

耐凍害性の評価法に関する一考察

山本 紀一 福永 均 伊藤 征幸 森川 泰年^{*}

Research on Evaluation for Frost Resistance

by

Kiichi YAMAMOTO, Hitoshi FUKUNAGA, Tatsuyuki ITO,
and Hirotoshi MORIKAWA

三河地方で生産されている瓦の耐凍害性に対する評価法について検討した。その結果は次のとおりである。1)瓦の中心部の温度(28℃)は約60分で冷凍槽内温度(-40℃)と平衡になり、約20分で水温(28℃)と平衡になった。2)凍害発生の予想や判定にヤング率が有効である。複雑な形状の試験体で形状係数が求められず、絶対値が求められない試験体はヤング率の減少率でもよい。3)凍害試験は次の条件が有効であった。①吸水法；減圧吸水法、500mmHg(ゲージ圧)、②冷却法；三次元冷却法、③冷却温度；-40℃、④凍結融解法；3時間冷却、1時間浸水(常温)、4)上記の条件で行った凍害試験において、ヤング率の減少率が小さいものは凍害に強く、減少率の大きいものは凍害に弱い。凍害が発生したヤング率の減少率が最も小さいもので約7.5%、最も大きいもので約19%であった。

1. ま え が き

長期間にわたる国内景気の停滞の影響を受け、住宅建設戸数の減少、資源・エネルギーの制約、消費者ニーズの多様化など三河地方の地場産業をとりまく経済環境は厳しい現状である。

これらの現状を打破する方策は種々とられているが、その1つとして、これまでは需要の少なかった寒冷地への販路拡大策も進められている。

そこで、問題となるのは凍害発生の危険性であるが、当地方の瓦を現行のJISに従って凍害試験を行っても凍害は認められない。しかし、実際に瓦を施工したら凍害が発生したという報告もある。

凍害試験に合格したら安心して出荷できる試験法の確立が望まれているゆえんである。

これらの背景のもとに、その前段階として、三河地方で製造されている瓦の耐凍害性に対する評価法を検討した。

一般に、自然環境における材質の劣化を試験するとき、自然環境より厳しい条件で行ない、その経費や時間を節約するのが常である。

瓦の凍害試験の繰返し回数については、JISで

は規定されていないが、類似のタイルは10回と規定されている。

そこで、凍害試験の繰返し回数が20回程度で可能な瓦の耐凍害性の評価法を目標として、種々の条件を変更して試験した。

2. 試 験 方 法

2.1 凍害試験

三次元冷却法は冷凍槽内の試験体間及び器壁からの距離を10cm以上離し、送風方向に平行(風速1.5~2.0m/s)に置いた。

一次元冷却法は扉を改造して、釉薬面を冷凍槽側に、裏面を実験室側に置いた。なお、送風方向は瓦に垂直である。

凍害試験機の主な仕様を表1に、主な性能を表2に示す。

2.2 減圧吸水法

減圧槽の中へ入れた瓦を所定の減圧度(ゲージ圧)で30分保持した後、注水する。30分経過後取り出し、吸水時の質量(g)を測定し、凍害試験に用いた。

表1 凍害試験機の主な仕様

内 法	650(W)×820(H)×640(D)mm
冷凍方式	単段冷凍方式
冷凍機	空冷式 1.5w×2
冷 媒	R13B1
加熱器	ニクロムストリップワイヤ 2.0kw×1
送風機	シロッコ形ファン 150φmm 0.2kw×1
電 源	AC 200V 1φ、3φ、60Hz

表2 凍害試験機の主な性能

温度範囲	-40~+120℃
温度分布	120℃±0.5℃, -20℃±0.5℃, -40℃±0.5℃
温度降下時間	+20~-20℃まで約17分 +20~-40℃まで約27分

2.3 飽和係数

飽和係数=普通吸水率/減圧吸水率

普通吸水率; JIS A 5208 による。

減圧吸水率; 所定の減圧度(ゲージ圧)で吸水させて求めた吸水率

2.4 ヤング率

非破壊で測定できるため、同一サンプルを何度も測定できる長所がある動的弾性測定法のうち、グラントソニック方法で測定した。

ヤング率は次式で求められる。(角柱の場合)

$$E = \frac{mM}{bR^2} [KN/mm^2] (1KN \approx 102kgf)$$

ここに、m; 質量(g)

