

低温液貯槽に用いるコンクリートの透気，透水性 に関する基礎的研究

AIR AND WATER PERMEABILITY OF CONCRETE USED FOR LOW-TEMPERATURE LIQUID STORAGE TANKS

初崎俊夫*・川崎宏二**・三浦 尚***

By Toshio HATSUZAKI, Koji KAWASAKI and Takashi MIURA

Experiments were made to study the permeability of concrete used for low temperature liquid storage PS concrete tanks.

This report consists of three parts. The first covers the airtightness of concrete under normal temperatures, the second does the airtightness of concrete under low temperatures and the third does the airtightness of concrete in a model tank.

According to the test results, it was found that the coefficient of permeability of concrete having a design strength of more than 400 kgf/cm^2 under low temperatures is in the order of same or below under normal temperatures. Almost the same can be said of concrete subjected to freezing and thawing. The coefficient of permeability of the model tank, which contains several construction joints was between 1.0×10^{-7} and 1.0×10^{-8} cm/s, which is greater than completely monolithic concrete by two orders.

Keywords : permeability of concrete

1. 序

LNG, LPGなどの地上低温液貯蔵タンクは、日本では金属二重殻タンクが主流となっている。このタンクは内槽に低温用鋼材、外殻に普通鋼材を使用している。

欧米先進国では、外部からの衝撃に対する安全性と耐久性から、内槽に低温用鋼材、外殻にプレストレストコンクリートを使用した外槽PC低温タンクが注目されてきている。

コンクリートタンクに直接LNG, LPGを貯蔵するためには、コンクリートは低温においても気密性、液密性を有するものでなければならない。ところが今日まで常温におけるコンクリートの透水性、透気性に関しては数編の論文が発表されている（たとえば、コンクリート箱型缶体の透気性に関する研究）が、低温時における研究はほとんどないものと思われる。

そこで本研究では、低温液貯蔵タンクの内槽をコンクリート製にしたときに問題となる、低温下におけるコンクリートの透水性、透気性について主として実験によ

て検討することとした。

コンクリートの透気性と透水性とを考えた場合、これらは必ずしも比例関係にあるとは限らないが、ほぼ同じ傾向にあるものである。そして同じ材質のものに対して透気量の方が容積比で600～3000倍の敏感さをもっている。したがって、実用上は気密性が満足できれば、液密性も十分満足できるものと考えられる。

一方、コンクリートの透気量は、養生条件、特に含水率に大きく左右されるといわれている。また低温液貯蔵タンクの場合実際には、コンクリートが低温状態にあるばかりでなく液面下では、片面が直接低温液体に接した状態にあるため、その状態における液気密性が問題となる。さらにタンクは、定期検査等で2～3年に1回、ウォームアップ、クールダウンを行うことになり、この冷却の繰り返しによって気密性が低下することも考えられる。

本研究では、初めにコンクリートの種類がコンクリートの透水性および、透気性に及ぼす影響を調べるとともに、実物大の部分模型によって施工方法の影響を調べた。

次に極低温下における透気性および、冷却の繰り返しを受けたコンクリートの透気性の変化を調べ、さらにモデルタンクを作って、これらの結果を総合的に確認した。

* 正会員 大成建設株式会社技術研究所主席研究員
(〒245 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

** 正会員 大成建設株式会社技術研究所係長(同上)

*** 正会員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科
(〒980 仙台市荒巻字青葉)

2. 透水性、透気性に及ぼす各種因子の影響

(1) 概要

低温液貯槽を目的とした各種コンクリートについて、透水性、透気性を調べた。使用したコンクリートは、水セメント比40%、圧縮強度約400 kgf/cm²のコンクリートであり、比較のため水セメント比57%のコンクリート、フリージングの少ないといわれるダブルミキシングコンクリート、ひびわれ分散性がよいといわれるスチールファイバーコンクリートおよび、膨張混和剤（膨張を制御するAI粉末）混入コンクリートを用いた。

透気性に関してはさらに、コンクリートの乾燥状態、打継ぎ方法などの要因について基礎的実験を行い考察を加えた。

(2) 透水性試験

a) 試験方法

通常コンクリートの透水係数を直接求めるには、非常に長い時間を要し、また試験水圧も高いものを必要とする。

たとえばアメリカ合衆国開拓局の方法では、圧力28 kgf/cm²、400~600時間、DIN 1048でも6日程度を要する。

これに対して、都立大村田教授の提案する浸透深さ試験法¹⁾によって求められる初期拡散係数は、短時間で試験できるうえに誤差も少ないことから、コンクリートの透水性の尺度としてよく用いられる。本試験では、浸透深さ試験法に準じ透水性が大きい場合には、透水係数が求まるように中空円筒供試体を用いて試験を行った。

コンクリートの種類としては、表-1に示すように、通常のRC構造物に用いられる配合、PC構造物に用い

られる配合、膨張用混和剤を用いた配合、PC用をダブルミキシングしたものおよび、ダブルミキシングにスチールファイバー（φ0.5 mm、l=25 mm）を混入したものの5種類である。

供試体コンクリートは、50 lアイリッヒミキサーで混練し、φ200×400の型枠に打設した。膨張用混和剤を使用したPC-2については、コンクリート打設後高温恒温室内に入れ、鋼製型枠の周辺拘束と1.5 tf/m²の上載荷重による拘束を与えた。

養生方法は、材令21日まで標準養生、以後7日間は、20°C、RH=60%の室にて乾燥後、ビニールシートで密封し試験日まで放置した。

透水試験方法は、図-1の浸透装置を用いて供試体に15 kgf/cm²の軸圧を作用させ、側圧を手押しポンプにより、15 kgf/cm²まで昇圧させた後、アキュムレーター

