

凍上試験方法の改良に関する実験

Experiments to Improve Frost Heaving Test Methods

水島達朗* 熊谷茂樹** 佐藤繁治***

Tatsuaki MIZUSHIMA, Shigeki KUMAGAI and Shigezi SATOU

寒冷地の道路整備には、凍上対策は不可欠なものである。特に、路床および路盤材料についての凍上性の判定は、凍上試験に大きく依存している。

現行法として「土の凍上試験方法」はあるが、再現性の向上を目的として凍上試験の改良案モデルを考案して凍上実験を行い現行法と比較した。

その結果、改良案は現行法に比べ安定した試験方法であることがわかった。これにより、粗粒材料の規格判定も可能な凍上試験方法の確立に一步前進した。

《凍上試験；シルト；路盤材料；凍上性》

Measures against frost action are required for road structures in cold regions.

The frost-susceptibility on subgrade and subbase course materials has been examined by frost heaving indoor tests. Frost heaving experiments were carried out to improve the presently used methods.

As a result, improved test methods giving better accuracy than those presently used were established.

Keywords: Frost heaving test, Silt, Subbase course materials, Frost-susceptibility.

まえがき

積雪寒冷地域の道路は、建設・維持管理上からも共通の問題として、凍上対策が大きなウェイトを占めている。

その中でも路床および路盤材料について凍上性を判定するために、凍上試験は特に重要な項目である。

一般に凍上を支配する要素として、土質・地中水・温度の3条件が必要であることが知られている。室内凍上試験においても、凍上量に影響する因子として、土の化学的物理的性質、水分補給や拘束力の条件、試験装置の温度管理精度などがあげられる。

現行の「土の凍上試験方法」は、道路排水工指針の資料編に記載されているが、約20年前に開発され合理的

で、すぐれた試験方法と思われるが細部の改良へ向けて検討が必要である。現行試験法の問題点としては、試験値の変動が大きく再現性があまりよくないことがあげられる。

本報告は、凍上試験方法の改良案として新しく考案した試験用具による凍上試験を行い、主として砂、切込碎石を試料とした実験結果から、現行法と改良案の比較および凍上性に関連する要素について述べるものである。

1. 改良案試験方法の作成

(1) 現行法と改良案

現行法の凍上試験装置のモデルは図-1に示した。この方法による試験結果は、試験値の変動が比較的大きく凍上性の有無は判明できるが規格の判定には不安があっ

*舗装研究室主任研究員 **同室長 ***同室副室長

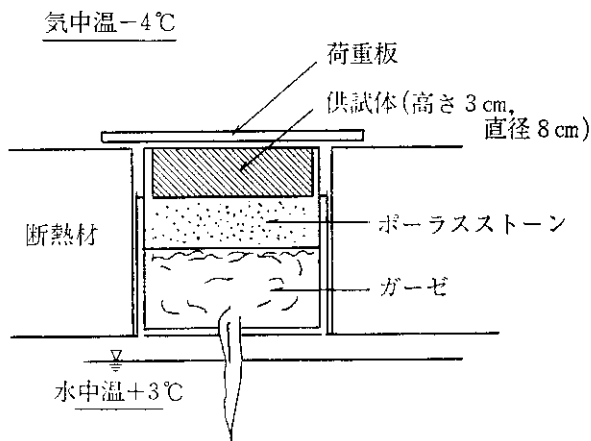


図-1 凍上試験装置 (現行法のモデル)

た。そこで、現行法の問題点を解決し、路盤材料の規格判定も可能な凍上試験方法の確立のため実験研究を進めてきた結果、図-2に示す改良案モデルの作成にいたったものである。以下現行法の問題点を改良した検討結果について述べる。

(1) 現行法のガーゼによる水の補給方法の問題点

現行のガーゼによる給水モデル(図-1参照)は、水槽内に入れたガーゼの毛細管現象によりポーラスストーンが吸水し、さらにポーラス石の毛細管現象により供試体が凍上に必要な水の補給を行うというものである。この方法の第1の問題点は、ガーゼとポーラス石の全面が完全に密着しないことがあげられる。これはガーゼに弾力性がなく、一度へこんだ部分は空間となり、このため吸水が不均一になることである。この結果

