

論文 高温環境下へのシラスコンクリートの適用に関する実験的研究

奥地栄祐^{*1}・武若耕司^{*2}・清川秀樹^{*3}・中尾好幸^{*4}

要旨：鹿児島県は日本有数の温泉地帯であることから、構造物が温泉地帯に建設されることも少なくなく、温泉地帯地中部においては 100℃にも達するの高温環境下の場所もある。そこで、本研究では、現在実用化が進められているシラスコンクリートをこのような高温環境に施工することを前提として、主に施工当初から高温環境に曝されたシラスコンクリートの初期物性について検討を行い、その性状を確認した。

キーワード：シラスコンクリート、養生温度、圧縮強度、静弾性係数

1. はじめに

鹿児島県牧園町に建設予定の丸尾の滝橋¹⁾では、構造物が温泉地帯に建設されることから、酸や無機塩類による構造物の劣化を抑制するための特別な配慮が必要となってくる。また同時に、今回のケースでは、本橋橋脚建設位置の地中部で 100℃を越える高温の地熱も観測されたことから、高温環境下で養生される橋脚基礎の物性変化についても検討しておく必要がある。

そこで本研究では、このような環境にコンクリート基礎を施工することを前提として、主に施工当初から高温環境に曝されたコンクリートの初期物性について検討を行った。なお、実験にあたって、温泉地帯におけるコンクリートの耐久性に配慮するため、近年実用化に関する検討が進められ、酸性環境においても高い耐久性を有することが確認されているシラスコンクリ

ートを検討の対象とし²⁾、その高温下での性能を普通コンクリートと比較した。さらに、物性の検討にあたっては、圧縮強度試験用供試体レベルでの調査と共に、大口径基礎内部のコンクリートの性能についても検討を行うため、基礎を模擬した大型模型供試体を作製し、コンクリート内部の温度影響範囲についても検討を行った。

2. 円柱供試体による検討

2.1 実験概要

今回の実験では、セメントに普通セメントまたは低熱セメント、細骨材に海砂（密度 2520kg/m³）または鹿児島県横川産シラス（主な物性を表-1に示す）、粗骨材に 2005 砕石（密度 2640kg/m³）を使用した。混和剤は、海砂を使用したコンクリートには AE 減水剤を、シラスを使用したコンクリートにはポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を使用した。なお、細骨材に使用したシラスは、地山から採取したものから 5mm のふるいを通すものをすべて使用した。

表-1 シラスの物性

表乾密度 (kg/m ³)	吸水率 (%)	微粉含有量* (%)	F.M.	実積率 (%)
2190	7.21	20.6	1.44	53.3

※微粉とは、粒径 0.075mm の粒子を示す

表-2 実験の要因と水準

コンクリートの種類	セメントの種類	細骨材の種類	養生温度(℃)
普通	普通	普通砂	20, 40, 60, 80,
普通シラス		シラス	20, 40, 60℃, 80,
低熱シラス	低熱		

表-3 コンクリートの配合

	W/C	単位量(kg/m ³)				混和剤 粉体比 [※]
		W	C	S	G	
低熱シラス	47	200	462	453	1110	0.65%
普通シラス		217	462	430	1014	0.90%
普通		176	374	676	1045	1.00%

※シラスコンクリートについては、セメント+0.075mm 以下のシラス微粉分に対する比率

*1 鹿児島大学 大学院理工学研究科 工修 (正会員)

*2 鹿児島大学 工学部海洋土木工学科 工博 (正会員)

