

論文

[1074] PC LNG 貯槽用のコンクリートの材料配合選定に関する研究

- 正会員 入矢桂史郎 (大林組土木技術本部)
- 正会員 北村 八朗 (大阪ガス技術部)
- 正会員 岡井 大八 (大阪ガス技術部)
- 正会員 鎌田 文男 (大林組本店土木部)

1. まえがき

大阪ガス(株)泉北第2工場に建設を進めている容量14万klのPCLNG貯槽は、従来の金属二重殻構造の地上式貯槽とPC構造の防液堤を一体化した新しい型式のLNGタンクで、保安レベル、経済性、および敷地の利用効率の向上が図れる等の特長を有する。PC防液堤は、図-1に示すように、内径81m、堤高33m、壁厚0.9mの長大な円筒シェル構造で、RC構造の底版とは、一体構造になっている。PC防液堤は、万一の漏液に際して内容液を安全確実に貯留して、その影響を局限化するという要求機能から、所要の強度を有し、耐久性に優れ、かつ液密性の高い構造であることが要求される。ここでは、このような高品質が要求されるPCLNG貯槽用コンクリートの材料・配合を選定する際のプロセスとその結果について述べる。

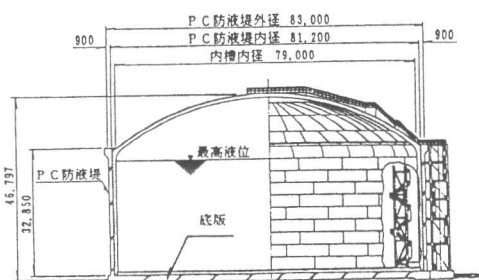


図-1 PCLNG貯槽断面図

2. 材料・配合選定フロー

要求性能を満足し、信頼性の高いコンクリート構造とするために、図-2に示すフローに従ってコンクリートの材料・配合の検討を行った。防液堤、底版は、ともにマスコンの範ちゅうに入り、水和熱に起因した温度応力ひびわれの発生が予測される。材料・配合の選定にあたっては、この主原因であるセメントの水和熱をできるだけ低く抑えることとした。

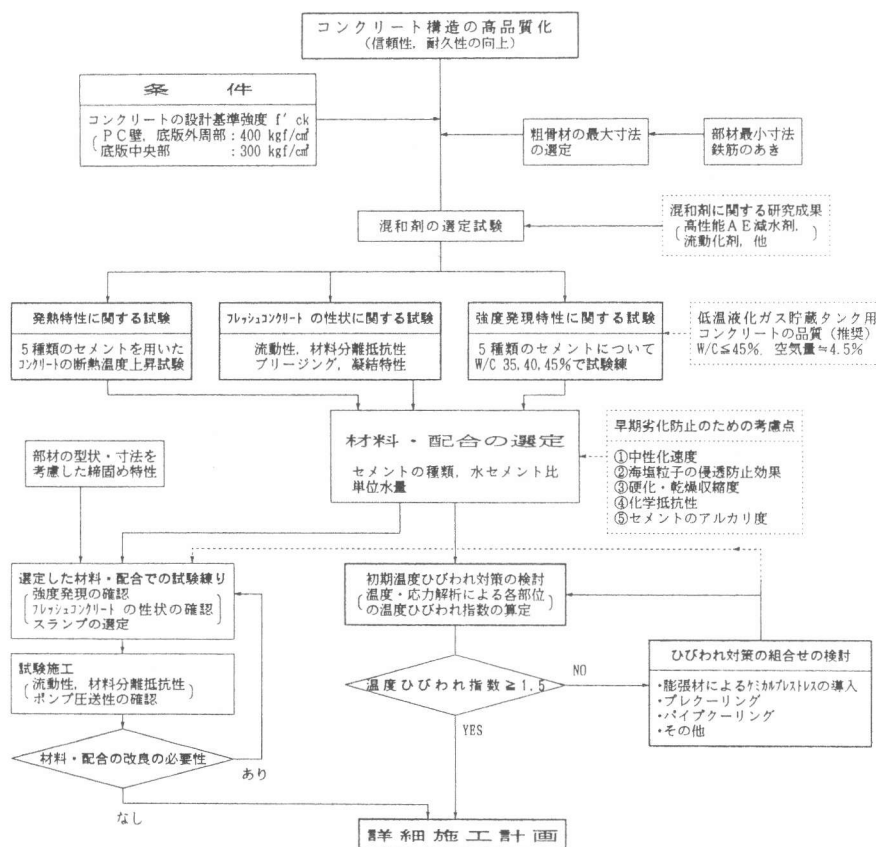


図-2 コンクリートの材料・配合選定フロー

3. 使用材料

3.1 セメント

本タンクは、臨海埋立地に建設され海水飛沫や潮風の作用を受けることから、セメントは硫酸塩や海水に対する化学抵抗性の大きい高炉セメント系もしくは中庸熱ポルトランドセメント系のものとし、低発熱化の改善を行うこととした。

