

花崗岩の斜面に分布する転石群の危険度評価

清水 泰弘*・木村 弘三**

A risk assessment of boulder stones on a granitic rock slope

Yasuhiro SHIMIZU* and Kouzou KIMURA**

Abstract

Risk assessment of boulder stones on rocky slopes is important for protecting human lives and facilities. In this study, risk assessment of rock-falling on a rocky slope consisting of highly weathered granite was conducted. Heavy torrential rainfalls, typhoons and earthquakes, cause threatening of rockfall. The other factors, such as the shape, weight, and relative height of individual boulders and loose rocks, also need to be considered when assessing rockfall hazards. In this paper, a numerical study using discrete deformation analysis (DDA) was performed to estimate travel distance of falling rock blocks and their velocities. We describe the results obtained from this numerical study, and propose a assessment for the risk of a rockfalls on a rocky slope located behind Kamitakami Elementary School in Toyota, Aichi.

キーワード：落石， 転石， 風化， 花崗岩， DDA

Key words : rockfall, boulder stone, weathered granite, DDA

1. はじめに

我が国の山間地域では、落石の可能性を有する浮石や転石などが点在する斜面は各所に見られる。このような斜面の近くに有る学校などの教育施設や通学路には、潜在的な落石の可能性が日常的

に存在している。本稿では愛知県豊田市の山間部の強風化花崗岩地域に位置する同市立上鷹見小学校の周辺地域(写真1)を調査対象として、落石の危険性を評価した。

同小学校の隣接山地と通学路に沿う斜面には浮

* 名城大学理工学部建設システム工学科
Faculty of Science and Technology Department of Civil
Engineering, Meijo University

** サンコーコンサルタント(株)
Sunco Consult Inc.

本報告に対する討論は平成22年11月末日まで受け付ける。

石あるいは転石状態の岩塊群（本稿では斜面上に静止している浮石や転石の比較的大きな岩の塊を岩塊と称する）が落石の可能性を含んで散在している。今後、地震などの外力が加われば、さらに落石の危険性が増大する。近年、東海地震の襲来が叫ばれていることから、緊急性を要する事象と考えた。

そこで、個々の転石や浮石の形状と質量および比高、斜面地形、植生分布などの状況を詳細に調



写真1 上騰見小学校付近の斜め航空写真
(赤丸印は調査対象斜面)

査し、地震時の落石等に対する力学的な不安定性について検証すると共に危険性を評価した。さらに、落石の発生源となりうる岩塊を抽出し、不連続変形法 (DDA) を用いて落石危険影響範囲を設定し、落石危険度評価を行った。

2. 対象地区の状況

2.1 地質と地形

調査地域は強風化花崗岩地域で、全体として風化により砂状化 (マサ化) しているが、岩塊として地上に露出した風化花崗岩も点在している。調査対象箇所付近の地質図¹⁾を図1に示す。同図によると対象地域は、伊勢湾から東側の領家帯に分布する新期領家花崗岩地帯であり、地質図では多くの岩体に分けられているがこの付近の岩体は伊奈川花崗岩と呼ばれる。

伊奈川花崗岩は、木曾山地の南部から三河高原にかけて広く分布し、中部地方領家帯のなかで最も広く分布する花崗岩体である。主に粗粒で斑状の角閃石黒雲母花崗岩～花崗岩閃緑岩からなる。他の花崗岩と異なる点は、斑状のカリ長石や粒状の石英を多く含み、片麻状構造をもつ場合もあり、含有鉱物の量及び化学組成は広い範囲で変化

