

報告 初期高温履歴を受ける暑中コンクリートの強度発現に関する検討

熊野 知司*1・佐々木 一則*2・長岡 誠一*3・半井 恵介*4

要旨：富配合ではない土木構造物用のコンクリートであっても、暑中期の施工では、構造物の寸法等の条件によっては材齢初期に高温履歴を受けることが予想される。しかしながら、このようなコンクリートの圧縮強度に関する知見がほとんどないのが現状である。本検討は、初期の高温履歴が普通セメントを用いた土木構造物用コンクリートの圧縮強度に与える影響を検討する目的で、断熱温度上昇試験、大型模擬試験体ならびに室内実験による高温履歴下における圧縮強度データの収集を行った。その結果、最高温度が 90℃程度までは、28 日標準水中養生供試体の圧縮強度に比べて大きな強度低下を生じるリスクは少ないと考えられた。

キーワード：暑中コンクリート、高温履歴、断熱温度上昇特性、大型模擬試験体、圧縮強度

1. はじめに

近年、暑中期の気温が上昇する傾向にあり、日最高気温が 35℃を超える猛暑日を記録したとのニュースが頻繁に届くようになっている。谷口ら¹⁾は、気象庁の公表データを基に 6 月～9 月の期間について日最高気温の月平均値を調査しているが、特に名古屋、大阪などの中部以西の大都市圏で日最高気温の月平均値が 35℃前後になる頻度が高くなっていることを報告している。土木学会コンクリート標準示方書施工編²⁾では、コンクリートの打込み温度の上限値は 35℃以下を標準とすることが明記されているが、日最高気温が 35℃を超える日が続く条件下でコンクリートの施工を行う場合には、打込み温度の上限値を満足することが難しいこともあり得る。コンクリート標準示方書では、打込み温度を 35℃以下にすることが困難な場合の性能照査項目として次の 5 点を挙げている。

- (1)フレッシュコンクリートの品質に及ぼす影響
- (2)硬化コンクリートの強度に及ぼす影響
- (3)コンクリートの施工に及ぼす影響
- (4)温度ひび割れに関する検討
- (5)比較的富配合の場合の水和に起因する高温履歴が圧縮強度に及ぼす影響

このうち、(5)に関して土木工事で一般的に適用されるコンクリートは、スランプ 8～12cm、設計基準強度 27N/mm² 以下であり、その場合の単位セメント量は 330kg/m³程度以下と考えられ、富配合なコンクリートではない。しかし、打込み温度が高くなるとマスコンクリート構造物では中心温度が高くなることが予想される。例えば、極端な事例として大規模な橋脚やフーチング等で、断面寸法が大きく、部材中心部が完全断熱状態になる場合を考えて、コンクリート標準示方書設計編(以下、

示方書)³⁾の終局断熱温度上昇量から部材中心温度を予想すると、普通ポルトランドセメントを使用し、単位セメント量を 330kg/m³とすると打込み温度が 35℃の場合には、88.2℃となり、高温の履歴を受けることになる。勿論、このような場合には温度ひび割れの懸念があり、別途検討を行うことになる。しかし、ここまで極端でなくとも構造寸法が比較的大きな土木構造物に対しては、高温履歴の影響を把握しておくのが良いと考えられる。

材齢初期の高温履歴がコンクリート強度に及ぼす影響に関しては、主に建築分野において高強度コンクリートの強度管理としての検討が行われ、構造物強度を保証する $_{28}S_{91}$ 値の評価に適用されてきた^{4), 5)}。また、コンクリート二次製品の蒸気養生の温度管理としての研究も行われてきた⁶⁾。しかしながら、比較的貧配合の土木分野のコンクリートを暑中期に施工した場合の強度に与える温度履歴の影響を検討した研究は、ほとんど見られない。そこで、検討の第 1 歩として、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートを対象に、①打込み温度が 30℃を超える場合のコンクリートの断熱温度上昇特性を把握し、②マスコンクリートの中心付近をイメージした大型の模擬試験体を作製し、温度履歴とコア強度に関するデータを収集するとともに、③封かん供試体に定温乾燥器を用いて簡易的に温度履歴を与える室内実験を実施することによって高温履歴がコンクリート強度に与える影響について検討を行うことにした。なお、(1)～(4)の性能照査項目に関しても、別途、検討を行うことにしている。