M; 形状係数(付属の表から求める)

b; 角柱の幅(mm)

R; グラントソニックの読み

ここで、形状係数は角柱の長さ(厚さ)の割合(1/h)の関数で付属の表から求める。しかし、その様に複雑な形をしている場合は、次の様にして、ヤング率の減少率を求めた。

凍害試験前のグラントソニックの読みを R_0 , 1回目のグラントソニックの読みを R_1 , 2回目のグラントソニックの読みを R_2 , n 回目のグラントソニックの読みを R_n とすると、

$$\frac{E_1}{E_0} = \left(\frac{mM}{bR_1^2} \right) / \left(\frac{mM}{bR_0^2} \right),$$

$$\frac{E_2}{E_0} = \left(\frac{mM}{bR_2^2} \right) / \left(\frac{mM}{bR_0^2} \right), \dots\dots$$

$$\frac{E_n}{E_0} = \left(\frac{mM}{bR_n^2} \right) / \left(\frac{mM}{bR_0^2} \right)$$

さて、m, M, b は同一試料であるから、ほとんど同一である。従って、

$$\frac{E_1}{E_0} = \left(\frac{R_0}{R_1} \right)^2, \frac{E_2}{E_0} = \left(\frac{R_0}{R_2} \right)^2, \dots\dots \frac{E_n}{E_0} = \left(\frac{R_0}{R_n} \right)^2$$

となり、形状係数に関係なく、ヤング率の減少率が求められる。

なお、ヤング率測定器の主な仕様を表3に示す。

表3 ヤング率測定器の主な仕様

測定方法	動的弾性測定法 (グラントソニック法)
検出音域範囲	20~40,000Hz
測定精度	±0.5%
測定物寸法	特別な制限はない。
測定物形状	円柱, 角柱, 円筒

3. 試験結果と考察

3.1 凍結融解時間の検討

現行の JIS A 5208 の凍害試験の試験条件は、「冷凍槽内に8時間以上経過後、15~20℃の清水中に6時間以上入れる」と規定されている。しかし、このサイクルでは1日に1回しか試験できないため、もう少し短縮したサイクルを検討した。

瓦の内部温度を測定するため図1に示す試験体を作製し、-40℃に保持した冷凍槽内に入れて瓦内部の冷却速度を測定し、その後、手早く取り出し、水温28℃の水槽に入れて瓦内部の昇温速度を測定した。図2に測定結果を示す。

瓦の中心部の温度は約60分で冷凍槽内温度と平衡になり、約20分で水温と平衡になった。

しかし、瓦の厚さのバラツキや安全係数も考慮して「3時間冷却、1時間浸水(常温水)」で行うことにした。

3.2 凍害発生とヤング率の関係

凍害の発生を肉眼で判定する方法では、内部に欠陥が発生した時点の確認は出来ない。しかし、内部に欠陥が発生すればヤング率に変化が現われ、凍害発生の判定法として有効であると思われる。

