

砂混入の多成層氷の曲げ破壊試験

小林 俊一* ・ 斎藤 龍夫** ・ 阿部 真一**
小林 俊市*** ・ 佐藤 和秀**** ・ 和泉 薫*

Bending test of multi-layer ice including sand particles

by

Shun'ichi KOBAYASHI, Tatsuo SAITO, Shin-ichi ABE,

Toshi-ichi KOBAYASHI, Kazuhide SATO and Kaoru IZUMI

(Abstract)

Measurements of breaking strength and the Young's modulus on multi-layer ice including sands were conducted by using a bending test machine in a cold room of constant temperature, -5°C . The breaking strength and the modulus were intensified the increasing the amount of sands in the ice and the number of ice layer. However, it is not clear to distinguish mutuality between the amount of sands and the number of ice layer. The experiment done in 10 days aging test of materials showed that the strengths of materials were not influenced by aging time.

Key words: ice, bending test, breaking strength

キーワード: 氷, 曲げ試験, 破壊強度

I ま え が き

道路上の雪が融解-凍結をくり返すと、非溶解性の不純物、例えば土砂などが混入した多層から成る氷板が形成されることがある。このような氷を除去する場合には、その氷の破壊強度の値を知る必要がある。また、将来、雪氷を利用した丈夫な構造物を作る必要がある場合には、不純物混入の氷の力学的性質を研究しなければならない。純粋な氷についての研究は多く見られるが(東, 1981; 前野・福田, 1986)、非溶解性不純物混入の氷についての研究は少ない(木下, 1982)。そこで、非溶解性不純物として新潟市五十嵐浜海岸から採取した砂を用いた。さらに、これら不純物を一様に分散させた氷の試料を作るのが難しいため、多成層氷の層間に砂を分散させた砂混入の多成層氷を低温室で作製して、曲げ試験を行ったので報告する。

II 実 験 方 法

2-1 氷試料の製作方法

氷は、イオン交換水を、巾39cm、厚さ9cm、長さ49cmのバットに入れ、室温 -5°C の低温室に放置して凍らせた。その際に、氷の中に非溶解性不純物を混入する方法としては、イオン交換水で充分洗浄し

* 新潟大学積雪地域災害研究センター ** 新潟大学工学部学生 *** 国立防災科学技術センター雪害実験研究所
**** 長岡工業高等専門学校

た浜砂を、水を凍結させた氷の上に、 0.0568 g/cm^3 になる様に均一にまき、更にその上に水を加えて凍結させた。これを最高氷の厚さが10層になるまでくりかえした。結果的には、氷の層が1, 3, 6, 10層のものを作った。したがって氷1層とは砂が混入しないものをいい、氷3, 6, 10層のものは多成層氷の間に砂の層が2, 5, 9層入っていることになる。また、砂の入っていない氷3層の試料も作ったので、砂混入氷3層とか氷3層とか呼んで区別する。試料はいずれも完成品がバットの内容積の大きさであるが、これをバットから取り出して、バンドソーで分割し、表面をカンナで削ってなめらかに

し、一つの供試体の大きさを巾6cm, 厚さ6cm, 長さ22cmにした。これらの供試体を支間18cmで単純支持し、中央点荷重による一点荷重で、氷の梁の曲げ試験を室温 -5°C の下で行った(図-1)。

曲げ試験は、圧縮試験機を用い、曲げ速度は 1 mm/min とし荷重は1tonfのロードセルで測定し、変位は50mm変位計を荷重点に設置しX-Yレコーダで荷重-変位曲線を描かせた。

2-2 弾性係数

弾性係数Eは、中央点のたわみ量を y とすると次の(1)式から求まる。

$$E = \frac{pl^3}{48yI} \quad (1)$$

ここで、Pは荷重、 l は支点間距離、Iは慣性モーメントで、供試体の巾を b 、厚さを h とすれば次の(2)式で表わされる。

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (2)$$

実際には、X-Yレコーダで描かせた荷重-変位曲線(図-2)より、破壊荷重を供試体の断面積A(約 36 cm^2)で除して、破壊強度 σ_F を求め、原点と破壊点を結んだ直線の傾きより破壊時弾性係数 E_1 を、原点と破壊荷重の3分の1の点を結んだ直線の傾きより割線弾性係数 E_2 を、曲線の原点における接線の傾きより初期弾性係数 E_3 を、曲線の破壊荷重の3分の1の点における接線の傾きより接線弾性係数 E_4 を求めた。

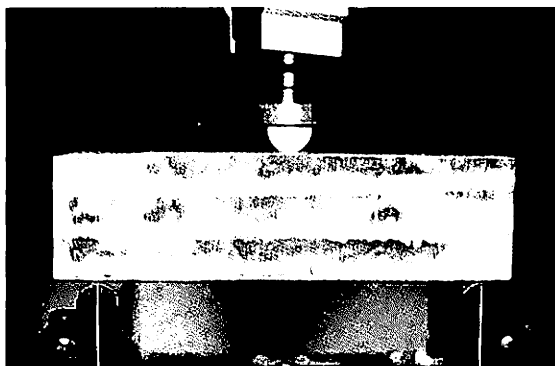


図-1 砂混入氷3層の1点荷重試験
Fig. 1 Bending test (three-layers ice including sand particles at boundaries of each ice layer).

