

高含水雪の力学的性質

江崎泰秀*・丹 政孝*・和泉 薫**・小林俊一**

Mechanical Properties of High Water Content Snow

by

Yasuhide EZAKI, Masataka TAN, Kaoru IZUMI and Shun'ichi KOBAYASHI

(Abstract)

High water content snow (slush) exist at boundary on roof and snow, and on ground and snow cover. The roof snow avalanches and whole depth snow avalanches were caused by those high water content snow. Therefore it is a very important to understand the mechanical properties of the high water content snow for prevention of those disasters.

Compression tests by tapping and uni-axis compression tests were carried out to know some mechanical properties of the high water content snow in a cold room of a constant temperature, 0°C. For tapping tests the volume reduction rates by compression were decreased with the increasing the water content up to saturate by water, after saturating the reduction rates reached to a constant. On the other hand, from uni-axis compression tests the breaking strength and the compressive viscosity were discussed. The breaking strength and compressive viscosity were rapidly decreased with the increasing the water contents.

The snow showed a visco-elastic property up to water saturated and showed a plastic property after water saturated.

Key words : Slush, Tapping test, Uni-axis compression, high water content, compressive viscosity

キーワード : 雪泥, タッピング試験, 一軸圧縮, 高含水雪, 圧縮粘性係数

はじめに

新潟県は日本でも有数の豪雪地帯であり, とりわけ積雪の特性としては, 密度が大きい湿雪である。通常の積雪の含水率は高々20%前後であるが, 積雪下層に不透水面があるとその面上の雪は水で飽和した高含水雪となって強度が著しく低下する。例えば, 屋根上の積雪は, 屋根材と屋根雪の界面で高含水雪となり屋根雪なだれが発生して危険である。また新潟県下では, 融雪期には小河川でも水で飽和した雪(雪泥: slush)による鉄砲水が発生し災害をもたらす(小出, 1981; 小林他, 1991)。このような高含水雪の力学的特性に関しては, まだ不明な点が多く研究は少ないのが現状である。

水に浸った雪の粒子は粗大化して丸味をおび結合点も少なくなっていく点は, すでに若浜(1965),

* 新潟大学工学部土木工学科平成2年度卒研生

** 新潟大学積雪地域災害研究センター

対馬 (1978), 対馬・Raymond (1979), Tusima (1985) 等による研究によって明らかにされている。しかし、そのような雪の力学的強度を調べた研究は、木下 (1963), 小林俊市 (1985), IZUMI (1987) の例のように少ない。前者の二つの研究は 0℃ の水に浸した雪の強度を調べたものである。そこで著者等は、乾き雪から水で飽和させた雪まで含水量を変化させながら雪の強度をタッピング圧縮と一軸圧縮の二つの方法で調べたのでその結果について報告する。

II 実験方法

II-1. タッピング圧縮

積雪のタッピング圧縮については、水野・黒岩 (1966) によって詳しく報告されているが乾き雪が主であった。本報告の高含水雪のタッピング圧縮についても同じ手法で行った。実験装置を写真-1と図-1に示した。タッピングは手動のハンドルを回転させると同一回転軸に二つのカムが回転し、各々のカム上には内径64.8mm、高さ130mmの亚克力製雪試料用のサンプラーが載せてあり上下に落下振動する仕組みになっており、サンプラー内の雪はその都度圧縮され体積が減少し雪の密度が増加する。二つのカムの高さは図-1に示したごとく38mmと18mmである。

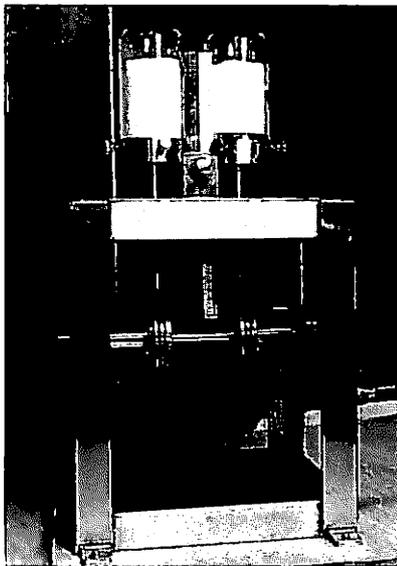


写真-1 手動タッピング装置
Phot. 1 Equipment of tapping.

