域で観察されたものである。

図-1のタイプ7は鳥取県西部地震と芸予地震で多発した落石・崩落で、兵庫県南部地震で記載された各タイプとは異なり、弱風化岩とマサが混在する切土法面で観察された。

タイプ1は尾根上に分布する花崗岩巨礫(径1m前後から数m)の転倒・移動で、変動時に尾根からはずれると落石になる。転倒はしばしば横跳びを伴い、落石を免れた花崗岩巨礫は変動前の位置から離れたところに倒れている。このような現象は墓石や灯籠でもしばしば認められ、慣性力によって地表地震動の水平加速度方位とは反対側に横跳び・転倒したものと考えられる⁵⁾。移動は重心の低い花崗岩巨礫でもみられる。ある事例では、花崗岩巨礫の一方が持ち上がった後、元に戻るときに持ち上がった側とは反対側がすべりを起こして移動している。

タイプ2は新鮮な岩石の露出している崖(露頭崖)か

		時 間			
		崩壊前			崩壊後
岩	タイプ1 (花崗岩巨礫) タイプ2 (露頭崖)	花崗岩巨礫	開口クラック	横跳び 転倒	樹木に直撃
	花崗岩巨礫や露頭崖の 転倒・移動に端を発した 崩落・崩壊				
地	タイプ3	風化殻			
	岩盤表面の風化殻の 剥離				
マ	タイプ4	未風化核岩 密着した節理	傾動		転倒
	マサ中の巨大な未風化 核岩の転倒破壊				
サ	タイプ5	多数の未風化核岩の跳 び出しに端を発したマ サの崩壊	開口クラック	未風化核岩の 跳び出し	
	多数の未風化核岩の跳 び出しに端を発したマ サの崩壊				
域	タイプ6	残存節理	傾動	開口クラック	転倒
	残存節理に沿った引張 り破壊、それに続く岩 塊の傾動に端を発した マサの崩壊				

タイプ7

図-1 花崗岩地域の地震時斜面変動の分類

(タイプ1～タイプ6 (1995年兵庫県南部地震³⁾), タイプ7 (2000年鳥取県西部地震⁵⁾および2001年芸予地震⁴⁾)

Fig. 1 Classification of earthquake-induced slope movements

(Movement type 1 to 6 (the 1995 Hyogo-Ken Nanbu Earthquake³⁾), and movement type 7 (the 2000 Tottori-ken Seibu Earthquake⁵⁾ and the Geiyo Earthquake⁴⁾)

ら方状節理に囲まれた岩塊が跳びだし、それが落石・崩落になったものである。岩塊が跳びだす現象は地震時落石・崩落の特徴であり、露頭崖の正面に樹木が自生していれば、跳びだした岩塊はしばしばその樹木に衝突している。露頭崖から離れた樹木の高い位置に付いた衝突の傷は、落石が発生時に大きな初速度をもっていたことを示す証拠となる。

タイプ 3 は花崗岩巨礫の表面の薄い風化殻がその内部の新鮮な岩石との境界に沿って剥離したものである。剥離面の面積は $10^3 \sim 10^5 \text{ cm}^2$ 程度と小規模なものが普通で、それがとくに防災上問題になることはないが、地震時斜面変動としては特記すべきことである。タイプ 3 の剥離は斜面の吹き付けコンクリートやビル外壁のタイル、土壁の漆喰などに見られる地震時の剥離⁶⁾と類似した現象である。地震動による剥離は、振動エネルギーの減衰の度合いが材料ごとに異なるために、相接する材料間で応答周期に違いが生じて発生したと考えられる。

マサ地域で観察された各タイプも、転倒や、剥離を伴う横跳びである。

タイプ 4 はマサ中の未風化核岩の転倒崩壊である。周辺のマサが浸食で失われた未風化核岩が潜在節理に沿って二つに割れ、その一方が転倒した事例が菅屋のロックガーデンで記載されている²⁾。しかし、多くの未風化核岩は、しばしば高角度の潜在節理に沿って二つに割れているが、その周囲のほとんどを包んでいるマサが崩れなかったために、転倒を免れている。このように通常は未風化核岩の転倒は少なく、落石に移行することも少ない。