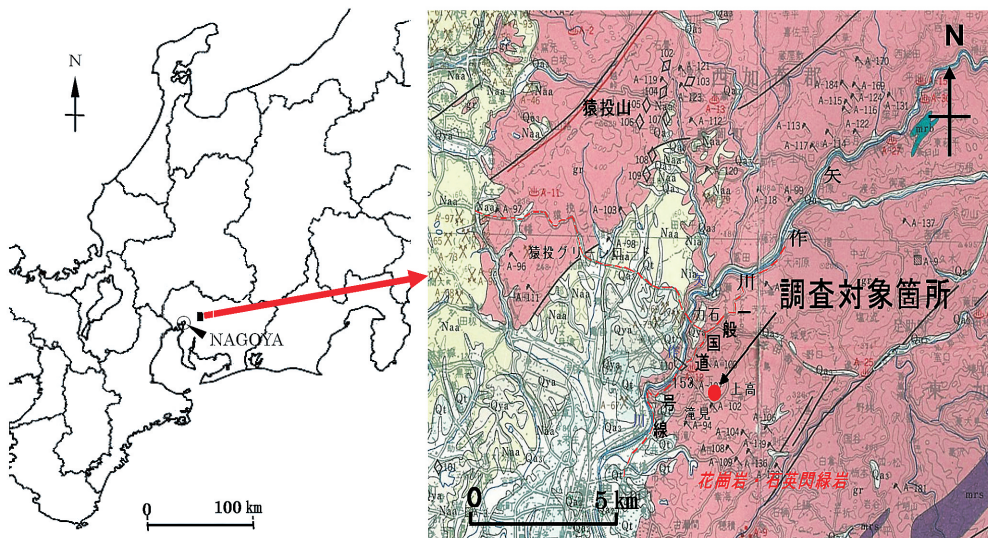


図1 調査場所位置図と調査対象箇所付近の地質図¹⁾ 薄赤色が伊奈川花崗岩地域
(愛知県豊田市上高町)

する。他の花崗岩体に比べ特に表層部の風化進度が速い特徴を持っている²⁾。写真2に対象地域の花崗岩の表面風化状況を示す。

粒状組織を呈する花崗岩の間隙は、主として鉱物粒子境界にあたるが、雨水の侵入可能深度は比較的浅いと考えられる。温度変化などによる風化は比較的表層部にとどまり、風化の初期においては表面粒子の剥離が進行する風化形態も見られる³⁾。調査地域には写真3のように山砂採掘場に球状風化（玉葱状構造）をした岩塊も見られる。

2.2 転石、浮石などの岩塊群と植生の分布状況

調査対象箇所とする同小学校北東山地および通学路に沿う斜面（SE20～SW40）には、写真5のように球形に近い危険な状態の岩塊群が散在する。また、対象斜面の下方向には写真1や写真4

にも見られるように、樹齢が短い樹木が多い。樹木調査結果では、太い切り株が数個確認されたが、現在は切り株から生長した若齢樹が存在するのみであった。

現場調査時に岩塊の個々の長さ、幅、高さ、形状とその状態、比高、斜面勾配などを調査した。調査結果から同地の岩塊分布状況を図2の地形図に示す。この地形図は1/25,000の地形図を基に現地調査の資料を合わせて作成した。同図の岩塊にはそれぞれ番号（番号の外にA～Oもあるが調査年度の違いによる）を付した。また、その形状や状況の一部を写真5および写真6に示す。

写真5はNo. 32, 33, 34の岩塊が球状に近い形状で積み重なった状態で分布していた。さらに写真6に示す岩塊No. 17は斜面下方向に倒れかかっている不安定な状態の岩塊であった。すべての岩塊の