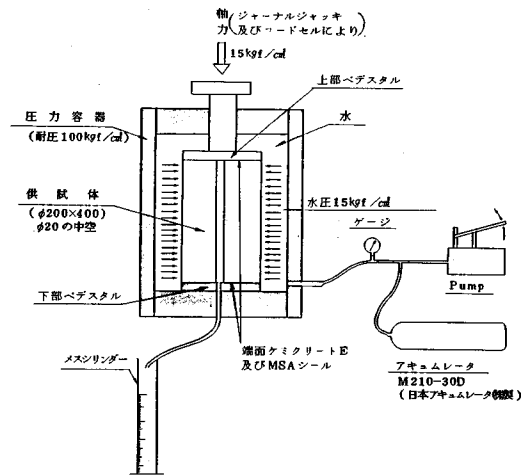


図-1 浸透装置

表-1 コンクリートの種類

配号	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ cm	空気量 %	水セメント比 w/c (%)	細骨材率 s/A (%)	単 位 量 (kg/m ³)				圧縮強度 σ ₂₈ (kgf/cm ²)	混練方法 他	
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G			混和材料
RC-1	25	13.2	5.0	57	42	160	281	782	1089	(ポゾリスNo.8) 0.703	326	材料同時投入 1分混練
PC-1	25	14.4	5.1	40	37	174	435	628	1078	(ポゾリスNo.8) 1.088	451	"
PC-2	25	14.9	5.1	40	37	174	435	628	1078	(ポゾリスNo.8) 1.088 + 膨張混和剤	338	膨張混和剤を 30秒後添加
PC-3	25	13.6	4.3	40	37	W ₁ =109 W ₂ =65	435	628	1078	(ポゾリスNo.8) 1.088	484	*3 ダブルミキシング
PC-4	25	8.5	4.6	40	37	W ₁ =109 W ₂ =65	435	628	1078	(ポゾリスNo.8) 1.088 + 2mmスチールファイバー 7.85	505	*4 ダブルミキシング+ ファイバー投入

*1 AI粉末GF-209-1 0.02×C%
流動化剤NP-20 0.3×C%

*2 φ0.5mm L=25mm

*3 W₁/C=2.5%
(S+W₁+G+C) → (W₁+Ad) →
75秒混練 60秒混練

*4 W₁/C=2.5%

(S+G+C) (W₁) → (W₁+Ad) →
30秒混練 60秒混練

回転させながら
ファイバー投入

を手押しポンプのホースに接続し所定時間（24～60時間）放置した。その後供試体を取り出しアムスラー試験機を用いて割裂し、浸透状況の確認と平均浸透深さの算出を行った。

拡散係数は、このようにして求めた平均浸透深さを用いて次より算出した。

$$\beta_i^2 = \alpha \frac{\mu}{\mu_{20}} \frac{D_m^2}{4 t \xi^2} \dots \dots \dots (1)$$

β_i^2 : 単位時間後の拡散係数 (cm²/s)

α : 換算係数 $\beta_i^2 = \alpha \beta^2$

μ, μ_{20} : 試験時温度, 20°Cにおける水の粘性係数 (g/cm・s)

D_m : 平均浸透深さ (cm)

t : 時間 (s)

ξ : $X = D_m$ における水圧を1 kgf/cm²としたときの $\frac{D_m}{2\beta t}$ の値で作用水圧により決まる (15kgf/cm²に対する $\xi = 1.301$).

b) 結果および考察

式(1)より求めた各配合の拡散係数は表-2に示す。また代表的な浸透状況として、RC-1とPC-3のコンクリートを写真-1, 2に示す。今回の実験におけるRC-1は 22.1×10^{-4} cm²/sであったのに対して文献¹⁾ではほぼ同じ水セメント比のコンクリート拡散係数が、 11.0×10^{-4} cm²/sと約2倍になっている。これは、水セメント比, s/a は今回の実験とほぼ同じであるが、骨材の種類、特に細骨材が違ふと、拡散係数が大きく変わる傾向にある、また、養生条件によっても変わる、これらが原因の1つと考えられる。

PC-1の拡散係数が小さくなったのは、水セメント比が小さく、コンクリートが密実になったことによると思

われる。

PC-3の結果より、ダブルミキシングを行った場合、ブリージング率が小さくなるため、さらに拡散係数は小さくなるのがわかった。

PC-4は強度が最も高いにもかかわらず、RC-1とほぼ同じ値になっている。これは混入しているスチールファイバーが水の浸透の通路になったのではないかと考えられる。また膨張混和剤混入のPC-2においてはコンクリート強度がRC-1と同じ程度であったにもかかわらず、供試体全面に水が浸透していた。しかしコンクリートに膨張混和剤を混入した場合その性質は膨張力と拘束力との関係によって微妙に異なってくるものであり、配合や施工法が少しでも異なれば結果は大きく異なる可能性もある。

以上の結果より、透水性の小さいコンクリートを得る

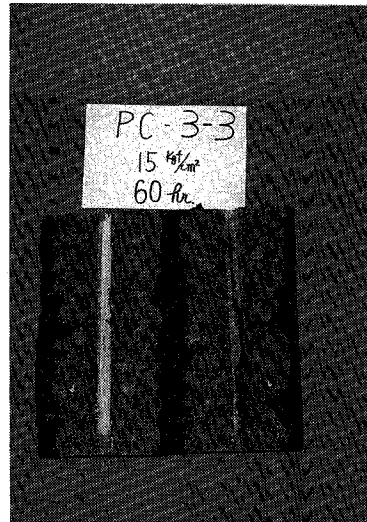


写真-2

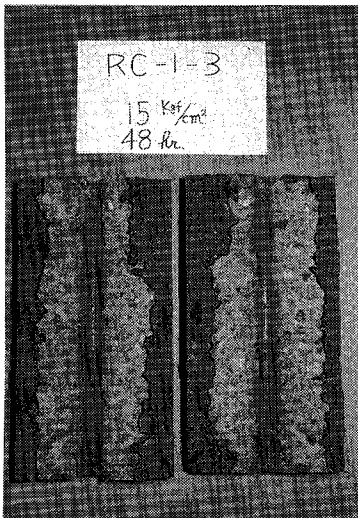


写真-1

表-2 各配合の拡散係数

供試体の 記号	浸透深さ (cm) [ブローマーターにより 求めた平均]	浸透 時間 (h)	拡散係数 (cm ² /sec)	
			平均浸透深さより求めた値	平均
RC-1	3.75	48	2.11×10^3	2.21×10^3
	4.36	48	2.84 "	
	3.35	48	1.68 "	
PC-1	1.78	48	4.78×10^4	5.67×10^4
	2.10	60	5.83 "	
	1.96	48	5.77 "	
	2.05	48	6.31 "	
PC-2	全面浸透	48		
		40		
		30		
		15		
PC-3	1.58	48	3.75×10^4	5.08×10^4
	2.00	48	6.01 "	
	1.91	48	5.48 "	
PC-4	4.13	48	8.67×10^3	1.96×10^3
	3.30	48	5.05 "	
	3.34	62.5	5.62 "	
	3.80	48	4.71 "	