2.断熱温度上昇試験

2.1 実験概要

示方書には、セメントの種類ごとに断熱温度上昇特性の標準値が示されているが、打込み温度は 30℃程度まで

*1 摂南大学 理工学部都市環境工学科教授 博(工) (正会員)

*2 阪神高速道路(株) 計画部計画調整課課長 博(工) (正会員)

*3 (株)中研コンサルタント 大阪支店 (正会員)

*4 西日本旅客鉄道(株) 大阪工事事務所施設技術課 (正会員)

表-1 断熱温度上昇試験の使用材料の一覧

| 材料 | 種類 |
|------|---|
| セメント | 普通ポルトランドセメント3社混合品 密度:3.15g/cm ³ |
| 水 | 水道水 |
| 細骨材 | S1:岐阜県揖斐川産川砂 表乾密度:2.62g/cm ³ S2:大阪府茨木産砕砂 表乾密度:2.65g/cm ³ |
| 粗骨材 | 兵庫県西島産砕石 表乾密度:2.63g/cm ³ Gmax:20mm |
| 混和剤 | AE減水剤標準形 (高機能タイプ) (20℃) AE減水剤遅延形 (高機能タイプ) (30, 35, 40℃) |

表-2 断熱温度上昇試験の配合

| W/C (%) | s/a (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | | 混和剤 C×% |
|---------|---------|-------------------------|-----|-----|-----|------|---------|
| | | W | C | S1 | S2 | G | |
| 56.7 | 44.5 | 170 | 300 | 563 | 244 | 1007 | 1.0 |

を想定したものである⁷⁾。大型の模擬試験体による高温履歴を検討するにあたっては、30℃を超える打込み温度における終局断熱温度上昇量や温度上昇速度を把握しておくことは重要である。そこで、大型模擬試験体による実験や室内実験に先だて、JCI-SQA3に準拠した断熱温度上昇試験を実施した。実験要因は、打込み温度とし、20℃、30℃、35℃および40℃の4水準とし、試験体中心温度は30分間隔で測定し、測定期間は10日間とした。

2.2 使用材料および配合

表-1に使用材料の一覧を、表-2に配合を示す。セメントは、3社の普通ポルトランドセメントを等量混合して使用し、単位セメント量は300kg/m³とした。混和剤は20℃の場合はAE減水剤標準形を、30、35、40℃の場合は、AE減水剤遅延形を使用した。スランブ8cm、空気量4.5%を目標とした。

2.3 実験結果および考察

表-3にフレッシュコンクリートの測定結果を示す。スランブ、空気量は、いずれも目標値である8±2.5cm、4.5±1.5%の範囲であった。また、打込み温度は、設定値の±1℃の範囲であった。

断熱温度上昇試験結果をもとに示方書の断熱温度上昇特性の式(1)に近似し、終局断熱温度上昇量 Q_{∞} (℃)と温度上昇速度に関する係数 r を求めた。

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-rt}) \quad (1)$$

ここに、 $Q(t)$: 材齢 t 日における断熱温度上昇量(℃)

図-1に打込み温度と終局断熱温度上昇量 Q_{∞} との関係を示す。図中には示方書の標準値を示しているが、 Q_{∞} の実験値は、示方書の標準値よりも小さくなり、特に練上がり温度30℃を超えると示方書の標準値より4℃程度小さくなった。これは、示方書の標準値を算出した根拠となるデータが練上がり温度が30℃までであったためと考えられる。

図-2に打込み温度と温度上昇速度に関する係数 r と

表-3 フレッシュコンクリートの試験結果

| 打込み温度の設定値(℃) | スランブ(cm) | 空気量(%) | 打込み温度の実測値(℃) |
|--------------|----------|--------|--------------|
| 20 | 8.5 | 4.5 | 20.5 |
| 30 | 8.5 | 4.2 | 30.8 |
| 35 | 8.5 | 4.1 | 34.5 |
| 40 | 7.0 | 4.4 | 40.5 |

