ＬＮＧ用コンクリートの模型実験　（第一報）

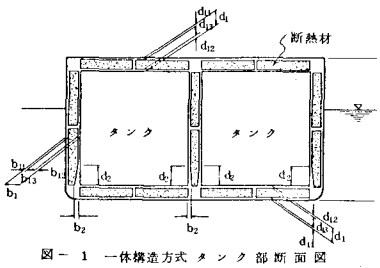
中央大学助教授　西沢紀昭
㈱　間　組　下村嘉平衛
㈱　開発機構　板子忠雄
フジタ工業㈱　田中誠一郎

はじめに

液化天然ガス（ＬＮＧ）は、クリーンエネルギーとして、また資源導入型の我が国としては、エネルギー源の多源化の１つとして注目されている。しかしこの天然ガスは、そのほとんどを海外に産し、我国への導入は外洋を越えて運ばねばならず輸送手段としては、鋼製ＬＮＧタンカーがその主体となっている。

この鋼製ＬＮＧタンカーに代るものとして、ＰＣタンカーやバージが考えられ、その船殻材料、貯槽およびバリヤーの材料にセメントコンクリート，レジンコンクリートなどの複合材料を利用することに注目した。

これはこれらの複合材料が、鋼材の低温脆性があること、船殻とＬＮＧ槽の複雑な構造など、鋼船の高価格などの欠点を補いうると考えたからである。



図－１　一体構造方式タンク部断面図

本研究は、バージシステムや、ラッシュシステムによるＬＮＧの輸送方式が、二次、三次輸送を含めて新しいシステムとして非常に有効な手段であることに着目し、このバージ構造を複合材料で考えた。図－１にバージの概念図を示す。複合材料は、低温脆性に良好であるばかりでなく特殊な技術を必要とせず、海水などの環境に対しても耐久性を有するなど多くの利点を有している。更には複合材料を適当な補強材を組合せた複合構造材は、強度的にも断面を選択することが出来サンドイッチ状に中間に断熱層などを入れることが可能で有効空間の増加をはかることが出来るなどの特徴を有している。

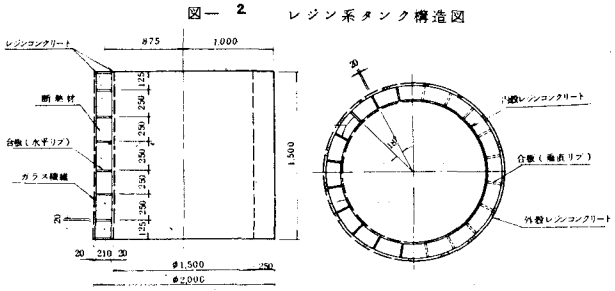
これらの複合構造材は、単にバージのみならず、海洋備基タンク、あるいは陸上タンク、地下タンクなどにも適用できるものである。

複合構造材としては、高強度、水密性、強度－コストの有利性よりレジンコンクリート系複合構造材を選定し基礎的性質を識る目的で模型実験を行った。　報文は模型実験に関する第一報である。

模型実験

模型実験は、レジンコンクリート系複合構造材が、ＬＮＧの極低温（－160°C）に適するか否か、また温度に対してどの様な挙動をするか、これらを識る目的で実験を行った。実験は、熱サイクルによる耐久性を識る低温貯留実験、急激な熱荷重での影響を見る熱衝撃実験、および組合されたそれぞれの構造素材が一体となって働くかを識る載荷実験の三実験を行った。

図－２　レジン系タンク構造図



実験に使用した複合構造体モデルは、厚さ２cmのレジンコンクリートをガラス繊維で補強した内外殻を、合板の水平リブ材、垂直リブ材で結び一本化構造としたものである。内外殻間は

断熱材（パーライトウレタン）を充塡した。試験体の大きさは、内径1.5M、外径2.0M、高さ1.5Mの円筒状で、内容積は約2.7M³である。構造を図－2に示す。

使用した複合材料の物理的性質は表－1に示す。

熱荷重は、LNGの温度と外気温を考へ液体窒素（－196℃）を使うこととした。液体窒素の供給はコールドエバポレーターから給液管を介して試験体内部に直接投入する方法をとった。

