

雪中爆破による雪崩誘発技術に関する基礎的研究

水文気象研究室 町田 敬
指導教員 陸 旻皎

1. 背景と目的

雪崩災害を未然に防ぐための対策法として、迂回や避難などの消極的対策法と潜在的雪崩の危険性を排除する斜面積雪処理などの積極的対策法がある。この積極的対策の一つとして、爆破による人工雪崩が実施されているが、その爆薬の使用及び装薬方法については経験によるところが多く、技術確立がなされていない。

また、新潟県においては平成 16 年新潟中越地震が発生したことにより山間豪雪地域において斜面崩壊や雪崩施設の損壊が多発した。さらに、その後の大雪によって雪崩災害が多発していることが独自の調査によって確認されており、雪崩災害対策技術としての爆破による人工雪崩技術の必要性がさらに高くなっていると言える。

本研究では、人工雪崩誘発を行うための装薬方法について装薬条件を変え人工雪崩誘発実験を行い、人工雪崩誘発に適した装薬方法を導くことを目的とした。また、計画段階での装薬条件における雪崩誘発の成否を人工雪崩誘発実験結果から検討することを目的とした。

2. 雪中爆破実験

2-1. 実験地

実験地は、図 1 に示す新潟県南魚沼市栃窪（旧塩沢町）の標高 550m、平均斜度 43° の自然斜面で実験を行なった。斜面の植生は、低木および草地である。

実験地においては、近隣住居より 800m 以上離れており、斜面下部には田んぼが広がっているため実験観測を行なっても危険性がない場所である。

2-2. 使用爆薬と装薬方法

使用爆薬は、これまでの実験結果成果から安全性が高く積雪層中の爆破に効果的であるエマルジョン系含水爆薬のチタ・マイト（品名¹⁾を用いた。装薬量は、1 孔につき 300g を装薬している。

発破方法は、瞬発電気雷管を用いて電気発破により全装薬同時に爆破を行なった。また、導通試験器によって結線もれが容易に確認できる直列結線を採用している¹⁾。

本研究においては、装薬を図 2 のように、破壊域と始動領域にわけ考えている。破壊域での装薬配置は千鳥配置であり、始動領域は等配置で行なっている。

装薬は、窄孔棒という先端が円錐状の棒を雪面上から積雪層に差込み穴を開けることにより、任意の深さに装薬が可能である。

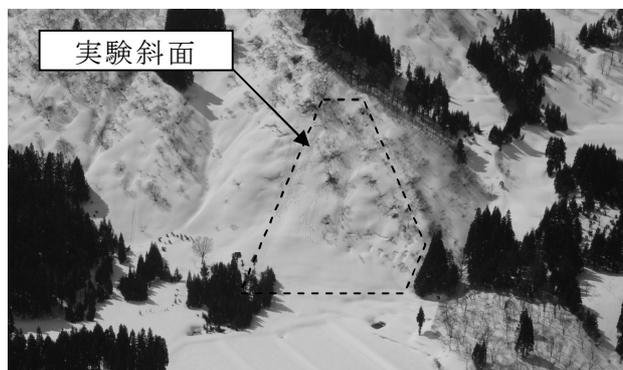


図 1 実験場所

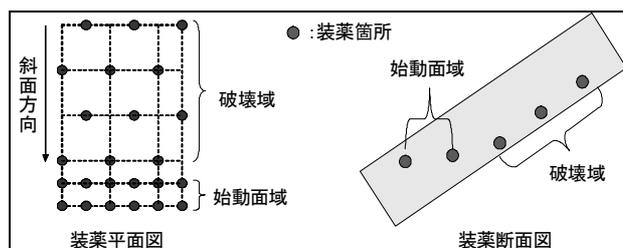


図 2 装薬方法

2-3. 2004年3月実験

2004年3月実験は、始動領域の装薬方法を間隔1mの等配置で2段と固定して破壊域の装薬段数と装薬間隔を変え、雪崩誘発現象の比較を目的とした3ケースの装薬方法で実験を行なった。

図3に示すケース1では、装薬域の斜度は40°であり、積雪深は1.5mであった。装薬方法については、破壊域は間隔2mの千鳥配置で4段設置(3孔×4段=12孔)した。