ためには、スチールファイバーや膨張剤等は使用せず、水セメント比の小さい一般のコンクリートを用いるのが望ましく、ダブルミキシングすることによって、若干ではあるがさらによい結果が得られる可能性があることがわかった。

(3) 透気性試験

a) 試験方法

供試体コンクリートの種類および配合は、表-1 に示す透水試験と同じコンクリートを用いた。

透気試験は、構造物のコンクリート打設方向と合わせて縦方向に打設した供試体(600(縦)×100(横)×600(高

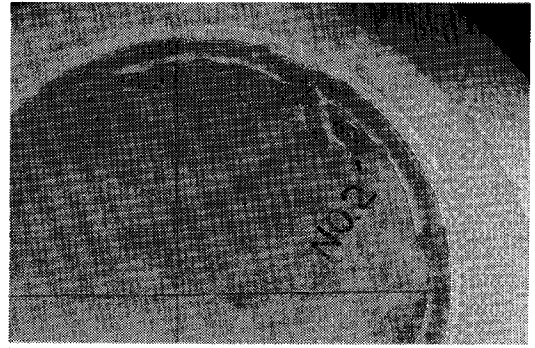


写真-3 LN₂ 蒸発直後にみられたひびわれ (記号: PC-2)

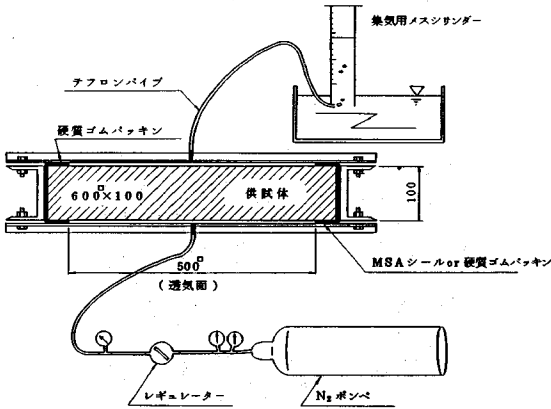


図-2 透気試験装置

表-3 試験条件

試験条件	養生及び熱衝撃の条件
I	材令 21 日まで標準養生後、+20℃、R・H=60%の室で7日間乾燥して、試験日までビニール密封
II	Iの透気試験後、+40℃、R・H=60%の室で14日間乾燥
III	IIの透気試験後、LN ₂ を液深約10cmまで瞬時的に投入して、液は自然蒸発させ、40℃、R・H=50%の室で5日間乾燥

さ) mm) について、表-3 の試験条件による気密性について試験を行った。透気試験装置は、図-2 に示すように N₂ ガスを用いて、2 kgf/cm² のガス圧を保持する方法で、ほぼ定常状態が得られるまで所定時間ごとに透気量を読み取る。

また、試験条件IIIでコンクリートに熱衝撃を与える方法は、供試体中央にフォームポリスチレン (内径 φ 300 mm, 厚さ t=30 mm) の筒をウレタン系接着材で接着した槽に LN₂ (液体窒素) を液深約 10 cm まで瞬時的に投入した後、液を自然蒸発させ供試体が常温になるまで放置した。

熱衝撃による供試体表面の温度変化は、図-3 に示すが供試体間で多少の差があり、7~12分間液状態にあった。また、LN₂ の蒸発直後にみられたひびわれを写真-3 に示す。ひびわれは、すべての供試体にあったが、ファイバー入り供試体のひびわれは微細に分散していた。

b) 結果および考察

透気係数は、式 (2) より算出し、表-4 に結果の一覧を示す。

$$K = \frac{Q \cdot L \cdot P_A}{P \cdot A} \dots \dots \dots (2)$$

- K: 透気係数 (cm/s)
- Q: 透過気体量 (cm³/s)
- L: 供試体の厚さ (cm)
- P_A: 大気圧に相当する気体の単位体積重量 (kgf/cm³)
- P: 気圧の圧力差 (kgf/cm²)
- A: 透気面積 (cm²)

試験条件 I においては、最も強度の低い RC-1 においても透気係数は、8.89×10⁻¹² cm/s と小さい値を示し、また、強度の高い PC-1 も同じ 10⁻¹² オーダーであった。一方強度の高い PC-3, PC-4 は 10⁻¹¹ オー