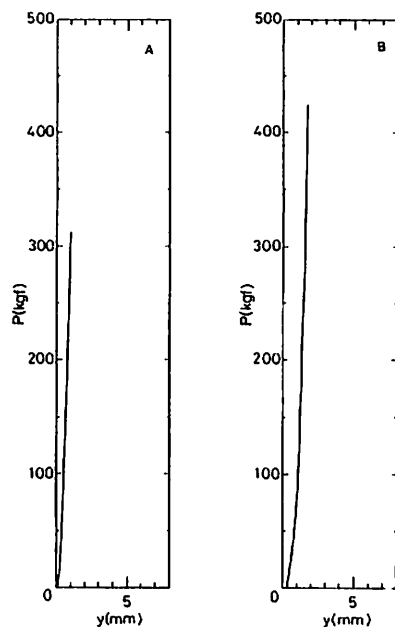


図-2 荷重-変位曲線
(A) 1点荷重による型枠砂混入氷3層
(B) 2点荷重による砂混入氷3層
Fig. 2 The relation of load (P) to displacement (Y).

III 実 験 結 果

氷のみの供試体（氷1層，氷3層）と砂混入の氷の供試体（砂混入3層，6層，10層）についての二点支持，中央点载荷による曲げ試験によって得られた実験結果を表-1に示した。また，砂の層数Nと

表-1 各供試体の破壊強度及び各弾性係数
Table.1 Results on breaking strength and various modulus.

No		A	σ_f	E1	E2	E3	E4
1	氷1層	36.86	3.77	4.65	1.44	0.31	15.72
2		35.96	4.08	4.86	4.86	4.86	4.86
3		35.55	3.47	1.87	1.37	0.37	2.19
4		35.51	3.15	1.94	0.96	0.09	0.86
5		36.05	3.37	3.10	6.52	-	2.89
mean			3.57	3.29	3.03	1.41	5.30
6	氷1層市販	36.76	3.07	1.94	0.84	0.09	-
7		36.48	2.70	1.36	0.64	0.14	2.47
mean			2.89	1.65	0.74	0.12	2.47
8	氷3層	38.19	3.74	2.44	1.67	0.35	10.40
9		36.19	3.91	2.44	1.65	0.29	3.25
10		39.09	2.75	2.16	1.46	0.78	1.99
11		40.37	3.07	1.76	1.33	0.38	2.07
12		40.62	2.93	1.44	1.08	0.50	1.65
13		36.31	2.93	2.74	1.62	0.17	4.06
mean			3.22	2.16	1.47	0.41	3.90
14	砂混入氷3層	35.93	3.14	1.33	1.00	0.28	1.62
15		34.34	4.31	2.67	1.94	0.75	2.70
16		37.85	4.80	1.97	1.66	0.37	2.98
17		37.57	3.19	3.20	2.87	1.15	2.87
mean			3.86	2.29	1.87	0.64	2.54
18	砂混入氷6層	41.30	4.61	1.67	1.42	-	1.79
19		41.18	3.12	3.49	9.66	2.38	9.52
20		38.35	3.96	2.21	1.64	0.67	3.49
21		37.09	6.17	2.79	2.21	0.08	6.12
mean			4.47	2.54	3.73	1.04	5.23
22	砂混入氷10層	37.16	2.64	3.40	2.51	1.30	4.20
23		35.86	2.77	3.07	2.36	1.10	3.13
24		36.46	5.49	4.47	13.81	3.75	13.82
25		36.19	5.26	2.33	1.57	0.12	3.38
26		35.75	4.20	2.54	2.29	0.36	6.30
27		36.39	4.61	1.84	2.67	2.18	3.11
mean			4.16	2.94	4.20	1.47	5.66

A : 断面積 (cm²)
 σ_f : 破壊強度 (kgf/cm²)
 E1 : 破壊時弾性係数 ($\times 10^3$ kgf/cm²)
 E2 : 割線弾性係数 ($\times 10^3$ kgf/cm²)
 E3 : 初期弾性係数 ($\times 10^3$ kgf/cm²)
 E4 : 接線弾性係数 ($\times 10^3$ kgf/cm²)