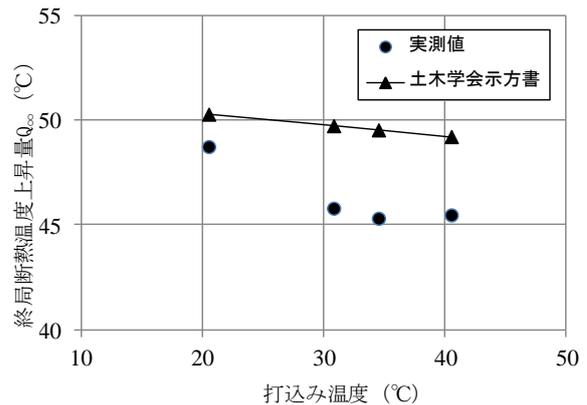


図-1 打込み温度と終局断熱温度上昇量の関係

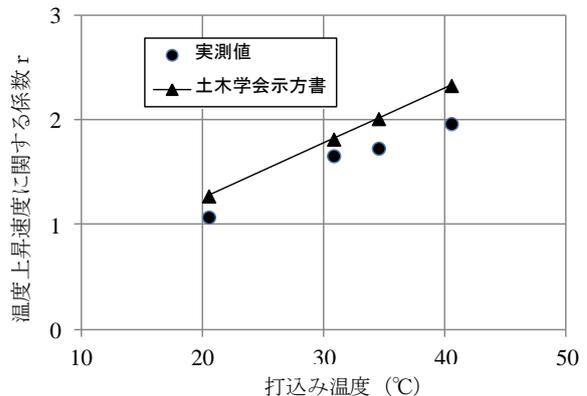


図-2 打込み温度と温度上昇速度に関する係数の関係

の関係を示す。練上がり温度が高くなると係数 r は大きくなる傾向を示したが、実験値の方が示方書の標準値よりも小さくなった。特に、練上がり温度30℃を超えると顕著となったが、これは混和剤に遅延形を用いたことによると考えられる。

3.大型模擬試験体による検討

3.1 実験概要

大型模擬試験体による実験は兵庫県神戸市にあるレディーミクストコンクリート工場のヤード内で行った。大型模擬試験体の概要を図-3に示す。平面寸法は、1.5m×1.5mで高さ1.0mとし、側面および上下面に厚さ200mmの断熱材として発泡スチロール(熱伝導率 $\lambda =$

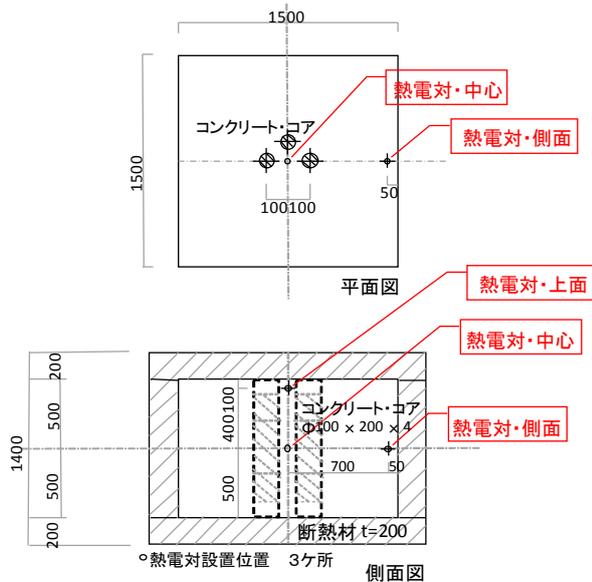


図-3 大型模擬試験体の概要

0.04W/m²C)を設置した。試験体には熱電対を設置して、温度の測定を行った。測定位置は図に示す試験体内3箇所と外気温1箇所とした。試験体内への熱電対の設置には、組立鉄筋とセパレータを利用したが、これらに接触しないようにリード線を固定した。大型模擬試験体の型枠および断熱材は材齢28日で解体した。圧縮強度試験は、コア(材齢28日, 56日, 91日), 20℃封かん養生および20℃標準水中養生(材齢28日, 91日)とした。コアは中心付近から材齢ごとに3本採取し、上面および下面から100mmを取り除き、深さ方向に4分割した。