ケース2の装薬図を図4に示す。装薬域の斜度は40°であり、積雪深は2mであった。装薬方法は、ケース1を基準とし、破壊域の装薬段数のみを2倍の8段(3孔×8段=24孔)にして実験を行なった。

ケース3の装薬図を図5に示す。装薬域の斜度は38°であり、積雪深は1.5mであった。装薬方法は、破壊域の装薬間隔を1.5mの千鳥配置として4段設置した。

爆破後の雪崩誘発状況は、ケース1では装薬域の積雪11m³が爆破により流下し雪崩が発生した。ケース2、ケース3では、爆破による雪崩は発生しなかった。

当初予想では、ケース2において雪崩誘発が可能と考えており異なる結果となってしまった。その影響について始動領域の装薬地点について詳細に調査を行い図6に示す掘削断面図のように、爆破後にみられる爆破孔跡の形状から積雪の流下が抑えられていると考えられた。

2) 3)

この結果、破壊域の装薬間隔を狭くする方法や装薬段数を増加させる方法より、始動領域の装薬によるすべり面形成が雪崩誘発に大きく寄与すると考えられた^{4) 5)}。しかし、この始動領域の装薬基準及び装薬方法による雪崩誘発への影響は今まで検討されてこなかったため、2005年3月に始動領域の装薬方法による雪崩誘発への影響についての実験を行なった。

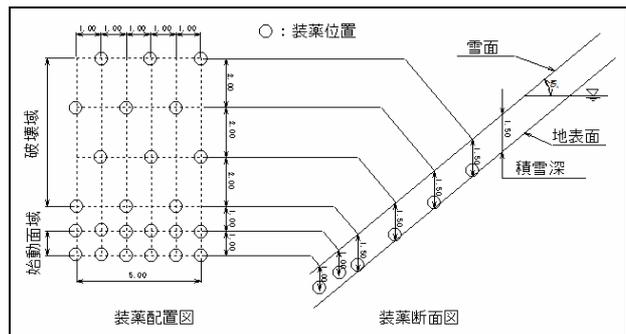


図3 ケース1装薬図 (2004年実験)

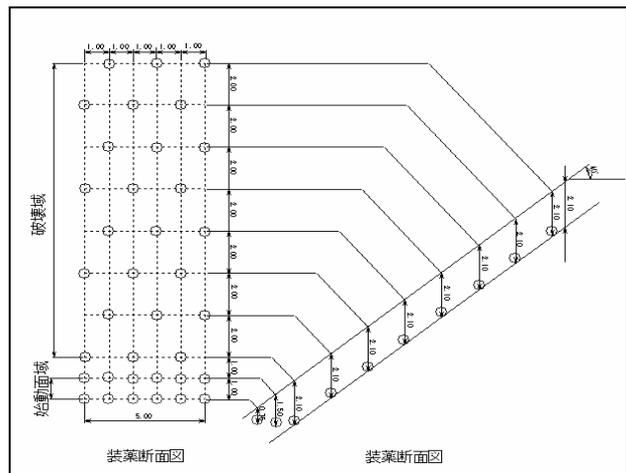


図4 ケース2装薬図 (2004年実験)

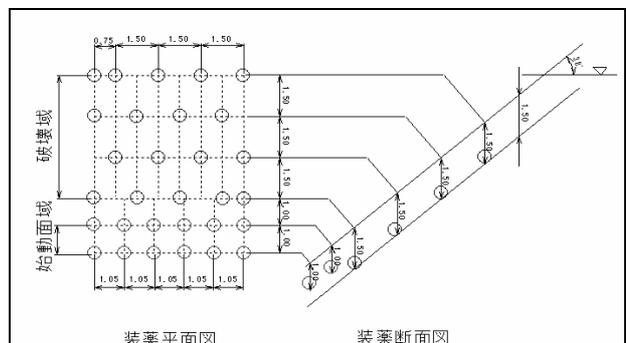


図5 ケース3装薬図 (2004年実験)