*3 鹿児島県 栗野土木事務所

*4 榊長大

実験の要因と水準を表-2に示す。実験に用いた供試体は、 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ の円柱供試体である。検討を行ったコンクリートは、低熱シラスコンクリート（セメントに低熱セメント、細骨材としてシラスを使用した場合、以下「低熱シラス」と称す）および、普通シラスコンクリート（セメントに普通セメント、細骨材にシラスを使用した場合、以下「普通シラス」と称す）、および普通コンクリート（セメントに普通セメント、細骨材に砕砂を使用した場合、以下「普通」と称す）の三種類である。これらの配合を表-3に示す。なお、混和剤は、セメントと粒径 0.075mm 以下のシラス粒子を粉体と考え、それに対する割合で添加している。配合は、先ず「普通」の配合を、28日間の標準養生において強度 30N/mm^2 となるような条件で決定し、それと同一の W/C となるよう「低熱シラス」および「普通シラス」の配合を決定した。目標スランプはいずれも $10 \pm 2 \text{cm}$ である。作製した供試体は、作製直後から 20°C 、 40°C 、 60°C および 80°C の温度の水中でそれぞれ養生を行った。また、その他に、材齢 28 日まで 40°C の温度で水中養生を行った後、 60°C （以下「 $40 \rightarrow 60^\circ\text{C}$ 」）又は 80°C （以下「 $40 \rightarrow 80^\circ\text{C}$ 」）の水中で養生を行った場合や材齢 28 日まで 20°C の温度で水中養生を行った後、温度 130°C 、圧力 0.27N/mm^2 の条件でオートクレーブ養生を行った場合についてもあわせて検討をした。

所定の養生後は、圧縮強度試験および静弾性係数試験を実施した。

2.2 実験結果

各種コンクリートで作製した円柱供試体の圧縮強度試験結果を取りまとめて図-1に示す。この結果、養生温度 20°C や 40°C の場合、材齢 14 日までの強度の発現性は「普通シラス」、「普通」が「低熱シラス」に比べ大きい。それ以後についての強度発現性は「低熱シラス」の強度増加率が大きく、養生温度 20°C の場合には材齢 56 日で、また養生温度 40°C の場合には材齢 28 日で、「普通シラス」や「普通」と同程度の圧縮強度となった。