3.2 使用材料および配合

表-4に使用材料の一覧を、表-5に配合を示す。コンクリートの配合は、粗骨材最大寸法20mm, スランプ12cmである。初期の高温履歴による影響を検討対象としているため安全側の検討となるように土木用コンクリートとしてはやや多いセメント量350kg/m³とした。また、混和剤にはAE減水剤遅延形を使用した。

3.3 実験結果および考察

コンクリートの打込みは、2016年8月4日に行った。スランプは、11.8cm, 空気量4.3%, 打込み温度は35℃であった。なお、当日の天候は快晴であった。

図-4に大型模擬試験体の温度測定結果を示す。材齢44.5時間で中心部の温度が81.2℃となった。上面の最高温度は80.6℃(材齢46.8時間), 側面は、79℃(44.0時間)であり、中心部と上面, 側面の温度差が小さいことからマスコンクリート部材の中心付近を模擬するという当初の目的は概ね達成できたと思われる。図-4には、2次元のFEMを用いた温度解析結果も示している。解析における外気温は30℃, 打込み温度は35℃とし、コンクリートの熱伝導率 $\lambda=2.7\text{W/m}^\circ\text{C}$, 比熱 $C_c=1.155\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$ を

表-4 大型模擬試験体の使用材料の一覧

| 材料 | 種類 |
|------|---|
| セメント | 普通ポルトランドセメント 密度3.15g/cm ³ |
| 水 | 地下水および上澄水 |
| 細骨材 | S1:福岡県北九州市産砕砂 表乾密度2.68g/cm ³ F.M.:2.55 S2:兵庫県赤穂市産砕砂 表乾密度2.58g/cm ³ F.M.:2.75 |
| 粗骨材 | G1:兵庫県赤穂市産砕石 表乾密度2.60g/cm ³ Gmax:20mm G2:大分県津久見市産砕石 表乾密度2.69g/cm ³ Gmax:20mm |
| 混和剤 | AE減水剤遅延形(高性能タイプ) |

表-5 大型模擬試験体の配合

| W/C (%) | s/a (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | | | 混和剤 C×% |
|---------|---------|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|---------|
| | | W | C | S1 | S2 | G1 | G2 | |
| 50 | 48 | 175 | 350 | 430 | 414 | 633 | 281 | 1.0 |

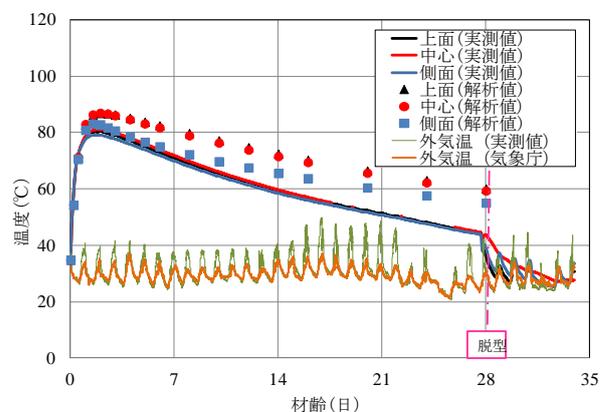


図-4 大型模擬試験体の温度計測結果と解析値の比較

用いた。断熱材として用いた発泡スチロールの熱伝導率は、 $\lambda=0.04\text{W/m}^\circ\text{C}$ として、側面および上下面の熱伝達率は、示方書の計算式に従い $\eta=0.2\text{W/m}^2\text{C}$ とした。断熱温度上昇特性は、示方書にしたがって算定した。終局断熱温度上昇量は、 $Q_{\infty}=55.713^\circ\text{C}$, 温度上昇速度の定数は、 $r=2.1773$ と算定された。図-4より、解析結果は、実測値に比べて中心温度が5℃程度高くなる結果となった。熱伝達率等の解析条件の詳細な検討も必要になるが、先述した断熱温度上昇試験の結果、示方書に示されている終局断熱温度上昇量 Q_{∞} および温度上昇速度に関する係数 r が実験値よりも4℃程度大きく推定されることも一因として考えられ、示方書の断熱温度上昇特性は、構造物の温度上昇を推定する上では安全側の結果を与えると考えられる。