供試体は部分的に吸水し、したがって部分的な凍上が起こり供試体に変形する。供試体の変形は凍上率測定の大きな誤差発生の原因となっている。

第2の問題点は、凍上に必要な水量の検証によるものである。凍上に要した水量は、各試験後の凍結後の含水比から凍結前の含水比の差で求められる。数多い実験結果から、凍上試験において必要な水量は多いもので約200 cc程度で十分である。凍上試験器に入れる前のポーラスストーンとガーゼに含まれる水量は約300 ccあり、このことは凍上に必要な水量はすでに保有しており、したがって実際には供試体は水槽内から吸水していないことになる。特に試験期間は通常4日間であり、気中温度の低下でガーゼも凍結して給水能力を失なうことから、供試体は水槽内の水を必要としないことが判明した。

(2) 現行法における供試体の乾燥、欠落現象の問題点

現行法では、凍上中に断熱材のすきまから冷気が侵入し、供試体の伸びた部分が乾燥するため土粒子の脱落による変形から吸水が抑制される原因となっている。このため、凍結後の含水比が変動したり凍上率測定の正確さを期せないなど、現行法の最大の欠点となっている。

(2) 改良案モデルの作成

改良案モデル(図-2参照)では、ガーゼによる水の補給という考え方を改め、弾力性のある吸水性のよいスポンジを使用した。プラスチック製モールドと架台は円筒内にすべて納め、供試体の乾燥を防ぐことおよび凍上を始めた供試体に変形を起さず真直に伸びることができる構造とした。モールド架台は、供試体の設置や取りだし

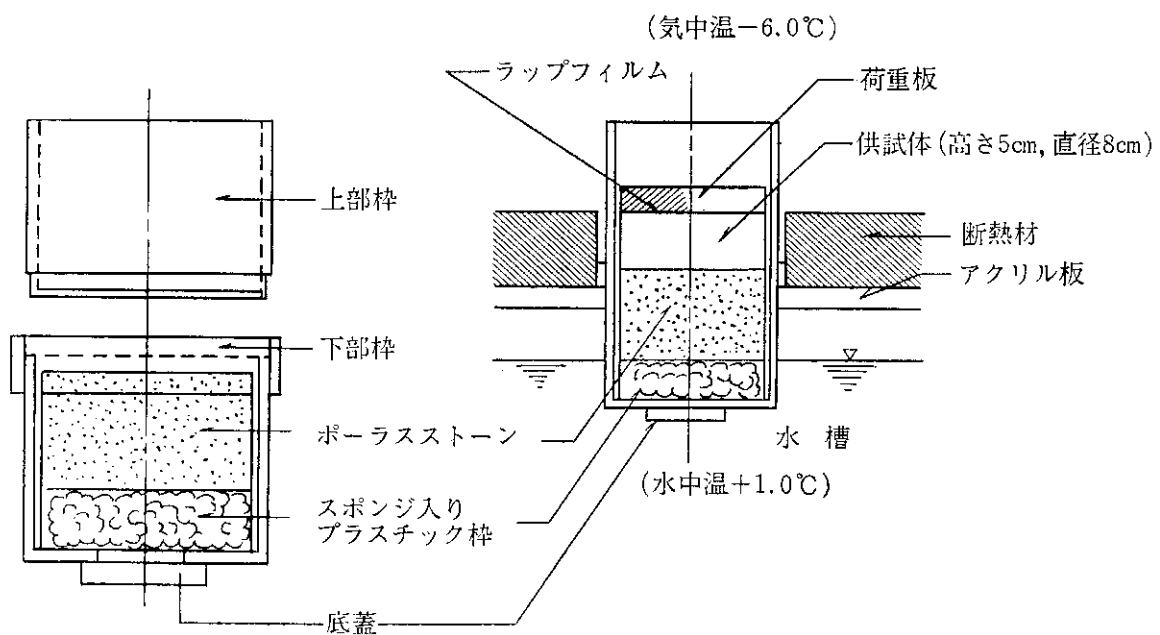


図-2 凍上試験装置 (改良案のモデル)

やすさを考慮して上下部枠に分割した。スポンジは厚さ40 mm を使用し、上部に荷重がかかることからプラスチック枠(径8 cm, 厚さ3 cm)の中に入れて潰れを防止し、ポーラスストーンによく密着する構造とした。ポーラスストーンはアクリル板の上にするよう厚さ6 cm とした。