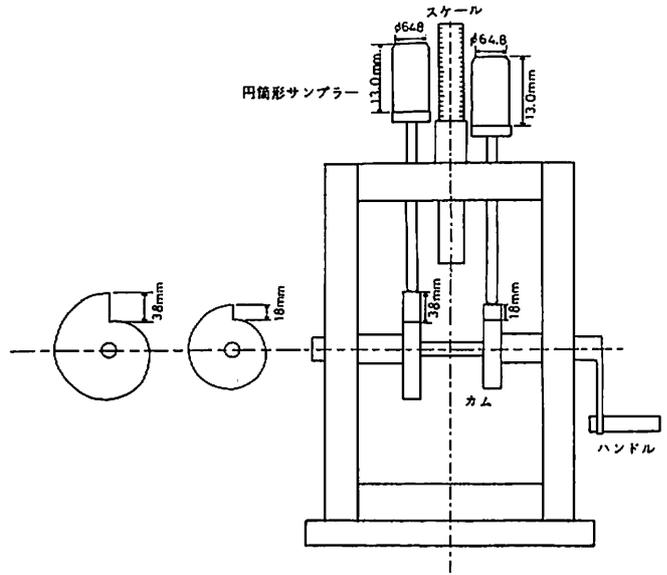


図-1 手動タッピング装置の概略図
Fig. 1 Schematically diagram of equipment.

タッピング回数 N の体積 V_N とタッピング開始前の初期体積 V_0 とすると、かさべり度 (体積歪) γ は次の(1)式のごとく定義される。

$$\gamma = \frac{V_0 - V_N}{V_0} \quad (1)$$

円筒内の雪粒子はタッピング毎に圧縮され体積を減少させるが、 N の増加と共にやがて一定値 V_∞ に近づく。この時のかさべり度を最終かさべり度 γ_∞ と呼び(2)式のように構造係数 a を定義する。

$$\gamma_{\infty} = \frac{V_0 - V_{\infty}}{V_0} = a \quad (2)$$

更に、初期体積 V_0 と最終体積 V_{∞} の和の $1/2$ に至るタッピング回数を N_i とし、(3)式のような構造係数 b を定義する (図-2 参照)。

$$b = \frac{1}{N_i} \quad (3)$$

構造係数 a は、圧縮され易さを示す圧縮率を意味し、構造係数 b は充填速度係数と呼ばれ雪粒子の充填のされ易さを意味する。かさぶり度 γ とタッピング回数 N との間には、次の(4)式の関係が経験的に成り立つことが川北 (1964 a, b) によっていろいろな粉体で実証されているので、 a 、 b はそれぞれ粉体についての特有な数値である。

$$\gamma = \frac{a \cdot b N}{1 + b N} \quad (4)$$

(4)式において、 $N \rightarrow \infty$ とすれば $\gamma \rightarrow a$ となり(2)式に一致する。また(1)、(2)式の関係(4)式に代入すると、 b は(5)式ようになる。

$$b = \frac{(V_0 - V_N)}{N (V_N - V_{\infty})} \quad (5)$$

そして N_i の時には $V_0 - V_N = V_N - V_{\infty}$ であるから、(5)式は(3)式に一致する。これらの関係は図-2のごとくであり、更に(4)式を変形すると次の(6)式となる。

$$\frac{N}{\gamma} = \frac{1}{ab} + \left(\frac{1}{a}\right) N \quad (6)$$

(6)式は図-3のごとく関係で表され $\frac{N}{\gamma}$ と N の間には直線関係が成り立ち、その直線の勾配と $\frac{N}{\gamma}$ 軸の切片から構造係数 a 、 b を決定することができる。

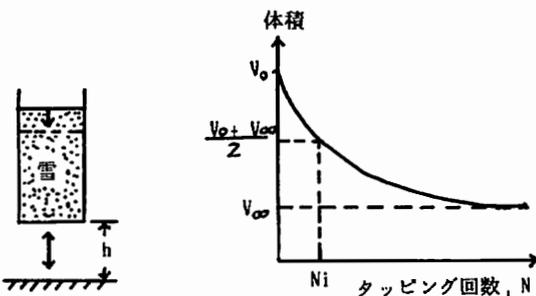


図-2 タッピング圧縮の模式図
Fig. 2 Schematically diagram of tapping.