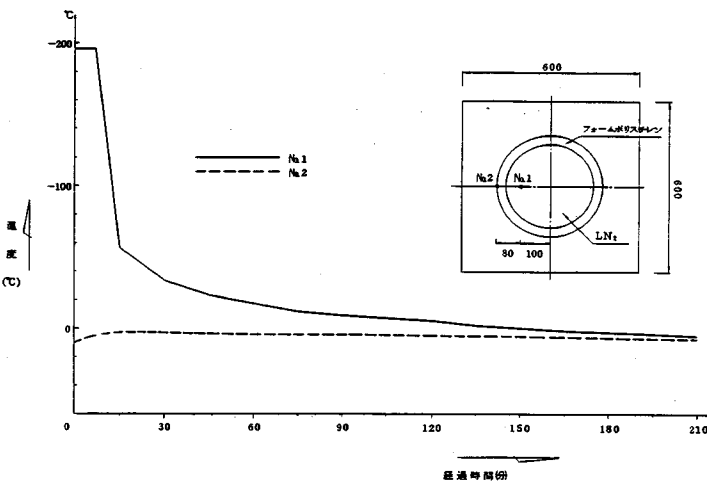


図-3 熱衝撃による供試体温度変化

表—4 透気係数一覧

試験条件 供試体	I		II		III	
RC-1	2.22 × 10 ⁻¹² 1.51 × 10 ⁻¹¹ 1.04 × 10 ⁻¹¹ 7.32 × 10 ⁻¹²	平均 8.89 × 10 ⁻¹² cm/sec	1.20 × 10 ⁻¹⁰ 2.00 × 10 ⁻¹⁰ 3.20 × 10 ⁻¹⁰ 3.60 × 10 ⁻¹⁰	平均 2.50 × 10 ⁻¹⁰ cm/sec *(0.9%)	1.70 × 10 ⁻⁸ 4.88 × 10 ⁻⁹ 4.22 × 10 ⁻⁹ 2.32 × 10 ⁻⁸	平均 1.23 × 10 ⁻⁸ cm/sec
PC-1	5.14 × 10 ⁻¹² 7.61 × 10 ⁻¹² 1.78 × 10 ⁻¹²	4.84 × 10 ⁻¹²	1.20 × 10 ⁻¹⁰ 1.00 × 10 ⁻¹⁰ 1.64 × 10 ⁻¹⁰	1.28 × 10 ⁻¹⁰ *(1.1%)	3.00 × 10 ⁻⁹ 7.60 × 10 ⁻¹⁰ 1.48 × 10 ⁻⁹ 2.61 × 10 ⁻⁹	1.96 × 10 ⁻⁹
PC-2	4.66 × 10 ⁻⁹ 2.81 × 10 ⁻⁹ 1.19 × 10 ⁻⁸ 1.20 × 10 ⁻⁸	7.84 × 10 ⁻⁹	3.00 × 10 ⁻⁸ 2.00 × 10 ⁻⁸ 2.40 × 10 ⁻⁸ 6.40 × 10 ⁻⁸	3.45 × 10 ⁻⁸ *(0.4%)	4.80 × 10 ⁻⁸ 5.44 × 10 ⁻⁸ 4.80 × 10 ⁻⁸ 1.30 × 10 ⁻⁷	7.01 × 10 ⁻⁸
PC-3	1.27 × 10 ⁻¹¹ 1.14 × 10 ⁻¹¹ 1.90 × 10 ⁻¹¹ 8.16 × 10 ⁻¹²	1.29 × 10 ⁻¹¹	8.40 × 10 ⁻¹¹ 1.60 × 10 ⁻¹¹ 4.80 × 10 ⁻¹¹ 8.00 × 10 ⁻¹¹	5.70 × 10 ⁻¹¹ *(1.0%)	1.80 × 10 ⁻⁹ 1.38 × 10 ⁻⁹ 3.20 × 10 ⁻¹⁰ 1.92 × 10 ⁻⁹	1.36 × 10 ⁻⁹
PC-4	7.94 × 10 ⁻¹² 9.09 × 10 ⁻¹² 1.92 × 10 ⁻¹¹ 2.50 × 10 ⁻¹¹	1.53 × 10 ⁻¹¹	1.16 × 10 ⁻¹⁰ 6.80 × 10 ⁻¹¹ 2.00 × 10 ⁻¹⁰ 1.24 × 10 ⁻¹⁰	1.27 × 10 ⁻¹⁰ *(0.34%)	5.00 × 10 ⁻¹⁰ 7.00 × 10 ⁻¹⁰ 1.10 × 10 ⁻⁹ 7.00 × 10 ⁻¹⁰	7.50 × 10 ⁻¹⁰

*: 試験条件 I → II による水分逸散

ダーと1オーダー大きい透気係数となっている。この原因としては、表—4の水分逸散量から予想されるように、含水状態に関係していると思われる。すなわちRC-1, PC-1は約1%の水分逸散が測定され、高い含水状態にあったのではないと思われる。

しかし、PC-3については高い含水状態であったにもかかわらず、PC-1より大きな値となっており、いずれにしても結果はかなりばらつきは大きかったものと思われる。

試験条件IIにおいては、PC-3の透気係数が最も小さくなっている。また膨張剤混入のPC-2は透気係数はほかよりかなり大きい。

試験条件IIIでは強度の高いコンクリートが小さい透気係数を示す傾向にある。すなわち、スチールファイバー

混入のPC-4が最も小さい値を示しており、これはファイバーを用いたことにより、ひびわれ分散性がよくなり、ひびわれ幅も0.04~0.06mm程度とひびわれの影響が最も小さかったことを示している。

以上の結果より、コンクリートのN₂の透気性は、透水性の結果とほぼ同じ傾向を示すものの、スチールファイバー混入のコンクリートにおいては、透水性の結果と比べて相対的にかなり透気係数が小さくなることがわかった。特に、熱衝撃を与える等、ひびわれの発生が考えられる場合においては、他の供試体に比べて、かなりよい結果を示すことがわかった。

(4) 実物大部分模型による透気試験

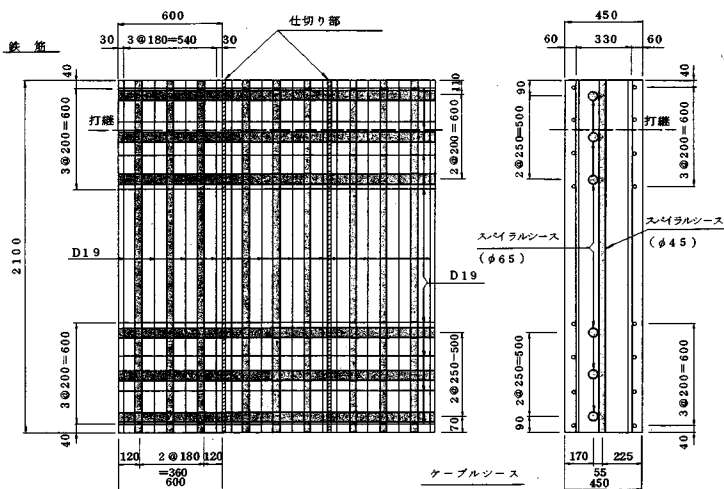
a) 試験方法

PCタンクの側壁下部を想定し、図—4の配筋、シース配置の型枠に、同一の条件(配筋、かぶり、シース配置、1リフトの高さ)で表—1のPC-1および、PC-3のコンクリートを打設した。

