

論文

[1085] 暑中コンクリートおよび高強度コンクリートにおける積算温度方式の適用に関する研究

正会員○西田 朗 (清水建設技術研究所)

正会員 岡田武二 (清水建設技術研究所)

正会員 桑原隆司 (清水建設技術研究所)

1. はじめに

構造体コンクリートの強度発現を捉えることは、コンクリート工事の品質管理、工程管理上重要な事項であり、あらかじめ構造体の強度を予測することができれば、合理的な計画や管理を行うことができる。現状では、実施工前に構造体コンクリートの強度発現を予測するには、過去の実績や試し練りによる供試体レベルの強度データから類推することになり、精度上問題がある。

コンクリートの強度発現をあらかじめ求め、これを調合設計や強度予測に用いる方法としては、寒中コンクリート工事における積算温度方式がある[1]。これまで、積算温度方式はその適用範囲が限定され、高温環境における施工や高温の温度履歴を受ける構造体コンクリートの場合には適用できないとされてきた[2]。しかしながら、近年、高温域の養生温度まで含めた積算温度を利用した強度増進曲線の提案がなされている[3][4][5]。

本研究は、こうした現状を踏まえ、近年使用頻度が増加してきた高強度コンクリートと寒中コンクリートと対照的な温度条件の暑中コンクリートにも積算温度方式を適用することを目的として、それらのコンクリートを想定したシミュレーション実験を行い、実験結果と既往の強度増進曲線から得られた予測値とを比較検討したものである。

2. 実験概要

実験は、夏季に施工する一般的な強度のコンクリートと常温時に施工する高強度コンクリートについて壁状部材を想定し、部材の温度変化、圧縮強度の測定を行った。

2.1 使用材料

使用材料を表-1に示す。暑中コンクリートには遅延形AE減水剤を使用し、高強度コンクリートでは標準形の高性能AE減水剤を使用した。なお、空気量の調整には空気連行剤を使用した。

2.2 コンクリートの調合

調合は、スランプ18cm、空気量4%を目標とし、表-2に示すように定めた。

2.3 実験装置および方法

実験装置の概要を図-1に示す。シミュレーションシステムは温・湿度制御可能な槽内で部材の最小部材厚方向の温度分布および温度履歴を捉えることができる装置である。また、強度予測・管理システムは部材の温度履歴を円柱供試体に与えて構造体コンクリートの強度発現を捉える装置である[6][7]。

暑中コンクリート実験は、30℃、相対湿度RH70%の槽内に部材厚800、150mmの壁状部材を想定し

表-1 使用材料

| 使用材料 | 内 容 |
|----------|---------------------------------------|
| セメント | 普通ポルトランドセメント 比重 3.16 |
| 粗骨材 | 青梅産碎石 比重 2.65 Gmax 20mm 吸水率 0.56% |
| 細骨材 | 大井川産川砂 比重 2.60 F.M. 2.69 吸水率 1.72% |
| AE減水剤 | 遅延形 主成分：リグニンスルホン酸化合物 |
| 高性能AE減水剤 | 標準形 主成分：変性リグニン、アルキルアクリルスルホン酸、活性持続ポリマー |

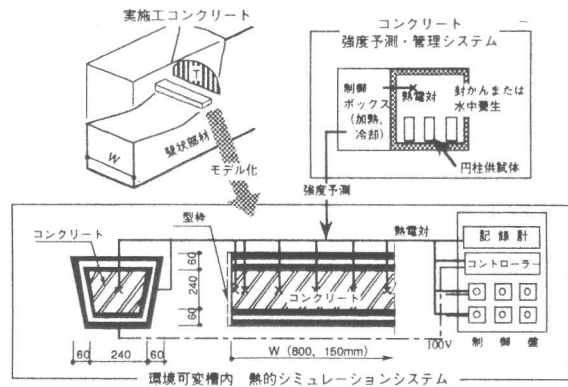
表-2 コンクリートの調合

| No. | 調合名 | W/C (%) | s/a (%) | 単位水量 (kg/m ³) | 重量 (kg/m ³) | | | 混和剤 (C×%) |
|-----|------|---------|---------|---------------------------|-------------------------|------|-----|-----------|
| | | | | | C | G | S | |
| 1 | 3045 | 45.0 | 45.0 | 160 | 360 | 988 | 809 | 0.30* |
| 2 | 3060 | 60.0 | 51.0 | 170 | 283 | 939 | 898 | 0.25* |
| 3 | 2028 | 28.0 | 37.0 | 170 | 607 | 999 | 575 | 0.70** |
| 4 | 2037 | 37.0 | 39.0 | 170 | 459 | 1041 | 655 | 0.60** |