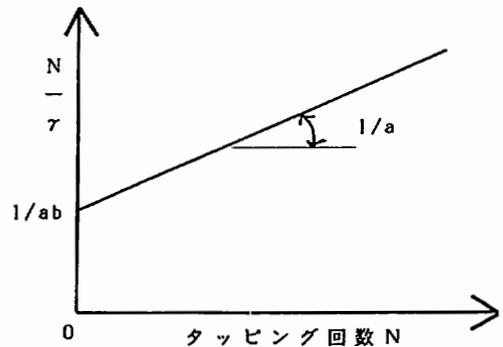


図-3 $\frac{N}{\gamma}$ と N の(6)式の関係から構造係数 a 、 b を決定する模式図

Fig. 3 Schematically diagram of a relation between $\frac{N}{\gamma}$ and N .

II-2. 一軸圧縮

圧縮試験は2通りの方法がある。試料に一定荷重を加えて時間-歪曲線を得るクリープ試験と一定速度で圧縮して反抗力-歪曲線を得る定速度圧縮試験である。前者は積雪の組織を破壊せぬように小さな荷重で長時間にわたりおこなう試験であり、後者は短かい時間で大きな変形を与え圧密とともに大きな反抗力が発生する。本研究では後者の実験について行った。この試験では、塑性変形と破壊変形が生ずる可能性があり、それは歪速度と温度に依存する。その境界値は0℃の温度で10mm/min前後であった。

用いた一軸圧縮試験機は低温室に納められたTCM-5000CR型万能引張圧縮試験機(ミネベア株式会社製)である。雪試料の大きさはおおむね直径64.8mm、高さ131mmの円柱で、0℃の水を含ませて種々の含水比の試料で実験を行った。その際に、実験中、注入した水が試料から浸みでることのないように実験の範囲を限定した。圧縮速度は2mm/minに固定して行った。その様子を写真-2に示す。

実験からは主として反抗力と圧縮粘性係数を求めた。また、圧縮歪が15%の時点での反抗力を圧縮強度とすることにした。圧縮粘性係数については次の(7)式から求めた。

$$\eta = \sigma \rho / (d\rho/dt) \quad (7)$$

ここで σ は圧縮応力(kg/m²)、 ρ は雪の密度(kg/m³)、 t は圧縮時間(sec)である。

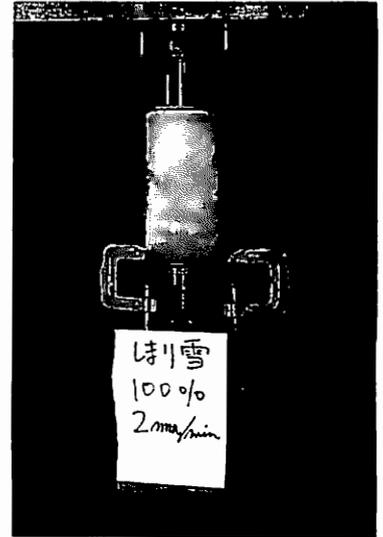


写真-2 しり雪の一軸圧縮試験状況
(圧縮速度2mm/min, 含水比100%)
Phot. 2 Uni-axis compression test.
(compression speed:2mm/min; weight ratio of water/snow:100%)

III 実験結果

III-1. タッピング圧縮の実験結果

用いた雪試料と実験条件は表-1に示す。表中の温度は雪の保存時の温度でその時の乾き密度も掲げている。含水比は加えた0℃の水と雪の質量の比を百分率で表したもので、高さはタッピング高さのことである。実験は全て0℃で制御された低温室の中で行われた。

表-1 タッピング圧縮試験に用いた雪試料
Table 1 Snow samples used in tapping test.

	温度 (℃)	乾き密度 (kg/m ³)	高さ (mm)	含水比 (%)
A: 新雪	-10	119	18	0, 50, 100, 150, 200, 220
		119	38	0, 50, 100, 150, 180, 200
B: しり雪	-10	218	18	0, 50, 75, 100, 125, 150
		218	38	0, 50, 75, 100, 125, 150
C: ざらめ	0	417	38	0, 25, 50, 75, 100
D: 雪	-10	429	38	0, 25, 40, 50, 60, 75
E: しもざら	0	383	38	0, 25, 40, 50, 62.5, 75
F: め雪	-10	392	38	0, 25, 50, 63, 70, 75