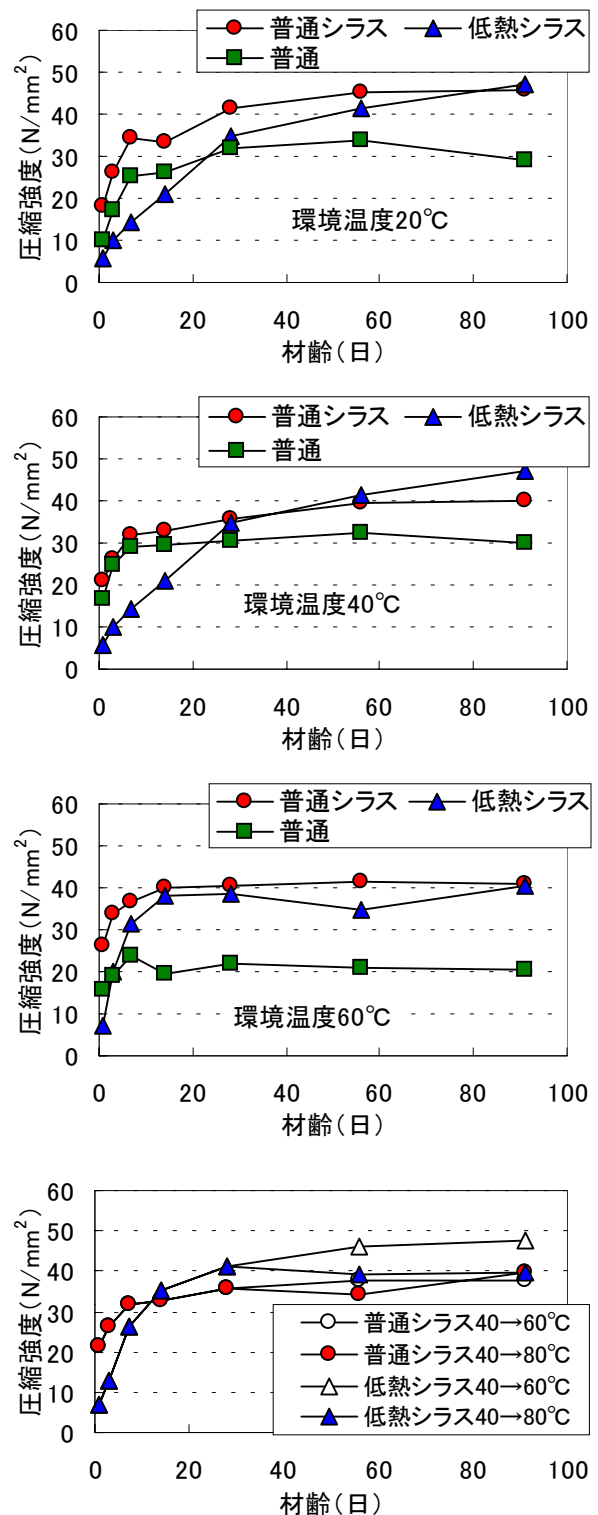


図-1 管理供試体圧縮強度試験結果

養生温度 60°C の場合、「普通」は材齢 7 日以後の強度増進が頭打ちの状態にあるのに対し、「普通シラス」と「低熱シラス」では少なくとも材齢 14 日までは順調に強度が増加し、材齢 14 日の圧縮強度は「普通」の 2 倍近くに達した。

養生温度 80°C の場合については、供試体を作製した直後から、 80°C の水中で養生を行ったた

め、コンクリートがまだ固まらない状態で供試体内部の空気が膨張して、コンクリートも全体的に膨らみ、供試体の品質が低下したと考えられ、正確に養生温度の影響を表していない可能性があったため、今回は省略した。

養生温度 40→60℃の場合、「低熱シラス」は、養生温度が 60℃となる材齢 28 日以後で、圧縮強度が増加しているが、「普通シラス」では、強度の増加はほとんど認められなかった。また、この養生条件の場合の「低熱シラス」は、養生温度 60℃一定の条件で養生を行った場合に比較して、材齢 91 日の圧縮強度は大きくなっており、養生温度 40℃一定の養生の場合と同程度の値を示していた。一方、「普通シラス」、養生温度 40→60℃の場合には、材齢 91 日の圧縮強度は、養生温度 60℃一定の場合とほぼ同程度であり、養生温度 40℃一定の場合より若干小さくなった。

養生温度 40→80℃の場合、「普通シラス」、「低熱シラス」とともに、養生温度が 40℃から 80℃に変化した材齢 28 日以後での圧縮強度の増加は認められなかった。

図-2 に材齢 91 日の各種コンクリートの静弾性係数を比較して示す。この図より、「普通」および「普通シラス」は、養生温度が高くなるに従い、静弾性係数が低下しているが、「低熱シラス」は養生温度 60℃までは静弾性係数に影響は認められなかった。また、養生温度を材齢 28 日以降に変化させた場合については、「普通シラス」、「低熱シラス」共に、養生温度 40℃と同程度以上の静弾性係数を示した。

以上のことから、養生温度が 40℃以上の場合、細骨材にシラスを使用した「普通シラス」や「低熱シラス」が、普通砂を使用した「普通」に比べて、強度発現性が良好で、圧縮強度が大きくなる傾向が認められた。この理由のひとつとして、シラスが有しているポズラン反応性³⁾が、高温環境下において活発化し、これが材齢 28 日以後の圧縮強度の増大につながったものと思われる。また、静弾性係数に対する温度の影響の観点からも、「低熱シラス」が、60℃～80℃の環境