試験用供試体(600×600×450mm)は、これら600×450×2100mmのコンクリート版の打継ぎのある部分とない部分とからダイヤモンドカッターにより切り出した。

コンクリート打設方法は以下のとおりである。

PC-1の場合、2m³水平2軸強制ミキサーにより、全材料同時投入後90s混練、トラックアジテーターから直接シュートを用いて、1リフト(1.8m)まで打設、3日間シート養生した後、



図—4 配筋およびシースの配置

表—5 コンクリートの試験値

コンクリートの種類	第1リフト				第2リフト			
	スランブ (cm)	空気量 (%)	強度 σ_{28} (kgf/cm ²)	ブリージング率 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	強度 σ_{28} (kgf/cm ²)	ブリージング率 (%)
PC-1	10	3.8	514	1.62	14.8	4.2	435	1.59
PC-3	9.3	3.3	566	0.87	13.6	4.0	463	0.97

表—6 透気係数

コンクリートの種類	打ち継ぎ無し	打ち継ぎ有り	打ち継ぎによる透気係数の増加
PC-1	1.68×10^{-10} cm/sec	2.22×10^{-9} cm/sec	13.2倍
PC-3	4.73×10^{-11} cm/sec	1.29×10^{-9} cm/sec	27.3倍

手ノミによるチップングとワイヤーブラシによる方法で打継ぎ部の処理をし、第2リフトを打設した。

第2リフト打設後は同様にシート養生を2週間行なった。

PC-3の場合、同じミキサーでダブルミキシングを行い、同じ要領で打設した。

$(W_1+S+G) \rightarrow (C) \rightarrow (W_2+Ad) \rightarrow$ 生コン

$W_1/C = 25\%$

ダイヤモンドカッターで切り出した供試体は、40時間の気中乾燥 (-2~+12°C) 後、7日間の強制乾燥 (+40°C, RH=30%) を行い、図—2と同様の透気試験装置で試験を実施した。

b) 結果および考察

PC-1, PC-3のコンクリートの試験値は、表—5に示すように、ダブルミキシングコンクリートのブリージング率が小さい値となっている。

表—6に試験によって得られた透気係数を示す。

打ち継ぎなしの供試体は、2.(3)における試験条件IIの値に近い透気係数が得られているが、打ち継ぎありの場合は、打ち継ぎ部を手ノミによるチップング処理をする等注意して施工したにもかかわらず、透気係数の増加がPC-1...13.2倍、PC-3...27.3倍とかなり大きい結果となった。

ブリージング率の小さいPC-3コンクリートの透気係数の増加率が大きい理由はコンクリートの打ち継ぎ部で

は、コンクリートそのものの透気係数には比例しないで、透気係数が増加するためであると考えられる。

したがって、コンクリート構造物の透気性に対しては、コンクリートそのものの透気性よりも、打継ぎ部の透気性の影響が大変大きいことがわかった。

3. 低温におけるコンクリートの透気性

(1) 概要

低温液貯槽用PCタンクコンクリートは、クールダウン後、凍結状態にある。また、定期検査等により、2~3年に1回ウォームアップがあると想定されている。この状態を想定して、設計基準強度400 kgf/cm²のコンクリートについて、極低温時および冷却を繰り返した場合の液気密性を調べるため、基礎的実験を行い考察を加えた。

(2) 試験方法

供試体は、表—7に示す配合および強度のコンクリートを用いた750×750×100 mm (試験部500×500 mm)の無筋コンクリート板で、水平に設置した型枠に打設する方法で作成した。

表—8に供試体の種類、表—9に試験条件を示すように供試体の含水状態を気中放置、強制乾燥、水中の3種類にして、試験温度および試験圧力を変えた。

透気試験装置は、図—5, 6に示すようにLN₂による冷却に耐えるように作られたものである。

供試体の冷却は、冷却中においても供試体各部の温度差が20°C以下に保たれるように行い、冷却終了後LN₂が液深2~3 cmにたまった後、自然放置によって供試

表—8 供試体の種類

養生条件 コンクリートの種類	気中放置	強制乾燥	水中
PC-5	○	○	○
PC-6	○		
PC-7	○		

表—7 コンクリートの種類

記号	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 w/c (%)	細骨材率 a/a (%)	単 位 量 (kg/m ³)				圧縮強度 σ_{28} (kgf/cm ²)	混練方法 他	
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G			
PC-5	25	13.1	3.6~4.2	40	44	166	415	765	978	ポゾリスルファ70 415 NP20 2.8	498	50ℓアイリッヒミキサーにより通常混練
PC-6	25	10.6	4.3~5.8	40	44	166	415	765	978	*1 ノンクラ 3ℓ	494	"
PC-7	25	5.4	2.3~2.8	40	44	166	415	765	978	*2 スーパーファイバー 7.5kg	475	"

*1: ひびわれ防止用混和剤
*2: φ0.5mm L=25mm

表-9 試験条件

試験圧力 温度	試験段階	0.5	1.0	2.0
		室温 (+15°C)	第1回冷却前	○
低温 (-196°C)	第1回冷却時		○	
	第3回冷却時		○	
	第3回冷却後			○



注) 試験時期は右図の通りである。

体温度を+2~+3°Cまで上昇させた。この冷却所用時間は約9時間(25°C/h)を要し、また上昇時間は約12時間であった。

(3) 結果および考察

透気係数は、測定値から式(2)を用いて算出し、表-10に結果をまとめた。

同一養生条件である気中放置の供試体について、第1回冷却前時点での透気係数を比較してみると、ひびわれ防止用混和剤(ノックラ)を用いたPC-6のコンクリートが若干大きくなっているが、三者ともほぼ同程度の値(4~8×10⁻¹⁰ cm/s)であり、配合の違いによる透気係数の差は少ないといえる。