そこで、棧瓦から30×14×145mmの大きさに切り出したテストピースを普通吸水(24hr)させ、

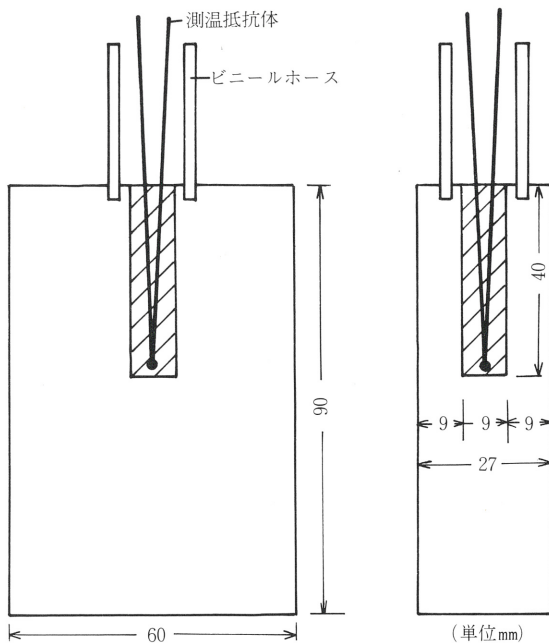


図1 瓦の内部温度測定用試験

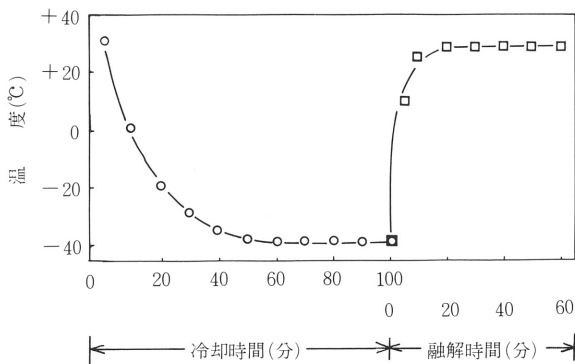


図2 瓦の内部の温度変化

冷却温度 -40°C 、冷却時間 3 時間、融解時間 1 時間（常温水）の条件で凍害試験を行い、ヤング率を測定した。

試験結果を表 4 に示す。吸水率が最も小さい 5.8% のテストピースは 20 回繰返しても凍害は認められなかったが、それより大きい吸水率のテストピースでは凍害が認められた。凍害発生回数は吸水率が大きいほど少なかった。

凍結融解回数とヤング率の関係を図 3 に示す。

ヤング率が大きいほど凍害は発生しにくく、発生しても凍結融解回数が多くなっている。また、

表 4 テストピースによる凍害試験結果

試料番号	吸水率 (%)	飽和係数	凍害発生回数	ヤング率の減少率 (%)
1	5.8	0.71	20回 異状なし	5.9
2	6.5	0.72	16回 発生	6.8
3	7.2	0.75	16回 "	8.2
4	7.5	0.76	15回 "	21.0
5	8.5	0.79	11回 "	13.6

凍害が発生する回数付近ではヤング率が急激に小さくなっている。

なお、凍害の発生が肉眼で確認できるヤング率の減少率は約 7% 程度と思われる。

これらのことから、ヤング率の変化が凍害発生判定に有効なことがわかったので、今後の凍害試験にも応用することにした。

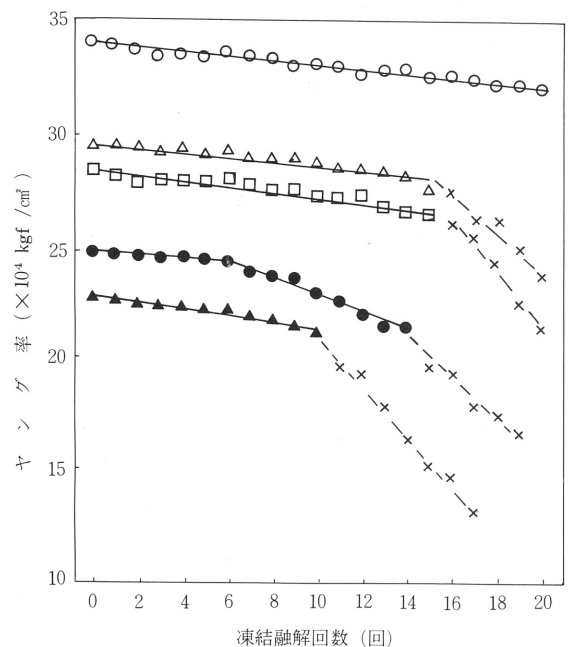


図3 凍結融解回数とヤング率

○：試料番号 1 ●：試料番号 4
△： " 2 ▲： " 5
□： " 3

3.3 普通吸水法—3 次元冷却法による凍害試験

普通吸水 (24hr) させた実桟瓦を試験体とし、3.2 と同一条件で凍害試験を行った。

試験結果を表 5 に示す。吸水率の最も小さい

表5 普通吸水させた瓦の凍害試験結果

試料番号	吸水率 (%)	飽和係数	凍害発生回数	ヤング率の減少率 (%)
1	4.2	0.65	20回 異状なし	2.1
2	4.9	0.58	〃	4.3
3	6.0	0.63	〃	2.7
4	6.7	0.68	〃	4.6
5	8.0	0.72	〃	3.8
6	8.4	0.73	〃	4.4