写真2 対象地域における花崗岩の表面風化の状況



写真4 小学校北東斜面の岩塊群

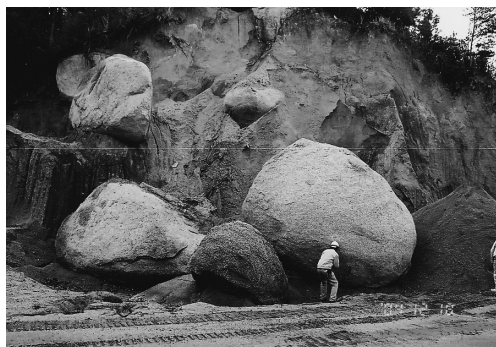


写真3 対象地域の山砂採掘場に出土した花崗岩の球状風化岩塊

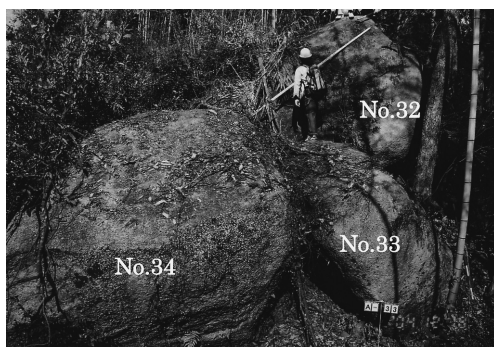


写真5 斜面上の岩塊群の一例

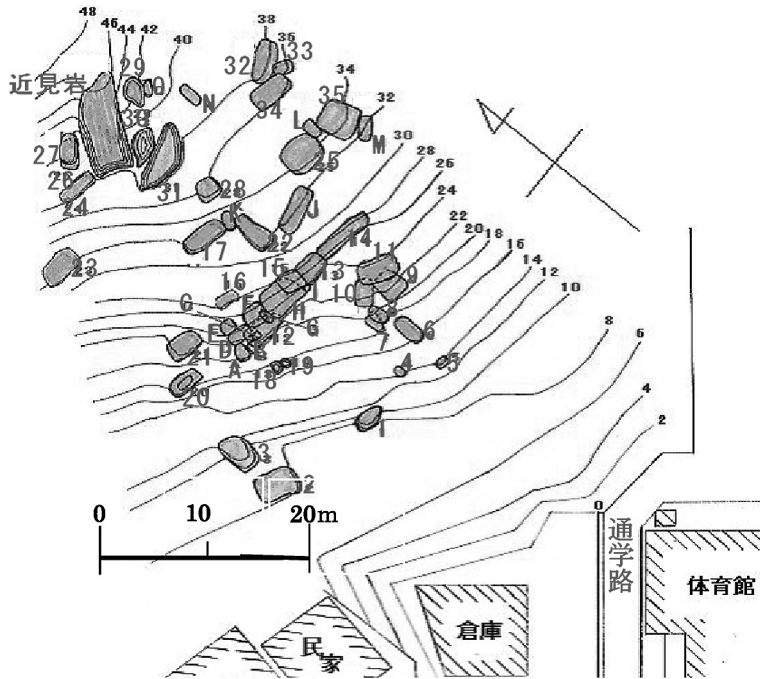


図2 対象斜面の地形図
岩塊分布状況と小学校の体育館および通学路の位置関係



写真6 岩体から分離した岩塊 No. 17
他の岩塊によって支えられている状態

比高（通学路面高さを基準として、岩塊の1/2までの高さ）と重量の関係を図3に示す。比較的高い位置に大きな岩塊が分布する傾向がある。

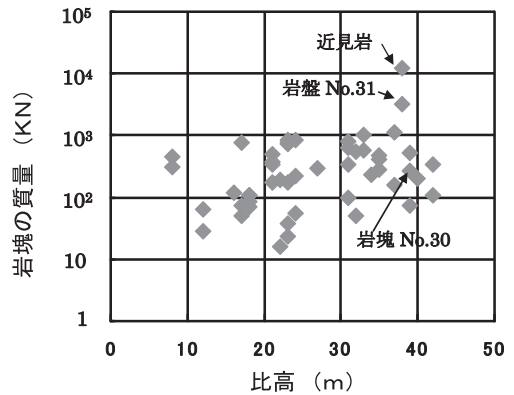


図3 岩塊の比高と推定質量

2.3 落石の全運動エネルギー

これら落石の保全対象としては、災害時の避難場所にも指定されている上鷹見小学校の体育館と同校の側道に位置した通学路である山裾の道路とした。落石発生源は斜面上の不安定な岩塊で、通学路端における落石の落石速度 (V) と落石の全

運動エネルギー (E) を求めた。それらの計算式を次に示す⁴⁾。

$$V = (2g(1 - \mu/\tan\theta)H)^{1/2} \quad (1)$$

ここで

θ : 斜面勾配 (°)

H : 斜面の比高 (m)

μ : 等価摩擦係数

$$E = (1 + \beta)(1 - (\mu/\tan\theta)) \cdot m \cdot g \cdot H \quad (2)$$

ここで

$$(1 + \beta)(1 - (\mu/\tan\theta)) \leq 1.0$$

E : 落石の全運動エネルギー

β : 回転エネルギーに関する係数

$$\beta = 0.1$$

m : 落石の重量 (ton) この式では重量

(ton) を用いる

g : 重力加速度 (9.8m/s²)

なお、上式の落石の重量については、現地での計測結果と岩塊の形状から推定した推定重量を用いて算定し、等価摩擦係数は対象斜面の特性から表1の区分Dと判断して $\mu = 0.35$ を採用した。

斜面に分布する主な岩塊の落石速度と全運動エネルギーの計算結果を表2および図4に示す。

表1 斜面の種類と等価摩擦係数 μ の値⁴⁾

区分	落石および斜面の特性	μ
A	硬岩, 丸状: 凹凸小, 立木なし	0.05
B	軟岩, 丸状~角状, 凹凸中~大, 立木なし	0.15
C	土砂・崖錐, 丸状~角状, 凹凸小~中, 立木なし	0.25
D	崖錐・岩塊混じり崖錐, 角状: 凹凸中~大, 立木なし~有り	0.35

