

論文

[1070] 微視的温度応力を受けるコンクリートの力学的性質

正会員 田澤 栄一 (広島大学工学部)
 正会員 ○南 和孝 (防衛大学校土木工学教室)
 影山 智 (山陽工業)
 寺西 修治 (広島大学大学院)

1. まえがき

極高温あるいは極低温のような極端な温度環境条件下で使用されるコンクリートの力学的性質は、コンクリート中の水分の脱水あるいは凍結によって変化する。したがって、コンクリートの含水量は、このような温度環境条件下のコンクリートの性質に大きな影響を与える。さらに、高温の影響を受ける場合には、コンクリートの内部温度が100℃以上の範囲でアコースティック・エミッションによる微小ひびわれの検出値が急増することや、高温履歴を受ける場合に力学的性質が低下することなどから、温度上昇および降下に伴うコンクリートの内部構造の変化は、含水量の影響と同様に主な要因であると考えられる。低温の場合にも高温の場合と同様なコンクリート内部の構造変化がコンクリートの性質に影響を与えることが予想される。このようなコンクリートの内部構造の変化が生じるのは、コンクリートがセメントペーストおよび骨材から構成される複合材料であるためであり、個々の複合要素が特有の熱変化挙動を示すことに起因する。特に、コンクリート内部で発生する微小ひびわれは、モルタル相と粗骨材相との熱膨張量の相違に伴って発生する熱応力(本研究では微視的温度応力と称する。)によって生じるものと考えられる。

本研究では、種々の岩種を用いて製造したコンクリートの高温あるいは低温温度環境条件下の熱膨張特性および力学的特性を測定し、これらの特性に及ぼすコンクリートの内部水、微小ひびわれ形成および微視的温度応力の影響について検討した。本研究により種々の温度環境条件下にあるコンクリートの性質ならびにこれらの性質の変化の機構、さらに複合材料としてのコンクリートにおける力学的性質に関する複合効果を微視的な観点から明かにすることができる。

2. 実験概要

2.1 供試体の製造

本実験には普通ポルトランドセメントを使用した。表-1に示すように、細骨材には泥質岩起源熱変成岩(ホルンフェルス)および石灰岩の砕砂、さらに風化花崗岩系山砂を使用し、粗骨材にはホルンフェルスおよび石灰岩の砕石を使用して、モルタル(寸法: φ 5×10cm)およびコンクリート(寸法: φ 10×20cm)の供試体を製造した。モルタルの配合はW/C=50%, S/C=2.45, フロー値180であり、コンクリートの配合はW/C=50%, s/a=60%, スランプ8cmとした。これらの供試体は2週水中養生の後、1週気温20℃、湿度50%の恒温室内で気乾養生した。ただし、含水量の影響を検討する場合には3週水中養生とし、水上げ後直ちに試験を行った。

表-1 供試体の種類

	細骨材岩種	粗骨材岩種
モルタル	ホルンフェルス	-
	風化花崗岩系山砂	-
	石灰石	-
コンクリート	ホルンフェルス	ホルンフェルス
	ホルンフェルス	石灰石
	風化花崗岩系山砂	ホルンフェルス
	風化花崗岩系山砂	石灰石
	石灰石	ホルンフェルス
	石灰石	石灰石

2.2 実験方法

2.2.1 熱膨張特性の測定

所定の養生を終了した供試体の表面の軸方向にストレインゲージを貼付け、高温過程(常温か

ら200°Cまでの温度上昇・降下)および低温過程(常温から-100°Cまでの温度降下・上昇)共に温度上昇速度および降下速度を20°C/hrとし、温度変化に伴うひずみ量を測定し、同時に測定された石英ガラスに貼付けられたストレインゲージのひずみ量との差を求め、熱膨張ひずみとした。

2.2.2 コンクリートの力学的特性の測定

コンクリートの力学的性質の測定は、圧縮強度および弾性係数について行った。測定時の温度条件は常温(約20°C)、高温(コンクリートの内部温度が200°Cに到達し、1時間保持後試験を行う。)、低温(コンクリートの内部温度が-100°Cに到達し、1時間保持後試験を行う。)高温および低温履歴(最高および最低温度を2時間保持し常温まで冷却あるいは加熱し試験する。)

2.2.3 温度上昇および降下過程におけるコンクリート内部の微小ひびわれ発生状況の観測

微視的温度応力の発生に伴うコンクリート内部の微小ひびわれの形成状況をアコースティック・エミッション法により観測した。試験装置は図-1に示すものであり、恒温槽内に設置した供試体にウェーブガイドを取り付け、その先端部にはAEセンサー(共振周波数175kHz)が接着され、AEセンサーで検出されたAE信号はプリアンプにより増幅し、AEプロセッサー(総増幅率:100dB)に伝達される。