表-6に強度試験結果の一覧を示す。大型模擬試験体から採取したコア強度はいずれの材齢も最上部の強度が他の3本に比べて明らかに低下する傾向が見られた。試験後の供試体の観察を行ったが、直角度や端面の平滑度に問題はなく、また、粗骨材の偏在なども見られなかった。断熱材の撤去に伴う表面の温度低下や乾燥に伴う内部拘束により大型模擬試験体の上面に引張応力が作用す

表一六 大型模擬試験体の圧縮強度試験結果

| | 材齢28日 | | 材齢56日 | | 材齢91日 | |
|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | 測定値 (N/mm ²) | 平均値 (N/mm ²) | 測定値 (N/mm ²) | 平均値 (N/mm ²) | 測定値 (N/mm ²) | 平均値 (N/mm ²) |
| 20℃標準水中養生 | 37.9 | 38.2 | - | - | 43.9 | 43.6 |
| | 38.6 | | - | | 43.0 | |
| | 38.1 | | - | | 43.9 | |
| 20℃封かん養生 | 33.9 | 33.6 | - | - | 38.5 | 38.6 |
| | 33.7 | | - | | 39.3 | |
| | 33.1 | | - | | 37.9 | |
| コア | 28.8 | 33.6 | 31.3 | 35.7 | 31.9 | 37.2 |
| | 35.4 | | 35.8 | | 38.0 | |
| | 36.9 | | 38.2 | | 40.3 | |
| | 33.4 | | 37.6 | | 38.4 | |

ることが考えられたが、上面にひび割れの発生は観察されなかった。強度低下の原因としては、ブリーディングの発生が影響したことが一因として推察できる。

表一七 に大型模擬試験体から採取したコア強度のデータに対して異常値の棄却検定⁸⁾を行った結果を示す。 $(\langle X \rangle - X_n) / \sigma$ の値が棄却限界 1.69 (データ数 4, 有意水準 0.05 の場合) より大きければ棄却可と判定される。表より、いずれも棄却不可との判定結果となった。

図一五 にコア強度のデータに最上部の試験値も採用した場合の材齢と圧縮強度との関係を示す。大型模擬試験体から採取したコア強度は 20℃標準水中養生に比べ 4~6N/mm² ほど低めに推移し、20℃封かん養生と同程度の強度発現となった。20℃標準水中養生の強度はこのコンクリートのパフォーマンスを示すものと考えられ、80℃を超える温度履歴を受け、水分供給にも限りがある大型模擬試験体中では、強度の発現は鈍化するといえる。一方、コンクリートの材料としての強度管理は、材齢 28 日の標準水中養生供試体の強度を基準に行われる。大型模擬試験体から採取したコアの強度は、先述したように材齢 28 日では標準水中養生供試体 (38.2N/mm²) よりも低い強度となっているが、図一五 に示すように、その後ゆっくりと発現し、材齢 91 日の時点で 37.2N/mm² まで増加した。大型模擬試験体から採取した材齢 91 日のコア強度は、28 日標準水中養生供試体と同程度といえる。

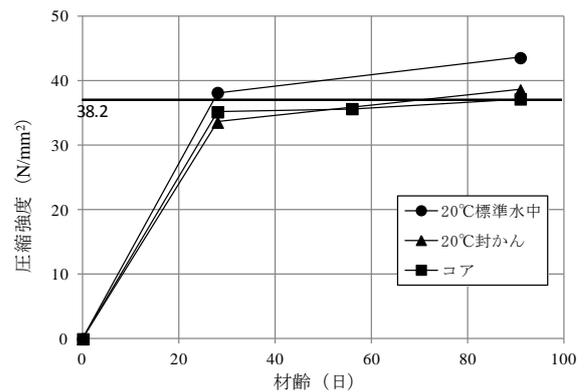
4. 室内実験による検討

4.1 実験概要

大型模擬試験体による検討の結果、打込み温度 35℃で中心温度 81.2℃の場合は、28 日標準水中養生供試体の強度に対して長期材齢のコア強度は同程度となると考えられた。一方、さらに打込み温度が高くなった場合には、条件によっては 90℃前後の温度にまで中心温度が上昇することも考えられる。そこで、供試体に強制的に高温履歴を与える室内実験を行い、圧縮強度に及ぼす影響を検討することにした。既往の研究によると材齢初期に