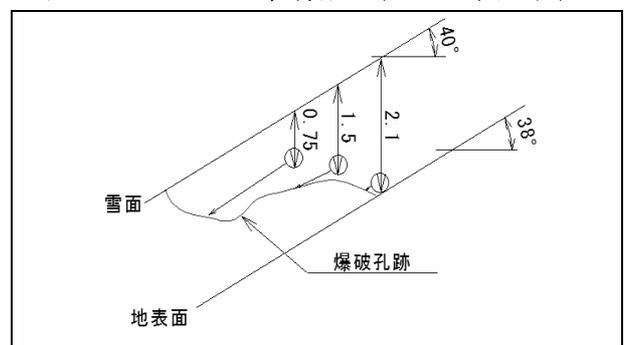


図6 ケース2掘削断面図 (2004年実験)

2-4. 始動領域の装薬方法の考案

今回考案した、始動領域における装薬方法は、爆破によって形成されるすべり面を滑らかな形状とするため、装薬時において人為的に角度をつける方法を取り入れることによって雪崩誘発がより良く行なわれると考えた。

装薬間隔は、これまでの実験結果と森末(1997)による破壊領域の算定式⁶⁾から装薬深 3m 以内で 1 孔 300g のチタ・マイトを積雪層中で爆発させると、その破壊孔半径は 50cm 以上となることが分かっている。よって、装薬間隔を 1m にすることにより破壊孔を連続的に作成することにより、すべり面を連続した面状に作成させる。さらに、装薬深が深くなるような場合はこれと同様な方法で、まず装薬深から爆破孔半径を算出し、爆破孔半径の 2 倍以内の装薬間隔で設置するものとした。

装薬深については、図 7 に示すように破壊域最下段の装薬位置を基点とし、そこから任意に角度を決定する。よって、始動領域での各装薬点の装薬深は、既知である基準装薬点の装薬深(積雪深)と斜度によって(1)式、(2)式から算出することが出来る。また、装薬深が浅くなりすぎると爆破の影響が少なくなるため、過去の実験結果から装薬深が 0.8m 以下の場合には装薬を行なわない。

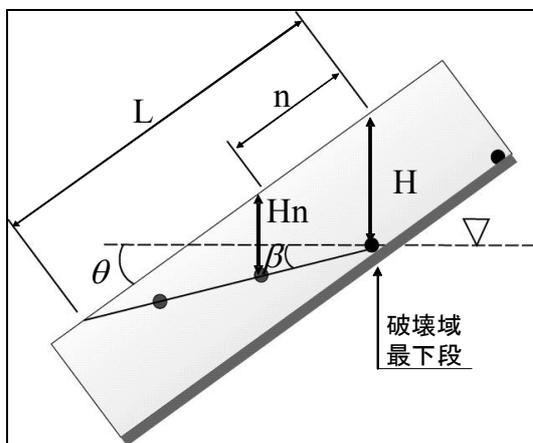


図 7 始動領域装薬方法

$$L = \frac{\cos \beta}{\sin(\theta - \beta)} H_s \quad (1)$$

$$H_n = \frac{L - n}{L} H_s \quad (2)$$

H:装薬深(積雪深) θ :斜度 n:装薬間隔

β :装薬傾斜角度 L:算出斜面長

Hn:始動領域の装薬深

2-5. 2005 年 3 月実験

2005 年 3 月実験では、「2-4」で述べた始動領域の装薬方法の検証ならびに雪崩誘発への影響を調べるため、破壊域の装薬方法は変えず、始動領域の装薬方法が異なる 2 ケースの実験を行なった。また、ケース 1、ケース 2 とも斜面の影響を最小限にするため同斜面で同時に爆破した。装薬箇所は斜面積雪深は 3.0m で斜度 45°であった。

図 8 に 2005 年 3 月実験ケース 1 の装薬図、図 9 にケース 2 の装薬図を示す。始動領域の装薬方法としては、破壊域装薬の最下段を基準点として、ケース 1 では基準点から水平線上に装薬を行い、ケース 2 では予め角度をつけて装薬を行なうため、基準点から 15°の斜線上に装薬を行った。

図 10 に示すように、両ケースにおいて爆破により雪崩が発生した。しかし、ケース 1 では 11m³ の雪塊が始動領域に流下せず残っており、ケース 2 では 1m³ のみであった。

図 11 図 12 にケース 2 の断面状況を示す。図 11 図 12 において、積雪層中に黒い爆破孔跡が見取れ、その上部がすべり面となり雪崩が流下したことが分かった。また、すべり面の形状は、ケース 1、ケース 2 ではまったく異なった形状をしている。この形状については測量を行なっており、この結果から爆破後のケース