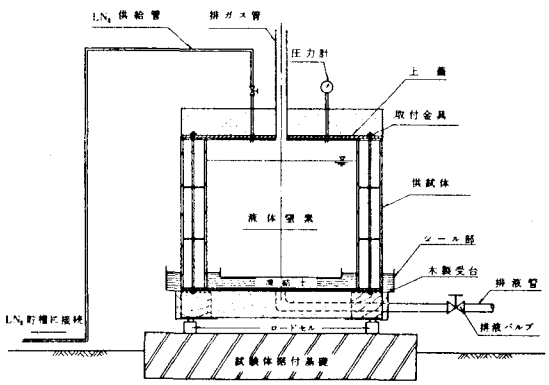
試験装置の略図を図－3に示す。試験体の上下を断熱材で覆った合板製の蓋を取り付け，配管類はこの蓋を貫通して取付けた。液のコントロールはコールドエバポレーターのバルブ操作で行った。熱衝撃は、多量の液体窒素の供給が必要なためタンクローリー車から直接供給した。

載荷実験の載荷重は、線荷重として反力壁を使い油圧ジャッキによった。

測定は、ひずみ、変位、温度について行ったが自動記録方式により計測した。

表－1　材料の性質

	E	σ		α	ρ	C	K
		σ_C	σ_B				
	Kg/cm²	Kg/cm²	Kg/cm²	℃⁻¹		Kcal/Kg℃	Kcal/mhr℃
レジンコンクリート	2.0×10^5	1,200	90	1.5×10^{-5}	2.20	0.25	1.50
ガラス繊維	7.4×10^5	－	15,000	5.0×10^{-6}	2.54	0.19	0.89
合板	0.6×10^5	150	750	6.0×10^{-6}	0.66	0.60	0.156
パーライトウレタン	－	－	－	－	0.40	0.32	0.04



図－3　試験装置図

i）低温貯留実験

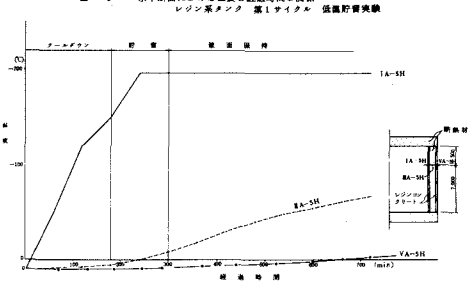
低温貯留実験は、急激な温度変化を与えないようにクールダウン（－60℃/hr）を行ない、内殻レジンコンクリートの壁面温度が、液温（－196℃）に達してから液の貯留を行った。クールダウン3時間、液貯留2時間の時間をかけて徐々に行った。液の貯留高さは1.2M、80％容量である。液の貯留終了后壁体の温度が定常状態になるまで液面の保持を行い、温度、ひずみなどの観測を行った。液の貯留を開始してから約20時間経過后にほぼ定常状態になった。第一サイクルでは24時、第二サイクル以降では20時間で液を放出した。各サイクルは、試験体が常温にもどってから実験を行った。

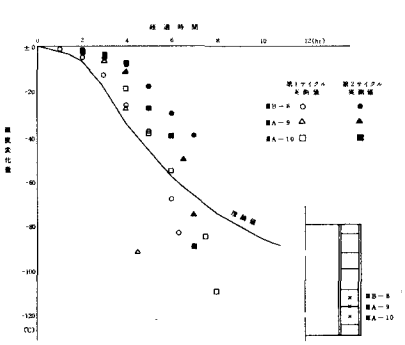
図－4に壁体断面における温度分布の経時変化の一例を示す。内殻レジンコンクリート壁面は、クールダウンと共に冷却されているが断熱材位置での温度変化は、相当に遅れて変化を示している。外殻レジンコンクリート壁はほとんど温度変化を示していない。クールダウン終了時にもっとも大きな温度勾配を履歴したものと考えられる。