供試体の厚さは、現行法の3 cm より5 cm の方が試験値が安定することから5 cm を採用した。荷重板は現

行法と同じ重さ1.2 kg, 径90 mm とした。荷重板と供試体間にラップフィルム(食品包装用ポリ塩化ビニリデン)を使用した。これは、供試体の乾燥を防ぎ、荷重板と供試体の凍着を防止して試験の安定化に有利なためである。

供試体の作成要領は、現行の凍上試験方法に準拠した。

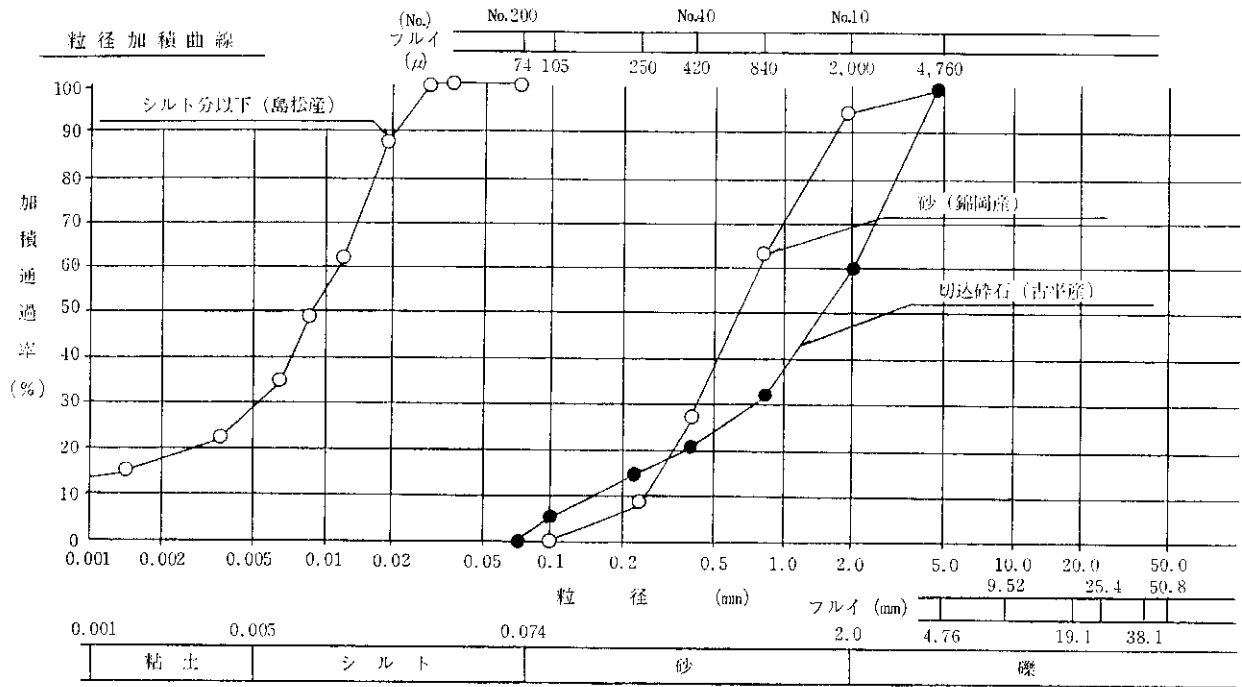


図-3 試料の粒度分布

表-1 改良案の試験条件を求める実験結果

	気中温度 (°C)	水中温度 (°C)	時 間	結 果	判 定
①	-4	+3	96 (4日)	供試体が凍結せず凍上しなかった。	×
②	-5	+3	96 (4日)	供試体の上部わずかに凍結したが凍上しなかった。	×
③	-5	+1	96 (4日)	供試体の下部が凍結しなかったがいくらか凍上した。	×
④	-6	+1	96 (4日)	凍上した。供試体のまわりまで水ができ取りだしが困難である。	×
⑤	-6	+1	72 (3日)	凍上した供試体も取りだしやすい。	○
⑥	-7	+1	72 (3日)	凍上した。急凍結して凍上が少なく供試体の取りだしが困難。	×
⑦	-7	+1	48 (2日)	凍上した。急凍結のため凍上が少ない。	×

(試料: 砂, シルト分15%使用)