1、ケース2の掘削断面図を図13、図14に示す。爆破後の始動領域における掘削断面調査の結果、ケース1では、始動領域の装薬最上段地点にできたすべり面斜度が平均 6° であり、ケース2では平均斜度 22° となった。

この結果から、本研究においては、 15° の斜線上に装薬したケース2において所定の目的を十分に満足する結果を得ることが出来た。よって、計画段階において始動領域の装薬においてあらかじめ角度をつける装薬方法は、なめらかなすべり面形成を行なうことが出来ることから雪崩誘発に有効な手法であることが言える。

また、すべり面の形状は、装薬時の形状を反映するため、始動面装薬時においては、計画通り装薬することが重要であり、今回考案した始動領域の装薬方法は、有効な手法と考えられる。
7)8)

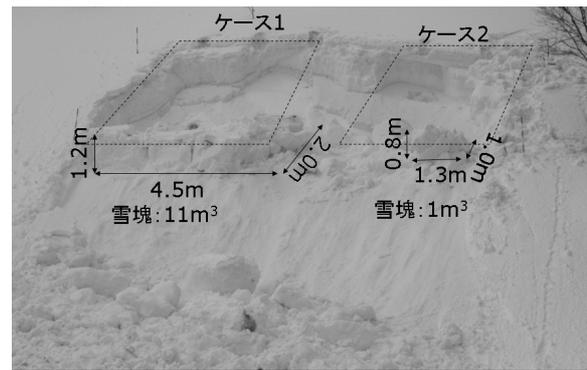


図10 2005年実験爆破後の状況



図11 ケース1の掘削断面状況



図12 ケース2の掘削断面状況

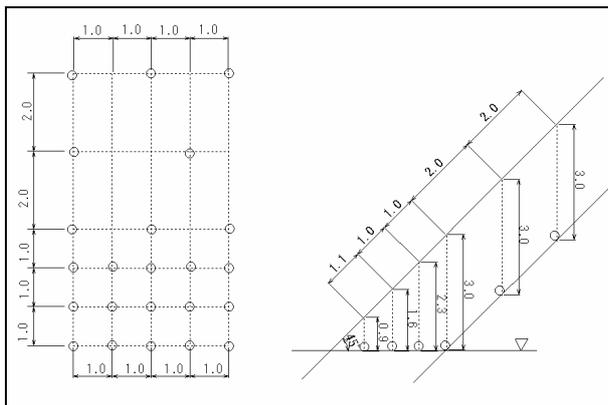


図8 2005年実験ケース1装薬図

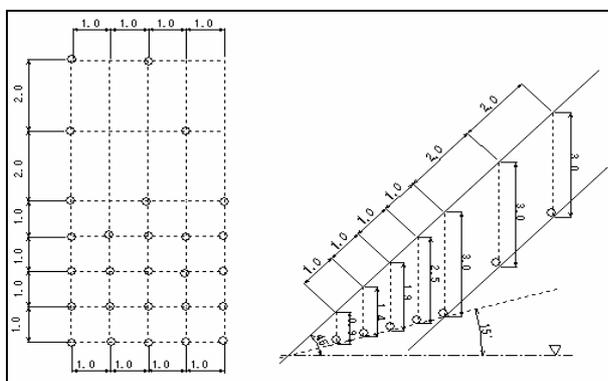


図9 2005年実験ケース2装薬図

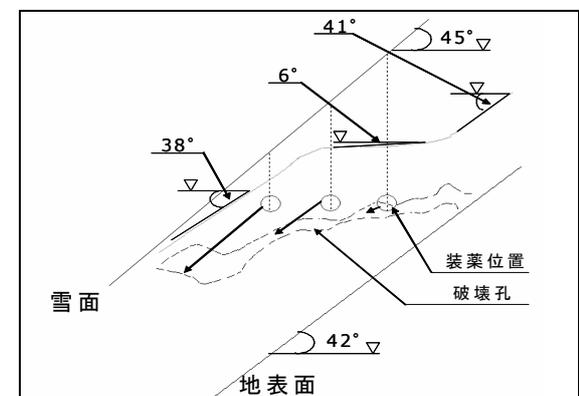


図13 2005年実験ケース1の掘削断面図

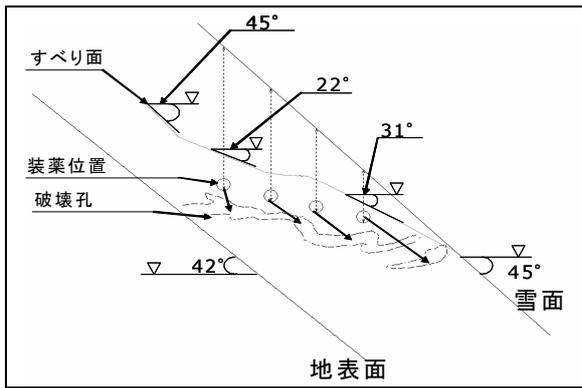


図 14 2005 年実験ケース 2 の掘削断面図

3. 安全率による装薬方法の検討

不均質な土構造物からなる斜面が崩壊する場合においての、斜面安全率の計算式であるビショップ法を人工雪崩誘発実験に適応し装薬方法による雪崩誘発条件について検討を行なった。ビショップ法は、不均一なすべり面を分割片ごとに計算を行うことが出来るため、人工雪崩誘発実験における装薬形状をすべり面と仮定して計算を行なった。⁹⁾

使用した計算式は、(3)式と(4)式を用いている。爆破前後の変数としては、(3)式における爆破後の面積 A の値が、爆破孔が出来ることによって減少し安全率が変動することを考慮している。この安全率の爆破前後の減少割合から人工雪崩誘発における境界値を今回導いた。

また、この計算式においては、粘着力および内部摩擦角については、過去の実験結果を基に検討し今回は、粘着力を 0.15 kN/m²、内部摩擦角を 40° の一定値を用いた。