※：AE減水剤 ※※：高性能AE減水剤

たシミュレーションシステムを設置し、練り上がり温度30℃のコンクリートの打込み直後から材令28日までの温度変化を測定した。なお、部材側面の合板型枠は材令3日で取り外した。また、28日以降は20℃、RH60%で材令91日まで養生した。強度測定は、150mm部材の中心部温度履歴を与えた水中と封かん、800mm部材の中心部温度履歴を与えた水中、標準水中、20℃封かん、部材と同じ環境条件の現場水中、現場封かんの各養生について行った。試験材令は1～91日の範囲とし、標準水中、20℃封かんについては強度増進曲線を求めることを考慮し、積算温度30～2730° D・D (20℃で1～91日)の範囲で、対数軸上で均等になるように定めた。

高強度コンクリートでは、練り上がり温度を20℃、環境条件を材令91日まで20℃、RH60%で一定とし、その他は暑中コンクリートと同じ条件とした。このため、現場水中、現場封かん養生はそれぞれ標準水中、20℃封かん養生と同一になるので供試体の採取は行わなかった。また、両シリーズとも部材からコアを採取し強度試験を行った。以上の実験条件を表一3に示す。



図一 実験装置の概要

表一3 実験条件と試験材令

| 調査No. | 部材環境条件 | 部材 | | 供試体 | |
|-------|--------------------------------------|----------|---------------|--------|--|
| | | 部材厚 (mm) | コア試験材令 (日) | 養生方法 | 試験材令 (日) |
| 1, 2 | 材令28日まで30℃ RH70% 材令28日以降20℃ RH60% | 800 | 28, 91 | 標準水中 | 1, 2, 3, 5, 9, 16, 28, 50, 91 |
| | | | | 20℃封かん | 1, 2, 3, 5, 9, 16, 28, 50, 91 |
| | | | | 現場水中 | 1, 3, 7, 14, 21, 28, 56, 91 |
| | | 150 | 7, 14, 28, 91 | 現場封かん | 1, 3, 7, 14, 21, 28, 42, 56, 91 |
| | | | | 150水中 | 1, 3, 7, 14, 28, 56, 91 |
| | | | | 150封かん | 1, 3, 7, 14, 28, 56, 91 |
| 3, 4 | 20℃ RH60% 一定 | 800 | 28, 91 | 標準水中 | 1, 2, 3, 5, 7, 9, 14, 16, 28, 50, 56, 91 |
| | | | | 20℃封かん | 1, 2, 3, 5, 7, 9, 14, 16, 28, 42, 50, 56, 91 |
| | | | | 150水中 | 1, 3, 7, 14, 28, 56, 91 |
| | | 150 | 7, 14, 28, 91 | 150封かん | 1, 3, 7, 14, 28, 56, 91 |
| | | | | 800水中 | 1, 3, 7, 14, 28, 56, 91 |
| | | | | 800水中 | 1, 3, 7, 14, 28, 56, 91 |

3. 温度予測および強度予測方法

3.1 温度予測

シミュレーション実験における強度実測値と予測値の対応を検討するために、強度予測に必要な部材の積算温度を算出する目的で有限要素法による部材の温度解析を行った。解析に用いた定数は一般的な値とし、境界条件は実験とできるだけ同一になるように型枠の除去等も考慮した。