破壊強度 σ_f の関係や接線弾性係数 E_4 との関係を図-3と4に示した。水中の砂の量に換算する場合は $N \times 7.392$ (g) で計算できる。図では値のバラツキが大きいが，各値の平均値 (図中の○印) Yと砂の層数Nとの1次回帰式 $Y = a + bN$ を求めた結果の係数と相関係数の値を表-2に示した。ただし，砂混入していない氷1層の試料は他の氷と材令が著しく違ったため，材令が比較的近い氷3層の平均値 (図中の△印) を使用した。また，市販の氷 (図中□印) の平均値も参考のために示した。

一般的傾向として，砂の層数の増加と共に，破壊強度や弾性係数は増加する。この原因としては，砂の混入量の増加，氷の層数の増加，砂の混入量と層数の相互作用等が考えられるが，この実験からは余りにもバラツキが大きくて結論することはできない。また，バラツキの原因としては，各供試体を作製する際の品質の不均一が考えられるのと，支点と供試体の接触不良も考えられるので，弾性係数については，接線弾

表-2 破壊強度，各弾性係数と砂の層数の関係

Table.2 The relation of breaking strength and various modulus to number of sand layer.

	a	b	r
σ_f	3.52	0.10	0.745
E1	3.22	0.28	0.776
E2	0.41	0.12	0.999
E3	2.13	0.09	0.997
E4	1.50	0.33	0.954

$Y = a + bN$ Y : 各値の平均値
 N : 砂の層数
 r : 相関係数

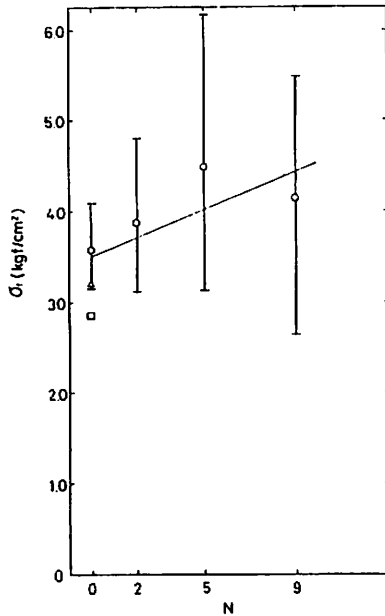


図-3 破壊強度 σ_f と砂の層数 N の関係

Fig. 3 The relation of breaking strength (σ_f) to number of sand layer (N).

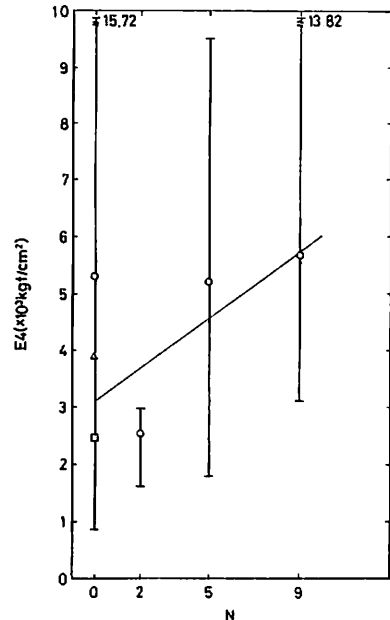


図-4 接線弾性係数 E_t と砂の層数 N の関係

Fig. 4 The relation of tangential modulus (E_t) to number of sand layer (N).

性係数 E_t の値を用いるとよい。

さらに、問題点としては、1点载荷実験では、せん断の影響もあると思われることと、供試体の材令も4日から10日と違っているのです、これらのことを考慮した実験が必要であるので次に補足実験を行った。

IV 考 察

4-1 材令の影響

材令についての1点载荷による試験を行った。ただし供試体の作製方法を変え、バンドソーによる切り出しやカンナによる成形の影響を取り除くため、 $6\text{ cm} \times 6\text{ cm} \times 22\text{ cm}$ の型枠を製作しその中で氷を作った。このようにして作った氷の供試体は、型枠氷1層とか型枠砂混入氷3層と呼んで前に使用した試料と区別する。

実験は、型枠砂混入氷3層を用いて、材令2、4、6、8、10日の5種類で行った。その結果を、破壊強度に関しては図-5に、接線弾性係数に関しては図-6に示す。図からは、日によるバラツキはあるが、材令10日以内程度では、材令が破壊強度と弾性係数に及ぼす影響は少ない。

4-2 2点载荷試験との相違

1点载荷試験では、曲げだけではなく、せん断の影響もあると考えられるので、1点载荷試験と同様な5種類の供試体を用いて、支間18cmで3等分点荷重の2点载荷の実験をも行った。ただし、2点载荷の場合の弾性係数を求める式は次の(3)式による。

$$E = \frac{p l^3}{54 y I} \quad (3)$$

ただし、 y は载荷点でのたわみ量である。

表-3 1点载荷による各供試体の破壊強度及び弾性係数

Table.3 Results on one point load.