(1) 新雪の場合

新雪の場合について体積の減少を密度の増加とタッピング回数との関係になおした図を示すと図-4 (a), (b)のごとくなる。(a)は落下高さ38mm, (b)は18mmの場合である。いずれも含水比を変えた場合の結果を示してあり, 含水比が増加するにつれ初期密度も大きくなり圧密が急に進む。これらの結果を $\frac{N}{\gamma}$ と N との関係で示すと図-5 (a), (b)のごとく(6)式の直線関係が満足される。図の傾きは充填のされ易さを示し, 傾きが大きいほど充填されにくい。たて軸の切片は充填速度を意味しその値が大きいほど充填速度は遅い。これらのグラフから新雪の場合のタッピング圧縮による構造係数 a, b の値をまとめると表-2のごとくである。

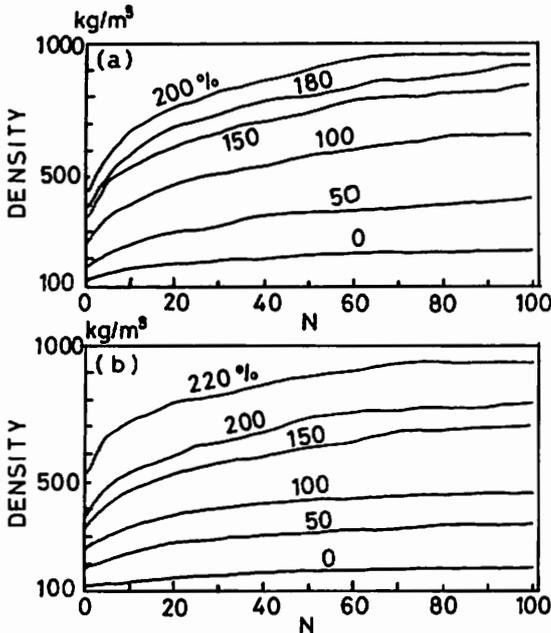


図-4 タッピング回数と密度の増加
(新雪の場合)
(a) 落下高さ38mm ; (b) 落下高さ18mm

Fig. 4 The relation of snow density to tapping number (new snow).
(a):h=38mm, (b):h=18mm

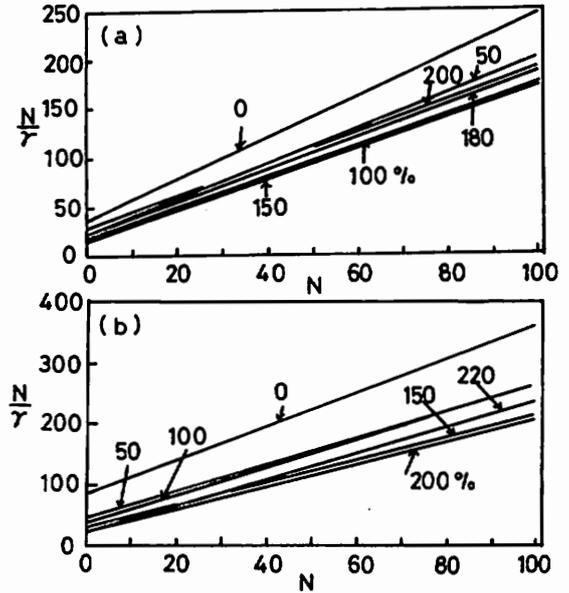


図-5 $\frac{N}{\gamma}$ と N の関係 (新雪の場合)
(a) 落下高さ38mm ; (b) 落下高さ18mm

Fig. 5 The relation of $\frac{N}{\gamma}$ to tapping number N (new snow).
(a):h=38mm, (b):h=18mm

表-2 新雪の構造係数

Table 2 Numerical constants a and b (new snow).