図－5に断熱材中央部の温度の経時変化の一例を示す。図中の実線は、数値解析にて求めたもので、実測値も傾向としては同じ経過をとっている。また第一サイクル、第二サイクルとも同じ傾向を示していると云える。

図－6にひずみの経時変化の一例を示す。

図－4　水平断面における温度と経過時間の関係
レジン系タンク　第1サイクル　低温貯留実験



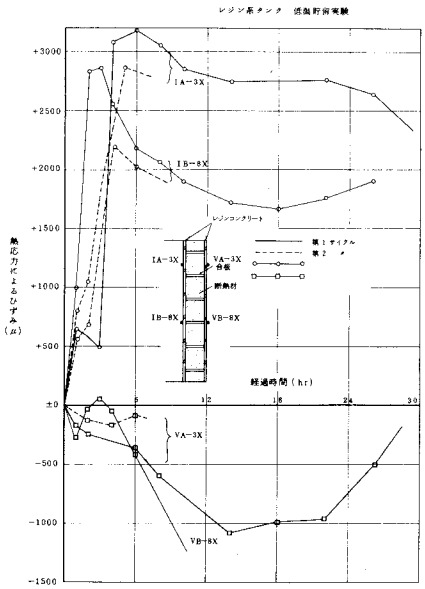


図－5.　温度変化量の経時変化（低温貯留実験）

ひずみは、温度補正を行った実応力のひずみで整理したものである。内殻レジンコンクリートは、クールダウン終了時に引張りひずみ約3,000μの数値を示しピークを示している。以降6時間経過ごろまでこの数値の減少を示し、その後はほぼ同じ数値を示している。一方外殻レジンコンクリートは、圧縮ひずみを示し、ピーク値を、内殻レジンコンクリートのピーク値より相当に遅れて示している。合板の水平リブ材もほぼ外殻レジンコンクリートと同じ傾向をたどっており、内殻に近いものほどその変化が大き傾向を示していた。しかしその絶対値は、応力として±40%～60%と数値的にはあまり大きくなかった。

このことは、非定常状態における温度伝波による応力の移行によるものと考えられる。

第一サイクルのひずみと第二サイクルのひずみを比較すると、第二サイクルのひずみが多少小さめな値を示す傾向にあった。実験中の外観からの観察においては、外殻レジンコンクリートの多少の温度低下の影響を受け、表面に霧をつく現象が認められたが構造上の変化は認められなかった。実験終了后における内面の観察において、補強された、ガラス繊維に、相当数の白化現象が、みられた。このことは、ガラス繊維の補強が少なかったことにも起因し、また熱応力が相当に厳しいことを示した。



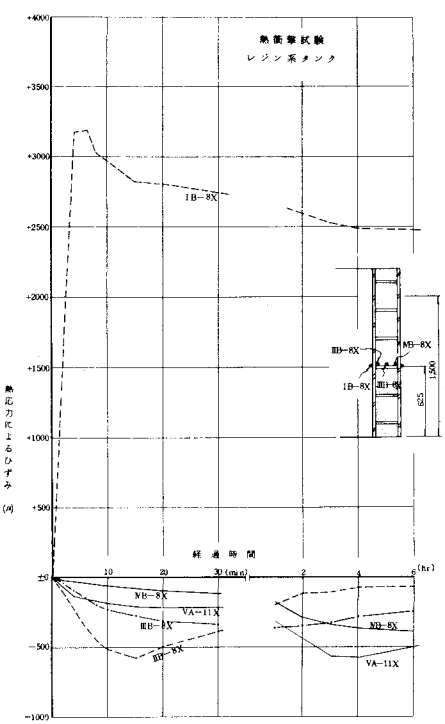
図－6　熱応力によるひずみと経過時間

ii) 熱衝撃実験

熱衝撃実験は、常温状態のタンクに急撃に液体窒素を投入しその挙動を観察した。タンクローリ車より直接液の供給を行い、12分で予定の高さまで貯留を終了した。タンクの外観には何らの変化も見うけられずそのまま液面の保持を行い20時間后に放液した。温度の経時変化は、内殻レジンコンクリートの壁面温度が、直ちに液温に達した以外は、温度分布の傾向、経時変化の傾向とも低温貯留実験と同じ傾向にあった。

