

V-121 低温の影響を受けるRC構造物の熱的挙動（その2） 方形型低温液体貯蔵槽の熱衝撃実験

フジタ工業 技術研究所 正員 青景 平昌
同上 正員 和泉 四郎
同上 正員 檜村 博

§ 1 はじめに

低温下で使用するRC構造物の熱的挙動を検討する目的で、方形型の低温液体貯蔵槽のモデル供試体を作製し、正常な運用状況を考慮した冷却貯溜実験および液密断熱材の破損を想定した異常漏洩実験等を行なった。その1¹⁾では冷却貯溜実験の結果について報告したが、本報告は液密断熱材が破損して低温液体が直接RC構造物にふれる場合の衝撃的な温度変化に伴うひずみおよびひびわれの発生状況についてまとめたものである。

§ 2 供試体

供試体は $4 \times 4 \times 2.5\text{m}$ の方形型で形状寸法と配筋を図-1に示す。部材厚は 30cm で断面中央に配置したPC鋼棒(SBPR $\phi 17\text{mm} @ 300\text{mm}$)によって $15\text{Kg}/\text{cm}^2$ の面内プレストレスを導入している。鉄筋はSD30を、またコンクリートは普通骨材コンクリートを使用した。供試体は四隅を単純支持し、横方向の移動を自由にした。

§ 3 材料特性

底版部に使用したコンクリートの強度特性を図-2に示す。テストピースは現場水中養生し、試験前に気乾状態にしたもので含水率は6%程度であった。コンクリートの線膨張係数は温度の低下に伴って小さくなる傾向を示し、常温域では $10\mu/\text{C}$ で $-90\text{C} \sim -120\text{C}$ の範囲内では $7.3\mu/\text{C}$ であった²⁾。コンクリートの熱伝導率は温度の低下に伴って大きくなる傾向を示し、 $-30\text{C} \sim -110\text{C}$ の範囲の平均的な値は約 $2.5\text{kcal}/\text{mhC}$ であった。一方、鉄筋の強度は温度の低下に伴ない増加する傾向を示すが、弾性係数・線膨張数の変化は少ない³⁾。

§ 4 実験の方法および経過

常温($+4\text{C}$)の供試体内に液体窒素(-196C)を急激に注入し、コンクリートに衝撃的な温度変化を与え、冷却に伴う温度とひずみを経時的に測定した。液体窒素の平均注入速度は $2\text{l}/\text{sec}$ で、約1時間半で液位約 50cm まで注入した。注入開始後3時間で外表面に霜が発生し始め約21時間で液体窒素は完全に気化した。 -200C 程度の熱衝撃を作用させたが、断面を貫通する亀裂は発生せず、液体窒素の漏洩は認められなかった。その後に行なった水張加圧試験においても水の漏洩はなく、この種の履歴を受けても再使用が可能であることが認められた。内側表面のひびわれは亀甲状に分散した微細なもので底版全面に発生していた。ひびわれの深さはコーヤ採取によって調査したが、目視検査で 5mm 程度、金属用の染色浸透探傷剤による検査で、 14mm 程度であった。

§ 5 実験結果

底版中央断面の温度とひずみの測定結果を図-3、図-4に示す。ひずみの値は自由収縮状態の試験片における各温度の出力を実測出力から差し引いたもので、温度応力に相当するひずみを示している。これらの図より次のような特長が認められる。すなわち、(a)内側鉄筋の引張ひずみは温度が低下する途中で、最大値

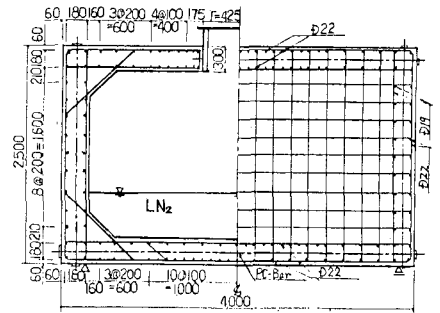


図-1 供試体の形状寸法および配筋図

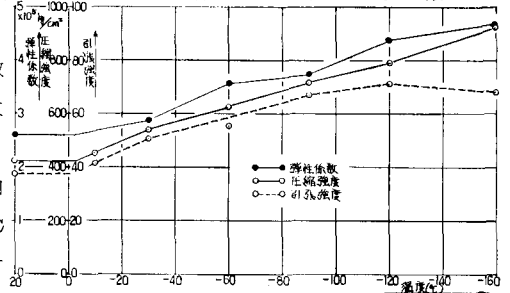


図-2 コンクリートの強度特性と温度の関係

1500 μ に達しその後は減少する。(b)断面中央のPC鋼棒のひずみは初期には圧縮ひずみを示すが、その後引張側に反転し、4時間経過時点で最大引張ひずみ約500 μ を示しその後は徐々に減少する。(c)外側鉄筋ひずみは初期には圧縮ひずみを示すが、その後引張側に反転し徐々にひずみは増加する傾向を示す。(d)外側コンクリート表面のひずみは初期には圧縮ひずみを示すが、その後減少しひずみがない状態に収束している。(e)内側鉄筋の温度は周囲のコンクリートよりも低い温度を示し、最終的には液温に達している。