4.2%の瓦は勿論、最も大きい8.4%の瓦でも20回繰返しても凍害は確認されなかった。

ヤング率の減少率は最も大きいものでも4.6%であり、さきに述べた凍害確認の目安となる7.0%と比較して小さく、この程度の減少率では凍害が確認されないものと思われる。

3.4 減圧吸水法—3次元冷却法による凍害試験

普通吸水法(24hr)では吸水しない細孔に吸水させるため、減圧吸水法により吸水させた。

減圧度を3段階に変化させて吸水した瓦を試験体として凍害試験を行った。なお、冷却時間は3時間、融解時間は1時間(常温水)である。

3.4.1 760mmHgで減圧吸水した場合

冷却温度を-20, -30, -40℃と変化させたときの試験結果を表6に示す。

表6 減圧吸水させた瓦の凍害試験結果

(ゲージ圧 760mmHg)

冷却温度(℃)	項目	1	2	3	4	5	6
-20	吸水率(%)	3.8	5.7	5.9	6.2	7.7	8.6
	飽和係数	0.57	0.62	0.65	0.66	0.72	0.72
	凍害発生回数	1	4	1	2	1	1
	ヤング率の減少率(%)	4.1	13.9	10.5	12.8	8.4	8.0
-30	吸水率(%)	4.3	5.6	6.0	6.1	7.1	9.0
	飽和係数	0.60	0.63	0.63	0.64	0.71	0.72
	凍害発生回数	1	4	3	3	3	5
	ヤング率の減少率(%)	-	12.0	14.9	18.2	16.1	19.4
-40	吸水率(%)	3.9	5.7	6.0	6.3	7.7	8.6
	飽和係数	0.54	0.64	0.63	0.66	0.71	0.70
	凍害発生回数	1	2	4	4	3	2
	ヤング率の減少率(%)	6.3	6.3	11.4	13.3	15.2	16.2

吸水率の小さい瓦でも凍害発生回数が早かったり、吸水率の大きい瓦が遅かったり吸水率の大小に関係なく凍害が発生している。

また、冷却温度については、一部の例外を除いては低温にした方が凍害発生回数が多くなっている。

凍害が確認できたときのヤング率の減少率も、最も小さいものは4.1%, 最も大きいものは19.4%と4.7倍の差がある。

全体に、比較的早い回数で凍害が発生しており、瓦の耐凍害性の優劣を判定するには、条件が厳しすぎ、瓦の品質と耐凍害性の関連が得られない。

3.4.2 500mmHgで減圧吸水した場合

冷却温度を-20, -40℃と変化させたときの試験結果を表7に示す。

表7 減圧吹水させた瓦の凍害試験結果

(ゲージ圧 500mmHg)

冷却温度(℃)	項目	1	2	3	4	5	6
-20	吸水率(%)	4.5	5.9	6.0	6.8	7.9	8.0
	飽和係数	0.83	0.78	0.90	0.80	0.86	0.87
	凍害発生回数	20回 異状なし	20回 異状なし	20回 異状なし	20回 異状なし	20回 異状なし	20回 異状なし
	吸水率(%)	4.6	5.9	6.3	6.8	8.0	8.2
-40	飽和係数	0.76	0.79	0.77	0.79	0.82	0.85
	凍害発生回数	20回 異状なし	20回 異状なし	15回 異状なし	11回 異状なし	4回 異状なし	11回 異状なし