含水比 %	0		50		100		150		180		200		220
落下高さmm	18	38	18	38	18	38	18	38	38	38	18	38	18
V_0 cm ³	428.5	428.5	428.5	428.5	431.8	425.2	431.8	431.8	418.6	421.9	426.9	408.7	
V_∞ cm ³	273.6	224.1	230.7	171.4	240.6	158.2	201.1	161.5	168.1	194.5	187.9	220.8	
a	0.36	0.48	0.46	0.60	0.44	0.63	0.53	0.63	0.60	0.54	0.55	0.46	
b	0.032	0.059	0.047	0.063	0.060	0.096	0.064	0.114	0.081	0.083	0.085	0.102	

(2) しまり雪の場合

新雪に比較してその形状が単純なしまり雪は圧縮され易いと考えられるが、空隙率については新雪よりもしまり雪が小さいために単純比較することはできない。そのためここには実験結果を示す。タッピング回数増加に伴う密度の増加を示した結果が図-6(a), (b)で、 $\frac{N}{\gamma}$ と N の関係が図-7(a), (b)である。図の(a), (b)はおのおのタッピング高さ38mmと18mmの場合である。密度の増加のグラフからは圧縮充填されにくいように見えるが $\frac{N}{\gamma}$ の勾配は新雪の場合に比べてゆるやかで充填されやすい。しかし $\frac{N}{\gamma}$ の切片の絶対値は大きいので充填速度は遅い。形状が単純なので相対的には動き易いが、空隙率が小さいので最終かさぶり度は小さい。同様にしまり雪の構造係数を表-3に掲げた。

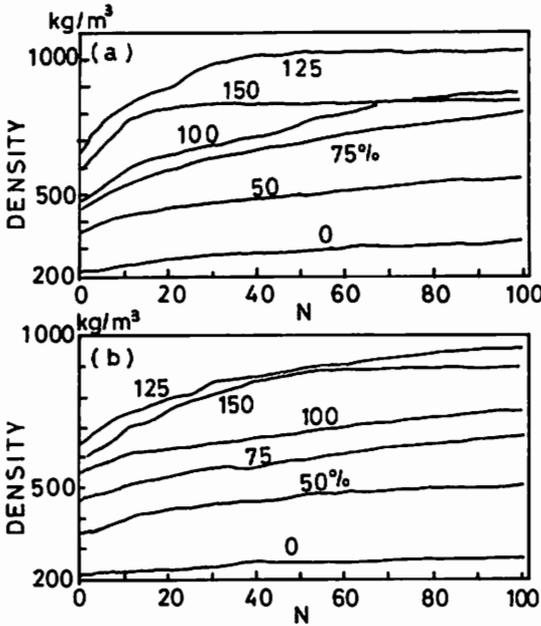


図-6 タッピング回数と密度の増加
(しまり雪の場合)
(a) 落下高さ38mm, (b) 落下高さ18mm

Fig. 6 The relation of snow density to tapping number (compacted snow).
(a):h=38mm, (b):h=18mm

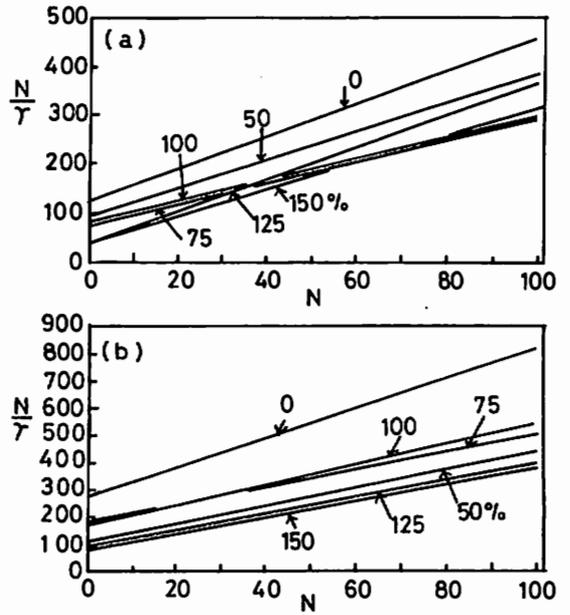


図-7 $\frac{N}{\gamma}$ と N の関係 (しまり雪の場合)
(a) 落下高さ38mm, (b) 落下高さ18mm

Fig. 7 The relation of $\frac{N}{\gamma}$ to tapping number N (compacted snow).
(a):h=38mm, (b):h=18mm

表-3 しまり雪の構造係数
Table 3 Numerical constants a and b (compacted snow).