表2 岩盤の落石速度と全運動エネルギー

岩塊 No.	長さ l	横幅 d	高さ h	比高 H	推定質量 m	平均斜面角度 θ	落石速度 V	全運動エネルギー
	[m]	[m]	[m]	[m]	kN	(°)	[m/s]	[MJ]
9	2.5	3.2	2	21	383	33	14	4.0
12	1.5	4	3.5	21	502	28	12	3.6
11	3	5	2	23	861	33	15	8.3
13	5	3	2.4	23	765	31	14	8.7
H	4	4	2	23	853	30	13	7.4
14	2.7	6.6	2	24	299	31	14	9.2
16	1.6	3	2.6	27	792	31	15	3.6
17	2.2	4.7	3.2	31	346	32	16	11.5
22	4.7	1.4	2.2	31	647	33	17	5.4
J	2	5.2	2.6	31	543	35	17	10.6
23	2.8	3	2.7	32	584	28	15	7.6
25	3	3.7	2.2	33	1018	34	18	10.0
35	3.6	4	4	33	228	33	17	17.0
L	2	2.8	1.7	34	405	34	18	4.0
28	2.2	2.2	3.5	35	280	33	18	7.1
33	2.6	1.5	3	35	476	31	17	4.4
34	2.5	4	2	35	157	32	17	7.8
32	3.3	4.2	3.4	37	1127	32	18	19.4
31	2.8	7	7	38	3282	33	19	62.3
近見岩	10	5.5	9.2	38	12104	30	17	189.8
26	3.7	1.7	1.8	39	271	31	18	4.8
30	3	1.7	6.8	39	519	33	19	9.9
27	3.8	2	1.1	40	200	31	18	3.6
29	3	1.7	4.5	42	343	32	19	7.0

全運動エネルギーの算定値は3.6～189.8MJの範囲にある。転石のほとんどが比較的大きな岩塊であることから、このような全運動エネルギーの値が算定された。なお、表2および図4は比高が20m以上の岩塊のみを低い方から順に抜粋して示した。また、これらの値を形状比(長さ/高さ:1/h)で整理し、図4にそれぞれ0.5以下を●印で0.5～1.0を▲印で1.0以上を■印で表示し分類した。

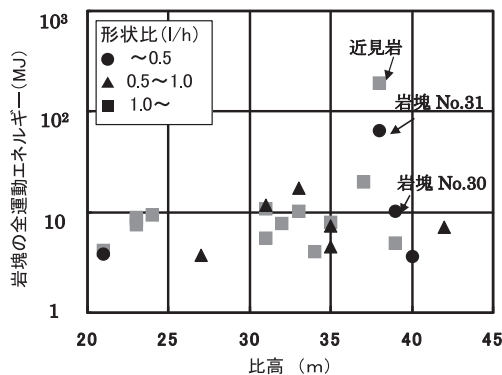


図4 岩塊の比高と全運動エネルギー

3. 危険要因の把握

3.1 危険岩塊の抽出

同小学校北東斜面における岩塊群のうち、特に危険性を有するものは、近見岩とそれに隣接する近見岩群である。巨大な近見岩と隣接する近見岩群(図2, 5の主にNo.29, 30, 31)は表面風化や雨水浸食などによって近見岩から分離したものと推測した。

近見岩は、長さ10m、幅5.5m、高さ9.2mで形状を考えた体積が466m³となり比重2.6として算出するとと推定総質量が約12104KNである。この岩塊は斜面上部の山側背面で高さの約8割が埋没している。下部地盤との関係を調べるため斜面下方側の底部を試掘したところ下部にも岩体を確認された。下部岩体との隙間はスコップの入る深さで約20cmの間隔で流れ盤方向に約5°の傾きで分離していると推測した(写真7)。また、近見岩は写真8の様に上部が張り出している形状であ



写真7 近見岩底面の状況
試掘により近見岩の底面が下部の岩体と分離していることが判明した

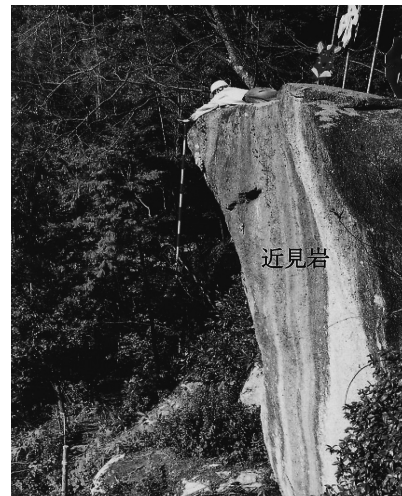


写真8 近見岩の斜面下方側面
近見岩の上部が斜面下部方向に約2m張り出した形状

る。

図2の近見岩群を詳細に見ると、近見岩に隣立する岩塊No.31との間に宙吊り状態の岩塊No.30(写真9)が有る。さらに、岩塊No.31の下部付近(地上高約1.5m)には、写真10の破線の様に割れ目(SW50-5)が発達し、上下部に分離していると推測された。