3.2 強度予測

積算温度方式による強度増進曲線には、鎌田らの研究によるロジスティック曲線式、指数関数式がある[3][4]。ロジスティック曲線式は水セメント比45～65%のコンクリートに適用できるとされ、初期養生温度による強度補正をする項が含まれている。また、指数関数式は水セメント比28～45%の高強度コンクリートで適合性が確認されたものである。これらの式は定温で養生された供試体レベルのコンクリートから求められたもので、ここでは、暑中コンクリートについては式(1)のロジスティック曲線式、高強度コンクリートについては式(2)の指数関数式を用いて構造体コンクリートの強度予測の検討を行った。

$$F_c = \frac{F_\infty}{1 + \exp \{-k \log(M+C)+m\}} \quad (1)$$

$$F_c = F_\infty \cdot \exp \left(\frac{-b}{M} \right) \quad (2)$$

F_c : 圧縮強度 (kgf/cm²) F_∞ : 最終到達強度 (kgf/cm²) M : 積算温度 (° D・D)

C : 初期温度補正項 (° D・D) ただし、 $C=10+0.5\theta$ θ : 材令12時間までのコンクリート温度平均値

b, k, m : 定数 ただし、 $b=147.18-16.23 \cdot \ln F_\infty$

なお、ロジスティック曲線式は標準水中養生の強度9データを用いて非線形最小二乗法により F_{∞} , k , m を決定した。指数関数式は標準水中養生28日のデータから F_{∞} を決定した。

4. 実験結果

4.1 部材の温度履歴

暑中コンクリートを想定した部材の温度変化の実測値を温度解析結果と併せて図-2に示す。図-2によると、部材厚150mm程度でも15℃前後の温度上昇があり、800mmでは25~30℃程度の温度上昇が見られる。

同じく高強度コンクリートについての結果を図-3に示す。高強度コンクリートでは、150mmの部材でも水セメント比28%で25℃程度の温度上昇があり、また、800mmでは、水セメント比28%で50℃、37%で40℃程度の温度上昇が見られる。

これらの実験結果を温度解析値と比較すると、150mmの場合で実測値に比べて解析値の温度上昇量が低くなっている。また、800mmでは、解析値の温度上昇量が実測値に近い値となっているが、温度が下降する速度に若干ずれがあることがわかる。150mm部材の解析結果のずれは、境界条件、解析定数等を検討したところ、温度上昇時における発熱速度に対し放熱が実際よりも過剰に評価されたことが原因と考えられる。800mmの下降速度のずれは、解析時刻を細かく設定することによりほぼ解消された。こうした点からは、温度予測方法についてさらに検討を要するものと思われる。

図-4は、材令1, 3, 7, 14, 28日における部材温度の実測値から求めた積算温度と温度解析結果から求めた積算温度の比較を示したものである。この図によると、今回用いた温度解析は実測値そのものとは若干ずれが生じたが、両者の相関係数は0.9988となり、構造体コンクリートの強度を予測するために必要な積算温度算出の観点からは十分実用的であると判断し、ここでは以後この値をそのまま用いた。

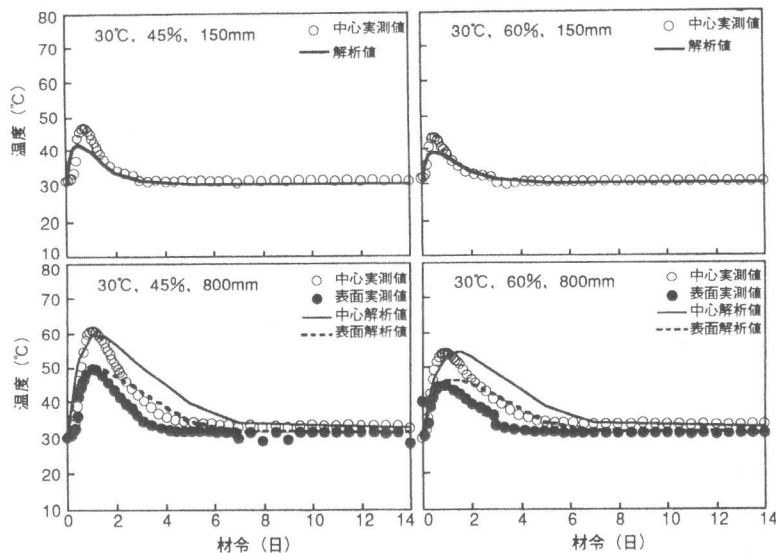


図-2 部材の温度履歴実測値と解析値の対応 (暑中コンクリート)