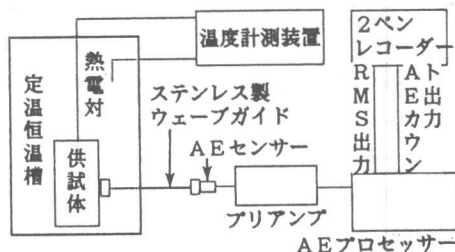


図-1 AE計測システム概要図

AE信号に関する情報はAEプロセッサーから出力されるRMS波形およびAEカウントである。

3. コンクリート内部に発生する微視的温度応力の算定

高温あるいは低温の影響を受ける場合温度上昇および降下過程においてコンクリート内部ではモルタル相と粗骨材相との熱膨張ひずみの相違によって微視的温度応力が発生する。この応力はコンクリートをモルタルマトリックスと粗骨材から成る二相系複合材料と仮定して、複合要素の弾性常数値および熱膨張ひずみを用いて計算することができる[1]。本研究では、種々の岩種を使用したモルタルおよび砕石母岩の熱膨張ひずみ測定結果を用いて、微視的温度応力を計算した。図-2(a)および(b)はそれぞれ高温過程における粗骨材とモルタルとの界面の半径方向の微視的温度応力を示している。全般的な傾向として、温度の上昇に伴い粗骨材とモルタルとの界面の半径方向には引張応力が発生し、約110°Cで最大値を示す。その後コンクリート中に含まれる水分、すなわち毛管水およびゲル水の

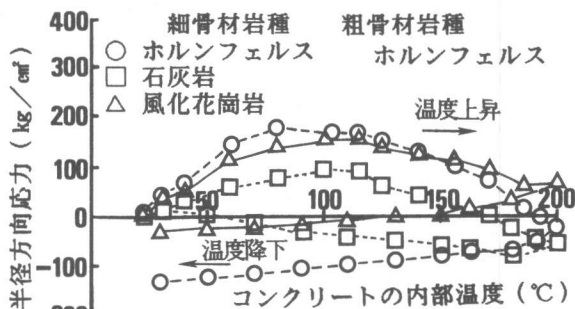


図-2(a) 高温過程における半径方向微視的温度応力

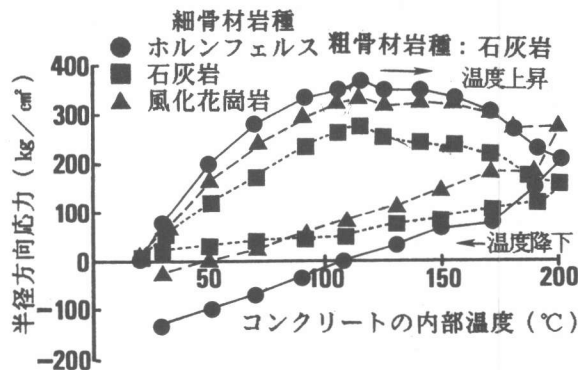


図-2(b) 高温過程における半径方向微視的温度応力

脱水に伴いモルタル相の収縮が生じ、最高温度に達するまで幾分の応力の低下が認められるものの比較的大きな応力が生じていることがわかる。また、温度上昇過程では微視的温度応力の曲線は非線形であるのに対して、温度降下過程では温度降下過程では比較的線形な変化を示す。これは、コンクリートを構成する材料の個々の熱膨張挙動が温度上昇過程と降下過程とでは相違することによるものである。また、コンクリートを構成する細骨材および粗骨材の岩種によって、微視的温度応力の値および推移は著しく異なる。したがって、微視的温度応力の発生に伴う微小ひびわれの形成は、コンクリートの骨材の組合せによって異なることが推察される。

図-3(a)および(b)は、それぞれ低温過程における粗骨材とモルタルとの界面の接線方向の微視的温度応力を示している。温度の低下に伴い、粗骨材とモルタルとの界面の接線方向には引張応力が発生するが、温度降下および上昇過程における微視的温度応力の変化はほぼ線形である。これは、モルタルおよび粗骨材の低温収縮挙動が共に、高温の場合とは異なり線形であるためである。しかしながら、低温過程におけるモルタルおよび粗骨材の熱収縮挙動はコンクリートに使用した骨材の岩種により異なるため、微視的温度応力も著しく異なる。