タイプ 5 はマサ中の風化を免れた角礫状岩塊の跳びだしである。角礫状岩塊の跳びだしと同時にマサの部分が崩れることもあるが、その場合も、マサが崩れた結果として角礫状岩塊が落下したのではなかったために、はじめに跳んだ角礫状岩塊は遠くに落下している。このようなマサと角礫状岩塊とが混在した花崗岩は六甲断層系の断層近傍に発達する。マサ化は小断層に沿って進行し、角礫状の岩塊が残される。タイプ 5 の典型は、灘区鶴甲の六甲山地南麓を走る諏訪山断層の断層崖で発生した。この例では、崩壊深は浅く、崩壊は角礫状岩塊が地表に露出していた部分で発生し、マサのみが露出していた部分は崩壊せずに残った。新鮮な岩塊だけが跳び出すという現象は段丘層や空石積み擁壁でも起こっていて、そこでも、段丘礫や空石積みの石といった新鮮な岩塊は跳び出す、岩塊の周囲や背後の軟らかい未～半固結土はほとんど崩れていない⁶⁾。

タイプ 6 はマサの剥離・転倒である。このタイプは節理面の残っている化学的風化があまり進んでいないマサで発生したもので、化学的風化による粘土化で節理面が失われたマサでは発生事例がなかった。これは豪雨時にマサで多発する斜面崩壊とは大きく異なる現象である。

タイプ 7 は弱風化岩とマサとが混在分布する道路沿いの切土法面で発生している (写真-1)。そこでの混在

写真-1 弱風化岩 (C_M 級岩盤) 中の節理に囲まれた岩塊の跳びだし (2000年鳥取県西部地震時に発生したタイプ 7 の落石)
(D_H 級岩盤のマサは一切崩れていない。)

Photo 1 Jump of jointed blocks from weak-disintegrated granite (C_M class of rock mass classification) (rock fall of type 7 caused by the 2000 Tottori-Ken Seibu Earthquake)
(Rock mass of D_H class does not collapse.)

分布は断層運動による破壊に起因したものではなく、後述するようにラミネーションシーティングの有無に起因したものである。岩盤の緩みや化学的風化はラミネーションシーティングの発達した部分で進行し、その部分は現在マサになっている。法面掘削後の浸食はマサで一方的に進行するために、弱風化岩は浸食を免れて凸型微地形を形成している。落石は弱風化岩中の節理に囲まれた岩塊の横跳びで生じているが、マサの部分はほとんど崩れていない。岩塊の跳びだしやすさは弱風化岩がつくる凸型微地形の形態と節理の分布に規制されており、弱風化岩の端部から崩落しているものが多い。

このようにタイプ 7 の落石・崩落は弱風化岩とマサとが不規則に分布する部分が掘削によって急勾配の切土斜面法面に現れたことと、掘削後の差別浸食による凸型微地形形成が素因となって発生している。そこで、このような落石・崩落をタイプ 7 として新たに分類した。

3. 花崗岩地域の落石・崩落発生の地質条件

比較的新鮮で割れ目の少なく大きな岩塊の集まった花崗岩は崩れやすく、風化・劣化の進んだマサや岩塊は新鮮であっても細かく割れている花崗岩は崩れにくい—これが地震時斜面変動の特徴である。地震時にマサが破壊されにくい原因はいくつか考えられる。マサは新鮮な岩盤に比べて空隙が多く、見かけの質量が小さいために、大きな慣性力が得られない²⁾。また、マサは鉱物粒

子間の摩擦や空隙部（空気・水）を振動するときに生じる抵抗で振動エネルギーが減衰するほか、塑性変形によっても破局的な破壊が免れると考えられる²⁾。

落石・崩落の発生頻度をタイプ別にみると、兵庫県南部地震や鳥取県西部地震、芸予地震のいずれの地震でも、尾根上に分布する花崗岩巨礫の転倒が落石となったタイプ1が多発している。尾根部での花崗岩巨礫の形成こそが花崗岩地域での落石発生頻度を高めている原因である。ではそれはどのようにして形成されたものであろうか。

最近、藤田ほか⁷⁾などは、粗粒花崗岩の風化帯には、広域に数mmオーダーの間隔の微細な割れ目群がほぼ水平に発達していて、その微細な割れ目群発達領域である風化帯から、その深部の新鮮岩への移行は急激であることを明らかにしている。このような微細な割れ目群は風化進行以前の新鮮岩に発生し、化学的風化を伴うマサ化は微細な割れ目群に沿って浸透した地下水と岩との反応によって進行したものであると考えている。そしてマサ中の未風化核岩の形成は微細な割れ目群形成と同時期であると考えている。本論文では、このような微細な割れ目群をラミネーションシーティングと呼ぶ。

花崗岩巨礫の多くは深部の新鮮岩の分布域と浅所部のマサの分布域との境界付近に存在していた未風化核岩に由来するものである。浸食小起伏面をつくっていたが風化帯が浸食される過程でこういった未風化核岩が巨礫として尾根部に残留する状況がつけられる。マサの部分が浸食で失われて「裸」になった未風化核岩、すなわち花崗岩巨礫は不安定な状態にあることが多いので、地震時には容易に転倒・落下し、タイプ1の落石の発生頻度が高くなったと考えられる。