図－7にひずみの経時変化の一例を示す。内殻レジンコンクリートは、液面の上昇と共に最大値（3,200μ）の引張りひずみを生じ、以后漸次減少の傾向を示している。外殻レンジコンクリート、中央の合板リブ材は共に圧縮ひずみを生じており、そのピークの発現は、低温貯留実験と同じ傾向である。熱衝撃、低温貯留両実験を比べるとその最大値は、熱衝撃実験の場合が大きい値を示しており、10～15%程度上まわっている。これはクールダウン時の温度伝播による応力緩和の影響と考えられる。

実験終了后の観察においては、内殻レジンコンクリートの壁面に補強したガラス繊維に白化現象が表われていたが、その量的なものについては、低温貯留実験と大差ない様であった。



図－7　熱応力によるひずみと経過時間

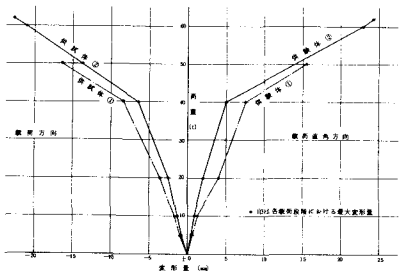
iii) 載荷実験

複合構造材の一体化挙動をみる載荷実験は、熱履歴を受けたもの（供試体①）を受けていないもの（供試体②）の二体について行った。熱履歴を受けた供試体①は、低温貯留実験に使用した供試体をそのまま使用した。

載荷重は、線荷重として段階荷重によった。各荷重段階は5サイクルのくりかえしを行った。表－2に荷重段階を示す。載荷速度、除荷速度は5 t/分で行い荷重制御によった。

表－2. 載荷計画

載荷段階	最大荷重 (t)	ひずみ測定間隔 (t)	サイクル数
第1段階	5	2.5	5
第2段階	10	2.5	5
第3段階	20	5	5
第4段階	40	5	5
第5段階	60	5	5
第6段階	80	5	5
⋮	20 tづつ増加	⋮	⋮
載荷速度：5 t/min 除荷速度：5 t/min			

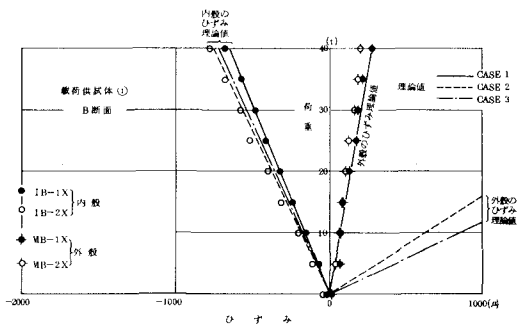


図－8 各載荷段階における最大変形量の包絡線

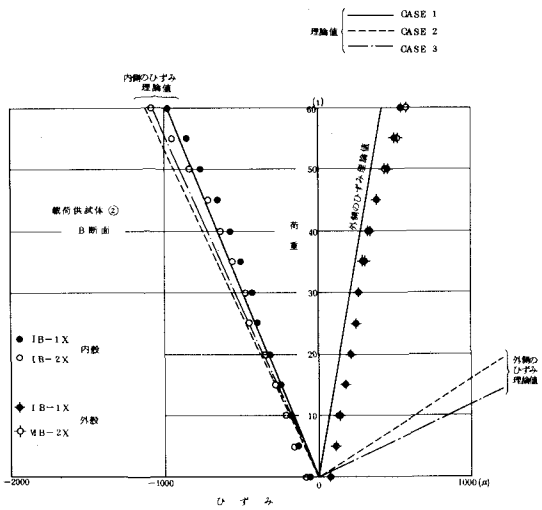
熱履歴を受けた供試体①は、第三段階（20 t）のころよりきしみ音を発生しはじめ、外殻レンジコンクリートの補強式ガラス繊維に従方向に白化現象を示し始めた。終局耐力は50 tであった。熱履歴を受けていない供試体②は、第2段階（10 t）を越えたころよりきしみ音を発生し、第4段階（40 t）から供試体①と同様にガラス繊維表面に白化現象を示し始めた。白化現象は、載荷直角方向の曲げ引張りを受ける面に特に著るしく表われた。終局耐力は、62 tであった。破壊の進展は、供試体①②とも載荷方向の内側のレジンコンクリートの部分から発生した。