表-1 使用セメントの構成

低発熱型セメントとしては、大型橋梁基礎のマスコングリート向けに開発された混合セメントが使用可能であった。防液堤は、部材厚が比較的薄く、構造もPC構造で埋め込み鋼材量が多いなど、橋梁基礎コンクリートとは異なる面がある。ここでは、この橋梁マスコングリート用のセメント（LHC）と、このセメントの低熱クリンカーの部分を利用して、ブレンドを変えたセメントを3種類選定し、中庸熱ポルトランドセメントとあわせてセメントの性能比較実験を実施して、最適なセメントを選定することとした。使用したセメントの混合成分について表-1に示す。

| 略号 | ブレンドの内容 | セメントを選定した理由 |
|-------|----------------------|----------------------------|
| MP | 中庸熱ポルトランドセメント | 低発熱セメントとしての基準 |
| LMP70 | 低熱クリンカー(LH)30%+MP70% | 混和材料を用いないでMPより低熱を期待した。 |
| LMP50 | LH50%+MP50% | LMP70より低熱を期待した。 |
| LHC | LH20%+高炉スラグ微粉末80% | 大型橋梁用低発熱型セメント高炉セメントC種相当とした |
| LHB | LH45%+高炉スラグ微粉末55% | LHCのスラグ混入率を下げ高炉セメントB相当とした。 |

3.2 混和剤

高性能AE減水剤を使用して単位水量、単位セメント量の低減を図ることとし、スランプロス抑制を配慮したN社製ナフタリン系（変性リグニン・アルカリスルホン酸・活性持続ポリマー）と凝結遅延の少ないポリカルボン酸エーテル系の2種類を選定の対象とした。

3.3 骨材

骨材については、貯槽建設地点のレデーミクストコンクリート工場で入手可能なものについて、アルカリ骨材反応の可能性の有無や工事期間中の安定供給可能なように原石量について調査して、原石山を決定した。その結果、細骨材は海砂（岡山県室木産、比重2.55、F.M.2.70）、粗骨材は、碎石（兵庫県家島産、比重2.63、F.M.6.60）を使用した。

3.4 混和材

細骨材として海砂を使用するため粒度分布がかたよることと、微粒分の不足が予測された。通常、この地域のレデーミクストコンクリート工場では、砕砂を一部混入して補正していたが、品質・粒度分布とも高耐久性が要求されるコンクリートに対しては、安定した性能は、期待できない状況であったので、ここではO社製の粉末度5000cm²/gの石灰石粉を用いて微粒分を補い、その効果を評価することとした。

4. 材料・配合の選定試験

4.1 セメントの選定試験

セメントの性能試験のための配合は、スランプリ12cm、水セメント比40%、高性能AE減水剤の使用量1.3%という条件で試験を行った。

表-2にその配合とフレッシュコンクリートの試験結果を示す。この試験では高性能AE減水剤は、ナフタリン系を用いた。

表-2 コンクリートの配合

| セメント種類 | W/C (%) | s/a (%) | 単体量 (kg/m ³) | | | | | Ad |
|--------|---------|---------|--------------------------|-----|-----|------|--------|----|
| | | | C | W | S | G | A d | |
| MP | 40 | 40 | 383 | 153 | 694 | 1076 | CX1.3% | |
| LHC | 41 | 40 | 355 | 142 | 727 | 1076 | CX1.3% | |
| LHB | 40 | 40 | 363 | 142 | 707 | 1094 | CX1.3% | |
| LMP70 | 40 | 40 | 375 | 150 | 700 | 1084 | CX1.3% | |
| LMP50 | 40 | 40 | 370 | 148 | 704 | 1091 | CX1.3% | |