含水比%	0		50		75		100		125		150	
落下高さmm	18	38	18	38	18	38	18	38	18	38	18	38
V_0 cm ³	431.8	431.8	431.8	431.8	435.1	435.1	431.8	431.8	425.2	421.9	431.8	431.8
V_∞ cm ³	352.7	303.3	303.3	283.5	300.0	240.6	316.4	234.0	286.8	267.0	286.8	300.0
a	0.18	0.30	0.30	0.34	0.31	0.45	0.27	0.46	0.33	0.37	0.34	0.31
b	0.020	0.028	0.032	0.032	0.017	0.032	0.022	0.027	0.033	0.069	0.036	0.088

(3) ざらめ雪およびしもざらめ雪の場合

ざらめ雪としもざらめ雪については、ほとんどタッピング落下高さ38mmについておこなった。また雪も-10℃に保存したものについてもおこなった。構造係数の結果のみを表-4と表-5に掲げた。

表-4 ざらめ雪の構造係数
Table 4 Numerical constants a and b (granular snow).

含水比 %	0						25						50						75						100					
	0	18	38	38	38	38	0	18	38	38	38	38	0	18	38	38	38	38	0	18	38	38	38	38	0	18	38	38	38	38
V_0 cm ³	431.8	431.8	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5
V_∞ cm ³	392.3	356.0	346.1	313.1	352.7	408.7	398.8	346.1	336.2	309.8	332.9	339.5	398.8	346.1	336.2	309.8	332.9	339.5	398.8	346.1	336.2	309.8	332.9	339.5	398.8	346.1	336.2	309.8	332.9	339.5
a	0.09	0.18	0.19	0.27	0.18	0.05	0.07	0.19	0.22	0.28	0.22	0.21	0.07	0.19	0.22	0.28	0.22	0.21	0.07	0.19	0.22	0.28	0.22	0.21	0.07	0.19	0.22	0.28	0.22	0.21
b	0.022	0.018	0.026	0.031	0.100	0.022	0.016	0.018	0.025	0.021	0.026	0.088	0.016	0.018	0.025	0.021	0.026	0.088	0.016	0.018	0.025	0.021	0.026	0.088	0.016	0.018	0.025	0.021	0.026	0.088
	0℃保存						-10℃保存						-10℃保存						-10℃保存											

表-5 しもざらめ雪の構造係数
Table 5 Numerical constants a and b (depth hoar).

含水比 %	0						25						50						75											
	0	38	38	38	38	38	0	38	38	38	38	38	0	38	38	38	38	38	0	38	38	38	38	38	0	38	38	38	38	38
V_0 cm ³	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5	428.5
V_∞ cm ³	349.4	309.8	319.7	290.1	313.1	329.6	349.4	309.8	319.7	290.1	313.1	329.6	349.4	309.8	319.7	290.1	313.1	329.6	349.4	309.8	319.7	290.1	313.1	329.6	349.4	309.8	319.7	290.1	313.1	329.6
a	0.26	0.27	0.27	0.31	0.28	0.19	0.18	0.28	0.25	0.32	0.27	0.23	0.18	0.28	0.25	0.32	0.27	0.23	0.18	0.28	0.25	0.32	0.27	0.23	0.18	0.28	0.25	0.32	0.27	0.23
b	0.023	0.040	0.044	0.029	0.067	0.128	0.020	0.025	0.047	0.027	0.032	0.031	0.020	0.025	0.047	0.027	0.032	0.031	0.020	0.025	0.047	0.027	0.032	0.031	0.020	0.025	0.047	0.027	0.032	0.031
	0℃保存						-10℃保存						-10℃保存						-10℃保存											

III-2. 一軸圧縮の実験結果

実験は、新雪、しまり雪、ざらめ雪、しもざらめ雪について含水比を変えながらおこなった。試料の大きさを直径64.8mm、高さ131mmの円柱で、圧縮速度は一定の2mm/min（歪速度 2.54×10^{-4} /secに相当）でおこなった。そして圧縮量が30mmになった時点で圧縮を中止し応力が自然に緩和するまで100kgのロードセルで反抗力曲線をえがかせた。その一例を新雪の場合について図-8に示した。圧縮歪量が15%の時の反抗力を雪の圧縮強度として新雪としまり雪について含水比を変えた場合の測定結果を図-9(a), (b)に示す。含水すると急激に強度が減少することがわかる。横軸の密度はその時点のぬれ密度である。図中の数字は含水比を示す。含水比が増加するとぬれ密度が増加するが、含水比の大きな点で反抗力が少し増加するのは、圧縮に伴う水の非圧縮性の効果が表れたと思われる。また、圧縮粘性係数も(7)式の関係から、圧密の時間変化と反抗力、密度などから求められ、その結果を示すと図-10(a), (b)のごとくなる。含水比の増加と共に急に圧縮粘性係数は減少した。