ところで、タイプ2の落石・崩落は兵庫県南部地震では多発しているが、鳥取県西部地震と芸予地震ではほとんど発生していない。一方、鳥取県西部地震と芸予地震では、兵庫県南部地震ではあまり見られなかったタイプ7の落石・崩落が多発している。それらの理由はつぎのように考えられる。

タイプ2とタイプ7とでは、どちらの落石・崩落の方が発生しやすいであろうか。新鮮岩と弱風化岩とでは破壊面となった節理面の性状に差異が認められる。すなわち、タイプ2の発生源となった新鮮岩内の節理面は密着性が高く破壊しにくい。それに対して、タイプ7の発生源となった弱風化岩内の節理面は密着性が低いだけでなく、すでに開口していることもある。さらに、タイプ7の場合は、振動エネルギーの減衰の度合いがマサと弱風化岩で大きく異なるために、両者間での応答周期の違いによる剥離効果が働いた可能性や、後述するような地形効果による地震動の増幅が起こった可能性もある。以上のようなことから、地震動が小さい場合には、タイプ7の落石・崩落は発生しても、タイプ2の落石・崩落は発生しないという状況も生まれると考えられる。

建物や土木構造物、道路などの被害程度から地震動の

大きさを比較してみると、明らかに破壊的な地震動は兵庫県南部地震の方が鳥取県西部地震や芸予地震よりもはるかに大きい。ゆえに、兵庫県南部地震で多発したタイプ2の落石・崩落が鳥取県西部地震や芸予地震ではほとんど見られなかったのである。しかし、タイプ7の落石・崩落が六甲山地で発生しなかった理由を地震動の大きさの違いで説明することはできない。もっともらしい理由は六甲山地ではタイプ7の落石・崩落を発生させる道路法面が存在しないということにあると思われる。何度となく豪雨災害を被った六甲山地の山岳道路は、主要観光道路ということもあって、ほとんどのところで何らかの対策工が施されていて、弱風化岩とマサとが混在した花崗岩が露出しているところがないのである。また、六甲山頂部を走る道路沿いには切土法面に露岩しているところもあるが、そこではマサが露岩しているために地震時には崩壊していない。

鳥取県西部地震における根雨花崗岩でも、芸予地震における呉花崗岩でも、ラミネーションシーティングの発達している部分がマサになり、発達していない部分が風化されずに残る傾向がある³⁾⁴⁾。芸予地震時に落石・崩落が集中した呉市北西方の二級峽右岸山腹の道路法面では、石英をほとんど含まない閃長岩～閃長岩質花崗岩や、細粒のアプライト～アプライト質花崗岩、あるいはそれらの岩石を部分的に含む岩塊の落石・崩落が多く見られた。一般に花崗岩類の中でも石英に乏しい岩型や細粒岩はラミネーションシーティングが発達しない⁷⁾。呉市北西でも、閃長岩～閃長岩質花崗岩やアプライト～アプライト質花崗岩にはラミネーションシーティングが発達せず、その結果風化・浸食が進まないために、そこが凸型微地形をなして、地震時に落石・崩落となった⁴⁾。

兵庫県南部地震、鳥取県西部地震、芸予地震のいずれの地震においても、花崗岩地域では落石・崩落が多発したのに、それと隣接して分布している中・古生界の堆積岩類や中生代の火山砕屑岩類、第四紀の火山岩などでは落石・崩落が多発しなかったのはなぜであろうか。それは、上記の花崗岩以外の地質体では、それらの風化特性に起因して、タイプ1の源となる巨礫が不安定な状態で尾根上に分布することが少なく、またタイプ7の素因である強度差の大きい弱風化岩と強風化岩とが切土法面に混在して出現することも少なかったからである。

では、兵庫県南部地震では、新鮮な花崗岩の露頭崖でタイプ2の落石・崩落が多発したにもかかわらず、花崗岩の壁岩やルーフペンダントとなっている中・古生界の堆積岩類起源のホルンフェルスや中生代の火山砕屑岩類からなる新鮮岩の露頭崖では、落石・崩落がほとんど発生しなかったのはなぜであろうか。それは節理系の発達の違いに原因がある。すなわち、花崗岩には平滑な破断面をもつ方状節理が全域に発達していて、転倒を起こしやすい直方体形状の岩塊が形成されやすいのに対して、他の地質体では節理の連続性、規則性、破断面の平滑性