(1) プリージングおよび凝結特性

20℃の条件下で実施したブリージング率と凝結時間の試験結果を図-3に示す。ブリージング率を基準値の2.0%、凝結始発時間を中庸熱ポルトランドセメントの12時間を境界として、4つのゾーンに区切って考えると、高炉スラグ微粉末を用いた低発熱セメント（以下に低熱型高炉セメント）は、「凝結は遅いがブリージングは少ない」というゾーン1、中庸熱ベースの高炉スラグを用いない低発熱セメント（以下に低熱型中庸熱セメント）は、「凝結は速いがブリージングは多い」というゾーン4にプロットされる。今回の試験では、凝結時間とブリージングの関係は強くあられずセメントの種類の影響が大きいという結果となった。

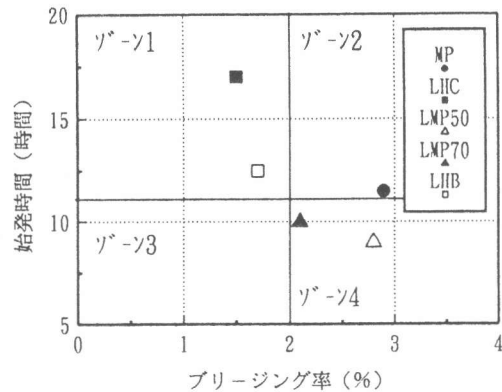


図-3 ブリージング率と凝結の関係

(2) フレッシュコンクリートの状態

水セメント比および高性能A E減水剤の添加率を一定とした条件で、同一のコンシステンシーを得るための単位水量は、表-2に示すように、LHCが最も少なく、LHB、LMP50、LMP70、MPの順に多くなり、MPは、LHCよりも11kg/m³多く必要とした。同じスランプ値であっても、LMP50、LMP70、MPは荒々しさが目立ち、スランプコーンを引き上げた時のコンクリートの形状や、それに打撃振動を与えたときの変形性から流動性、材料の分離抵抗性が劣ると観察された。水セメント比を45%まで大きくして単位セメント量が320kg/m³程度になるとスラグ微粉末の混合されたLHCやLHBでも荒々しさが認められた。

(3) 強度発現特性

材令と圧縮強度および引張強度の関係を図-4に示す。水セメント比40%では各セメントとも目標とする配合強度の480kgf/cm²を満足している。全体的に低発熱型セメントに特有の初期強度が低く長期強度が大きいという傾向が認められる。そのなかで、低熱型中庸熱セメントは、初期強度は低いが、材令28日から91日までの強度の伸びが大きく、低熱型高炉セメントは、初期強度は大きい、長期の伸びが若干少ないという傾向を示した。

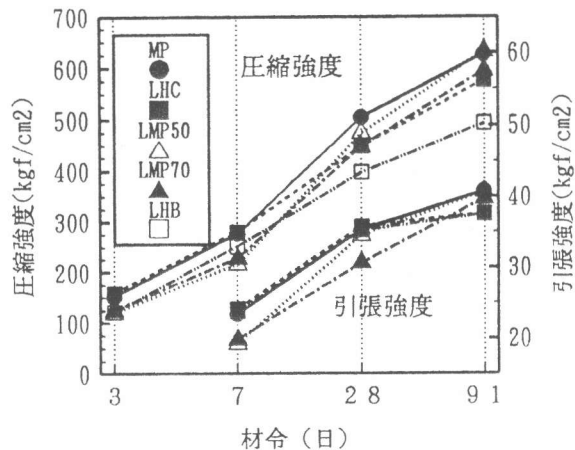


図-4 各セメントの強度発現

(4) 発熱特性と温度ひびわれ指数

セメントの断熱温度上昇特性を調査するために、一辺が1mの立方体のコンクリートを打設し、その周囲を厚さ20cm発泡スチロールで覆い断熱状態にし、温度分布の経時変化を計測した。その後、3次元FEM温度解析により逆解析することによって、断熱温度上昇式を求めた。その結果を表-3に示す。低熱型中庸熱セメントに比べ、低熱型高炉セメントは、断熱温度上昇量をさらに低く抑えることが可能である。強度の試験結果と、この発熱特性を用いて、底版を外部拘束体としてモデル化した防液堤の温度応力解析を打設温度をパラメータとして、CP法で行い、温度ひびわれ指数を算出した。

表-3 断熱温度上昇式

| セメントの種類 | 断熱温度上昇式 $K(1-EXP(-\alpha(t-\beta)))$ | | |
|---------|---|----------|--------------|
| | K(°C) | α | β (hr) |
| MP | 45.1 | 1.74 | 12 |
| LMP70 | 42.3 | 1.70 | 10 |
| LMP50 | 39.1 | 1.67 | 9 |
| LHC | 32.4 | 1.64 | 18 |
| LHB | 37.8 | 1.70 | 12 |