表一七 コア強度試験結果の棄却検定

| | 材齢28日 | 材齢56日 | 材齢91日 |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|
| 平均値 $\langle X \rangle$ | 33.6 | 35.7 | 37.2 |
| 最小値 X_n | 28.8 | 31.3 | 31.9 |
| 標準偏差 σ | 3.05 | 2.70 | 3.15 |
| $(\langle X \rangle - X_n) / \sigma$ | 1.57 | 1.63 | 1.68 |
| 判定結果 | 棄却不可 | 棄却不可 | 棄却不可 |



図一五 材齢と圧縮強度の関係

高温履歴を与える方法として蒸気加熱による方法^{4), 6)}、温水加熱による方法⁹⁾等様々な方法で検討されている。その多くは、昇温・降温過程の制御が行える方式としている。本検討では、昇温・降温過程の制御はできないが、90℃以上の温度にも簡便に対応できる実験方法として、封かんした供試体に一般的な送風定温乾燥器を用いて高温履歴を与える方法を採用することにした。

4.2 使用材料および配合

表一八 にコンクリートの使用材料の一覧を示す。セメントには普通ポルトランドセメントを使用し、混和剤は、AE 減水剤遅延形および AE 助剤を使用した。表一九 にコンクリートの配合を示す。スランプの目標値は、実施工における運搬時間を考慮して練上がり 30 分後で 12cm ± 2.5cm、空気量の目標値は、4.5 ± 1.5% とした。

4.3 実験要因および水準

表-8 室内実験の使用材料の一覧

| 材料 | 種類 |
|------|--|
| セメント | 普通ポルトランドセメント 密度:3.15g/cm ³ |
| 水 | 水道水 |
| 細骨材 | 岐阜県揖斐川産川砂 表乾密度:2.65g/cm ³ F.M.:2.56 |
| 粗骨材 | 大阪府茨木市産碎石 表乾密度:2.68g/cm ³ Gmax:20mm |
| 混和剤 | AE減水剤遅延形 |

表-9 室内実験の配合

| W/C (%) | s/a (%) | 単位量(kg/m ³) | | | | 混和剤 C×% |
|---------|---------|-------------------------|-----|-----|------|---------|
| | | W | C | S | G | |
| 55 | 44.3 | 175 | 318 | 798 | 1013 | 0.25 |

実験要因は初期高温履歴の最高温度とし、最高温度の目標を65℃、75℃、85℃、90℃および95℃の5水準とした。初期の高温履歴は、実大模擬実験の温度測定結果(図-4)を参考にして設定した。図-6に設定最高温度85℃の場合を一例として示す。コンクリート練混ぜ6時間後、すなわち材齢0.25日までは室温で保管し、その後高温履歴を与えた。まず、設定最高温度-25℃に設定し、材齢2日で設定最高温度にした。最高温度を5日間保持し、材齢7日で設定最高温度-25℃にした。材齢11日で設定温度を40℃とし、材齢14日以降は室温とした。供試体の型枠には、ブリキ製の軽量型枠を使用した。初期高温履歴を受ける供試体は、打込み後5時間で、水分の逸散を防ぐために、アルミ粘着テープで上面をカバーし、湿布とラップおよびビニール袋を用いて封かんし、6時間後(すなわち、材齢0.25日)から送風定温乾燥器にて先述した14日間の温度履歴を与えた。なお、熱電対を供試体中心に埋め込んだ封かん供試体を作製し、他の供試体と同様に乾燥器内に入れ、高温履歴の確認を行った。14日間の高温履歴を終えた供試体は、その後、封かんをしたまま実験室内に保存した。20℃水中養生を行う供試体は材齢1日で脱型し、20℃の恒温水槽内で標準水中養生を行った。圧縮強度試験は、材齢28日と91日で行った。