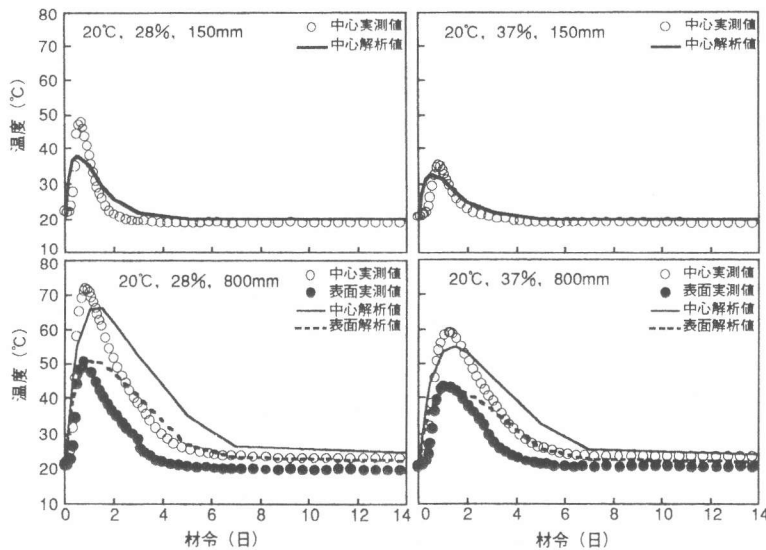


図-3 部材の温度履歴実測値と解析値の対応 (高強度コンクリート)

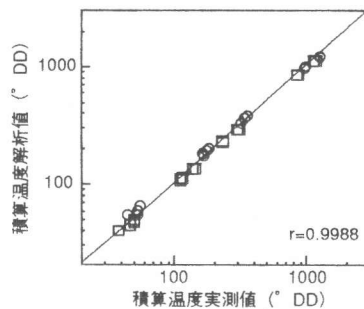


図-4 積算温度の実測値と解析値の比較

4.2 コンクリートの強度発現

暑中コンクリートを想定した場合の圧縮強度試験結果を図-5に、また、高強度コンクリートを想定した場合の試験結果を図-6に示す。

図-5より、暑中コンクリートでは、材令初期において温度履歴を与えた供試体の強度が最も大きく、つぎに30℃で養生された現場養生、標準水中および20℃封かん養生の順になっている。この傾向は材令7日以降明瞭でなくなり、水セメント比60%では14日以降で温度履歴を与えた供試体の強度が若干小さめとなる傾向が認められる。

高強度コンクリートの場合も、図-6から、温度履歴を受けた供試体が標準水中および20℃封かん養生に比べて材令初期で高めの強度を示しているが、この傾向は材令14日以降は認められない。

これらの強度発現の差は、コンクリートの養生温度の違いに起因するものと考えられ、初期に高温で養生された供試体の強度発現が若材令時に大きく、材令の進行とともに強度発現が緩慢になり常温で養生された供試体の強度と同等あるいは若干小さくなるのは既往の傾向と一致するものである[2][6][8]。

図-7は温度履歴を与えた供試体とシミュレーションシステムに打ち込んだ試験体から採取したコア供試体の強度を比較したものである。

この図から、暑中コンクリートの場合は封かん養生を行って温度履歴を与えた供試体の強度とコア供試体の強度がほぼ同等の値を示し、水中養生を行って温度履歴を与えた供試体はコア供試体に比べて若干高めの強度となっている。また、高強度コンクリートの場合では、温度履歴を与えた供試体は水中養生、封かん養生のいずれもコア供試体に比べて高めの強度となっているが、封かん養生をしたもののほうがよりコア強度に近い値となっている。なお、この傾向は筆者らが以前行った実験と若干異なるものであるが[9]、部材の温度履歴を与える供試体の養生方法に関しては、今

