HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	湿雪の圧縮実験
Author(s)	大前, 宏和; 若浜, 五郎
Citation	低温科學. 物理篇, 39, 17-24
Issue Date	1981-03-18
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/18409
Type	departmental bulletin paper
File Information	39_p17-24.pdf

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

Hirokazu OHMAE and Gorow WAKAHAMA 1980 Compression Tests of Wet Snow.
Low Temperature Science, Ser. A, 39. (With English Summary p. 23)

湿雪の圧縮実験*

大前宏和
(北海道大学大学院 理学研究科)
若浜五郎
(低温科学研究所)

(昭和55年10月受理)

I. はじめに

積雪の力学的性質を調べるために，これまで，数多くの実験が種々の方法を用いて行なわれてきた[1~5]。たとえば，積雪の圧縮，引張，剪断実験が行なわれ，その強度が，雪の密度，粒径，温度あるいは，変形速度（歪速度）によって，どのように変るかなどが調べられてきた。しかし，これらの研究の大部分は温度が0°C以下の乾いた雪についてであって，水を含んで湿った雪については，従来ほとんど，研究された例がない[6~8]。北陸地方などの比較的温暖な地域につもる雪は，ほとんど常にとけて，水を含んでいるし，北海道のように比較的寒冷な地域でも春になると，雪はぬれる。もっと寒冷な地域の氷河源流部でも，真夏になると雪がとけて，水を含む。このように自然界での雪は多くの場合，水を含んでいるので，その力学的性質を調べることは，除雪，春先の全層雪崩，氷河源流部での雪の圧密などの問題を論ずる上で，きわめて，重要なことである。

そこで今回，いろいろな含水率をもつ湿雪について，定荷重圧縮実験を行ない，湿雪の流動特性を調べるとともに，定速度圧縮実験を行なって，破壊強度の含水率依存性を調べた。

II. 実験試料及び実験方法

1. 実験試料

実験試料は，自然状態に近くなるように考慮しつつ，以下のようにして作った。低温室（−10°C）に保存しておいた均質な積雪から，上面（25 cm×50 cm），高さ（25 cm）のブロックを切り出し，上面以外を断熱材で囲った後，0°C～+0.2°Cの低温室に持ち込む。やがて，積雪ブロックは上面から融け出し，融解水は積雪内部へ浸み込む。数時間ないし数日間放置することにより，積雪ブロックは種々の含水率を持つようになる。このように準備した積雪ブロックから，直径5 cm，長さ12.5 cm及び15 cmの積雪円柱を切り出し，実験に使用した。同時に積雪ブロックの含水率（α）を数回測定し，その平均値をもって試料の含水率とした。

2. 定荷重実験

湿雪の流動特性を明らかにするために定荷重実験を行なった。荷重は2.6 kg～40 kg（40 kg

* 北海道大学低温科学研究所業績 第2280号

の荷重は，万能試験機 TOM-10000 のクリープ装置を用いて加えた。）を加えた。上述した方法でつくった積雪円柱（直径 5 cm，長さ 12.5 cm）の表面にカーボン粉で 1 cm きざみのマークをつける。円柱の上面に，垂直に荷重がかかるようにガイドを通して錘りをのせ，1 分ないし数分ごとにカーボン・マークの変位を読み取り顕微鏡で読み取った。試料の昇華を防ぐためにビニールのおおいをつけ，また実験温度を 0°C に保つために，試料のまわりを氷と水の混合体で囲んだ。（実験室内温度は 0°C±0.2°C）