4.4 実験結果および考察

表-10にフレッシュコンクリートの試験結果の一覧を示す。表より、練上がり30分後のスランプは、設定最高温度が75℃のバッチを除いて、目標値の12cm±2.5cmを満足した。一方、空気量は、すべてのバッチで4.5±1.5%を満足した。

図-7に材齢と圧縮強度の関係を示す。図より、20℃標準水中養生供試体の圧縮強度に比べて、高温履歴を受けた供試体の強度は、低めの値で推移することがわかる。このような傾向は大型模擬試験体による実験の傾向と同様であった。高温履歴を受けた供試体のうち、目標最高温度が65℃~90℃の供試体は、28日強度、91日強度ともに大差なく、ほぼ同じ様な強度発現を示したのに対し、目標最高温度を95℃(実測最高温度93.1℃)とした供試

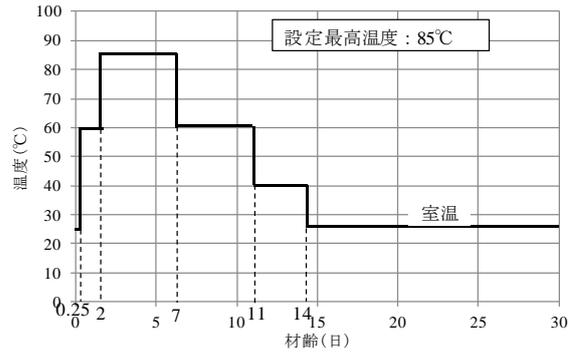


図-6 初期高温履歴設定の一例(設定温度85℃)

表-10 フレッシュコンクリートの試験結果

| 設定最高温度 (°C) | スランプ(cm) | | 空気量 (%) | コンクリート温度 (°C) |
|-------------|----------|------|---------|---------------|
| | 直後 | 30分後 | | |
| 95 | 17.5 | 10.5 | 4.9 | 26.6 |
| 90 | 16.0 | 10 | 5.3 | 25.0 |
| 85 | 18.0 | 13.5 | 4.4 | 21.2 |
| 75 | 17.5 | 7.5 | 4.3 | 25.9 |
| 65 | 14.5 | 10.5 | 4.5 | 27.0 |

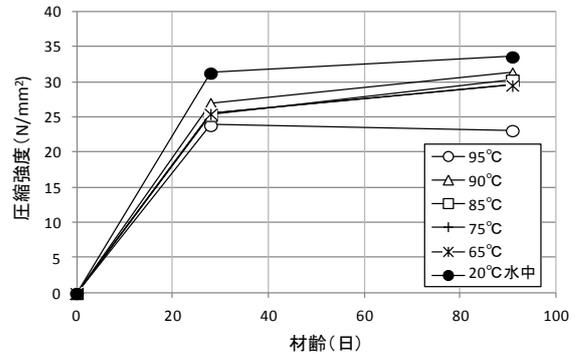


図-7 材齢と圧縮強度の関係

体は、材齢28日から材齢91日にかけて強度に変化がなく、強度の増進がほとんど見込めない結果となった。本検討では、高温履歴による強度の発現性の低下の原因の追及は行っていないが、既往の研究によると、高温によるコンクリート中の含水率の低下¹⁰⁾、遷移帯の生成¹¹⁾、エトリングライトからモノサルフェートへの転移^{9), 11)}等が要因として議論されている。

土木構造物におけるコンクリートの強度管理は、材齢28日の水中養生供試体の強度をもとに行われる。図-8に20℃標準水中養生の28日強度に対する高温履歴を受けた供試体の圧縮強度の比を示す。横軸は最高温度の実測値である。図中には実大模擬試験体からの採取コアの試験結果に加えて、建築分野の高強度コンクリートを対象に実施された既往の研究成果のデータ^{10), 12)}も示している。図より、66℃~90℃程度までの範囲では、高温履歴を受けたコンクリートの強度比は、材齢の経過とともに1.00に近づく傾向となった。一方、最高温度の実測値が90℃を超えると傾向が異なり、本実験の93.1℃の場合や桂ら¹⁰⁾の場合の強度比が0.74~0.76程度と28日標準