3.2 危険性の把握

近見岩は、上部が露出している巨大な岩塊であるが、底部の試掘により、下面が平面で下部岩体と分離していると推測される。この岩塊は形状比

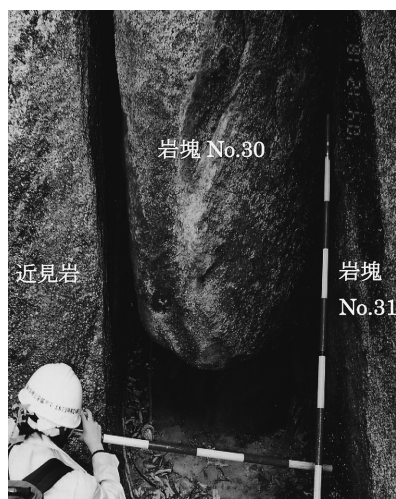


写真9 岩塊 No. 30の宙吊り状態
近見岩と接する岩塊No. 30が岩塊
No. 31との間で宙吊りの状況



写真10 No. 31の水平方向のクラックの状況
地上から約1.5mの高さで流れ盤方向
に約5°のクラック(破線)の発達状況

が1.0以上であるが、高さが9.2mと高いこと、下部岩体との隙間に土砂が介在しているなどから、地震による近見岩の水平方向の振動が予測される。近見岩群のうちの近見岩と岩塊 No. 30および岩塊 No. 31は、それぞれ岩塊の上部で接触しており、質量や形状比も異なる。近見岩と岩塊 No. 30や岩塊 No. 31とは地震の際の振動性状に大きな差異が考える。

すなわち、地震時における近見岩群の水平振動性状はそれぞれの質量と形状により異なる。質量の比較では、表2に示す様に、その比は近見岩を

1として示すと岩塊 No. 30は0.04、岩塊 No. 31は0.27となり、近見岩に比べ他の二つの岩塊の質量の差は大である。また、岩塊の形状比を比較すると近見岩が1.08で、岩塊 No. 30が0.25、岩塊 No. 31が0.4となり、近見岩に比べ他の二つの岩塊は形状比からみても不安定な状態にある。

上記の様に質量と形状比の違いからも近見岩と岩塊 No. 30や No. 31では、振動性状が異なると推測される。また、宙吊り状態に有る岩塊 No. 30は、地震の際には、自重による落下に伴うくさび効果も発生すると考えられる。この現象によって近見岩と岩塊 No. 31との間隔が開くが、両者に比べ近見岩が巨大であることから岩塊 No. 30が岩塊 No. 31を押し出す現象が発生すると推測される。その結果、岩塊 No. 31は、地面より1.5mの高さの水平方向の亀裂の存在も有り、地震の水平振動によるトップリング型の崩落の可能性が予測される。また、岩塊 No. 31自身が地震により転倒することも考えられる。

3.3 危険要因の拡大

同小学校北東斜面の岩塊群の中でも近見岩群は、最も高い場所にあり、落石の全運動エネルギーが大きいことが予想される。さらに、その下位にも不安定な岩塊群が散在している。

地震による近見岩群の岩塊 No. 31が崩落すると考えると、下方向に位置する岩塊 No. 28に衝突し、はじき飛ばすことが予測される。そこで、崩落の影響範囲を把握するため、二次元の不連続変形法 (DDA) を用いて落石シミュレーションを行った解析結果について以下に述べる。

4. DDA 解析条件の設定

4.1 落石軌跡推定線とその斜面地形

調査対象地はSE20からSW40の方向の斜面であるが、本調査目的が小学校の施設(体育館)や通学路に対する落石の安全性の評価であることから、図5に示す落石軌跡推定線(SW5)を設定した。その推定線の地形断面は、地形図と現地の地形を総合的に判断して図6の様に設定した。なお、現地植生調査結果より対象斜面には若齢樹しか存在せず、落石軌跡推定線方向には衝突により