防液堤のようなロット毎に分割して上方に施工していく壁状構造物では、各ロットの最小温度ひびわれ指数は、壁体の温度が外気温と同様になって後、次ロットが打設された時の温度上昇にともなう引張応力度の増加時に生じる。セメント毎の打設温度に応じた最小温度ひびわれ指数を図-5に示す。壁厚90cmの防液堤に対して、1年間の施工を通して温度ひびわれ指数1.5以上を満足するためには、MPおよびLMP70は、打設温度を20℃以下にする必要があり、

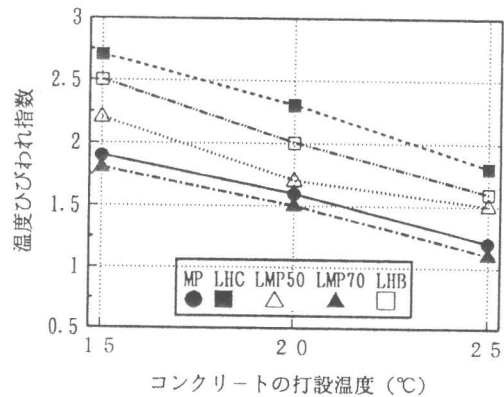


図-5 防液堤の温度ひびわれ指数

夏の間、コンクリートのクーリングが必要である。しかし、LHC・LHB・LMP50は、打設温度 25℃程度で温度ひびわれ指数1.5を満足でき、夏の一部期間のクーリングのみで打設可能である。

(5) 中性化および乾燥収縮に関する特性

低発熱型セメントの中性化速度について、表-2に示した配合およびそれを基準として水セメント比を45%に調整したコンクリートについても、中性化の促進試験を実施した。試験方法は、直径15cm×高さ15cmの円柱供試体を28日間標準水中養生した後、炭酸ガス濃度5%、温度30℃、湿度55%の室内に60日間放置した後、割裂し、フェノールフタレンを噴霧した時の未変色域を中性化ゾーンとして測定するものである。促進試験結果から、実際の構造物における中性化速度を予測することは、困難であるが、ひとつの目安として、建築学会の調合指針案^{*1)}の環境条件と中性化の実験結果から促進倍率を約60倍と推定した。中性化深さが時間の平方根に比例するという関係から、促進試験結果より得られた中性化深さと期間（試験期間と促進倍率の積）から比例定数を求め、これを用いて100年後の中性化深さを求めた。

表-4 中性化試験結果

| セメント種類 | W/C (%) | C (kg/m ³) | 中性化深さ(mm) | |
|--------|---------|------------------------|-----------|--------|
| | | | 2ヵ月促進 | 100年予測 |
| MP | 40 | 383 | 5 | 16 |
| | 45 | 340 | 8 | 25 |
| LHC | 40 | 355 | 16 | 51 |
| | 45 | 316 | 21 | 66 |
| LHB | 40 | 363 | 13 | 41 |
| | 45 | 322 | 16 | 51 |
| LMP50 | 40 | 370 | 8 | 25 |
| | 45 | 322 | 11 | 35 |

その結果を表-4に示す。低熱型高炉セメントLHCは、低熱型中庸熱セメントに比べ中性化速度が大きい。スラグの混入率を下げたLHBは、LHCに比べ8割程度に中性化速度は遅くなる

ことが認められた。100年後の中性化予測深さは、16mm～51mmで、鉄筋のかぶり85mmに対して未中性化域が30～70mm残存することになり、水セメント比40%の配合では、いずれのセメントを用いても耐久性上、中性化は問題ないと考えられる。硬化乾燥収縮度の評価として、JIS

A 1129に基づきモルタルの硬化乾燥にともなう長さ変化の測定を行った。LHB、LHCの長さ変化率は、MPと同程度か若干小さく、LMP50はその7割の値を示した。

4.2 混和剤の選定試験

(1) 運搬時の品質の変化

レディミクストコンクリートを使用するという条件で運搬時のフレッシュコンクリートの性状の変化についてフタリソ系およびカルボソ酸エーテル系の2種類の高性能A E減水剤を用いて20℃においてアジテーター車にて試験を行った。配合は、表-4のLHBのものとした。スラン