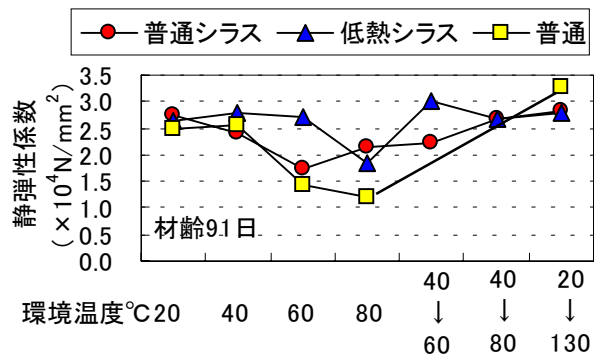


図-2 材齢 91 日の各種コンクリートの静弾性係数の比較

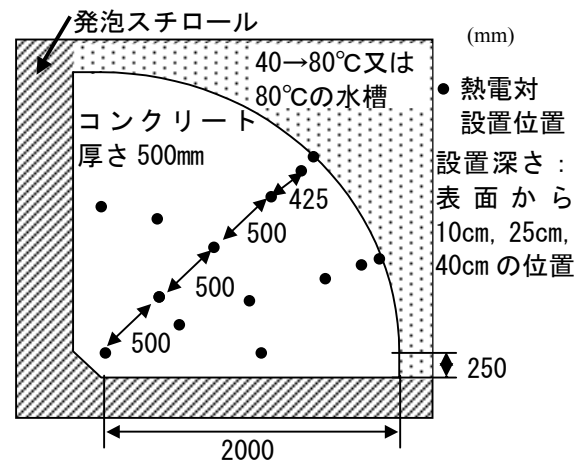


図-3 大型供試体概要

では比較的適したコンクリートであると言えそうであった。

3. 大型模型供試体による検討

3.1 実験概要

丸尾の滝橋橋脚基礎は、直径 8000mm の大口径の深礎杭であるため、杭外周部と中心部間に温度勾配が生じるものと考えられ、円柱供試体では、必ずしも杭体各部の圧縮強度分布を捉えているとは言い難い。そこで、実構造物をモデル化した図-3 に示すような半径 2000mm の 1/4 円で、厚さ 50cm の大型模型供試体を作製し、各部の温度履歴とその点におけるコア供試体の強度の測定を行った。供試体は、円弧部分に水槽を接置し、円弧表面が養生温度 80℃一定あるいは、材齢 28 日まで 40℃とし、その後 80℃となるようにした状態で養生を行った。なお、水槽と接しない部分は、供試体上面も含めてすべての面を厚さ 400mm の発泡スチロールで覆い断熱した。

また、図中の●の位置には温度測定のための熱電対を埋め込んだ。

材齢 7, 28, 56, および 91 日が経過した時点で、強度試験用として長さ 50cm のコアを供試体から採取し、コア上部を圧縮強度試験に、コア下部を圧縮強度試験および静弾性係数試験に供した。なお、今回の実験結果では、コア上部の圧縮強度のバラツキが非常に大きく、コア採取の際の作業による一時的な冷却等の影響を受けていると思われたため、圧縮強度、静弾性係数共にコア下部のデータを使用し、検討を行った。

実験に用いたコンクリートは、養生温度が常時 80°C 一定の場合については、表-3 の配合の「普通」、および「低熱シラス」、また養生温度 40→80°C の場合には、「普通シラス」、および「低熱シラス」である。

3.2 実験結果

(1) コンクリート中の温度

図-4 には、高温水槽に接するコンクリート表面からの距離ごとのコンクリート温度の経時変化を示す。なお、図中の凡例の距離は水槽側コンクリート表面からの距離を示している。また、この図において材齢 7 日、28 日、56 日において温度の低下が認められるが、これは各材齢時においてコンクリートコア採取のため、供試体上部の断熱材をはずし、さらにコア採取の際にコンクリート表面に水をかけたためのものである。

この結果から、まず、「低熱シラス」初期材齢における水槽からの距離 2000mm の温度に関して、養生温度 80°C 一定よりも、養生温度 40→80°C の温度が高くなっていることなどから、厚さ 40cm の発泡スチロールによる断熱の効果は、実際の現象を十分に模擬できていない可能性がある。しかし、大型模型供試体の温度分布を測定していることから、それぞれの温度履歴におけるコンクリートの圧縮強度や静弾性係数の評価を行うことは可能であると思われる。また、今回の測定結果を利用して、実際の橋脚基礎の温度分布を推測することも可能であると思われる。なお、養生温度 80°C 一定、40→80°C いずれの場合