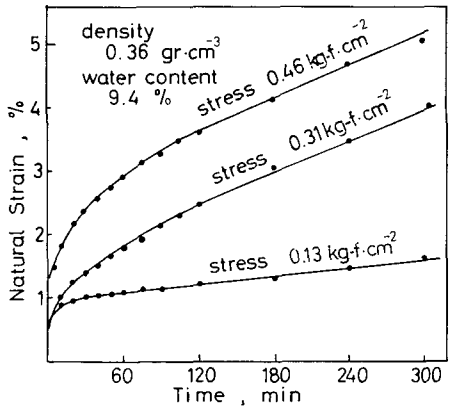
3. 定速度圧縮実験

湿雪が巨視的な破壊を起こす時の圧縮強度を求めるために，定速度一軸圧縮実験を行なった。実験は，低温室内（−8°C）に設置した恒温箱の中で行なった。恒温箱内の温度は，0°C±0.7°C に制御された。圧縮板と円柱試料（直径 5 cm，長さ 15 cm）の接触をよくし，かつ，圧縮中に試料端がすべらないようにするため，圧縮板と試料両端との間に薄い紙を挟んだ。実験終了後，この紙を調べてみると，ほとんどぬれていなかったので，試料から水がしみ出たり，両端で試料がとけることはなかったと考えられる。圧縮は，万能試験機（TOM-10000，新興通信社製）を用い，圧縮応力は，ロードセルを介して測定した。今回行なった積雪試料の含水率の範囲（0〜20%）では，圧縮速度（v）が 1〜2 mm/min ていどでは，雪は単に塑性的に縮むだけで巨視的な破壊はおこらなかった。v を 5 mm/min ていどにすると破壊が起ることもあれば，起らないこともあった。$v>10$ mm/min にすると，常に巨視的な破壊が起こった。そこで破壊強度を求めるために，圧縮速度として，10, 30 および 50 mm/min を選んで実験を行なった。

III. 実 験 結 果

1. クリープ曲線

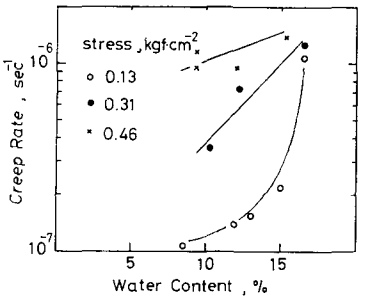
湿雪の定荷重実験を行なった結果，得られたクリープ曲線の例を第 1 図に示す。クリープ曲線は，瞬間歪，歪速度が時間とともに減少する遷移クリープ，歪速度が一定値に達した定常クリープの 3 つの部分から成ることがわかる。



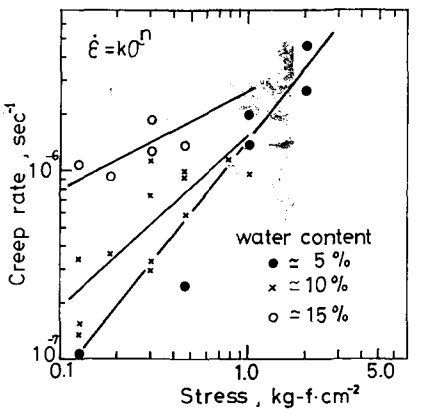
第 1 図 湿雪のクリープ曲線の例

2. 流 動 特 性

クリープ曲線中，定常クリープの部分から定常クリープ速度（以下便宜上「クリープ速度」と呼ぶ）を求めた。このクリープ速度と含水率の関係を示したのが第 2 図である。含水率の増加によってクリープ速度は急激に増大する。この増加率が，加えた圧縮応力によって異なることがわかる。そこで応力—クリープ速度の関係を，含水率 5% ていど，10% ていど，15% ていどの 3 つの群に分けて第 3 図の両対数グラフに示した。それぞれの含水率ごとに，クリープ速度の対数値と応力の対数値が，ほぼ比例関係にあることがわかる。そこで応力（σ）とクリープ速度（$\dot{\varepsilon}$）の関係は次のように書ける。



第2図　クリープ速度と含水率の関係
○；加えた応力 0.13 kg-f/cm²
●；〃　0.31 kg-f/cm²
×；〃　0.46 kg-f/cm²



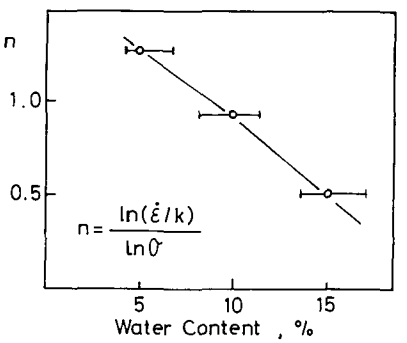
第3図　クリープ速度と応力との関係
●；含水率 5% ていど
×；含水率 10% ていど
○；含水率 15% ていど

$$\dot{\varepsilon} = k\sigma^n$$
$$k = k(\alpha)$$
$$n = n(\alpha)$$

実際には，k, n の値は，雪の温度，密度粒径などの関数であるが，ここでは，湿雪の温度は 0°C，密度を 0.36 g/cm³ に条件をそろえて行なったので，k, n は含水率 (α) だけの関係と考えてよいであろう。