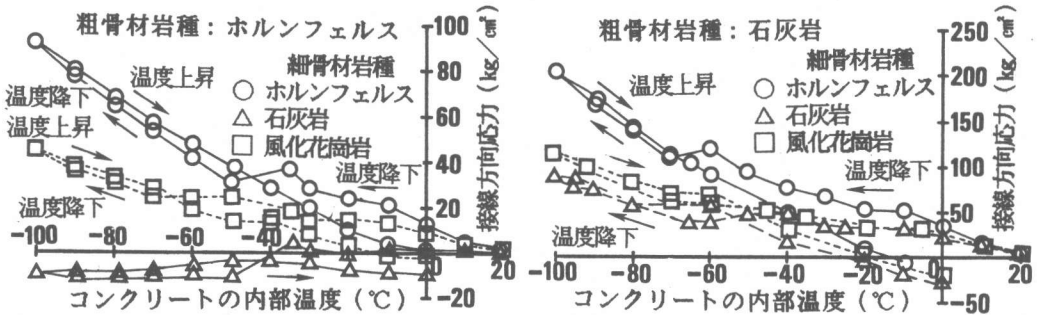


図-3(a) 低温過程における接線方向微視的温度応力 図-3(b) 低温過程における接線方向微視的温度応力

4. 温度上昇および降下過程におけるコンクリート内部の微小ひびわれの発生

図-4は温度上昇および降下過程におけるコンクリート内部の微小ひびわれの発生状況をアコースティック・エミッションを利用して測定した結果であり、累積AEカウントとコンクリートの内部温度との関係を示している。温度の上昇に伴いAE信号が検出され始めるが、コンクリートの内部温度が約100°C以上になるとAEカウントは比較的大きな増加を示し始める。

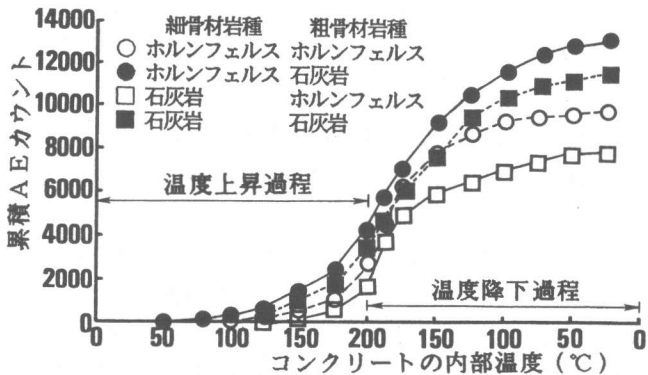


図-4 温度上昇および降下過程における微小ひびわれの発生

コンクリートの含水量がコンクリートの内部温度約100~180°Cにおいて急激に減少することを考慮すると、このAEカウントの急増は、コンクリート内部の水分の脱水に伴う内部構造の変化によって引き起こされるものと考えられる。しかしながら、コンクリートの含水量の変化は全てのコンクリートに関して同程度であるのに対して、コンクリートの内部温度約100~180°Cの範囲におけるAEカウントの増加傾向は異なることから、温度上昇に伴うコンクリート内部

の微小ひびわれの発生性状は、コンクリートを構成するモルタルと粗骨材の岩種によって影響されることがわかる。一方、温度降下過程における微小ひびわれの発生状況は、コンクリートに使用した骨材の岩種の組合せにより著しく異なり、最終的な累積AEカウントに影響を与える。また、温度降下時において、コンクリートの内部温度が約100°C付近になるとAEカウントの増加率は低下する。これは、コンクリートの構成材料の熱膨張挙動に影響されるものと考えられ、この影響について半径方向の微視的温度応力と累積AEカウントとの関係より検討する。図-5は累積AEカウントとコンクリートの粗骨材とモルタルとの界面の半径方向に発生する微視的温度応力との関係を示している。全般的な傾向として、半径方向応力が最大値に到達後AEカウントの急増が開始される。この時点でのコンクリートの内部温度は約110°Cであり、これはコンクリート中の水分の脱水が開始される温度である。そのため、コンクリート中の水分の脱水に伴うモルタル相の収縮によって半径方向の微視的温度応力は低下し始めるが、微小ひびわれの形成量は増加する。この時点が第1の微小ひびわれ形成状態であると考えられる。しかしながら、コンクリートの重量変化が引き起こされるのは温度範囲にして約200°Cまでであり、この範囲までの累積AEカウントは多い場合で約3000である。したがって、コンクリート中の水分の脱水がほぼ終了した時点からは、微視的温度応力によって微小ひびわれが発生するものと思われる。この段階を第2の微小ひびわれ形成状態と見なすことができる。半径方向応力の低下に比例して、累積AEカウントは増加して最大値に到達する。半径方向応力の低下にもかかわらず微小ひびわれの発生数は増加していることから、この温度範囲における微小ひびわれの発生条件は他の応力に依存するものと考えられる。図-6は累積AEカウントとコンクリートの粗骨材とモルタルとの界面の接線方向に発生する微視的温度応力との関係を示している。圧縮応力が最大値に到達後、累積AEカウントは増加し始め、この接線方向応力の変化により粗骨材界面の半径方向に微小ひびわれを形成し、さらに、第1の微小ひびわれ形成状態で生じた微小ひびわれの伝播・拡大を引き起こすことが推測される。この微小ひびわれの形成によって高温履歴を受けるコンクリートの力学的特性は著しく低下する。一方、第1および第2の微小ひびわれ形成状態における累積AEカウントの増加傾向は、コンクリートの種類によって著しく異なり、コンクリートの構成材料の熱膨張挙動が大きな影響を与えていることがわかる。