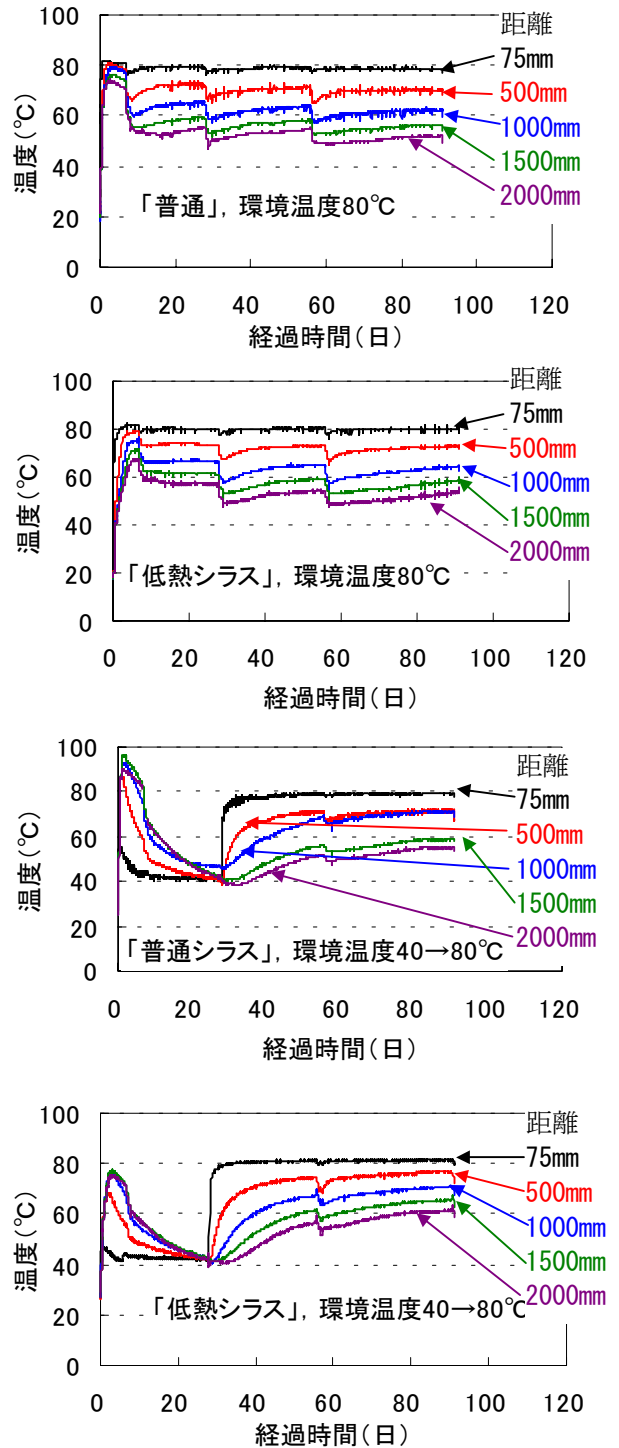


図-4 大型模型供試体温度分布

もコンクリートの種類による温度分布の違いはほとんど認められなかった。

(2) コア供試体の試験結果

図-5 にコア供試体の圧縮強度試験結果を示す。縦軸は圧縮強度を、横軸は水槽に接しているコンクリート表面からの距離を示す。なお、図中の太線は、養生温度 20°C、材齢 28 日における円柱管理供試体の圧縮強度を示す。養生温度

80℃一定として検討を行った場合、「普通」では、いずれの材齢においても、コンクリート表面から75mmの位置での圧縮強度が、他の部位に比べ、小さくなっていた。また、材齢28日の圧縮強度と比較すると、材齢91日ではすべての部位において、圧縮強度の低下が認められた。さらに、「普通」のコア供試体の圧縮強度は、いずれの位置並びに材齢の場合でも、養生温度20℃、材齢28日の円柱管理供試体の圧縮強度よりも小さい結果となった。