$$F = \frac{\sum [(W \tan \phi + cA) / m]}{\sum W \tan \theta} \quad (3)$$

$$m = \left(1 + \frac{\tan \theta \tan \phi}{F} \right) \cos^2 \theta \quad (4)$$

F = 安全率 W = 積雪重量 φ = 内部摩擦角

c = 粘着力 b = 面積 θ = 斜度

今回の計算に用いた実験ケースは、11 ケースである。

安全率の計算結果の分布を図 15 示す。この結果から、2004 年 3 月実験におけるケース 3 において、他と大きく異なる値を示した。この実験は、他の実験より装薬域の装薬間隔を狭くして行っており、爆破後の面積の減少が大きくなってしまったため今回の計算式においては傾向が異なる結果となってしまった。

しかし、2004 年 3 月実験ケース 3 以外においては 0.84 から 0.88 の間に雪崩誘発の境界値があることが分かった。よって、計画段階においては、0.84 以下となるような装薬方法が雪崩誘発可能な条件であることが分かった。

また、さらに精度を向上させることによって、計画段階の装薬方法について雪崩誘発の成否を高い確率で判断することも可能と考えられる。それには、実験時における雪の粘着力や内部摩擦角などの雪質条件の検討を行なうことにより精度の向上を行なう必要があると考えられた。

表 1 計算に用いた実験ケース

実験日	条件	実験番号	積雪深 (cm)	雪面角度	地面角度	破壊域装薬方法	雪崩誘発有無
2001年3月22日		2001①	240	40	38	2m千鳥配置	○
2002年3月20日		2002①	150	40	44	2m千鳥配置	○
2002年3月20日		2002②	150	45	42	2m千鳥配置	○
2004年2月1日～3日		2004.2①	240	40	34	2m千鳥配置	×
2004年2月1日～3日		2004.2④	240	40	44	2.5m千鳥配置	×
2004年2月1日～3日		2004.2⑤	240	38	37	横:2.5m 縦:6m	×
2004年3月23日		2004.3①	150	40	40	2m千鳥配置	○
2004年3月23日		2004.3②	210	40	44	2m千鳥配置	×
2004年3月23日		2004.3③	150	40	38	1.5m千鳥配置	×
2005年3月29日		2005.3①	300	45	42	2m千鳥配置	○
2005年3月29日		2005.3①	300	45	42	2m千鳥配置	○