第1表　n, k の値の含水率によるちがい

含水率	5%	10%	15%
n	1.27	0.97	0.51
k	1.56×10^{-4}	1.77×10^{-6}	2.59×10^{-6}



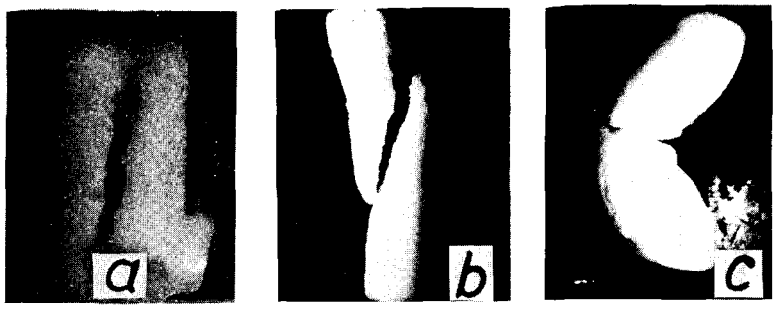
第4図　指数 n の含水率によるちがい

第4図あるいは第1表を見てわかるように，指数 n は，含水率の増加に伴なって減少している。今回試料として用いた典型的なしまり雪を，クリープ歪速度 $10^{-7}\,\mathrm{sec}^{-1}$ ていどで圧縮した場合，含水率が 10% 以下では，ほぼ $n\sim1$ で，ニュートン粘性体で湿雪を近似できるが，含水率が 15% ていどになると $n\sim0.5$ となり，ニュートン粘性体としては取りあつかえないことがわかる。ただし，密度，クリープ速度が異なる雪がニュートン粘性体として取りあつかえるか否かは，今後の課題として残されている[9~12]。

3. 破形形式，応力—歪曲線

湿雪の円柱を定速度で圧縮すると，円柱はやがて，縦に割れたり（縦割れ型），剪断的に割れたり（剪断型），座屈を起して（座屈型），破壊する 第5図 (a), (b), (c))。またこれらが複合した形式で破壊することもある。この他，試料上下端面から雪粒子が間欠的に飛び出しつつ破壊が進行する粉砕破壊も観察された。

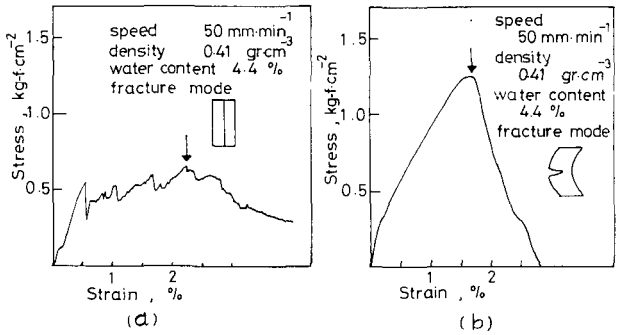
密度 0.41 g/cm³，含水率 4.4% の湿雪を 50 mm/min で圧縮したときに得られた応力—歪曲線の例を第6図 (a), (b) に示す。(a) は試料端面で雪粒子が飛び出しつつ，ついには全体が縦割



第5図 破壊形式の例
(a) 縦割れ型 (b) 剪断型 (c) 前屈型

れ破壊を起した例である。雪粒子が飛び出すたびに瞬間的な応力の減少を起しつつも，応力は次第増加し，最大応力に達したとき巨視的な破壊が起った。(b)は，最大応力に達してのち座屈を起し，ついには破壊した時の例である。