表-2 現行法と改良案の実験結果

回数	方法	現行法 (A)		改良案 (B)	
		凍上率	増加含水比	凍上率	増加含水比
1回目		37.5	15.4	65.0	31.9
		50.8	20.0	64.5	31.5
		30.0	13.9	59.5	27.8
		54.2	20.6	60.0	28.4
		25.8	11.0	61.0	29.1
		27.5	11.8	58.0	27.6
2回目		82.5	29.6	64.0	31.5
		76.7	29.2	75.0	36.1
		80.0	25.8	65.0	30.9
		60.0	21.1	67.0	30.6
		50.8	19.3	67.0	32.9
		18.3	8.2	59.0	27.9
3回目		46.7	19.6	54.0	23.9
		62.5	22.4	72.0	32.0
		62.5	26.4	53.0	21.3
		10.8	6.8	59.0	27.9
		30.0	11.8	73.5	34.9
		10.0	8.1	78.0	35.2
4回目		29.2	12.6	63.0	29.7
		50.8	17.9	71.0	31.4
		75.8	28.5	59.0	27.9
		57.5	20.4	69.5	31.0
		39.2	17.9	66.5	30.1
		30.0	14.5	68.5	30.7
5回目		30.8	12.2	59.0	27.8
		46.7	19.8	69.0	30.6
		36.7	14.9	61.0	29.0
		10.0	6.6	68.5	30.8
		61.7	27.4	70.0	32.0
		72.5	28.9	68.5	30.6
総和 $\sum xi \cdot fi$		1357.5	542.6	1948.0	903.0
平均 $\bar{x} = \frac{\sum xi \cdot fi}{\sum fi}$		45.25	18.09	64.93	30.10
分散 $\sigma^2 = \frac{\sum (xi - \bar{x}) \cdot fi}{\sum fi - 1}$		$\sigma_A^2 = 451.57$	49.83	$\sigma_B^2 = 37.41$	9.12
分散比 ($F = \sigma_A^2 / \sigma_B^2$)				$F = (12.1)$	$F = (5.5)$
標準偏差 $\sigma = \sqrt{\sigma^2}$		$\sigma_A = 21.25$	7.06	$\sigma_B = 6.12$	3.02
変動係数 $K = \sigma / \bar{x}$		0.47	0.39	0.09	0.10

2. 試験条件を求めめるための実験と結果

(1) 調製試料の作製

実験では標準試料を作製し、粗粒材料に砂(錦岡産)、切込碎石(古平産)、細粒材料に鳥松産火山灰質土のシルト分以下を用いた。粒度分布を図-3に示す。

(2) 試験条件を求めめるための実験と結果

改良案モデルにおいて凍上試験の設定条件を求めめるため、凍上試験器の設定温度(気中温度と水中温度)の組合わせと試験時間を変化させて順次実験を行った。

その結果、表-1に示すとおり設定温度として、気中温度 -6°C 、水中温度 $+1^{\circ}\text{C}$ 、試験時間72時間が設定条件として最適であることがわかった。

3. 現行法と改良案の比較実験

実験には、粗粒材料(錦岡産洗砂)85%と細粒材料(鳥松産火山灰質土のシルト分以下)15%を調整して使用した。シルト分以下を15%混入したのは、凍上が顕著に現われる都合のよい割合だからである。

供試体は、現行法(厚さ3cm)と改良案(厚さ5cm)それぞれ6個ずつ計12個作成し、5回の比較実験を行った。凍上実験結果は、表-2のとおりである。実験データを分析し精度を推定すると、表-2に示すように凍上率の分散は現行法では $\sigma_A^2=451.57$ 、改良案 $\sigma_B^2=37.41$ で分散比は凍上率で12.1である。

また凍上率の標準偏差は、現行法 $\sigma_A=21.25$ 、改良案 $\sigma_B=6.12$ で、図-4に示すように改良案の精度のよいことがわかる。凍上率の変動係数は現行法で0.47、改良案で0.09であり、現行法の約1/5であることから、改良案はかなり安定した試験法と考えられる。