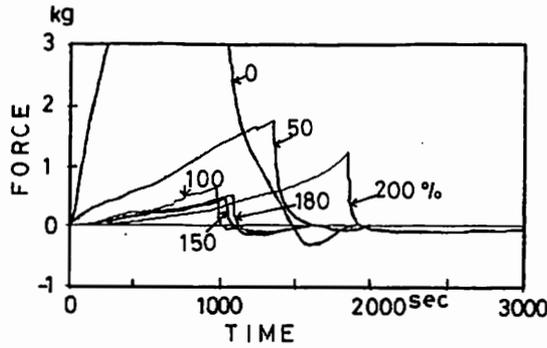


図-8 新雪の時間-反抗力曲線
Fig. 8 The relation of force to time (new snow).

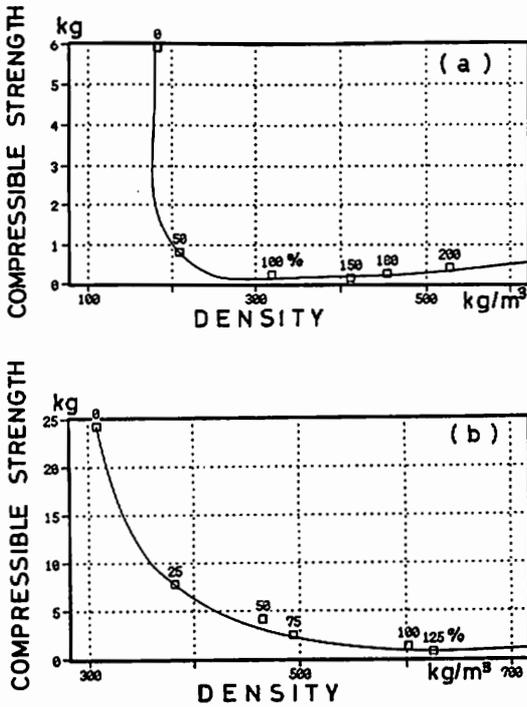


図-9 含水比を変えた場合の密度と圧縮強度の
関係
(a) 新雪, (b) しまり雪
Fig. 9 The relation of compressive strength
to snow density (□ ; weight ratio of
water/snow).
(a):new snow, (b):compacted snow

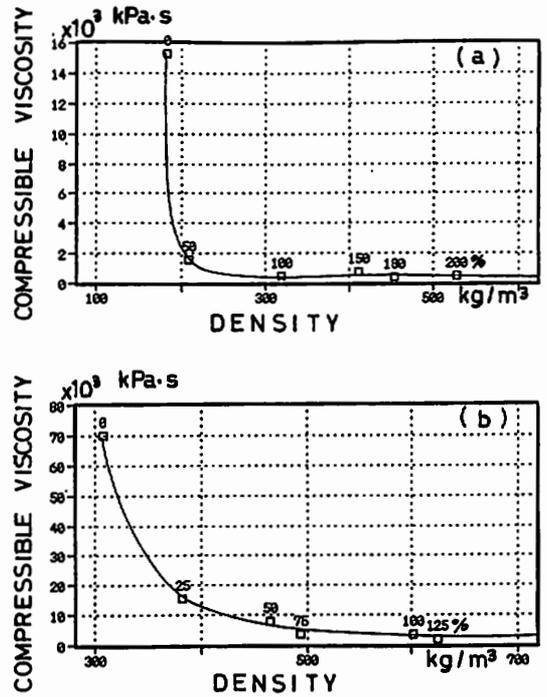


図-10 含水比を変えた場合の密度と圧縮粘性係
数の関係
(a) 新雪, (b) しまり雪
Fig. 10 The relation of compressive viscosity
to snow density (□ ; weight ratio of
water/snow).
(a):new snow, (b):compacted snow

IV 考 察

IV-1. タッピング圧縮の場合

タッピング圧縮実験は、これまで乾き雪について研究されてきた。含水比については、圧密に伴い空隙が減少し含水率が増加していく。高含水雪の場合には直ちに飽和含水率に達する。ここでは、実験開始前の初期含水比をパラメータに整理した。これまで乾き雪のタッピング圧縮から求められた構造係数の値と著者等の得た値と比較することは余り意味がない。この種の実験は装置の大きさや落下高さの違いによって結果も違う。したがって傾向のみを考察したい。