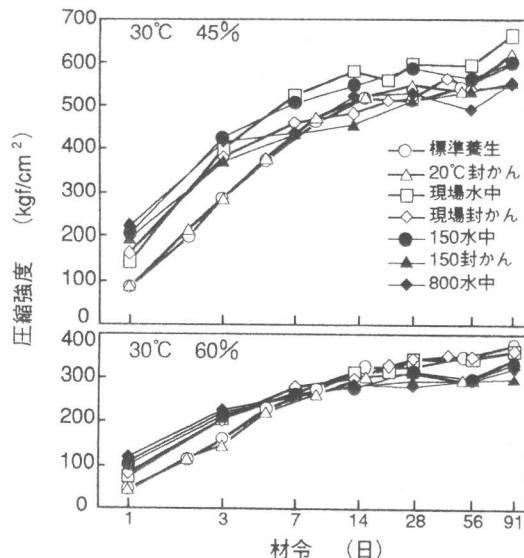


図-5 コンクリートの強度発現 (暑中コンクリート)

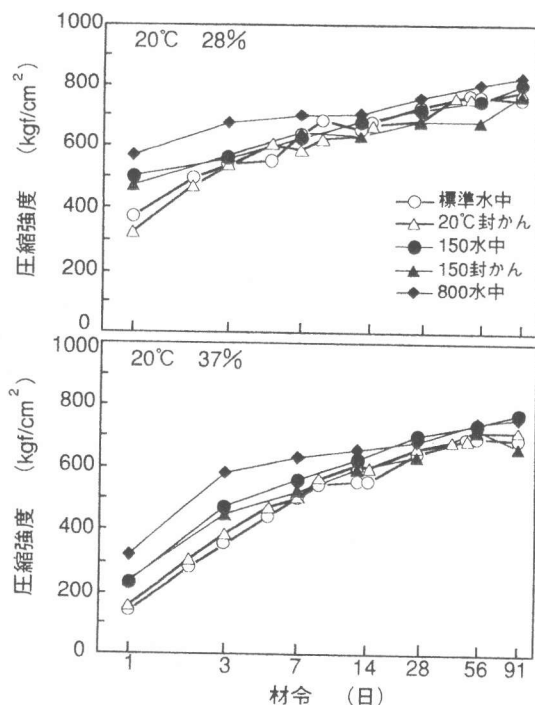


図-6 コンクリートの強度発現 (高強度コンクリート)

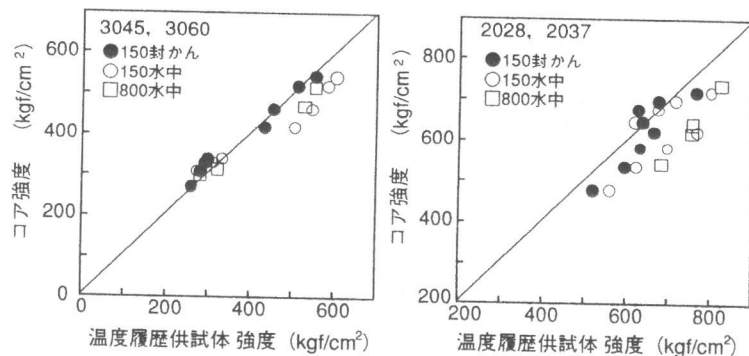


図-7 温度履歴供試体とコアの強度比較

後さらに検討を要するものと思われる。

5. 検討

5.1 暑中コンクリートの強度増進曲線

式(1)のロジスティック曲線式で導いた強度増進曲線と暑中コンクリートを想定した場合の部材温度履歴を与えた供試体の強度増進傾向の比較を図-8に示す。図-8によると、全体的な傾向として強度増進曲線は部材の強度発現を良く表している。しかし、ここで採用している強度増進曲線は定温養生を行った供試体強度を基にしたもので、初期材令における養生温度による強度の片寄りについては温度補正項で精度がより高いものとなっているが、水和熱による温度履歴に関しては考慮されていない。一般には、構造体コンクリートでは初期に高温の温度履歴を受けた場合に長期材令における強度増進が停滞する傾向にあるとされているので[8]、温度上昇による長期材令での強度増進の停滞を強度増進曲線に組み入れることで、より精度の高い強度予測が可能になるものと考えられる。