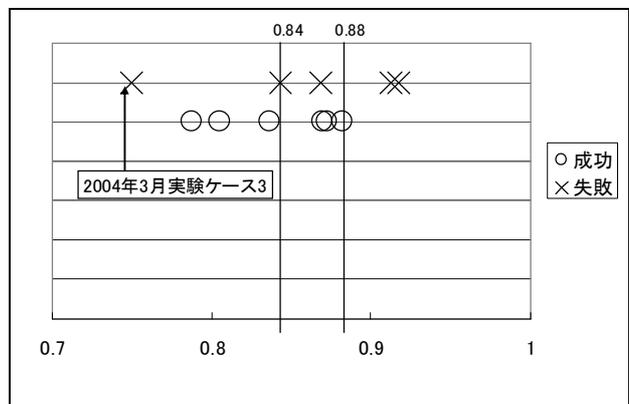


図 15 爆破前後の安全率の比

4. まとめ

破壊域の装薬間隔および装薬段数を著しく増加させても、雪崩誘発には有効性を見出すことが出来なかった。また、雪崩を誘発することのできなかった実験ケースにおける断面掘削調査を行った結果、すべり面が滑らかに形成されずに、積雪の流下を抑制するような形状になっていたことが判明した。この原因としては、始動領域の装薬方法に問題があるとされた。しかし、これまでは始動領域の装薬方法は、経験的手法で行われており、装薬基準が無く、そのつど異なった装薬方法で行われてきた。さらに、始動面に着目した雪崩誘発実験はこれまで行われてこなかった。

今回は、新たに始動領域の装薬方法について装薬基準を設け、既知である装薬深（積雪深）と斜度から始動領域の装薬深を決定できる方法を考案した。さらに、基準点となる破壊域最下段の装薬点から任意の角度の斜線上に装薬を行なうようにした。

考案した方法において実験を行い、基準点から 15° の斜線上に装薬した場合、所定の目的を十分に満足する結果を得た。さらに、雪崩発生後の装薬域において断面掘削を行い、詳細観測を行った結果、 15° の斜線上に装薬を行なったケースにおいて、なめらかなすべり面が形成されていたことを確認した。このことから、考案した装薬方法において予め角度をつけることが雪崩誘発において有効性が非常に高いと言える。

また、計画段階の装薬方法から雪崩誘発条件の検討を行なうため、斜面安全率の計算式を雪に応用して計算を行なった。計算には、過去の実験結果を含めて 11 ケースを用いた。この計算を行なった結果、装薬間隔が他と比べ密な 1 ケースを除くと爆破前後の安全率の比が 0.84 から 0.88 の間に雪崩発生の境界値があり、0.84 以下ならば雪崩が発生すると言う計算結果を得ることができた。

5. 参考文献

- 1) 日本火薬工業会資料編集部 (2001) : 一般火薬学. 日本火薬工業会, 26-79 81-105 228-243
- 2) 町田誠 川田邦夫 早川典生 町田敬 林徹 (2004) : 雪中爆破による人工雪崩誘発実験. 雪氷北信越 第 24 号, 57
- 3) 町田誠 早川典生 川田邦夫 町田敬 林徹 (2004) : 2004 年雪中爆破による人工雪崩誘発実験 (1). 2004 年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集, 212
- 4) 町田敬 町田誠 早川典生 川田邦夫 (2004) : 2004 年雪中爆破による人工雪崩誘発実験 (2). 2004 年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集, 213
- 5) 町田敬 町田誠 早川典生 川田邦夫 (2004) : 人工雪崩誘発技術の実験的検討. 日本雪工学会誌 Vol.20 No20 大会論文特別号, 3-4
- 6) 森末晴男 (1997) : 雪崩対策のための雪中爆破と雪崩危険度の推定に関する研究. 長岡技術科学大学提出学位論文, 63-103
- 7) 町田敬 陸旻皎 町田誠 早川典生 川田邦夫 (2005) : 人工雪崩誘発における雪中爆破による始動面形成法. 雪氷北信越 第 25, 49
- 8) 町田敬 陸旻皎 町田誠 早川典生 川田邦夫 (2005) : 雪中爆破による人工雪崩誘発実験における始動面装薬方法. 2005 年度日本雪氷学会全国大会講演予稿集, 184
- 9) 河上房義 (1999) : 土質力学 (第 6 版). 森山出版, 165-186