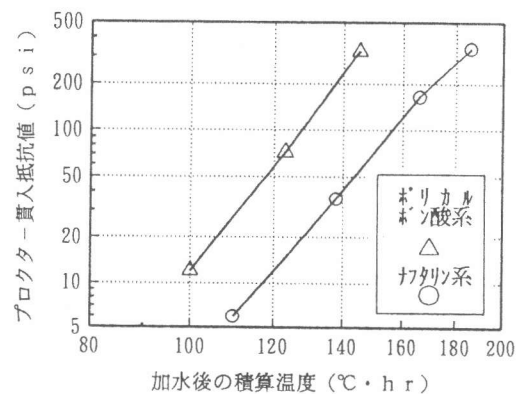


図-6 混和剤の種類と凝結時間

プロスについては、90分の運搬時間に対してフタリソ系では1cmであったのに対して、カルボソ酸エー

ル系では、2.5cmとやや大きい値を示した。空気量については、両者とも1.0%の減少であった。

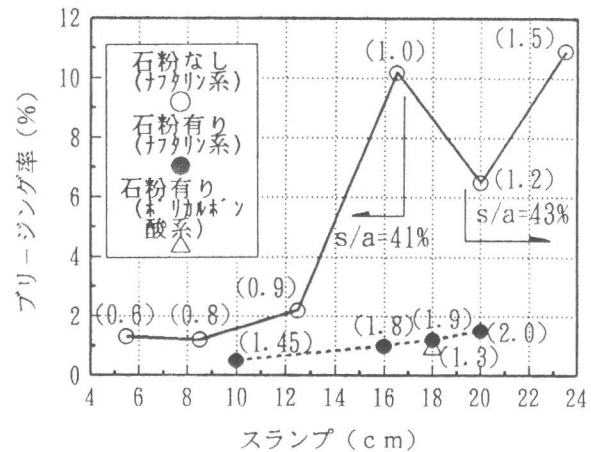
(2)凝結特性

上記の2種類の高性能A E減水剤についてプロクタ貫入抵抗試験による凝結試験結果を図-6に示す。カルボ酸エステル系高性能A E減水剤は、フタリ系に比べ、500psiに至る時間が40°C以下早いことが認められる。

4.3 スランプと混和材の選定試験

(1)コンシステンシーとブリージング特性

表-2に示すLHBの配合について、高性能A E減水剤の量を変化させて、様々なコンシステンシーを持つコンクリートを製造し、ブリージング特性を調べた。その結果を図-7に示す。スランプが12cmを境としてブリージングが、急増することが認められた。一方、単位セメント量を一定とし、石灰石粉を30kg/m³砂と置換してした場合、コンシステンシーの変化によらず1.5%以下のブリージング率を確保できた。



注) 図中の () は高性能A E減水剤の添加率 (%)

図-7 スランプとブリージングの関係

5. 材料・配合の選定方法

5.1 混和剤の選定

本工事では、練り混ぜ後、1時間以内に打設完了可能と考えられ、スランプロス抑制を配慮したフタリ系を用いれば、通常の添加率の範囲では、90分までのスランプの経時変化は僅かであったことから、フタリ系高性能A E減水剤を使用することとした。フタリ系は、スランプロス抑制のために添加されている活性ポリマーの影響で、スランプの保持時間は長く効果的であるが、寒中の施工では、大幅な凝結遅延やブリージングの増大が懸念されるため、コンクリート温度が15°C以下となる場合には、凝結時間が40°C程度早くなるカルボ酸エステル系を用いることとした。

5.2 セメントの選定

セメント選定試験で確認された結果を要約すると以下のようになる。

- ①低熱型中庸熱セメントは、ブリージングが多い。低熱型高炉セメントは、フレッシュコンクリートの性状において低熱型中庸熱セメントより優れている。
- ②ひびわれ抵抗性の指標である引張強度については、低熱型中庸熱セメントは材令7日までは、低い。7日程度に最小温度ひびわれ指数になる防液堤の場合は、強度発現特性からみて、低熱型高炉セメントの方が優れている。
- ③温度ひびわれ指数1.5を確保するという観点からは、LHC, LHB, LMP50が、優れており、夏期のみプレクーリングで対応できる。
- ④低発熱型高炉セメントは、中性化速度において低発熱型中庸熱セメントに比べやや大きい、LHBにすることにより改善される。防液堤では、設計基準強度400kgf/cm²から定まる水セメント比が40%と小さく、中性化に対する耐久性は問題ないと考えられる。