著者らの実験からは、次の点が明らかにされた。

- (1) 乾き密度が同じならば、含水比が大きいほど充填速度が大きくなる。これは、雪粒子の焼結力が低下したことによると考えられる。
- (2) 乾き密度が同じならば、含水比が大きいほど体積減少率は大きい。しかしある点までくると減少率は逆に小さくなる。これは、最初含水比が大きいと雪の流動性が増して圧縮され易いが、積雪の空隙が水で飽和されると水の非圧縮性のために圧縮がおさえられる。
- (3) 乾き密度が小さいほど圧縮され易い。すなわち、密度の小さな雪ほど空隙率が大きく圧縮され易い。したがって、新雪の場合が一番圧縮され易い。

IV-2. 一軸圧縮の場合

反抗力-時間曲線を表した図-8からもわかるように、いずれの雪質についても水を少し含んだだけで反抗力が急激に減少することがわかった。これは木下(1963)が0℃の水の中に浸した雪の圧縮実験を行った際に得た結果と一致する。圧縮粘性係数も含水比の増加と共に急に減少するが、一般には乾き雪の場合には密度の増加と共に粘性係数は指数関数的に増加することが知られている(小島, 1954)。高含水雪の場合の密度の増加は含水量の増加に伴うので乾き雪の場合と全く逆の傾向を示す。

V ま と め

高含水雪について、タッピング圧縮と一軸圧縮の実験をおこなった結果、共通の結論として以下の点が明らかにされた。

- (1) 積雪は、含水比を増すと、乾き雪に特有な粘弾性的性質を弱めて、塑性的あるいは流体的性質へと物性を変え力学的強度を弱める。
- (2) 積雪が水で飽和すると、水の非圧縮性の効果があらわれて圧縮強度が若干増加する。側圧がない場合には積雪の空隙に満たされた水は排出される。積雪が水で未飽和な状態では含水比が大きいほど圧縮され易い。
- (3) 積雪は乾き密度が大きいほど、含水させても体積歪は小さくなり、圧縮強度が大きくなる(雪質の違い)。

今後、積雪の構造と関連させて研究を進めることが重要である。本研究は平成2年度新潟大学工学部土木工学科の卒業研究として著者の中の江崎、丹が行ったものの一部を報告したものである。

文 献

- IZUMI, K. (1987) : Studies on the hardness of wet snow and its decrease due to solar radiation. 新潟大災害研年報, 9, 1-42.
- 木下誠一 (1963) : 0℃の水に浸した雪の圧縮 I. 低温科学, 物理篇, 21, 13-22.
- 川北公夫 (1964a) : 粉体の化学. 第1報粉体の圧縮. 法政大学工学部研究集報第1号, 17-31.
- (1964b) : 粉体の化学. 第3報粉体圧縮式の比較. 法政大学工学部研究集報第1号, 36-47.
- 小林俊市 (1985) : 水潤雪のベーンセン断強度 (I) - ベーンセン断強度と水潤時間の関係 -. 雪氷, 42-(2), 55-62.
- 小林俊一・和泉 薫・丸井英明 (1991) : 雪崩災害の予知・検知体制の現状と課題. 文部省科研成果報告書, 「災害情報伝達過程の迅速化に関する研究 (代表, 田崎篤郎)」, 44-64.
- 小出 崇 (1981) : 東頭城郡牧村に発生した鉄砲水. 56豪雪の記録, 土木学会新潟会, 96-102.
- 小島賢治 (1954) : 積雪の粘弾性. 低温科学, 物理篇, 12, 1-12.
- 水野悠紀子・黒岩大助 (1966) : 積雪粒子のタッピング圧縮. 低温科学, 物理篇, 24, 111-131.
- Tusima, K. (1985) : Grain coarsening of snow particles immersed in water and solutions. Annals of Glaciology, 6, 126-129.
- 対馬勝年 (1978) : 水に浸った雪の粗大化. 雪氷, 40-(4), 1-11.
- ・Raymond, C. F. (1979) : 水溶液中での雪の粗大化. 雪氷, 41-(2), 91-99.
- 若浜五郎 (1965) : 水を含んだ積雪の変態. 低温科学, 物理篇, 23, 51-66.