が乏しく、露頭崖から容易に抜け出す岩塊が形成されにくいからである。

ただし、地震時に基盤の地質に関わりなく起こる表層崩壊は区別しておく必要がある。芝生や笹など、成長した根が絡み合って「マット」を形成しているところでは、地震時には地表部のマットがその直下の地質体から剥離してずり落ちる。たとえば、1993年北海道南西沖地震や1994年北海道東方沖地震では、笹や芝生のマットの剥離が多発し、マットの末端部がたたんだ布団のように過褶曲している⁸⁾⁹⁾。筆者らの内、横山と菊山も宝塚の西部や淡路島北淡町で兵庫県南部地震時に芝生からなるマットの剥離による表層崩壊を観察している。またテフラも、1949年今市地震で見られるように、基盤の地質体と関わりなく、表層崩壊を起こしやすいようである¹⁰⁾。したがって、花崗岩地域であっても、花崗岩の地質特性とは無関係の表層崩壊が発生することもあるので注意をしなければならない。

4. 花崗岩地域の落石・崩落発生の地形条件

兵庫県南部地震で発生した落石・崩落の地形条件については、多くの研究者が共通した認識をもっていることが明らかになっている²⁾。公表されたものをまとめると、地形条件として、(1)尾根部、(2)遷急線付近、(3)露頭崖、(4)急斜面、(5)凸型斜面といった地形因子が挙げられている。これらの地形条件は花崗岩以外の地質体でも認められるものもあるようである¹¹⁾など。

六甲山地で露頭崖が出現する頻度が高いのは谷底付近の両側斜面であるので、露頭崖の出現率だけを見ると、落石・崩落の発生頻度は谷底付近で最も高くなるはずである。しかし、現実とは違って、尾根の遷急線付近の露頭崖からタイプ2の落石・崩落が多発している¹¹²⁾。またタイプ1の落石も尾根上に分布していた花崗岩巨礫の転倒・移動が引き金になっているが、谷底に分布していた花崗岩巨礫はほとんど転倒・移動を起こしていない。

鳥取県西部地震や芸予地震で多発したタイプ7の落石・崩壊でも、その発生部位というのは法面の上部で、そこは法面上方の自然斜面と法面がつくる遷急線直下にあたっている(写真-1)。さらにタイプ7の落石・崩落が発生した弱風化岩は凸型微地形をなしている。地震時応答解析のシミュレーションによれば、地形の凸部で地震動が増幅することが明らかになっている¹²⁾¹³⁾。落石・崩落現場の地形とシミュレーション結果とを結びつけて考えると、尾根肩の遷急線付近や、凸型横断面を呈する斜面、周辺に比して盛り上がっている凸型微地形など様々なスケールの凸型地形部で、地震動の増幅が引き起こされ、それが落石・崩落の原因になっているものと推定される。

5. 落石の落下方向の予測

落石災害の防止あるいは軽減を考えると、地震時落

石・崩落の落下方向が予測できるかどうかということは重要問題である。その予測ができるならば、尾根の方向や露頭崖の向きが地震動の揺れの方向との関係で落石・崩落が発生しやすい方向を向いているかどうか、花崗岩巨礫はどの方向に落下する可能性が高いかといったことを考慮にいたれた防災対策が可能になるからである。

兵庫県南部地震の際に、淡路島北部から西宮市にかけての地域では少なくとも地下深部の断層は破壊を起こした。この地域では、墓石・灯籠の卓越転倒方位から、兵庫県南部地震による卓越水平加速度方位が既存の活断層に直交する傾向があることが分かっている⁵⁾。こういった水平地震動の方位に地表変状も方向規制を受けている。たとえば、(1)木造家屋の倒壊方位、(2)六甲アイランド周辺のケーソン式岸壁の傾動や水平移動の方位、(3)盛土中の開口クラックの方向である⁵⁾。阪神高速道路(神戸線)の高架の倒壊も同様の方向規制を受けた結果と思われる。そして、六甲山地における花崗岩巨礫の転倒(タイプ1)の方位のほか、露頭崖からの崩落(タイプ2)の方位も水平地震動の方向規制を受けている(図-2)。

鳥取県西部地震や芸予地震でも、タイプ1とタイプ7の落石・崩落の方位が一定の方向に向いている³⁾⁴⁾。もちろん、露頭崖で発生したタイプ2や道路路面で発生したタイプ7は当然斜面の向きの影響を受けるし、節理面の方向の影響も受けるはずである。にもかかわらず、落石・崩落の卓越方位がある範囲に集中するのは水平地震動による方向規制を受けているためと考えられる。