No		T	A	σ_f	E
1		4	35.39	10.67	6.14
2	氷1層	4	35.93	11.04	6.26
3		4	38.31	10.23	4.58
mean				10.65	5.66
4		4	36.95	6.63	4.48
5	氷3層	4	36.22	9.06	4.93
6		4	36.19	12.61	5.34
mean				9.43	4.92
7	砂混入氷3層	4	35.04	5.98	4.16
8		4	33.33	11.11	5.26
9		4	35.95	10.67	4.62
mean				9.25	4.68
10	型枠氷1層	4	38.89	10.60	1.67
11		4	34.55	11.14	2.68
12		4	38.93	6.78	1.73
mean				9.51	2.03
13	型枠氷1層	6	34.39	8.39	1.43
14		6	35.99	6.03	2.09
mean				7.21	1.76
15	型枠氷3層	2	34.94	7.87	3.93
16		2	36.46	7.84	2.84
17		2	35.93	7.47	2.62
mean				7.73	3.13
18	型枠砂混入氷3層	2	36.19	7.57	2.22
19		2	35.00	9.74	3.80
20		2	38.19	6.82	2.16
mean				8.04	2.73
21	型枠砂混入氷3層	4	33.24	7.09	4.57
22		4	35.32	12.64	3.44
23		4	37.26	8.43	3.20
mean				9.39	3.74
24	型枠砂混入氷3層	6	35.54	4.78	3.43
25		6	36.11	9.46	3.06
26		6	35.98	5.25	2.17
mean				6.50	2.89
27	型枠砂混入氷3層	8	36.38	10.49	3.94
28		8	36.84	8.32	3.25
29		8	35.86	11.49	4.80
mean				10.10	4.00
30	型枠砂混入氷3層	10	36.66	8.18	2.27
31		10	35.26	10.51	3.06
32		10	36.68	7.28	3.10
mean				8.66	2.81
33	型枠砂2倍氷3層	2	36.61	6.97	2.52
34		2	36.99	6.54	2.29
35		2	36.52	7.12	3.12
mean				6.88	2.64

A: 断面積 (cm²)
 σ_f : 破壊強度 (kgf/cm²)
 E: 接線弾性係数 ($\times 10^3$ kgf/cm²)
 T: 材令 (day)

表-4 2点载荷による各供試体の破壊強度及び弾性係数

Table.2 Results on two point load.

No		T	A	σ_f	E
1		4	37.57	13.44	3.92
2	氷1層	4	35.95	12.27	4.73
3		4	39.13	10.50	4.23
mean				12.04	4.29
4	氷3層	4	36.66	10.58	7.21
5		4	36.54	10.62	5.56
6		4	36.14	10.06	4.75
mean				10.42	5.84
7	砂混入氷3層	4	35.87	11.83	4.08
8		4	34.46	13.35	6.57
9		4	33.82	6.22	2.90
mean				10.47	4.51
10	型枠氷1層	4	24.61	6.50	2.99
11		4	39.73	7.31	1.10
12		4	38.19	9.86	1.99
mean				7.89	2.03
13	型枠砂混入氷3層	4	36.53	10.27	2.21
14		4	37.19	10.63	2.67
15		4	35.71	4.54	2.03
mean				8.48	2.30

A: 断面積 (cm²)
 σ_f : 破壊強度 (kgf/cm²)
 E: 接線弾性係数 ($\times 10^3$ kgf/cm²)
 T: 材令 (day)

表-5 破壊強度による1点载荷と2点载荷の比較 (kg f / cm²)

Table.5 Comparison of breaking strength with one point and two point load.

供試体	1点载荷	2点载荷
氷1層	10.65	12.04
型枠氷1層	9.51	7.89
氷3層	9.43	10.42
砂混入氷3層	9.25	10.47
型枠砂混入氷3層	9.39	8.48

表-6 接線弾性係数による1点载荷と2点载荷の比較 ($\times 10^3$ kg f / cm²)

Table.6 Comparison of tangential modulus with one point and two point load.