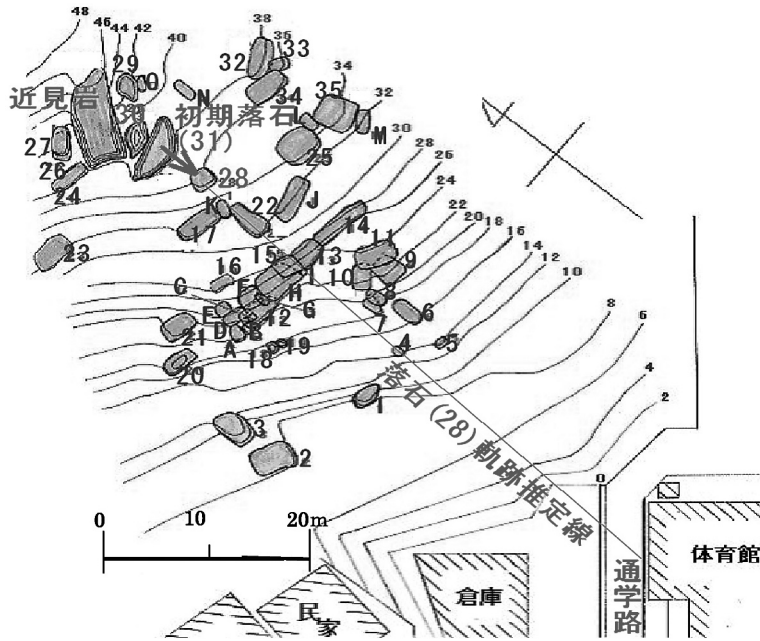


図5 岩塊 No.28の落石推定線

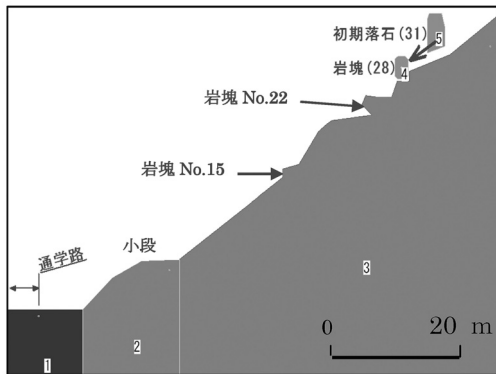


図6 岩塊 No.28の落石推定線の地形形状

落石の方向や速度を変える樹木は無く、障害物は考慮しないものとした。

4.2 DDA 解析に用いた岩盤物性

落石の解析に用いた岩盤物性値は斜面部，下位小段部，最下位平坦部の3種類に分け，現地調査の結果を参考にそれぞれの物性値を表3の様に設定した。現地斜面の状況は若齢樹や草などの植生の状況から表土を平均30cmの一様な厚みと推定した。なお，岩盤物性値は，花崗岩の標準物性値を参考に設定した。

表3 主要な DDA 解析のパラメータ

項目	単位	発生源	斜面部岩塊	斜面地表部	下位小段部	最下位平坦部
単位体積重量	kN/m ³	26	26	19	18	19
ヤング率	×10 ³ kN/m ²	200	200	50	5	50
ポアソン比		0.25	0.25	0.3	0.25	0.3
内部摩擦角	度	40	40	30	30	35
粘着力	kN/m ²	0	0	0	0	0
速度エネルギー比		0.81	0.81	0.64	0.36	0.64
粘着係数		0.01	0.01	0.1	0.05	0.05

4.3 くさび状態にある岩塊 No. 30による押出し外力

近見岩と岩塊 No. 31との間でくさび状態にある岩塊 No. 30の押し出し外力は岩塊と岩塊の摩擦抵抗から滑動安全率 (N) を求める式より滑動安全率 (N) を1.0とする逆算により求め、以下の値を算定した。基本式は

$$N = \mu \cdot W \cdot \cos \alpha / k \cdot W$$

ここで

- N : 滑動安全率,
- μ : 摩擦抵抗係数,
- W : 岩塊質量,
- α : 亀裂角,
- k : 水平震度

岩塊 No. 31の大きさ : 長さ7.0×幅2.5×高さ5.5m
(亀裂より上部)

岩塊 No. 31の質量 : $7.0 \times 2.8 \times 5.5 \times 2.6 \text{ KN/m}^3$
W = 2,803KN (上部)

滑動抵抗力 : $2,803 \times 0.7$ (岩の摩擦係数)
 $\mu = 1,962 \text{ KN}$

亀裂方向角 α : 30°

活動への水平分力 : $1,962 \text{ KN} \times \cos 30^\circ$
= 1,699KN

水平震度換算 : $1,699 / 2.803$
k = 0.6

なお、No. 31が滑動するに至る発生機構においては、近見岩に挟まれた岩塊 No. 30が介在し、この場合の亀裂方向角は、壁面角 10° 、壁面摩擦角 15° 及び不連続面 5° を考慮し、滑動に至る不安定角 30° とした。

4.4 岩塊 No. 31の初動について

DDA 解析モデルとしては、岩塊 No. 31が岩塊 No. 28への衝突接触角度が初動回転速度によって変わるため、岩塊 No. 31に10段階の初動回転速度を与えて解析した。10段階のパターンは、いずれも初動回転速度を1~10rpsと変化させた。その結果、岩塊 No. 31の微妙な落下地点の違いから岩塊 No. 28への衝突形態の変化を考慮し、岩塊 No. 28の挙動についてシミュレーションを行った。