鳥取県西部地震では、菅沢ダム(日南湖)の周囲を取り巻く道路沿いで落石の落下方位を測定したデータがある(図-3)。測定を実施した道路の全体的な方向はN50°WとN30°Eである。測定結果によると、落石測定数26箇所の中の80%以上がSW10°~70°の落下方位を向いている。余震の分布から推定された震源断層の方向はN28°Wであるので、多くの落石はこの震源断層の法線方向を中心とする45°の範囲に入っていることになる。

兵庫県南部地震や鳥取県西部地震のように、水平地震動の方位が破壊を起こした活断層に直交する方向を向くということが一般にいえるなら、直下型地震で発生した落石・崩落については、活断層の方向から落下方位を予測することが可能である。

6. 落石の到達距離の予測

誘因に関わらず、落石の到達距離は落下高さや移動域の斜面の性状および停止域の傾斜に制約される。鈴木¹⁴⁾は急傾斜地の自由面の崖頂から崖錐末端までの比高を落下高さとし、崖頂から崖錐末端までの水平距離を落石の到達距離として、両者の関係を調査している。それによると、落下高さが高くなるほど、到達距離は長くなる傾向があり、最大級の崖錐斜面では到達距離は落下高さの5倍にも及ぶ。これは落石が自由落下後に崖錐斜面を転がりながら移動したため、古い崖錐ほど到達距離は長

図-2 1995年兵庫県南部地震による花崗岩巨礫の転倒・移動の方位と斜面崩壊の方位 (芦屋のロックガーデン)⁷⁾
Fig. 2 Orientation of migration, topple and jump of granite boulders, and slope failures (Asia Rock Garden)⁷⁾

図-3 2000年鳥取県西部地震による落石の落下方向 (菅沢ダム日南湖)
Fig. 3 Falling direction of rock falls caused by the 2000 Tottori-Ken Seibu Earthquake (Nichinan Lake of Sugesawa Dam)

くなる。

鳥取県西部地震時に菅沢ダム沿いでは、長径数10cm程度の角張った岩塊が高さ10m以下の道路法面から多数落下している。これはタイプ7の落石・崩落である。大部分の岩塊は崖面を転がり落ちることなく、直接路上に落下している。

このような落石について落石の落下高さと到達距離の関係を調査したデータがある。それによると、岩塊は落下後も路面をほとんど転がることなく停止している。そこで法尻から落石発生位置までの高さを落下高さとし、落石発生位置から停止位置までの水平距離を到達距離として、両者の関係を見ると、到達距離は落下高さにはほぼ等しいという結果が得られた (図-4)。1987年千葉県東方沖地震による上総丘陵の小規模な斜面崩壊の計測結果でも、到達距離は落下高さにはほぼ等しいという結果が得られている¹⁵⁾。菅沢ダム周辺には震度の計測データはないが、落石・崩落や道路構造物の破損状況を兵庫県南部地震の場合に当てはめて推定すると、調査地の平均的な震度は5強～6弱程度であろう。もし水平地震動がそれより大きくなれば、落下高さが同じでも、到達距離はこの結果よりも長くなるであろう。

尾根上の花崗岩巨礫の崩落 (タイプ1) や露頭崖からの崩落 (タイプ2) も、落下直後に停止すれば、その距離はタイプ7の落石の到達距離と変わらないものと予想される。しかし、通常、タイプ1やタイプ2の落石は、落下後、山腹斜面を転がることになり、樹木などの障害

図-4 2000年鳥取県西部地震によって道路切土法面から発生したタイプ7の落石の落下高さと到達距離（自由落下距離）の関係（菅沢ダム日南湖）

Fig. 4 Relation between distance of free-falling and height of falling position on rock falls from road-cuts, caused by the 2000 Tottori-Ken Seibu Earthquake (Nichinan Lake of Sugawara Dam)

物にトラップされなければ、長距離を移動して山麓の低地まで到達する。山腹を走る道路くらいの幅なら、たとえ平坦は路面に落下したとしても、路面上で停止することなく、路面上をジャンプし、さらに写真-2のようにコンクリート製防護壁を突き破って山腹斜面を落下している。