4. 凍上実験の結果と考察

改良案の凍上試験方法がかなり安定してきたことから、調製試料の砂および切込碎石について、シルト分以下の含有量を変化させて実験を行った結果が表-3(砂)、

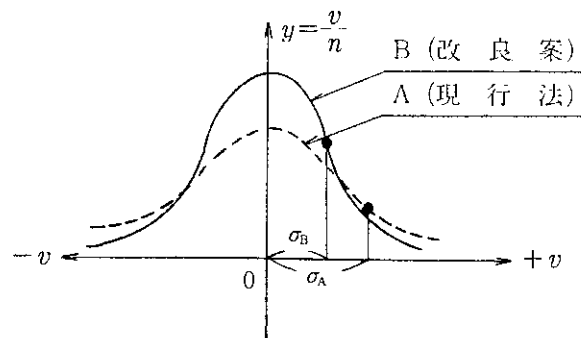


図-4 標準偏差による精度の比較

表-4(切込碎石)である。また、平行して実施した現行法での実験結果が表-5である。

(1) 試験値のバラツキの大きさの測定

各実験結果一覧表には、標準偏差、変動係数を示してあるが、各実験ともシルト分以下の含有量が増加すると凍上率の標準偏差が大きくなることわかる。

また凍上率の変動係数は、現行法(砂)で平均0.40であるが、改良案(砂)、(切込碎石)とも平均0.17で改良案試験結果が安定していることがわかる。

(2) シルト分以下の含有量に対する凍上率の変化

各試験法ともシルト分以下の増加に対して凍上率も増加しているが、その相関を求めてみたのが図-5であり、実験結果の凍上率の平均値を図示した。

シルト分以下15%ぐらいまで、各法とも同様な傾向を示している。しかし、過去の実験においても、シルト分以下が20%を超えると凍上率は大きく変動している。

今回の改良案の結果では、おおむね安定した動きを示している。1次回帰による相関係数を求めた結果、凍上率とシルト分以下含有量に対して、砂で $R=0.96$ 、切込碎石で $R=0.93$ であった。

(3) 凍上率と増加含水比の関係

凍上率の測定は四点法により、ノギスや三角スケールで計測され次の式で求める。

$$\text{凍上率}(\%) = \frac{\text{供試体の凍結後の高さ} - \text{供試体の初めの高さ}}{\text{供試体の初めの高さ}} \times 100$$

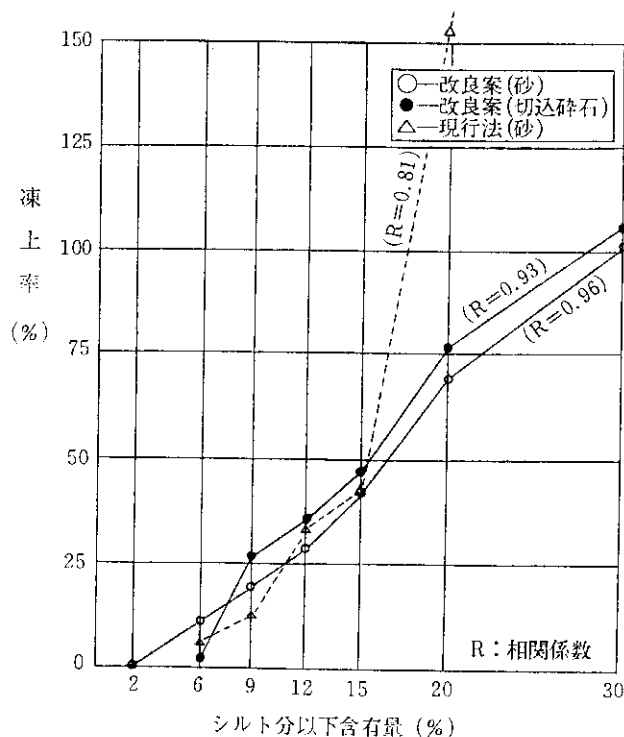


図-5 シルト分以下含有量と凍上率の変化

表-3 凍上実験結果一覧表 (改良案~砂)