養生温度80℃の水槽と常時接していた「低熱シラス」の場合も、「普通」の場合と同様に、いずれの材齢においても、コンクリート表面から75mmの位置での圧縮強度が、他の部位に比べ、小さくなっていることが認められた。しかし、圧縮強度値自体は、材齢91日の時点で、「普通」の1.5倍以上の値を示していた。また、材齢91日ではコンクリート表面から75mmおよび500mm部位の圧縮強度の値が、それぞれの部位の材齢28日のコア圧縮強度より低下していたが、「普通」に比べると、圧縮強度の低下している範囲は狭い傾向であった。さらに、「低熱シラス」の材齢91日の時点におけるコア供試体の圧縮強度は、コンクリート表面に近い距離75mmの場合を除いて、いずれも、養生温度20℃、材齢28日の円柱供試体の圧縮強度を上回る結果となった。このことから、「低熱シラス」は、水槽から500mmより遠い位置における温度履歴すなわち養生温度70℃程度までは、養生温度の増加による圧縮強度の低下はあまりないものと思われる。

一方、養生温度を40℃から80℃に変化させた状態における「普通シラス」および「低熱シラス」ともに、コンクリート表面からの距離による圧縮強度の違いは、養生温度80℃一定の場合ほど顕著には認められなかった。また、この場合の「普通シラス」のコア強度は、養生温度20℃、材齢28日の円柱供試体の圧縮強度と同等であった。この場合の「低熱シラス」における、コア供試体の圧縮強度は、養生温度20℃、材齢28日の円柱供試体の圧縮強度を上回る結果となった。

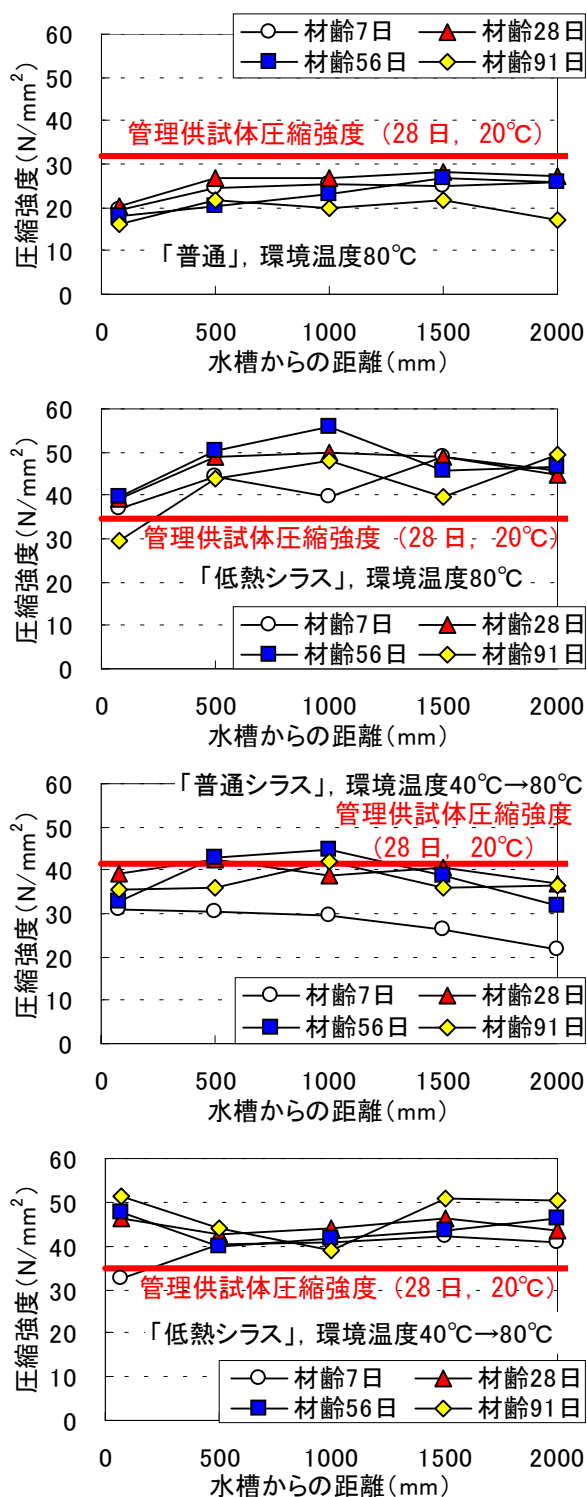


図-5 コア供試体圧縮強度試験結果

このことから、材齢28日まで養生温度を40℃程度にすることで、材齢28日以降に養生温度が80℃程度まで上昇したとしても、コンクリートの圧縮強度に及ぼす影響はほとんどないものと思われる。