以上から、貯槽コンクリートには低発熱型高炉セメント・LHBを使用することとした。

5.3 配合の選定

防液堤コンクリートの水セメント比の決定は採用した材料(LHB・フタリ系高性能A E減水剤・石

灰石粉)を用いて、水セメント比30%、40%、45%と変化させた場合の強度試験結果から目標強度を満足するものとして、40%を選定した。底版コンクリートは、強度からではなく、耐久性から45%を選定した。単位セメント量は363kg/m³、単位水量については、そのままし、高性能AE減水剤の量でコンシステンシーを確保することとした。

5.4 スランプと混和材の選定

上記の配合で、バイブレータを使用した時の材料の分離抵抗性試験の結果から*2)、スランプは、12cm～15cmの時流動性が良く、分離が少ないことが認められた。しかし、ブリージングは、スランプの影響を大きく受け、スランプが12cmをこえると急増した。防液堤の頭部は地上から30mにあり、コンクリートポンプの能力から考えてスランプを12cmから15cm程度にする必要がある。ブリージングの原因は、細骨材に使用している海砂の微粒分が水洗浄によって流出し、不足する傾向にあることに起因していると考えられる。対策としては、粉体量を増加することが望ましいが、セメントを増やすと発熱が増加する。ここでは、石灰石粉を砂に置換して使用することでブリージング抑止効果が認められたため、30kg/m³海砂に置換して用いることとした。石粉による断熱温度上昇式への影響については、影響しないことを断熱温度上昇試験で確認した。

5.5 配合の見直し

スランプを12cm～15cmとするための高性能AE減水剤量は、冬季の施工を考え、セメントと石粉の合計量の1.5%使用を基本とし、打設温度に応じて変化させることとした。さらに、圧送性を考慮して細骨材率を41%から44%に修正した。

最終的に選定したPCLNG貯

表-5 貯槽コンクリートの配合

槽用のコンクリートの配合を
表-5に示す。

| 施工区分 | 配合 f'ck | Gmax (mm) | slump (cm) | Air (%) | W/C (%) | s/a (%) | 単位量 (kgf/m ³) | | | | | |
|------|------------|--------------|---------------|------------|------------|------------|---------------------------|-----|-----|------|----|-------|
| | | | | | | | W | C | S | G | MS | Ad |
| 底版 | 300 | 20 | 12 | 4.5 | 45 | 44.0 | 145 | 322 | 791 | 1036 | - | C×1.5 |
| 防液堤 | 400 | 20 | 12 | 4.5 | 40 | 43.0 | 145 | 363 | 757 | 1036 | 30 | C×1.5 |

注) f'ck:設計基準強度(kgf/cm²)、Gmax:粗骨材の最大寸法、MS:石灰石粉

6. まとめ

PCLNG貯槽用のコンクリートの材料・配合を選定する方法について、コンクリートに要求される仕様を明確にし、選定フローを示し、フローに基づいた試験を実施し、材料・配合を選定した経緯を述べた。このコンクリートに要求された性能は、高強度に加え、水密性・高耐久性の面からのひびわれの防止であった。高強度コンクリートとするためには、セメント量が増え、温度応力ひびわれの面で不利となるが、配合選定に単位セメント量の制限を設けた場合はかなり複雑な配合選定フローとなる。ここでは、低発熱型セメント(温度上昇量の低減)、高性能AE減水剤(単位セメント量の低減)、石灰石粉(水密性の確保)などを効果的に組み合わせて、発熱特性やフレッシュコンクリートの特性や強度発現特性などの品質確保に必要な材料・配合を選定する方法を示すとともに、施工時ひびわれの主原因である温度応力ひびわれに対しては、プレクーリング(およびパイプクーリング)を組み合わせて、対応する考え方について示した。

現在、コンクリート工事が終了した段階であるが、選定時に目標とした様々な要求仕様を満足したコンクリートが施工できたと考えている。今後、高品質・高耐久コンクリートにこの考え方を応用していきたいと考えている。

最後に、当該工事に関してご指導頂いている東京大学岡村甫教授に感謝の意を表します。

参考文献 *1)日本建築学会:コンクリートの調査設計・調査管理・品質検査指針案・同解説(1976)

*2)入矢桂史郎ほか:高炉スラグ微粉末を用いた低発熱型高強度コンクリートのワーカビリティに関する研究:土木学会46回年次講演会概要集、V-219