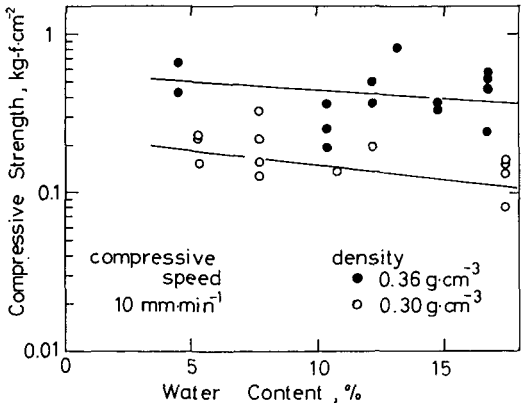
このようにして得られた最大応力をもって湿雪の圧縮強度とした。



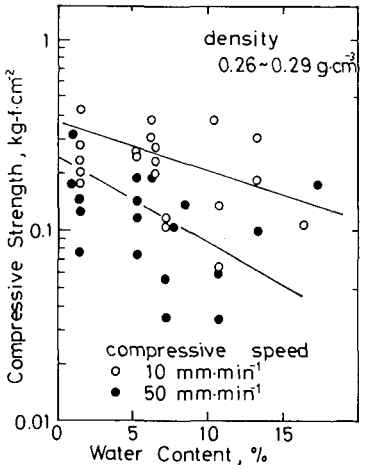
第6図 応力—歪曲線の例。密度 0.41 g/cm², 含水率 4.4%, 圧縮速度 50 mm/min, 矢印で巨視的な破壊を起した

4. 圧縮強度

第7図に圧縮速度 10 mm/min で定速度圧縮したときの圧縮強度と含水率との関係を初期の乾き密度をパラメーターとして示す。実験値はかなりばらついているが，強度は，含水率の増加に伴なって指数関数的に減少する傾向がみられる。



第7図 圧縮強度と含水率の関係。
パラメーターは初期密度
● ; 0.36 g/cm³ ○ ; 0.30 g/cm³



第8図 圧縮強度と含水率の関係。
パラメーターは圧縮速度
● ; 50 mm/min ○ ; 10 mm/min

第8図には，ほぼ同密度の湿雪（ρ_d；0.26～0.29 g/cm^3）の圧縮強度と含水率との関係を圧縮速度（v）をパラメーターとして示した。第7図と同様に，含水率が増加するにしたがって，強度が指数関数的に減少する傾向がみられる。含水率（α）15% ていどの湿雪の強度は，$\alpha=0$% の強度の 50% から 60% ていどに減少している。

また，圧縮速度が大きいほど，強度は小さく，含水率依存性が大きいことがわかる。

IV. 考　　察

積雪は，雪粒子が網目状に結びついた多孔性物質である。したがって，その変形形式や圧縮強度は，雪の密度はもちろん，雪粒子どうしの結合の仕方などを反映する。

第7図に示したように，同じていどの含水率の湿雪では初期密度が大きいほど，強度も大きい。

一方，第8図で，初期の乾き密度がほぼ同じであるにもかかわらず，圧縮速度 $v=10$ mm/min で圧縮した時の方が，$v=50$ mm/min で圧縮した時よりも強度が大きい。これは次のように説明できる。$v=10$ mm/min のときには，雪粒子が空隙を埋めるように圧密されて後に，巨視的な破壊が起る。すなわち，破壊時には，密度が大きくなって，そのために強度が大きくなるのである。ところが，$v=50$ mm/min のときには，圧密初期で，雪粒子の連結部が破壊し，再び連結状態が回復する間もなく，巨視的な破壊へと至るのである。目視観察によっても，$v=10$ mm/min のときには，全体としての圧密が進んでから巨視的な破壊を起し，$v=50$ mm/min のときには，ほとんど圧密されずに破壊が起ることが確かめられた。

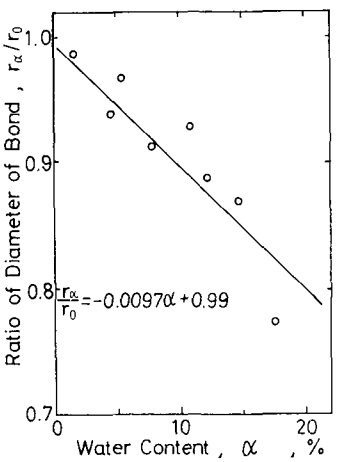
一方，圧縮強度は，含水率の増加とともに指数関数的に減少する傾向がある（第7図，第8図）。また，乾き雪の場合にくらべて，含水率が数 % のときでも，その強度は 20% ほど小さい。

このことは，積雪が水を含んだときに起る組織の変化すなわち，湿雪の変態が，積雪の力学的強度の低下の原因であることを示唆している。そこで，含水率の増加に伴なう雪粒子や雪粒子間の連結部の変化が，巨視的な変形や破壊にどのように関連しているかを調べた。