冷却温度-20℃では、全ての試料が20回繰返しても凍害は確認されなかった。凍結融解回数とヤング率の減少率を図4に示す。

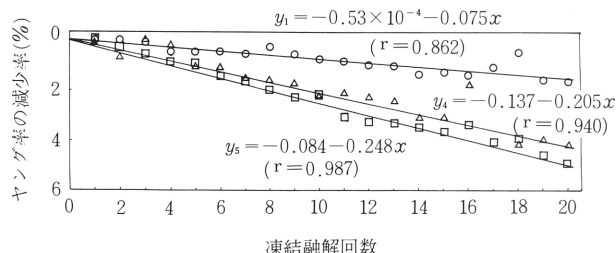


図4 凍結融解回数とヤング率の減少率

(減圧度:ゲージ圧500mmHg)
(冷却温度:-20℃)
(冷却法:3次元冷却)

ヤング率の減少率がどの試料も近似していてわかりにくいので、試料番号 1, 4, 5 を y_1, y_4, y_5 として示し、他は省略した。

ヤング率の減少率は最も大きいもので約 5% であり、この程度では先に述べた目安の 7% より小さく、瓦の内部にも著しい欠陥が発生していないものと思われる。

冷却温度 -40°C では、全般的に吸水率が大きくなるほど凍害発生回数が少なくなっている。しかし、試料番号 5 と 6 では逆転しているのもそれらの理由等について、ヤング率の減少率から考察してみる。図 5 に凍結融解回数とヤング率の減少率を示す。ここで、試料番号 1, 2, …… 6 の順に $y_1, y_2, \dots, y_6$ とした。

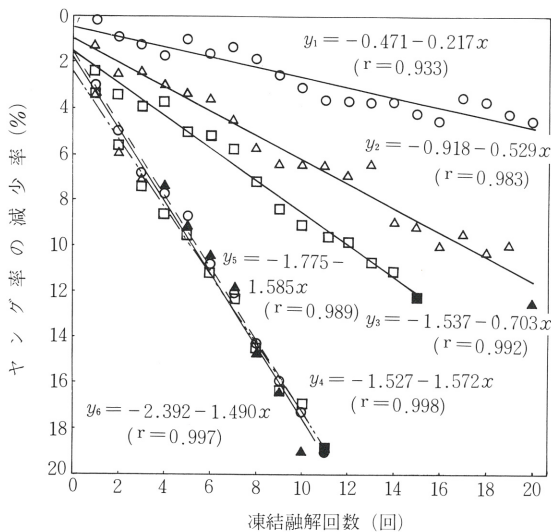


図 5 凍結融解数とヤング率の減少率

(減圧度：ゲージ圧 500mmHg)
(冷却温度： -40°C)
(冷却法：3 次元冷却)

凍害発生回数が比較的多い y_1, y_2, y_3 はヤング率の減少率が小さい。最も小さい y_1 はその傾きが 0.217 (相関係数 0.933)、最も大きい y_3 でもその傾きは 0.703 (相関係数 0.992) である。

凍害発生回数が比較的小さい y_4, y_5, y_6 はヤング率の減少率が大きい。最も大きい y_5 はその傾きが 1.59 (相関係数 0.989)、最も小さい y_6 でもその傾きは 1.49 (相関係数 0.997) である。

減少率の小さいものと大きいものを比較すると

2.1~7.3 倍もある。

また、凍害の発生が肉眼で確認できた凍結融解回数は y_4 は 11 回目、 y_5 は 4 回目、 y_6 は 11 回目であるが、三者ともヤング率の減少率は非常によく一致しており、 y_5 の凍害発生時のヤング率の減少率は約 7.5% である。

これらのことから試料番号 No. 4 と No. 6 の凍害が発生したのは No. 5 と同じところと推察されるが、それは内部的な段階であり、肉眼観察できたのは、両試料とも 11 回目であると思われる。

3.4.3 250mmHg で減圧吸水した場合

冷却温度を -40°C のときの試験結果を表 8 に示す。吸水率の大きい瓦も小さい瓦も全て 20 回繰返しても凍害が認められなかった。なお、ヤング率の減少率を見てみると、No. 5 が最も大きくて 6.9% であるが、全体的にみて低い値を示し、内部に著しい欠陥が発生していないものと思われる。

表 8 減圧吸水させた瓦の凍害試験

(ゲージ圧 250mmHg)