4.5 落石シミュレーション解析ケース

現地調査により近見岩と隣接する近見岩群と下方周辺に広がる地形状況や岩塊群の配置、研究目的である通学路の危険度評価の観点から通学路に到達する落石経路を選び出し、落石シミュレーションを実施した⁶⁾。

落石シミュレーションのケースについては、近見岩群の岩塊 No. 31は地震の水平振動により上部が転倒し、さらに岩塊 No. 28に衝突する。また、岩塊28は下部に存在する水平な割れ目により砕けると仮定する。この解析ケースは予備解析の結果、通学路に落石が到達するケースである。この解析ケースの説明を以下に示す。また、その状況を模式的に図示すると図7のようである。

- ケース1 : 岩塊 No. 31がトップリングして No. 28に衝突し、岩塊 No. 28が正方形状 (2.2m×2.2m) に割れた場合 (図8)
- ケース2 : 岩塊 No. 31がトップリングして岩塊 No. 28に衝突し、岩塊 No. 28 (2.2m×3.5m) が根本から割れた場合 (図8)
- ケース3 : 岩塊 No. 31がトップリングして岩塊

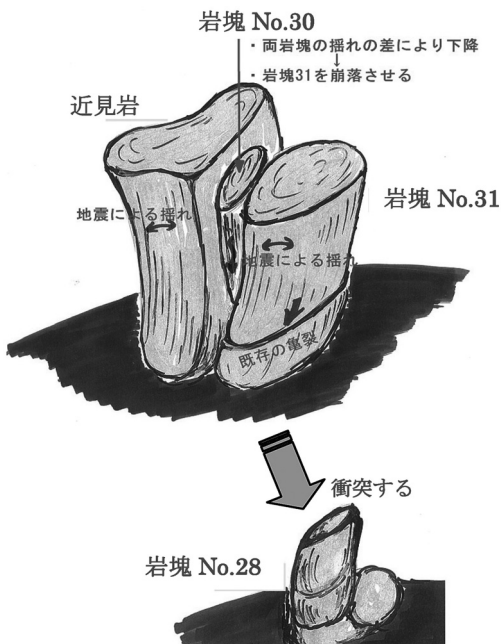


図7 落石発生原因の概念図

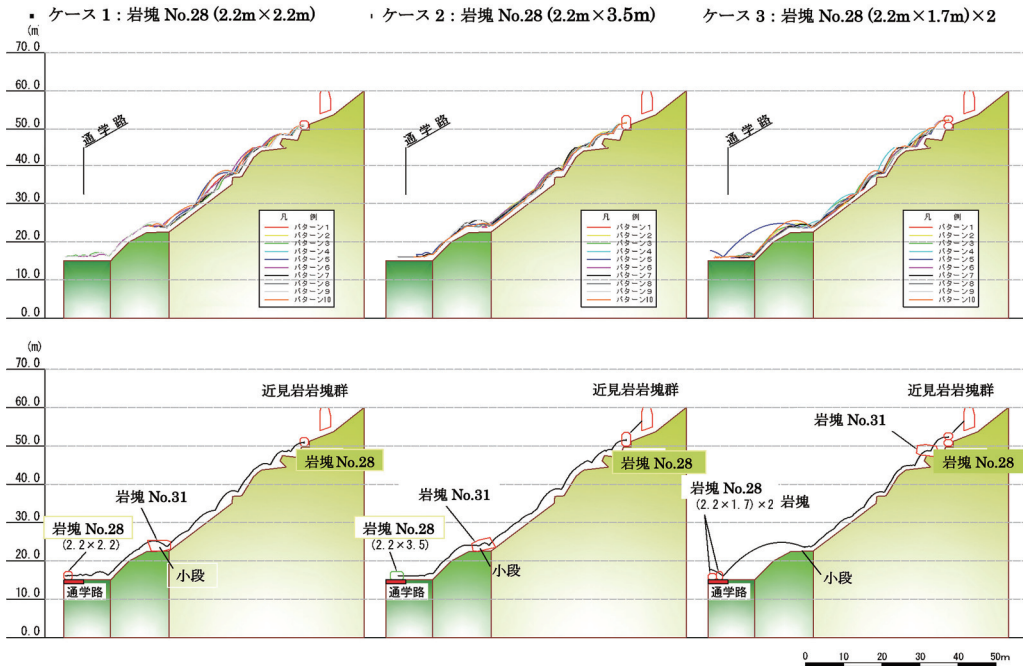


図8 ケース1～3の解析結果
(上図は10パターンの落石軌跡を示し、下図は各ケースの落石影響範囲が最大となる落石到達距離の位置を示す。)