§ 6 考 察

実験結果では、鉄筋とPC鋼棒のひずみは最終的に全て引張ひずみを示した。鉄筋とコンクリートの応力が同じ傾向にあると仮定するとRC断面は全引張の応力状態にあると考えられるが、これはコンクリートのひびわれ深さと一致しない。また内側鉄筋の最大引張ひずみは3時間経過時点で1500 μ 程度でその後は減少している。これらの傾向を説明するために、コンクリートのひびわれ深さ及び鉄筋とコンクリートの線膨脹係数の違いによる固有元応力を考慮して熱衝撃応力を求めた。算定方法は次の仮定に基づいた。(a)最初一様な温度にあった版の片面を一定温度の液体で冷却する。熱伝達率は冷却面で無限大、一方の面で断熱状態とする。(b)材料特性値は温度によって変化しない。(c)断面内温度はコンクリートの熱特性値に依存し、ひびわれの影響は受けない。(d)コンクリートの引張応力が引張強度を越える部分までひびわれが進展する。(e)RC版は境界で曲げ拘束されているとする。

以上の仮定で断面内の非定常温度分布 $T(z, t)$ ⁴⁾、ひびわれ深さまでを除いた区間のコンクリート部分および鉄筋部分(ヤング係数比を考慮)の平均温度 $T_{mean}(t)$ を求め次式より熱衝撃応力 $\sigma(z, t)$ を計算した。

$$\sigma(z, t) = \frac{E\alpha}{(1-\nu)} [T_{mean}(t) - T(z, t)] + k\sigma(z, t)$$

ここに、 α ：線膨脹係数、 $k\sigma(z, t)$ ：固有元応力

計算に用いた断面寸法、材料定数および3時間経過時点の断面内の応力分布を図-5に、また温度およびひずみの経時変化を図-3、図-4に実験結果と合わせて示す。温度の計算値は境界条件に実状と一致しない点があるので、実測温度に近い結果を示す熱伝達率を用いて計算したが、ひずみの経時変化は実測値と比較的良好一致をみ、材料特性の温度依存性に問題は残るものの、この種の計算法で現象を説明できると思われる。

§ 7 おわりに

本報告は社団法人・日本海洋産業開発協会の委託研究事業として行なった「昭和52年度LNGの海洋輸送・備蓄一貫システムの研究」のうち「大型バージモデルの低温実験」の一部をまとめたものであり、当協会および西沢紀昭部会長をはじめ、共同で実験を行なった石川島播磨重工業株式会社の関係各位に深謝致します。

参考文献 1) 第33回土木学会概要集 低温の影響を受けるRC構造物の熱的挙動(その1) 方形型低温液体貯蔵槽の低温液体(LN₂)貯溜実験 2) 日本海洋開発産業協会 昭和52年度低温エネルギーの海洋輸送・備蓄一貫システムの研究補助事業「大型バージモデルの低温実験」報告書 3) フジタ工業技術研究所報14 極低温下における鉄筋コンクリート部材の曲げ強度特性について 4) 竹内洋一郎著「熱応力」日新出版

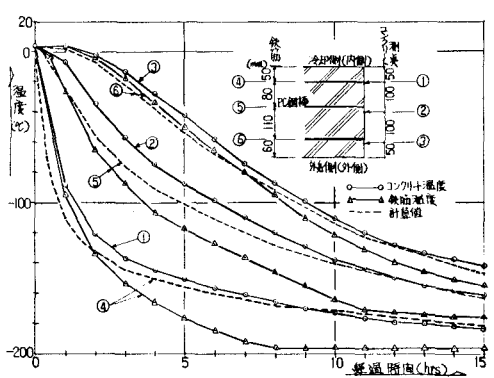


図-3 断面内温度の経時変化曲線

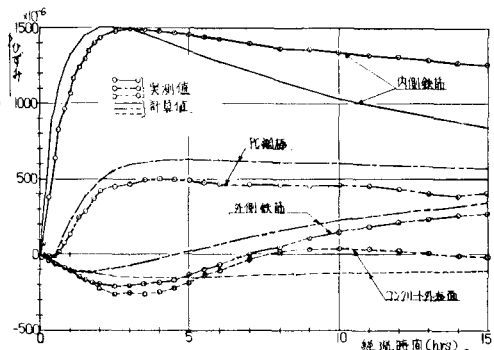


図-4 ひずみ経時変化曲線

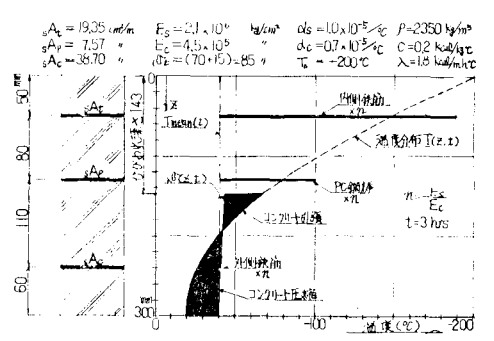


図-5 断面内応力分布(3時間時点)