設定温度 -6°C 試験時間 72 h
+1°C

シルト分	凍上率	平均値	偏差	標準偏差	変動係数	増加含水比	平均値	偏差	標準偏差	変動係数
2%	1.0		-0.1	0.20	0.18	9.2		-0.3	0.26	0.03
	1.0		-0.1			9.6		0.1		
	1.5	1.1	0.4			9.3	9.5	-0.2		
	1.0		-0.1			9.3		-0.2		
	1.0		-0.1			9.9		0.4		
	1.0		-0.1			9.5		0.0		
6%	12.5		0.2	0.98	0.08	12.0		0.6	0.57	0.05
	14.0		1.7			12.0		0.6		
	12.0	12.3	-0.3			11.3	11.4	-0.1		
	12.0		-0.3			11.7		0.3		
	12.5		0.2			11.0		-0.4		
	11.0		-1.3			10.6		-0.8		
9%	19.0		-1.5	2.74	0.13	12.0		-0.8	1.32	0.10
	26.0		5.5			15.5		2.7		
	20.0	20.5	-0.5			12.5	12.8	-0.3		
	19.0		-1.5			12.3		-0.5		
	20.0		-0.5			12.4		-0.4		
	19.0		-1.5			12.3		-0.5		
12%	28.0		-1.8	4.91	0.16	16.5		0.1	2.26	0.14
	38.5		8.7			20.3		3.9		
	28.5	29.8	-1.3			15.0	16.4	-1.4		
	24.0		-5.8			13.9		-2.5		
	31.5		1.7			17.4		1.0		
	28.0		-1.8			15.3		-1.1		
15%	30.0		-11.7	12.02	0.29	15.3		-5.1	5.01	0.25
	46.5		4.8			22.0		1.6		
	29.0	41.7	-12.7			15.3	20.4	-5.1		
	35.0		-6.7			18.0		-2.4		
	57.5		15.8			27.4		7.0		
	52.0		10.3			24.4		4.0		
20%	76.5		5.7	14.92	0.21	33.2		2.0	7.33	0.23
	87.0		16.2			40.2		9.0		
	58.5	70.8	-12.3			24.4	31.2	-6.8		
	47.0		-23.8			20.5		-10.7		
	79.0		8.2			35.2		4.0		
	76.5		5.7			33.8		2.6		
30%	97.0		-5.3	15.41	0.15	46.0		-3.2	7.49	0.15
	121.5		19.2			59.4		10.2		
	86.0	102.3	-16.3			42.0	49.2	-7.2		
	89.5		-12.8			42.1		-7.1		
	99.0		-3.3			48.7		-0.5		
	121.0		18.7			57.2		8.0		

(変動係数平均0.17)

(0.14)

表-4 凍上実験結果一覧表 (改良案~切込砕石)

設定温度 -6°C 試験時間 72 h
+1°C

シルト分	凍上率	平均値	偏差	標準偏差	変動係数	増加含水比	平均値	偏差	標準偏差	変動係数
6%	4.0		0.3	0.93	0.25	4.1		-0.2	1.17	0.27
	4.5		0.8			5.1		0.8		
	4.5	3.7	0.8			4.0	4.3	-0.3		
	2.0		-1.7			2.2		-2.1		
	3.5		-0.2			4.5		0.2		
	3.5		-0.2			5.6		1.3		
9%	24.5		-2.3	1.33	0.05	12.5		-0.8	1.52	0.11
	28.5		1.7			16.2		2.9		
	27.5	26.8	0.7			13.9	13.3	0.6		
	27.0		0.2			12.4		-0.9		
	27.0		0.2			12.7		-0.6		
	26.5		-0.3			12.3		-1.0		
12%	36.5		1.2	3.43	0.09	17.6		-1.0	2.37	0.13
	39.5		1.8			18.2		-0.4		
	37.5	37.7	-0.2			17.6	18.6	-1.0		
	40.5		2.8			22.7		4.1		
	31.5		-6.2			15.7		-2.9		
	40.5		2.8			19.5		0.9		
15%	48.0		-0.1	6.28	0.13	23.0		0.6	3.91	0.17
	48.0		-0.1			22.2		-0.2		
	48.0	48.1	-0.1			22.6	22.4	0.2		
	37.0		-11.1			15.4		-7.0		
	56.0		7.9			27.3		4.9		
	51.5		3.4			24.1		1.7		
20%	49.0		-29.9	18.71	0.24	23.2		-15.7	9.93	0.26
	99.0		20.1			50.1		11.2		
	75.5	78.9	-3.4			35.0	38.9	-3.9		
	71.5		-7.4			36.0		-2.9		
	80.0		1.1			40.2		1.3		
	98.5		19.6			48.7		9.8		
30%	64.0		-43.0	27.17	0.25	33.1		-22.6	14.22	0.26
	140.0		33.0			73.6		17.9		
	91.0	107.0	-16.0			47.1	55.7	-8.6		
	126.0		19.0			65.7		10.0		
	103.0		-4.0			57.1		1.4		
	118.0		11.0			57.6		1.9		
					平均 0.17					平均 0.20