含水状態による透気係数の値の違いをみると、第1回冷却前時点でのPC-5の普通コンクリートの場合、水中養生では全く透気が見られないが、他の測定例から、10⁻¹²オーダー以下と推定されるのに対し気中放置と強制乾燥では、オーダーとしてはほぼ同じ(10⁻¹⁰)であった。

文献²⁾によれば、水中、気中、絶乾養生のコンクリートでは、この順にそれぞれ100倍程度ずつ透気係数が大きくなると述べられている。本試験では、水中と気中では100倍程度の違いはあるものの、気中の強制乾燥では大差がなかった。

今回の実験では、強制乾燥においては、データ数が少ないため、精度のよい結果が得られていないと思われる。

室温で試験圧力を0.5, 1.0, 2.0 kgf/cm²と変えて行った。透気係数はすべてのケースで、試験圧力が上がるにつれて上昇しており、試験圧力2.0 kgf/cm²では、0.5 kgf/cm²の場合の1.3~1.8倍になったが、オーダーとしては大差ないと思われる。

供試体上面にLN₂をためた状態での試験では、全く透気が見られなかった。極低温時に供試体上面にLN₂をためない状態での試験を行い、表-10の〔 〕内に

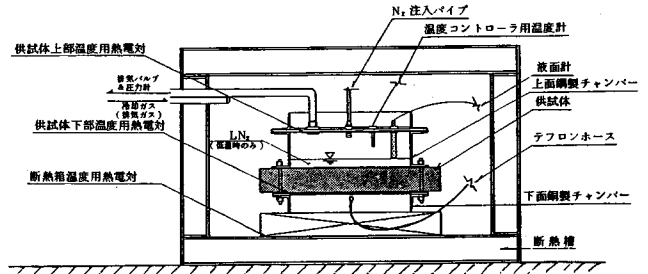


図-5 試験装置

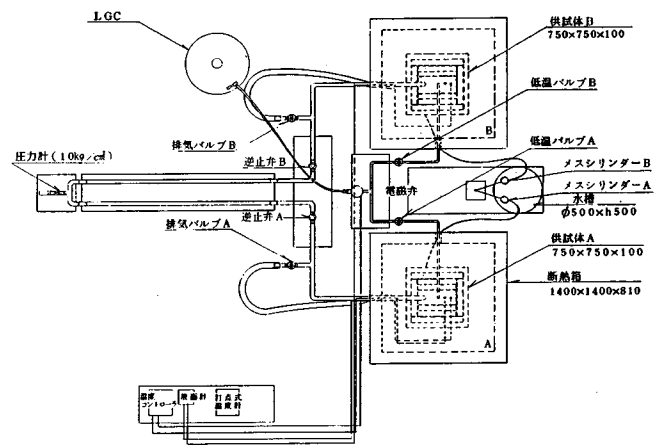
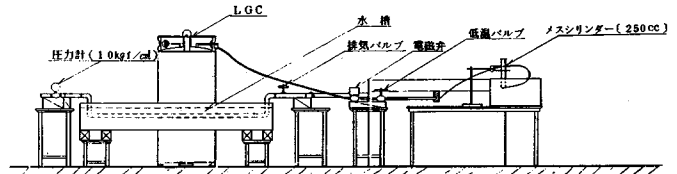


図-6 試験装置全体配置図

示す透気係数が観測された。

文献²⁾では、低温になれば若干(1オーダー以内)透気係数が低下すると述べられており、サンプル数が少ないが、この傾向は一致している。

冷却を繰り返した供試体の透気係数の変化は、3サイクルの試験ではみられなかった。

4. モデルタンクによる透気性の測定

(1) 概要

PCタンクが低温液化ガス貯蔵タンクとして安全に機能することを実証するために、モデルタンクを製作した。

モデルタンクは、実用タンク(80000 kJ LNGタンクを想定)の1/15縮尺のプレストレストコンクリート製で、内径4.0m、液深1.9m、タンク容量24m³である。

LNGの模擬液としてLN₂を用いて、冷却に伴う温度分布、ひずみ変化等の一連の実験で、冷却前と冷却し室温に戻した後における気密試験を行った。

(2) 試験方法

モデルタンクの一般構造図およびコンクリート打設順序は、図-7, 8に示す。

表-10 透気係数一覧

コンクリートの種類	養生条件	注3) 含水率 (%)	供試体番号	透気係数 (cm/sec)						
				室温 (+15°C)			低温 (-196°C)		室温	
				第1回冷却前			第1回冷却時	第3回冷却時		第3回冷却後
				0.5kg/cm ²	1.0kg/cm ²	2.0kg/cm ²	1.0kg/cm ²	1.0kg/cm ²		2.0kg/cm ²
PC-5	気中放置	3.8	1-1	2.61×10 ⁻⁹	2.99×10 ⁻⁹	4.03×10 ⁻⁹	0	0	5.49×10 ⁻¹⁰	
			1-2	5.97×10 ⁻¹⁰	7.04×10 ⁻¹⁰	8.88×10 ⁻¹⁰	(7.44×10 ⁻¹⁰)	(7.58×10 ⁻¹⁰)	4.00×10 ⁻¹⁰	
			平均	4.29×10 ⁻¹⁰	5.02×10 ⁻¹⁰	6.46×10 ⁻¹⁰	0	0	4.75×10 ⁻¹⁰	
	強制乾燥	2.0	2-1	6.48×10 ⁻¹⁰	7.46×10 ⁻¹⁰	8.72×10 ⁻¹⁰	0	0	(2.72×10 ⁻¹⁰)	
			2-2	0	0	0	0	0	0	
			平均	6.48×10 ⁻¹⁰	7.46×10 ⁻¹⁰	8.72×10 ⁻¹⁰	0	0	5.21×10 ⁻¹⁰	
水中	4.3	3-1	0	0	0	0	0	0		
		3-2	0	0	0	クラック発生の高測定出来ず	同左	同左		
		平均	0	0	0	0	0	0		
PC-6	気中放置	3.7	4-1	9.98×10 ⁻⁹	1.12×10 ⁻⁸	1.37×10 ⁻⁸	0	0	7.87×10 ⁻¹⁰	
			4-2	1.65×10 ⁻⁹	1.92×10 ⁻⁹	2.96×10 ⁻⁹	0	0	4.45×10 ⁻¹⁰	
			平均	5.82×10 ⁻¹⁰	6.56×10 ⁻¹⁰	8.33×10 ⁻¹⁰	0	0	6.16×10 ⁻¹⁰	
PC-7	気中放置	3.7	5-1	4.16×10 ⁻¹⁰	5.17×10 ⁻¹⁰	6.45×10 ⁻¹⁰	0	0	6.43×10 ⁻¹⁰	
			5-2	3.95×10 ⁻¹⁰	5.12×10 ⁻¹⁰	6.11×10 ⁻¹⁰	0	0	6.48×10 ⁻¹⁰	
			平均	4.06×10 ⁻¹⁰	5.15×10 ⁻¹⁰	6.28×10 ⁻¹⁰	0	0	6.46×10 ⁻¹⁰	