他方、花崗岩巨礫を取り巻く風化殻の剥離（タイプ7）やタイプ6のようなマサの崩落ではほとんど横跳びすることなくその場に落下している。

地震時落石の落下経路が詳しく調べられた事例はほとんどないように思われる。ここでは、鳥取県西部地震時に発生したタイプ1の落石の落下経路と被災状況をそれぞれ平面図（図-5）と断面図（図-6）に示す。この事例では、長径4.3mの花崗岩巨礫が標高465mの発生地点から自然斜面に沿って127mの距離を落下して、最終的には標高400mのダム湖畔の砂堆上で停止した。落下経路は、落石の衝突の証拠である樹木の擦痕・折木・倒木や、落石の着地の証拠であるインパクトクレーターによって推定された。樹木の高い位置に刻まれた擦痕は落石のジャンプを示唆している（写真-3）。インパクトクレーター内では落石はしばしばすべりを起こし、前面に土を押し出していることから、多くのインパクトクレーターはジャンプした落石の着地を示しているものと推定される。落下経路全体を通してみると、落石は遷急線のところでジャンプを繰り返しながら落下したものと推定される。

この事例の落石は、発生直後の自由落下距離が約5mに過ぎない。しかも落下過程では、多くの樹木への衝突によって運動エネルギーが失われている。こういった状況にも関わらず、長距離移動し得たのは、落石が水平地震動による慣性力で跳びだしたこと、斜面が35度の平均勾配をもっていたこと、さらにもうひとつ重要なこととして、比較的樹木の少ない谷に沿って落下したことを挙

写真-2 2001年芸予地震時に発生した花崗岩巨礫の衝突（タイプ1の落石）による道路の破損

（直方体の花崗岩岩塊（120×80×50cm）が道路に落下し、路面上をジャンプしながら移動した後、ついには路肩のコンクリート製防護壁を突き破ってさらに斜面を80m落下した。花崗岩破片が路上のインパクトクレーターにめり込み、環状と放射状のクラックがクレータの周りに発生している。）

Photo 2 Damage of road due to clash of granite boulder (rock fall of type 1) caused by the 2001 Geiyo Earthquake

（Rectangular parallelepiped block of granite (120×80×50cm) fell down and migrated with jumping on road, finally crashed through concrete safety wall of road shoulder and fell down on slope of distance of 80 meters. The fragments of granite sank into asphalt road surface in impact crater, and ring and radial cracks run around the crater.)

げることができる。地震時落石の多くは、溝状凹地のような小規模な谷でも、一旦谷に入ってしまったらそれに沿って落下し、山麓線を越えて平地に出ても移動している。しかし、谷でない斜面を落下した落石は樹木にトラップされ、山麓線を越える前に停止しているものが多い。このように谷の存在が落下経路や落下距離を規制することから、発生場所と0次谷や1次谷との位置関係から保全対象物に対する落石被害の危険性をおおよそ予測することができる。

7. 地震時落石・崩落の発生場所の予測方法

これまでに述べてきたことから明らかなように、花崗岩地域において地震時落石・崩落が多発する原因は、花崗岩の風化帯構造とそれがつくる特有の地形と深く関係している。そうであるならば、風化帯構造と地形から、落石・崩壊の発生場所を予測することが可能である。

落石災害の防止と軽減を目的とするならば、予測対象とすべき落石・崩落は発生頻度の高いタイプ1、タイプ2、タイプ7とすることが現実的である。これらの落石・崩落がどのような地形・地質条件のところで発生するかについては上述したようによく分かっているの、調査地域の全域を隈なく踏査して、個々の花崗岩巨礫や露頭崖を診断すれば、精度の高い予測図は完成する。しかし、それでは調査効率（経済性）がよくない。そこで、まずは上記3タイプの落石・崩落が発生する危険性の高い地

図-5 2000年鳥取県西部地震時に発生した花崗岩巨礫の落石経路と落石衝突による被害³⁾ (図-6 に対応する)
Fig. 5 Falling route of granite boulder caused by the 2000 Tottori-Ken Seibu Earthquake and damage due to clash of the boulder 3³⁾ (See Fig. 6)

域を地質図や地形図, 空中写真等を使って机上で絞り込み, つぎに絞り込まれた地域において現地踏査を行って個々の花崗岩巨礫や露頭崖を診断するという方法を提案する。

(1) ステップ1: 地質図の活用

現在の日本では, 旧地質調査所発行の地質図をはじめ

として, 多くの論文から花崗岩の分布や岩相を知ることができる。通常, 節理間隔が広く, 風化・浸食によって巨礫が生成されやすい岩相は粗粒で岩石学的にはアダメロ岩や花崗閃緑岩に分類される粗粒花崗岩である。発生場所予測ではこの粗粒花崗岩が対象になる。

図一 6 2000年鳥取県西部地震時に発生した花崗岩巨礫の落石挙動³⁾ (図一 5 に対応する)
Fig. 6 Falling behavior of granite boulder caused by the 2000 Tottori-Ken Seibu Earthquake³⁾ (See Fig. 5)