表—5 凍上実験結果一覽表 (現行法～砂)

シルト分	凍上率	平均値	偏 差	標 準 差	変 係 数	増 加 比	平均値	偏 差	標 準 差	変 係 数
6%	9.2		1.8	1.86	0.25	9.0		1.7	1.12	0.15
	9.2		1.8			7.4		0.1		
	7.5	7.4	0.1			6.2	7.3	- 1.1		
	6.7		- 0.7			6.3		- 1.0		
	7.5		0.1			8.2		0.9		
	4.2		- 3.2			6.7		- 0.6		
9%	25.8		13.3	7.09	0.57	11.1		4.1	2.31	0.33
	15.0		2.5			6.5		- 0.5		
	8.3	12.5	- 4.2			6.4	7.0	- 0.6		
	6.7		- 5.8			4.7		- 2.3		
	9.2		- 3.3			5.3		- 1.7		
	10.0		- 2.5			8.0		1.0		
12%	27.5		- 7.2	12.9	0.37	11.2		- 3.1	5.47	0.38
	29.2		- 5.5			11.4		- 2.9		
	52.5	34.7	17.8			22.8	14.3	8.5		
	24.2		-10.5			9.3		- 5.0		
	50.0		15.3			19.5		5.2		
	25.0		- 9.7			11.6		- 2.7		
15%	45.0		5.8	16.3	0.42	20.0		4.0	6.33	0.40
	39.2		0.0			15.6		- 0.4		
	18.3	39.2	-20.9			8.1	16.0	- 7.9		
	21.7		-17.5			8.8		- 7.2		
	59.2		20.0			23.1		7.1		
	51.7		12.5			20.4		4.4		
20%	133.3		-24.7	60.5	0.38	37.1		-21.2	29.09	0.50
	100.8		-57.2			38.1		-20.2		
	167.5	158.0	9.5			55.9	58.3	- 2.4		
	108.3		-49.7			36.1		-22.2		
	265.8		107.8			110.1		51.8		
	172.5		14.5			72.2		13.9		

(平均 0.40)

(平均 0.35)

しかし、現行法の試験結果のように凍結後の供試体が変形し、凍上の仕方が一様でない供試体の測定は、測定誤差を含んだまま凍上率として示されてしまうのが現状である。このため、凍上率と増加含水比の関係について相関を求めたのが図-6、7である。増加含水比は、凍結後の含水比と凍結前の含水比の差であり凍上に要した水量である。相関係数は砂、切込砕石とも $R=0.99$ と高い正の相関を示している。1次回帰式の直線の傾きもほぼ同様な傾向を示していることから、増加含水比が凍上率

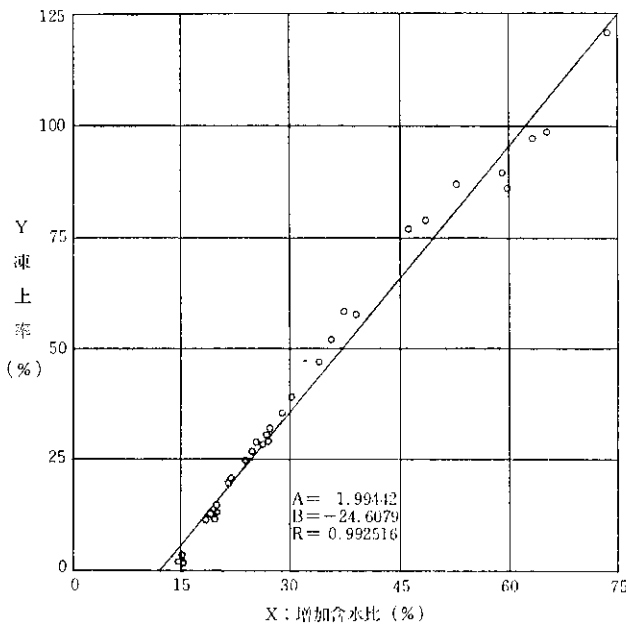


図-6 凍上率と増加含水比 (改良案—砂)