5.2 高強度コンクリートの強度増進曲線

図-9は、高強度コンクリートの場合の強度増進曲線と部材温度履歴を与えた供試体強度の関係を示したものである。この図によると、ロジスティック曲線式による暑中コンクリートの場合と同様に、指数関数式を用いた高強度コンクリートの強度増進曲線は部材の強度発現の傾向を十分に捉えていることがわかる。なお、水セメント比28%の場合で初期の供試体強度と強度増進曲線にずれが見られることなどから、ロジスティック曲線式と同様に指数関数式においても初期養生温度や水和熱による温度履歴に対する補正を加えることで予測精度の向上が図られるものと思われる[10]。

5.3 強度予測値の適合性

図-10は、温度解析で得られた積算温度と強度増進曲線を組み合わせて各部材の強度予測を行った結果と温度履歴を与えた供試体の強度を比較したものである。強度予測値と実測値の対応は良く、今回の実験の範囲では積算温度方式による強度予測を暑中コンクリートや高強度コンクリートの構造体にも適用することが可能と判断される。

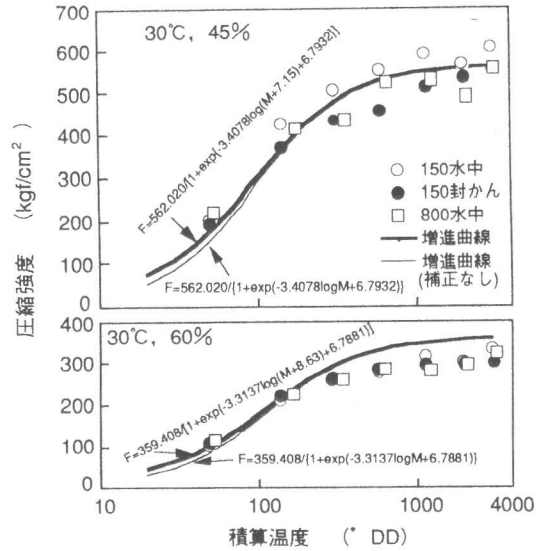


図-8 強度増進曲線と温度履歴供試体の強度の対応(暑中コンクリート)

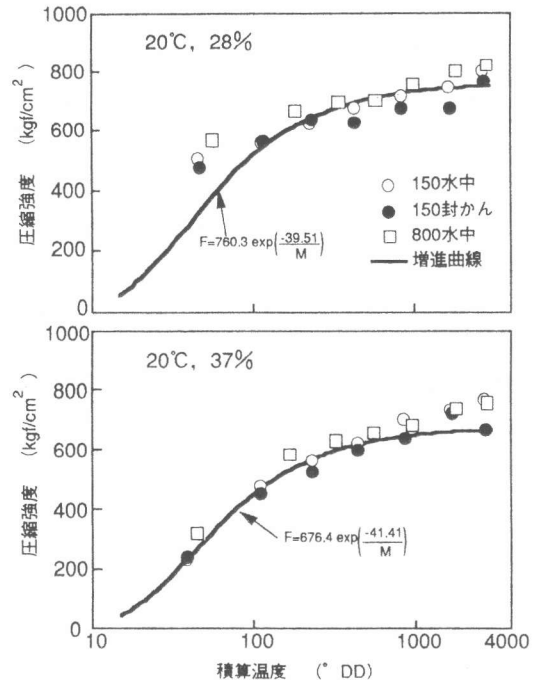


図-9 強度増進曲線と温度履歴供試体の強度の対応(高強度コンクリート)

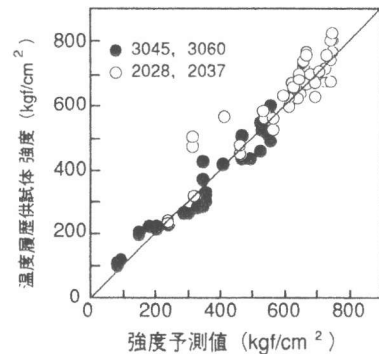


図-10 強度予測値と実測値の比較

6. まとめ

従来は、主に寒中コンクリートを対象としてきた積算温度方式を、暑中コンクリートや高強度コンクリートにも適用することを目的として、構造体コンクリートの強度発現を把握する実験を行った。同時に、温度解析および強度予測を行い、実験結果との対応について検討を行った。本研究の範囲で得られた結果をまとめると以下のようになる。