そのために，実験に使用した湿雪試料と，もとの乾いた積雪ブロックの試料の2つを，それぞれほぐして，雪粒子の顕微鏡写真をとり，粒度解析器を用いて，粒径及び連結部の直径を測定した。

その結果，試料の平均粒径は，含水率 0% の乾き雪の平均粒径よりも大きかった。また連結部の直径は小さかった。

含水率 α% のときの連結部の直径を r_α，$\alpha=0$% (乾き雪) のときの直径を r_0 とし，その比 r_α/r_0 を含水率の関数として示したのが第9図である。連結部の直径が含水率の増加とともに減少している。この回帰直線は，



第9図　連結部の直径と含水率の関係

r_α；含水率 α% のときの連結部の直径

r_0；含水率 0% (乾き雪) の連結部の直径

$$r_\alpha/r_0 = -0.0097\alpha + 0.99 \qquad (1)$$

と表わされる。第II章第1節で述べたようにして試料を作ったので，含水率 α は，$\alpha=0\%$ からその含水率になるまでの経過時間に比例すると考えることができる。すなわち，0°C の条件下で，湿雪は変態し，連結部の直径は時間とともに小さくなる。

積雪の巨視的な破壊は，雪粒子どうしの連結部が破壊することによって起ると考えられる。従って，破壊強度は，積雪内の破壊面に存在する連結部の数と直径に比例するであろう。そこで今，積雪内にある面を考え，その面をよぎる連結部の数を n 個，その直径を r_i とする。この面で破壊が起ったとすると，その時の強度 σ は，n, r_i および氷の破壊強度 σ_{ice} と

$$\sigma \propto \sigma_{ice} \sum_{i=1}^{n} r_i^2$$

なる関係がある。

(1) 式より，たとえば，含水率 $\alpha=15\%$ のときには

$$r_i\ (15\%) \sim 0.8\, r_i\ (0\%)$$

となる。したがって，σ_{ice}, n に変化がないとすると，

$$\sigma\ (15\%) \sim 0.6\sigma\ (0\%)$$

となる。

今回の実験において，前述したように，含水率 15% ていどでの強度は，$\alpha=0\%$ での強度の 50% から 60% ていどになっている。

このように，湿雪の強度が，含水率の増加とともに減少するのは，水を含んだことによる連結部の直径の減少で説明できる。

また第2図に示したように，含水率が増加すると，湿雪のクリープ速度が増加する事実も，水を含むことによって，連結部が細くなって変形しやすくなったためであると考えることができる。

V. ま と め

湿雪の力学的性質を調べるために，定荷重圧縮実験及び，定速度圧縮実験を行なった。今回の実験で使用した試料密度，歪速度の範囲では，定荷重実験の結果，湿雪の流動特性として，含水率 10% 以下のときにはニュートン粘性体として取りあつかえが，15% ていどになると，ニュートン粘性体としての取りあつかいができなくなることがわかった。また，圧縮破壊強度は乾き雪より 20% 以上も小さく，さらに含水率の増加とともに，指数関数的に減少する傾向のあることが見い出された。

このような，含水率の増加とともに，湿雪の圧縮破壊強度が減少したり，クリープ速度が，増大することは，雪が水を含むことによって，雪粒子間の連結部の太さが減少することによって説明できることがわかった。