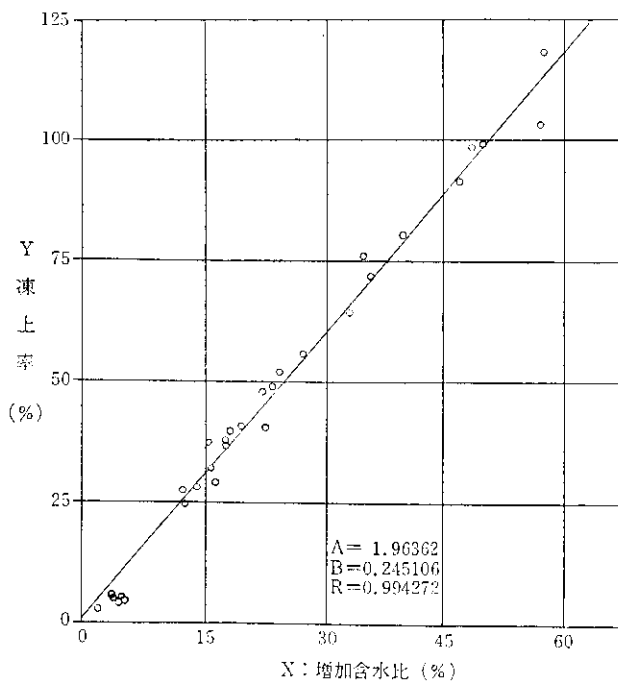


図-7 凍上率と増加含水比 (改良案—切込砕石)

の代替となり得ることを示している。これは供試体を重量測定することにより凍上率が判明し、スケールなどで計測するより精度の高いものとなる。

(4) 凍上試験の判定の基準について

凍上試験の判定は、現行法では凍結様式と凍上率で評価されている。凍上様式の判定は個人的判断の差が現われ、今後の評価の方法としては定量的な表現に改めることが必要と思われる。定量的な方法としては、増加含水比で表現する方法にすると凍上率との関係から相関も高く判定基準値の作成が可能である。また判定基準値を定めるためには、現地の凍上量と関連させることが必要である。このため、全道14カ所に凍上調査地点を設けている。これらの観測結果から凍上実態が把握され、同地点より室内実験用の試料を採取し材料による凍上率を究明する。このように、各地の各種の実験結果から相関を求め凍上判定基準の策定を計画している。

ま と め

(1) 現行法 (道路排水工指針：土の凍上試験方法) が策定されて20年以来、新規に凍上試験の改良案モデルを考案した。

(2) 改良案の凍上試験の設定温度と試験時間は、各種の組み合わせ実験から気中温度 -6°C 、水中温度 $+1^{\circ}\text{C}$ 、試験時間72時間が最適である。

(3) 改良案は現行法に比べ、おおむね安定した試験法である。砂 (シルト分以下含有量15%) では、凍上率の変動係数が現行法に比べ1/5であった。

(4) シルト分以下の含有量に対する凍上率の変化では、各試験法ともシルト分以下の増加に対して凍上率も増加している。シルト分以下15%ぐらまで各法とも同様な傾向を示した。

(5) 凍上率と増加含水比の関係は、高い正の相関があり増加含水比から凍上率が求められる。供試体の重量測定で凍上率を計測することが可能である。

(6) 凍上試験の判定の基準

増加含水比と凍上率を測定し、判定基準値を策定する。策定する場合、現地凍上調査と関連させる。このため、現地凍上量と室内凍上試験を連動させ相関を求める実験計画をもっている。

あ と が き

この実験では、現行法モデルと改良案モデルの比較から出発したが、おおむね改良案モデルの試験結果の安定性が確認された。今後、改良案の試験方法により凍上の判定基準値の策定に向けて現地調査とも連動させ、継続

した実験から新凍上試験法を提案したい。最後に本実験には当研究室の斎藤敏彦技官，五十嵐光徳技官，川畑新一技官の協力を得た。記して謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会(社団法人): 道路排水工指針.
- 2) 北海道開発局: 道路河川工事仕様書.
- 3) 土質工学会編: 土の凍結 —その制御と応用—.
- 4) 森北出版株式会社: 凍土の物理学. 木上誠一編著.
- 5) 北海道土木技術会舗装研究会委員: 伊福部宗夫博士論文集.
- 6) 山田了士, 熊谷茂樹, 上田正昭, 有田政博: 凍土試験方法の改良について. 第28回北海道開発局技術研究発表会資料.
- 7) 水島達朗, 熊谷茂樹, 上田正昭, 五十嵐光徳: 凍上試験方法の改良に関する実験. 第29回北海道開発局技術研究発表会資料.

*

*

*