写真一 3 花崗岩巨礫の衝突によって擦痕の付いた樹木
(2000年鳥取県西部地震)

Photo 3 Trunk of a tree scratched by clash of granite boulder (the 2000 Tottori-Ken Seibu Earthquake)

(2) ステップ 2：風化マップの活用

花崗岩の風化マップ (風化帯区分図) があれば, マサと新鮮岩の分布が分かるので, 地形図と組み合わせて, 新鮮岩が露出している尾根や露頭崖を抽出することができる。さらに花崗岩巨礫の分布が示されていれば, 精度よく危険地域を絞り込むことができる。こうして室内での絞り込み作業の大半は終了する。しかし, 残念なことにはほとんどの地域で花崗岩の風化マップは作成されてい

ないのが現状である。

(3) ステップ 3：空中写真判読

そこで, 空中写真判読から, 花崗岩巨礫や露頭崖の分布, 道路法面の露岩状況を把握することを試みる。ただし, その成果は空中写真の縮尺や撮影時期, 植生状況によって大きく左右されるので注意が必要である。風化マップが存在する場合も, 詳細を確認する上で空中写真判読は有効である。

(4) ステップ 4：地形図の活用

地形図から, 崖や露岩, 道路, 法面の位置を読みとる。地形図の縮尺によっては法面形状や勾配を読みとることができる。また崖記号が記入されていなくても, 等高線が密になっている領域には露頭崖が分布している可能性がある。最後に明瞭な遷急線に囲まれた尾根を抽出し, とくに抽出した尾根が凸型やせ尾根の場合は最重要踏査地域としてマークしておく。

(5) 現地踏査対象地域の絞り込み

このステップでは, (1)~(4)の成果を地形図に記述し, その地形図読図結果と合わせて総合的に現地踏査対象地域を絞り込む。

最も重要な現地踏査地域は花崗岩巨礫が分布すると予想される尾根である。そういった尾根は凸型やせ尾根を呈していることが多く, 尾根の肩に明瞭な遷急線が認められる。そして, 遷急線直下では露頭崖の出現頻度も高くなる。したがって, 「花崗岩巨礫の出現」, 「明瞭な遷急線」, 「凸型のやせ尾根」, 「露頭崖の出現」といった項目が数多く重なる地域ほど, タイプ 1 とタイプ 2 の落石・崩落が発生する危険性が高く, 現地踏査が必要である。タイプ 7 の落石・崩落では, 道路法面など切土法面で, 新鮮岩~弱風化岩が露出しているか, 弱風化岩とマ

サが混在分布して露出しているところで現地踏査が必要である。

(6) ステップ5: 現地踏査による診断

現地踏査では、露頭崖の形状、花崗岩巨礫の姿勢、露頭崖や花崗岩巨礫の位置と遷急線との関係、風化度、節理の方向や分布密度、さらには節理面の緩み状態などが診断ポイントとなる。落石・崩落のタイプ毎に、その診断ポイントを具体的に記すとつぎのようになる。タイプ1の落石を発生しやすい花崗岩巨礫は、(1)凸型やせ尾根上に分布し、(2)巨礫の縦横比や形が転倒を起こしやすい形状をもっていて、(3)転倒・横跳びすれば容易に落石になる位置にあるものである。タイプ2の落石・崩落を発生しやすい露頭崖は、(1)遷急線の付近に位置し、(2)新鮮な岩石からなり、(3)節理に囲まれた岩塊は転倒・横跳びを起こしやすい形状をもち、(4)さらにその節理面が開口して緩んでいるものである。タイプ7の落石・崩落が発生しやすい道路法面の弱風化岩は、(1)マサと混在分布し、(2)マサとの差別侵食による凸型微地形をなし、(3)法面の上部に位置し、(4)弱風化岩全体あるいはそのなかの節理に囲まれた岩塊が剥離・横跳びを起こしやすい形状をもっているものである。

なお、道路を保全対象とした落石・崩落踏査では、道路法面におけるタイプ7の落石・崩落だけではなく、タイプ1やタイプ2の落石・崩落も対象となるので、尾根上までの調査が必要である。また、落下経路についても評価が必要なので、花崗岩巨礫や露頭崖と谷筋との関係も明らかにする必要がある。