- (1) 壁状部材を想定した試験体の温度上昇は、暑中コンクリートの場合、部材厚150mmで15℃前後、800mmで25～30℃となった。また、高強度コンクリートでは150mmで15～25℃、800mmで40～50℃であった。これらの実測値に対し温度解析で得た上昇量は若干ずれが生じたが、実測値から算出した積算温度と解析値から求めた積算温度は相関係数が0.9988となった。
- (2) 暑中コンクリートを想定した場合の強度発現は、初期の材令においては部材温度履歴を与えた供試体および高温環境にある現場養生の供試体で大きなものとなった。また、高強度コンクリートにおける強度発現は、暑中コンクリートの場合と同様に温度履歴を受けた供試体で初期の強度が大きなものとなった。なお、本実験の範囲では部材温度履歴を与えた供試体の強度は、封かん養生を行った場合に、コア強度により近い値を示した。
- (3) 積算温度方式による強度増進曲線は、暑中コンクリート、高強度コンクリートの場合とも、全体的な傾向として温度履歴を与えた供試体の強度発現を良く表している。今後はさらに、部材の温度解析方法の改良や強度増進曲線の精度の向上により、暑中コンクリートや高強度コンクリートにおいても積算温度方式を適用することが十分可能になるものと判断される。なお、今後は実施する暑中コンクリートや高強度コンクリートにおける積算温度方式の適用上の問題点を明らかにし、さらに本方式を用いた品質管理方法の提案を行っていく予定である。

〈謝辞〉

本研究は、北海道大学と清水建設(株)が共同で実施した実験研究において、清水建設(株)が担当した実験を中心に取りまとめたものである。

本研究の遂行に際して、関東学院大学 洪悦郎教授、北海道大学 鎌田英治教授、北見工業大学 長島弘教授、釧路工業高等専門学校 大楽隆男教授の御教示を戴いた。また、実験結果の解析では北海道立寒地住宅都市研究所 桂修氏に御指導戴いた。ここに、謹んで感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 寒中コンクリート施工指針・同解説、日本建築学会、1989
- 2) 岡田 清・六車 熙編：コンクリート工学ハンドブック、朝倉書店、1985
- 3) 吉野利幸・桂 修・大楽隆男・鎌田英治：高温域を含む各種養生温度でのコンクリート強度増進性状、第45回セメント技術大会講演集、pp.400-405、1991
- 4) Nili, M., Nishida, K., Katsura, O. and Kamada, E.: PREDICTION OF STRENGTH DEVELOPMENT OF HIGH STRENGTH CONCRETE BY USING MODIFIED EQUIVALENT AGE METHOD、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13、No.1、pp.951-956、1991
- 5) 友澤史紀・牛島栄：最近の積算温度方式の発展とその応用、セメント・コンクリート、No.527、pp.66-74、1991.1
- 6) 桑原隆司・西田 朗：寒冷期に施工するマスコンクリートの温度履歴と強度発現に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.12、No.1、pp.897-902、1990
- 7) 黒田泰弘・桑原隆司・西田 朗・青柳圭二：高強度コンクリートの品質管理方法の研究(その4)、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、pp.881-882、1991
- 8) 桑原隆司・安斎俊哉・森永 繁：マスコンクリートの強度管理方法と管理装置の研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.9、No.2、pp.79-84、1987
- 9) 桑原隆司・西田 朗・黒田泰弘・青柳圭二：高強度コンクリートの品質管理方法の研究(その5)、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、pp.883-884、1991
- 10) 梶田佳寛・阿部道彦・松本雅之：高強度コンクリートを用いた構造体コンクリートの強度管理方法に関する考察、日本建築学会大会学術講演梗概集(東北)、pp.837-838、1991