No. 28に衝突し、岩塊 No. 28が根本から割裂した後、その上部岩塊が2分裂 (2.2m×1.7m×2) した場合 (図8)

4.6 岩塊 No. 28崩落影響範囲の把握

近見岩群の崩落岩塊 No. 31によりはじき飛ばされた岩塊 No. 28は、予備解析により正方形体であるほど小段の畑を越え通学路に達する確率が高いことを確認した。また、近見岩群の岩塊 No. 31は、岩塊規模が大きい形状により、回転速度が小さいと斜面をすべり落ち、小段の畑で止まることも予備解析の結果から判明した。

岩塊 No. 28の崩落影響範囲について、落石シミュレーション解析結果を図8に示す。同図の上図には各ケースの岩塊 No. 31に与えた回転速度の違いによる10のパターンの落石軌跡を示し、同図下図には各ケースのうち崩落影響範囲が最大となる落石到達位置を示した。

5. 発生源落石防止対策

5.1 こども達の野外活動

現在も小学校周辺の丘陵地が野外教育の場として拡張されいろいろな手作りの施設が造られ利用されている。調査対象の小学校に隣接する里山は、日常的に子供の遊び場である。近見岩は、約55m²あり近見岩岩と呼ばれ野外活動の拠点と成っている。落石対策を行うにあたり、児童の行動範囲を考慮して落石の発生など危険な状況にならないこと、危険な遊び道具とならないよう配慮する必要がある。

5.2 落石対策工法の提案

同地の岩塊群には落石の危険性が高い岩塊が散在しており、最近の待ち受け落石防護柵 (最大8000KJ) では到底落石を防御することは出来ない。これらを考慮して安全性および経済性から総合的な発生源対策工法を次に提言する。

○ 地震時の挙動を抑制する目的で近見岩群に根

固アンカー工または接着工を施す。近見岩は児童の野外活動の拠点であることから、撤去しない。ワイヤーロープ掛け工は子供たちの新しい遊び道具となり返って危険な状態を発生させる可能性があることから同様に避けるべきである。

- 全ての岩塊群のワイヤーロープ掛け工も考えられるが、経済的には近見岩を残して転石状態の岩塊を撤去することが最善策と考える。
- 小規模な岩塊の予期せぬ落石、小規模崩壊土砂の防護も必要となることから落石防護工や待ち受け落石防護柵の設置も必要と考える。

6. おわりに

伊奈川花崗岩が広く分布している長野県南部から愛知県東部の地域では、風化により落石の発生源となる不安定な浮石や転石が広く分布している。

今回実施した DDA 解析のシミュレーション結果および数多くの予備解析から得られた評価では、地震による落石が通学路に到達する可能性も明らかになった。

今後の防災対策は、対象地域外の落石による被害も予測されることから、公共施設及び住宅周辺の岩塊の分布状況を調査し、潜在的な落石の可能性が日常的に存在していること、落石到達範囲を予測し落石危険区域であることを住民に認知させる。また、落石影響範囲を示す詳細なハザードマップの作成が望まれる。

謝 辞

平成16年の調査時に御助言とご協力を頂いた豊田市立上鷹見小学校校長、同地区長、および DDA の数値解析にあたりご助言を頂いた京都大学工学部大西有三教授に深謝いたします。また、現場調査の補助やデータ整理に協力頂いた和氣信二氏（株式会社ノダ）に深謝するしだいである。

参考文献

- 1) 通商産業省工業技術院：日本地質図大系中部地方、三河地方の地質、p. 22, 1991
- 2) 木宮一邦：三河高原の風化殻とその形成時期－花こう岩の風化・第3報－、地質学会誌、第87巻2号、pp. 91-102, 1981
- 3) 糟谷憲司：各種岩盤の風化進行機構・風化進行速度に関する研究、電力中央研究所研究報告 381038、pp. 22-23, 1982
- 4) 道路土工委員会：落石対策便覧、社団法人日本道路協会、pp. 18-19, 2003
- 5) 右城 猛：落石対策における課題、落石対策委員会資料、大洲河川国道事務所、pp. 1-10, 2008
- 6) 清水泰弘、木村弘三、山本直樹、辻野 洋：強風化花崗岩が分布する地域の落石の危険度評価、第26回日本自然災害学会学術講演会、pp. 149-150, 2007

(投稿受理：平成21年5月18日)

訂正稿受理：平成22年4月21日)