これら、コア供試体の圧縮強度については、これらコア供試体が受けた温度履歴に近い養生

条件における円柱供試体の圧縮強度試験結果とほぼ同様の傾向を示していた。

図-6 にコア供試体の弾性係数試験結果を示す。まず、材齢 91 日における静弾性係数のコンクリートの部位による違いは明確には認められなかった。また、養生温度 20℃、材齢 28 日の円柱供試体の静弾性係数（「普通」が $2.19 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ 、「普通シラス」が $2.65 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ 、「低熱シラス」が $2.37 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ ）とコア供試体の静弾性係数を比較すると、細骨材にシラスを使用したコンクリートは、ほぼ同程度であるが、「普通」はコア供試体の静弾性係数が低くなる結果となった。

以上のことから、細骨材としてシラスを使用することにより、養生温度 80℃程度の高湿環境下においても、コンクリートの強度や静弾性係数の低下を抑制でき、さらにシラスと低熱セメントを組み合わせることにより、この抑制効果は、より大きくなることが確認された。

4. 結論

本研究では、現在実用化が進められているシラスコンクリートを高温環境に施工することを前提として、主に施工当初から高温環境に曝されたシラスコンクリートの初期物性について検討を行い、以下の知見を得た。

- 1) 円柱供試体を用いた実験では、養生温度が 60℃～80℃の場合、細骨材にシラスを使用した「普通シラス」や「低熱シラス」が、普通砂を使用した「普通」に比べて、強度発現性が良好で、圧縮強度が大きくなる傾向が認められた。
- 2) 高温の環境と接する大容量のコンクリート内部の温度分布は、セメントの水和反応によるものと思われる材齢初期の温度上昇過程における若干の違い以外は、細骨材やセメントの種類による大きな違いは認められない。
- 3) 大型模型供試体実験から、細骨材としてのシラスや低熱セメントを使用することによって養生温度 80℃の環境においても圧縮強度の発現性が良好なコンクリートを作製できる。

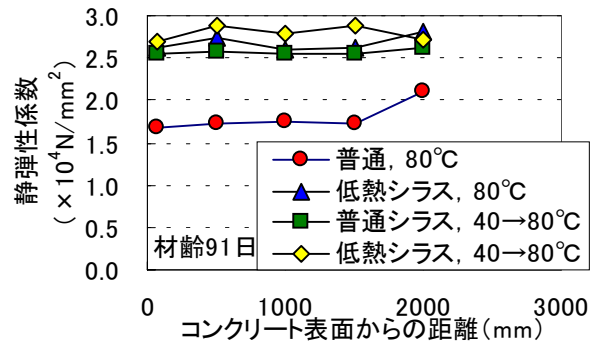


図-6 材齢 91 日コア供試体弾性係数試験結果

なお、養生温度が 100℃以上の場合については、現在検討中であり、今後報告する予定である。

【参考文献】

- 1) 武若耕司，清川秀樹，奥地栄祐，立山幸雄：シラスコンクリートの施工性能評価，土木学会西部支部研究発表会概要集，V-23，pp. 508-509，2003
- 2) 武若耕司，川俣孝治：しらすコンクリートの長期強度特性および耐久性について，第 45 回セメント技術大会講演集，pp. 544-549，1991
- 3) 樺山圭輔，武若耕司，中重朗：コンクリート用混和材としてのしらすの利用可能性に関する実験的研究，土木学会第 49 回年次学術講演会概要集，V-200，pp. 400-401，1994