本研究は筆者の一人，大前宏和が北海道大学大学院理学研究科修士課程地球物理学専攻の修了研究として行なったものである。

本研究を行なうに当って，応用物理学部門の方々から多くの助言をいただいた。ここに感謝の意を表します。

文　献

1) 木下誠一 1957 積雪における変形速度と二つの変形形式（塑性変形，破壊変形）との関係. 低温科学，物理篇，**16**, 139-166.
2) 木下誠一 1958 積雪における変形速度と変形形式との関係 II. 低温科学，物理篇，**17**, 11-30.
3) 木下誠一 1960 積雪における変形速度と変形形式との関係 III. 低温科学，物理篇，**19**, 135-146.
4) 遠藤八十一 1967 積雪円柱の圧縮破壊. 低温科学，物理篇，**25**, 63-72.
5) Brown, R. L. and Lang, T. E. 1974 On the fracture properties of snow. Snow Mechanics Symposium, Grindelward, *IUGG-IAHS publ.* No. **114**, 196-207.
6) 藤岡敏夫・田畑忠司・木下誠一 1963 尾瀬沼スノージャム調査. 低温科学，物理篇，**21**, 95-115.
7) 木下誠一 1963 0°C の水に浸した雪の圧縮 I. 低温科学，物理篇，**21**, 13-22.
8) 伊藤　一 1969 湿潤積雪の一軸圧縮試験. 雪氷，**31**, 151-162.
9) 吉田順五 1953 雪の粘弾性及び雪の破壊抵抗. 低温科学，物理篇，**10**, 1-11.
10) 小島賢治 1955 積雪層の粘性圧縮 I. 低温科学，物理篇，**14**, 77.
11) Ramseler, R. O. and Pavlak, T. L. 1964 Unconfined creep of polar snow. *J. Glaciol.*, **5**, No. 39, 325.
12) Yosida, Z. et al. 1956 Physical studies on deposited snow. II. Mechanical properties (1). *Contr. Inst. Low Temp. Sci.* No. 9, 1.

Summary

It is important to clarify mechanical properties of wet snow in connection with snow removal, the generation of total layer avalanches and densification processes in the accumulation areas of glaciers.

For this purpose two uniaxial compression tests were made, i. e. unconfined creep test and constant-speed compression test. Taking natural conditions into consideration, samples of wet snow were prepared in the cold room (0°～0.2°C).

(1) Unconfined Creep Test

Creep curves of wet snow were obtained from reading the displacement of a darkened mark on the surface of a sample (Fig. 1). The steady state creep rate was obtained from the part of a steady state creep in a creep curve. The creep rate markedly increased with an increase in free water content, as shown in Fig. 2.

In order to show the dependence of the creep rate on the applied stress and free water content, the logarithm of the creep rate obtained in each test was plotted against the logarithm of the applied stress. The resulting plot was shown in Fig. 3. The straight lines were obtained for the three groups of free water contents. The straight lines drawn correspond to a power law between stress σ and creep rate ε of the form

$$\dot{\varepsilon} = k\sigma^n$$

where n and k are constants. The values of n obtained from slopes of three lines for free water contents of 5%, 10% and 15% are 1.3, 1.0 and 0.5 respectively.

The following results were obtained:

i) The value of n is approximately 1 for free water contents less than 10%, which means that wet snow behaves as a Newtonian body when the free water content is

less than 10%.

ii) The value of n decreases to 0.5 as the free water content increases to about 15%. In other words, in this condition, wet snow does not behave as a Newtonian body.

It is a future problem to be looked into whether these results can be applied to other conditions.

(2) Constant-Speed Compression Test

Constant-speed compression tests were made to obtain the compressive strength of wet snow.

Fracture did not occur when the compression speed (v) was less than 1 mm/min; so, wet snow deformed plastically. At 5 mm/min, sometimes fracture occurred and occasionally it did not occur. Fracture always occurred when v was more than 10 min/min.

The compression speed chosen was, therefore, 10, 30, and 50 mm/min (1.11×10^{-3}, 3.33×10^{-3}, and $5.56\times10^{-3}\,\mathrm{sec}^{-1}$, in strain rate).

The following results were obtained:

i) The compressive strength of wet snow increases with increasing initial density when the free water content of snow is almost the same (Fig. 7).

ii) The strength decreases as the compression speed increases on wet snow with the same density and the same free water content (Fig. 8).

iii) The compressive strength decreases exponentially with increasing free water content (Figs. 7 and 8).

It can be summarized from these results mentioned in (1) and (2) that the mechanical properties of wet snow were weakened with increasing free water content (leading to compressive strength and a remarkable increase in creep rate). This may result from the thinning of necks or grain-bonds which connect snow grains.

Therefore, the radius of a grain-bond of wet snow samples was measured under the microscope.

As a result it was found that the radius of the grain-bond decreased as the free water content increased, as shown in Fig. 9, where r_α and r_0 are the radiuses of a grain-bond when the free water content was α% and 0% (dry snow), respectively. It was found that the decreasing of the compressive strength, and the increasing of the creep rate were caused by the decreasing of the radius of the grain-bond as the free water content increased.