- 注1) () 内の値は、供試体上面上にLN₂を溜めない状態での試験結果を示す。
- 注2) 2-2 供試体は強制乾燥養生であるにも拘らず、全く透気が見られず、ホース等の目詰まりの可能性が高いのでデータから除外した。
- 注3) 含水率は、最初の窒素試験を行なう前に、同一養生を行なったテストピース(φ10cm×20cm)で測定したものである。
- 注4) 透気係数 0 cm/secとは、図-5, 6の装置により透気量を測定することができなかった。

気密試験は、モデルタンクのマンホールに鋼製蓋を取り付け、コンプレッサーで空気を送り込み、タンク内圧を0.2 kgf/cm²まで上昇させた後、バルブを閉じてタンク内圧の経時変化を測定した。

試験は、図-9の冷却スケジュールに示すように、第1回実験としては、初めに常温で気密試験を行い、そして-100°Cまで冷却してから、再び常温に戻して気密試験を行った。

第2回実験は、モデルタンク内側にライニング材(両面をガラスクロスで補強したアルミシート)を張り付けた常温の状態では、気密試験を行い、そ

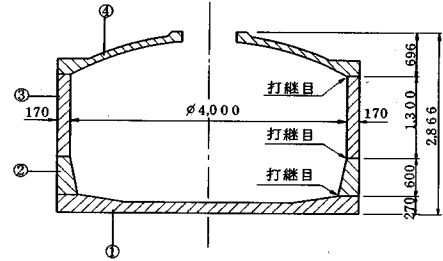


図-8 コンクリート打設順序

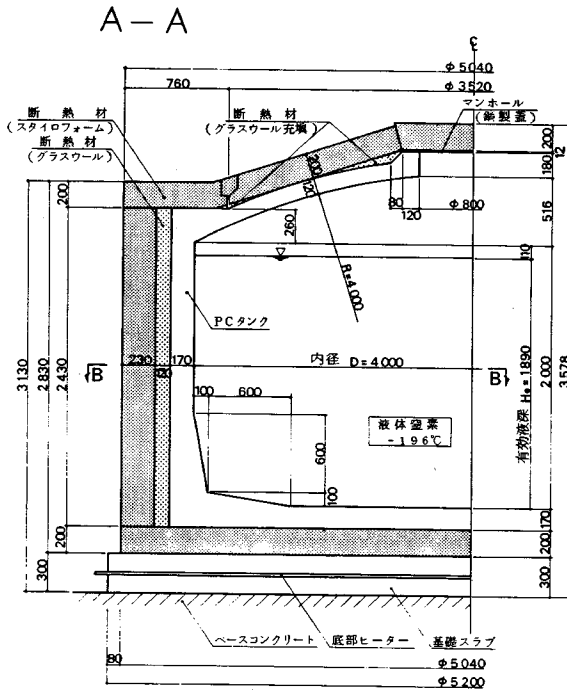
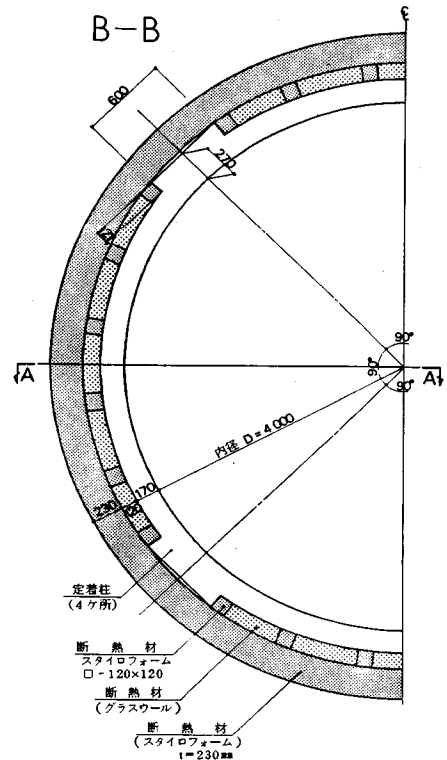


図-7 一般構造図



して、 -196°C まで冷却して、 LN_2 を貯留し、再び常温に戻してから、同様に気密試験を行った。

(3) 結果および考察

図-10に経過時間とタンク内圧の実測値との関係およびその計算値を示す。

図から明らかなように「第2回実験前」を除いて、時間経過に伴うタンク内圧の低下が観測された。

計算値は、打継ぎ目を考慮しないで、コンクリート部分が均一な透気係数をもつものと仮定して、時間経過に伴うタンク内圧の低下を式(3)により求めたものである。

$$P = P_0 \times e^{-\beta t} \dots \dots \dots (3)$$

ここに $\beta = \frac{K \cdot A}{V \cdot d \cdot \rho} = 982 \times K$

- タンク容量 $V = 2.85 \times 10^7 \text{ cm}^3$
- 表面積 $A = 5.71 \times 10^5 \text{ cm}^2$
- 壁厚 $d = 17 \text{ cm}$