供試体	1点载荷	2点载荷
氷1層	5.66	4.29
型枠氷1層	2.03	2.03
氷3層	4.92	5.84
砂混入氷3層	4.68	4.51
型枠砂混入氷3層	3.74	2.30

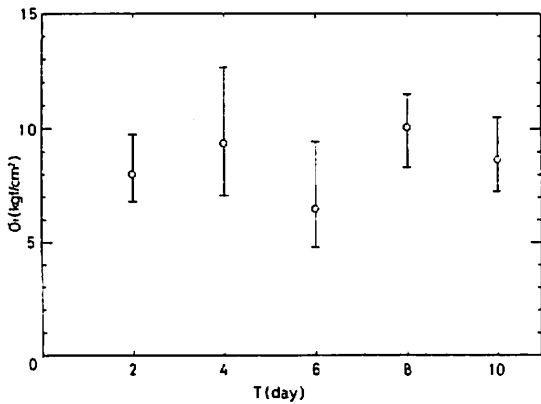


図-5 破壊強度についての材令試験 (型枠砂混入氷3層)

Fig. 5 Aging effect on breaking strength (three-layer ice including sands).

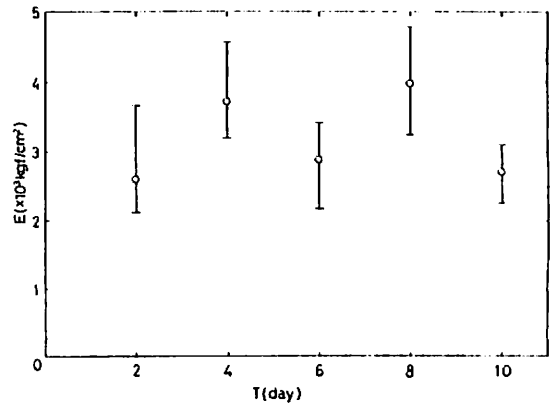


図-6 接線弾性係数についての材令試験 (型枠砂混入氷3層)

Fig. 6 Aging effect on tangential modulus (three-layer ice including sands).

1点荷重と2点荷重の結果を表-3, 表-4に示す。さらに破壊強度と接線弾性係数の平均値に関して1点荷重と2点荷重試験の比較を表-5, 表-6に示した。これらを比較してみると, 破壊強度, 接線弾性係数ともに平均値で 2 kg f/cm^2 と $2 \times 10 \text{ kg f/cm}^2$ 以内の差で, しかもその差異の規則性はみられなかった。

4-3 供試体の成形による影響

供試体を作る際に, 最初の実験では, バンドソーで切り出した後で, カンナをかけて削った。このカンナで削った影響をみるために, この最初の実験を第1実験とし, バンドソーのみで, カンナを使用しない実験を第2実験として, 1点荷重による材令4日の試料を用いて行った。その破壊強度と接線弾性係数の比較を示した値を表-7, 表-8に示した。

これにより, カンナによる成形の効果は破壊強度の方に大きくあらわれた。

表-7 破壊強度による第1, 第2実験の比較 (kg f/cm^2)

Table.7 Comparison of breaking strength with plane and without plane.

	第1実験	第2実験
氷 1 層	3.57	10.65
氷 3 層	3.22	9.43
砂混入氷3層	3.86	9.43

表-8 接線弾性係数による第1, 第2実験の比較 ($\times 10^{10} \text{ kg f/cm}^2$)

Table.8 Comparison of tangential modulus with plane and without plane.

	第1実験	第2実験
氷 1 層	5.30	5.66
氷 3 層	3.90	4.92
砂混入氷3層	2.54	4.68

V あ と が き

本研究は、 -5°C の低温室でイオン交換水を凍結させた氷を用いて実験を行ったが、今後、実際の道路上の圧雪・凍結との類似性を考慮した場合溶解性不純物の影響の実験が必要である。さらには、多層と砂混入量の影響をはっきりわけて調べる必要があるとあり、作製の困難な砂の量のみ変えた氷の試料を作る方法を考案しなければならない。また、異物として砂以外の物質でも調べてみるのも興味がある。

終りに、用いた試験機は、国立防災科学技術センター雪害実験所のものと長岡工業高等専門学校のものを使用させていただいた。

なお本研究は、昭和61年度新潟大学工学部土木工学科の卒業研究として 斎藤龍夫（現新潟県庁）と阿部真一（現山形県庁）が行ったものの一部である。

文 献

- 東 晃（1981）：寒地工学基礎論。古今書院，東京，247pp.
木下誠一編（1982）：凍土の物理学。森北出版，東京，227pp.
前野紀一・福田正己編（1986）：雪氷の構造と物理。古今書院，東京，209pp.