図－8に各載荷段階における最大変形量の関係を示す。弾性領域と考えられるのは、供試体①で30 t、供試体②で40 tであった。変形量も供試体①が大きく出ており供試体②の15～20％増の数値を示している。

図－9、図－10に供試体①、②の荷重とレジンコンクリートの円周方向ひずみの関係を示す。
供試体①も供試体②も、ほとんど同じ傾向、同じ分布を示している。荷重が増大するにしたがいほぼ直線に的にひずみも増大し良い追従性を示している。
ここに示したＣＡＳＥ1～ＣＡＳＥ3の直線、破線等は、組合された構造材が、有効に1体化となって働くかを各ＣＡＳＥに別けて考えたものである。ＣＡＳＥ1は補強ガラス繊維、レジンコンクリート、合板が全て有効に働く場合、ＣＡＳＥ2は引張側においてレジンコンクリートの引張強度を無視した場合、ＣＡＳＥ3は同じくレジンコンクリート、合板の引張力を無視した場合である。なお圧縮側においては、ガラス繊維の圧縮力はいずれも無視している。以上において数値計算して求めた直線である。実測値の分布は、ほとんど、ＣＡＳＥ1の線上附近に分布しており、熱履歴を受けた供試体①も受けていない供試体②もほぼ1体化の挙動を示していると考えてもさしつかえないと思われる。なお合板部のひずみ分布もほぼ正常な分布を示しており、全体の構造材が一体となって働いていることを示していた。



図－9 荷重とひずみの関係（外殻，内殻）



図－10 荷重とひずみの関係（外殻，内殻）

ま と め

今回ＬＮＧバーシを目して、レジンコンクリート系複合構造材による基礎的実験を行ったが、これは単に複合構造材の一つを取り上げて実験を行ったにすぎず、決論的なことは言えないが、実験結果のみをまとめるとつぎのようなことがわかった。

1. レジンコンクリート系複合構成材（ガラス繊維補強－合板組込み）は、極低温の貯留に対して脆性的性質は示さなかった。
2. 中間部に断熱材を組み込んだ複合構造材は、熱的性質はほぼ期待通りのものであった。
3. ガラス繊維補強は、複合構造として非常に有効であると考えられる。熱荷重によってレジンコンクリートの引張（曲げ強度）以上の応力を履歴したと考えられる供試体も載荷実験では、ほぼ全体としての機能を発した。
4. 熱履歴を受けた複合材は、強度低下が認められた。載荷実験結果では変形量の増大、終局耐力の低下など、熱履歴の影響が見られた。
5. 今回の実験では、補強したガラス繊維に白化現象や多少のはがれが認められた。補強比や接着方法など更に検討の必要がある。

以上のことよりレジンコンクリート系複合構造材は、ＬＮＧ用の構造材として適用出来る可能性が認められた。

この研究は、(社) 日本海洋開発産業協会の低温エネルギーの海洋輸送備蓄一貫システムの研究として日本小型自動車振興会から補助金を受けて行った研究の一環であり、(株)間組、(株)開発機構、(株)ユニック、フジタ工業(株)の４社の共同研究である。(社)日本海洋開発産業協会をはじめこの研究の御指導、協力をいただいた諸兄に本紙をかりて謝意を表します。