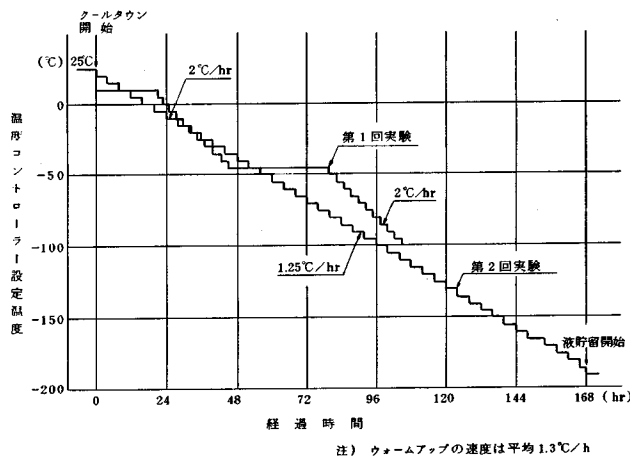


図-9 冷却タイムスケジュール

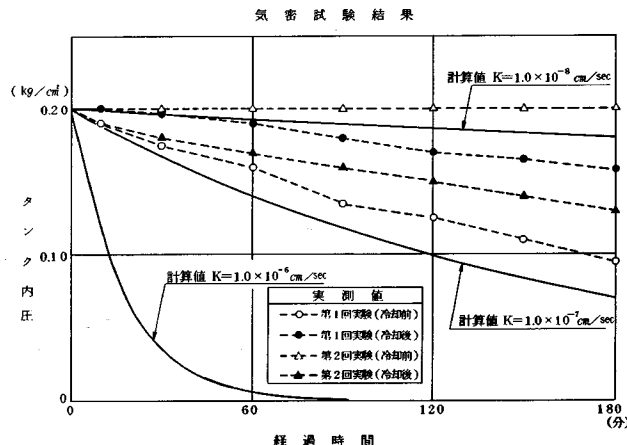


図-10 気密試験結果

- 空気 $\rho = 1.2 \times 10^{-6} \text{ kgf/cm}^3$ (N_2 ガスとして)
- 試験圧力 $P_0 = 0.2 \text{ kgf/cm}^2$
- 透気係数 K : cm/s
- 時間 t : s

式(3)より、モデルタンク本体の透気係数を推定すると、 $1.0 \times 10^{-7} \sim 1.0 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$ の範囲にあると考えられる。

「第1回実験」において、冷却前より後の方が内圧低下が少ない(気密性能が向上している)のは、冷却後のウォームアップ時に、タンク内面についた霜により、コンクリート中の水分が増加したためと思われる。

「第2回実験」の冷却前は、タンク内面にライニング材を施工した状態であり、内圧の低下は全くみられず、ライニング材の完全な気密性が確認された。ただし、冷却し室温に戻した後においては、ライニング材のコンクリート表面よりのがれがみられ、また、側壁目地接着部の欠陥より漏気しているのが観察されて、ライニング材がない状態と同程度まで内圧が低下した。

打継ぎ目のないコンクリートの透気係数は $1.0 \times 10^{-9} \sim 1.0 \times 10^{-10} \text{ cm/s}$ 程度であり、今回のように打継ぎ目(図-8)を含むタンク全体を均一な材料とみなした場合は、施工性から2オーダー程度気密性が低下するものと思われる。

したがってコンクリート製の内槽を考えた場合、コンクリートだけで完全気密内槽を構築することは困難であり、低温鋼材等の気密保持ライニングを施す必要がある。また、不完全気密内槽とすることも考えられる、この場合内外槽間に漏れるガスが許容濃度をこえないようにイナートガスで換気する必要がある。

5. まとめ

低温液貯槽用材料としてコンクリートを用いた場合に問題となるコンクリート体の透気性に関して、基礎的な研究を行った結果、次のようなことがわかった。

(1) 各種コンクリートにおける水の拡散係数を比較した結果、水セメント比が小さいほど小さくなること、膨張剤やスチールファイバーを用いた場合にはむしろ値が大きくなる可能性があること、ダブルミキシングによって若干ではあるが拡散係数が小さくなること等がわかった。

(2) 室温における各種コンクリートの透気係数は、圧縮強度が大きいものほど小さくなる傾向にあるが、透水性の結果と異なり、熱衝撃を受けた場合にはスチールファイバーコンクリートの透気係数が最も低くなる。これはスチールファイ

バーによるクラック幅の抑制およびクラック分散の効果と考えられる。

(3) 低温時および冷却の繰り返しによるコンクリートの透気係数は、室温時に比べて同等かわずかに低下する程度であり、3サイクルの冷却の繰り返しでは、ほとんど繰り返しの影響はない。また LN_2 に接している場合は透気現象はほとんどみられない。

(4) 配筋、シース配置等をしたコンクリートでは、打継ぎがない場合、透気係数は 10^{-10} cm/s オーダーであるが、打継ぎがある場合、1 オーダー低く、 10^{-9} cm/s のオーダーであった。

(5) コンクリートの打継ぎ目、およびマンホールを有する PC コンクリートのモデルタンクでは、打継ぎ目を含むタンク全体を均一な材料とみなした場合の透気係数は 10^{-7} cm/s オーダーであった。

したがって実際の構造物においても、打継ぎ目処理を入念に行い、設計基準強度 400 kgf/cm^2 以上のコンクリートを用いれば上記のオーダー程度になるものと思わ

れる。

熱衝撃を受ける場合には、スチールファイバーコンクリートが有効であるが、水の拡散係数が大きくなる可能性があるため、使用する場合には、特に熱衝撃が大きくなるタンク内面付近のみに、限定するのがよいと思われる。

謝 辞：本研究は、PC 二重殻低温タンクプロジェクトによって実施した実験結果を報告するものであって、プロジェクトメンバーの皆様に厚くお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 村田二郎：コンクリートの透水試験方法の一提案。
- 2) Bamforth, P. B., Morray, W. T. and Browne, R. O. : The Application of Concrete Property Data at Cryogenic Temperature to LNG Tank Design, 2nd Int. Conf. on Cryogenic Concrete, Amsterdam.

(1986. 8. 22・受付)