8. まとめ

花崗岩地域では、風化帯構造とそれがつくる特有の地形に規制されて、地震時には落石・崩落が多発する傾向がある。多くの落石・崩落は尾根の直上や遷急線の近傍の露頭崖で発生していて、しかも地震による破壊はマサや割れ目の多い花崗岩よりも、新鮮で割れ目の少ない花崗岩の方が著しい。その結果、規模の大きな岩塊が大きな慣性力を得て、水平地震動の方位とは反対方向に転倒・横跳びを起こして落石・崩落になる。地震時落石・崩落で高い発生頻度を示すタイプは、(1)尾根上の花崗岩巨礫の転倒・移動から発生する落石、(2)尾根の遷急線近傍に分布する露頭崖で発生する新鮮岩の落石・崩落、(3)道路法面の弱風化岩とマサとの混在部で発生する弱風化岩の落石・崩落である。これらの3タイプの落石・崩落の予測が地震時落石災害の防止と軽減に向けて重要な課

題となる。落石・崩落の発生場所は発生域の地形・地質条件から絞り込むことが可能である。落石の落下方向は起震断層に直交する傾向がある。タイプ7の落石の自由落下距離は落下高さに比例して長くなり、ほぼ落下高さに等しい長さをもつ傾向がある。落石挙動は個々の状況に依存し、一義的に現象を予測することは難しい。こういった現象については帰納法的に認められる「傾向関係」に基づいて予測方法の向上を図ることが現実的である。

引用文献

- 1) 沖村孝 (1995): 兵庫県南部地震にともなう斜面崩壊の特性, 兵庫県南部地震等にともなう地すべり・斜面崩壊研究報告書, 地すべり学会, pp. 1-16.
- 2) 横山俊治・菊山浩喜 (1997): 1995年兵庫県南部地震時に発生した六甲花崗岩地域の斜面崩壊の運動様式と機構, 地すべり, Vol. 34, No. 3, pp. 17-24.
- 3) 水口真一・藤田勝代・嘉茂美佐子・加藤弘徳・中野浩・大谷竹志郎・横山俊治・横田修一郎 (2001): 2000年鳥取県西部地震による落石特性, 鳥根大学鳥取県西部地震災害調査報告書, 鳥根大学鳥取県西部地震災害調査団, pp. 51-60.
- 4) 嘉茂美佐子・水口真一・横山俊治・瀬尾孝文 (2001): 2001年芸予地震による呉市周辺の花崗岩地域の落石, 第40回日本地すべり学会研究発表会地すべり2001講演集, pp. 513-516.
- 5) 横山俊治・菊山浩喜 (1995): 墓石・灯籠の転倒方向からみた1995年兵庫県南部地震の水平地震動の方位と地表変状の方向規制, 地質学論集, No. 51, pp. 78-88.
- 6) 横山俊治・菊山浩喜・田中英幸・海谷叔伸 (1997): 1995年兵庫県南部地震による盛土の地表変状の原因, 構造地質, No. 42, pp. 51-61.
- 7) 藤田勝代・菊山浩喜・田中英幸・横山俊治 (2001): 小豆島の花崗岩に見られるラミネーション・シーティングの発生と成長に起因した岩盤の緩みと斜面変動, 第40回日本地すべり学会研究発表会地すべり2001講演集, pp. 591-594.
- 8) 山岸宏光・雨宮和夫・黒沢邦彦 (1994): 奥尻島および島牧・北松山海岸の斜面災害, 地下資源調査所調査研究報告, No. 24, pp. 5-29.
- 9) 田近淳・伊藤陽司・石丸聡・広田知保 (1995): 根室・釧路地方の斜面変動, 地下資源調査所研究報告, No. 25, pp. 81-94.
- 10) 井口 隆 (1995): 谷埋め盛土地盤における地震時地すべりの事例と若干の考察, 兵庫県南部地震等に伴う地すべり・斜面崩壊研究報告, 地すべり学会, pp. 101-119.
- 11) 奥園誠之・羽根田汎美・岩竹喜久磨 (1980): 地震による斜面崩壊の実態, 土と基礎, Vol. 28, No. 8, pp. 45-51.
- 12) 落合博貴・北原曜・三村利昭・阿部和時 (1995): 地震による山腹斜面崩壊と地震応答解析, 兵庫県南部地震等にともなう地すべり・斜面崩壊研究報告書, 地すべり学会, pp. 119-132.
- 13) 仲野公章 (1984): 地震, 高橋博・大八木規夫・大滝俊夫・安江朝光編纂: 斜面災害の予知と防災, 白亜書房, pp. 259-268.
- 14) 鈴木隆介 (2000): 落石, 建設技術者のための地形図読図入門 第3巻 段丘・丘陵・山地, 古今書院, 東京, pp. 793-795.
- 15) 釜井俊孝・野呂春文 (1988): 1987年千葉県東方沖地震による上総丘陵の斜面崩壊, 応用地質, Vol. 29, pp. 285-294.

(原稿受付2001年11月20日, 原稿受理2002年4月22日)