冷却温度 ($^{\circ}\text{C}$)	項目	試料番号					
		1	2	3	4	5	6
-40	吸水率 (%)	4.4	5.1	6.3	6.9	7.8	7.7
	飽和係数	0.96	0.93	0.93	0.95	0.94	0.55
	凍害発生回数	20回	20回	20回	20回	20回	20回
	異状なし	異状なし	異状なし	異状なし	異状なし	異状なし	異状なし
	ヤング率の減少率 (%)	2.0	2.7	2.6	5.7	6.9	5.4

3.5 減圧吸水法 — 1 次元冷却法による凍害試験

実際に瓦を施工した場合は 1 次元冷却に近い状態で冷却されると考えられる。500mmHg (ゲージ圧) で減圧吸水させた実積瓦を、冷却温度 -20°C で 1 次元冷却法により、冷却時間 3 時間、融解時間 1 時間 (常温水) の条件で試験した。試験体とした瓦の吸水率は平均的なもの (No. 4)、と大きいもの (No. 6) の 2 種類である。

結果を表 9 に示す。両方の試料とも 20 回繰返しても凍害は認められなかった。

凍結融解回数とヤング率の減少率を図 6 に示す。ここでも、ヤング率の減少率は約 4% と小さく、瓦の内部には著しい欠陥が発生していないものと思われる。

表 9 1次元冷却法による凍害試験結果
(ゲージ圧 500mmHg)

冷却温度(℃)	項 目	試料番号	
		4	6
-20	吸水率 (%)	6.8	8.0
	飽和係数	0.80	0.88
	凍害発生回数	20回 異状なし	20回 異状なし

また、室内側の瓦面（無釉側）の表面温度を測定した結果を図7に示す。設置位置の上段と下段の温度差はあるものの、冷凍槽内温度より8～10℃も高い値を示した。

4. ま と め

- 1) 瓦の中心部の温度(28℃)は約60分で冷凍槽内温度(-40℃)と平衡になり、約20分で水温(28℃)と平衡になった。
- 2) 凍害発生の予想や判定にヤング率が有効である。複雑な形状の試験体で形状係数が決定できないために、絶対値が求められない試験体はヤング率の減少率でよい。
- 3) 凍害試験は次の条件が有効であった。
 - ①吸水法；減圧吸水法, 500mmHg(ゲージ圧)
 - ②冷却法；三次元冷却法
 - ③冷却温度；-40℃
 - ④凍結融解法；3時間冷却, 1時間浸水(常温)
- 4) 上記の条件で行った凍害試験において、ヤング率の減少率が小さいものは凍害に強く、減少率が大きいものは凍害に弱い。凍害が発生したヤング率の減少率が最も小さいもので約7.5%、最も大きいもので約19%であった。

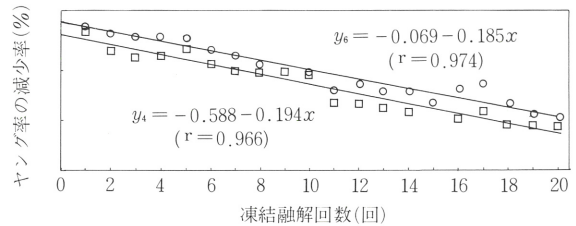


図 6 凍結融解回数とヤング率の減少率

(減圧度：ゲージ圧500mmHg)
(冷却温度：-20℃)
(冷却法：1次元冷却)

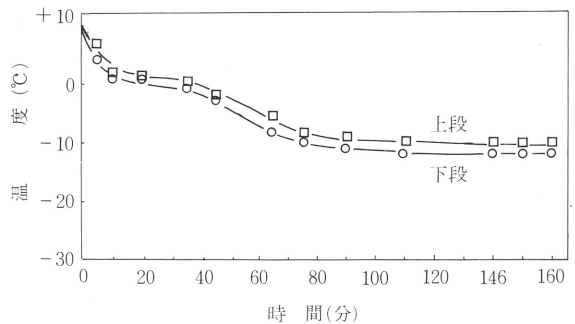


図 7 1次元冷却における瓦の表面温度