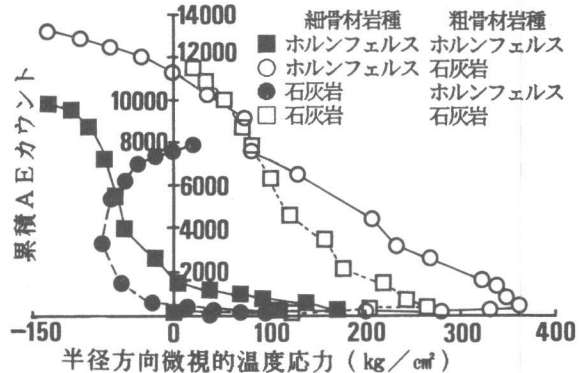


図-5 累積AEカウントと微視的温度応力との関係

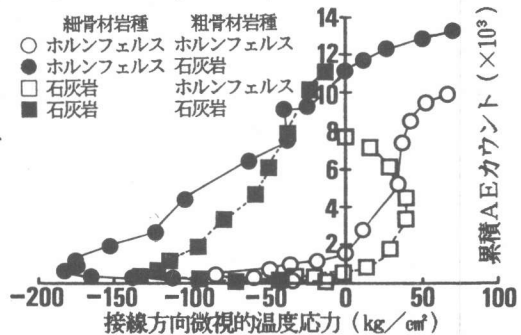


図-6 累積AEカウントと微視的温度応力との関係

、コンクリート中の水分の脱水がほぼ終了した時点からは、微視的温度応力によって微小ひびわれが発生するものと思われる。この段階を第2の微小ひびわれ形成状態と見なすことができる。半径方向応力の低下に比例して、累積AEカウントは増加して最大値に到達する。半径方向応力の低下にもかかわらず微小ひびわれの発生数は増加していることから、この温度範囲における微小ひびわれの発生条件は他の応力に依存するものと考えられる。図-6は累積AEカウントとコンクリートの粗骨材とモルタルとの界面の接線方向に発生する微視的温度応力との関係を示している。圧縮応力が最大値に到達後、累積AEカウントは増加し始め、この接線方向応力の変化により粗骨材界面の半径方向に微小ひびわれを形成し、さらに、第1の微小ひびわれ形成状態で生じた微小ひびわれの伝播・拡大を引き起こすことが推測される。この微小ひびわれの形成によって高温履歴を受けるコンクリートの力学的特性は著しく低下する。一方、第1および第2の微小ひびわれ形成状態における累積AEカウントの増加傾向は、コンクリートの種類によって著しく異なり、コンクリートの構成材料の熱膨張挙動が大きな影響を与えていることがわかる。

5. コンクリートの力学的性質に及ぼす微視的温度応力の影響

5.1 高温の影響を受けるコンクリートの力学特性に及ぼす微視的温度応力の影響

図-7および8は表-1に示すコンクリートの高温下ならびに高温履歴を受ける場合の圧縮強

度比および弾性係数比とモルタルと粗骨材との界面の半径方向に生じる最大微視的温度応力との関係を示している。ここで、圧縮強度比および弾性係数比は、各温度環境条件下における圧縮強度および弾性係数の常温の場合に対する比である。半径方向応力に対する圧縮強度比の変化は、高温下と高温履歴を受ける場合共に著しい低下は認められないが、応力の増加に伴い次第に低下する傾向にある。また、弾性係数比の変化の傾向は圧縮強度の場合に比較すると、高温下の場合には同程度であるのに対して、高温履歴を受ける場合には著しい低下を示し、半径方向応力の増加に伴いその傾向は増大する。また、最大微視的温度応力の値は、砕石母岩とモルタルの熱膨張挙動により定まることから、圧縮強度および弾性係数の低下率は、コンクリートに使用された骨材の組合せにより影響される。これは、高温の履歴を受けることによって生じる微視的温度応力がコンクリートの内部の微小ひびわれの形成を引き起こし、コンクリートの強度ならびに弾性係数の低下を生じさせることによるものと思われる。図-9は高温下ならびに高温履歴を受けるコンクリートの圧縮強度比および弾性係数比と強度測定時の累積AEカウントとの関係を示したものである。この図から明らかなように、累積AEカウントの増加、すなわちコンクリート内部の微小ひびわれの形成量の増加に伴い、圧縮強度比および弾性係数比は共に低下することがわかる。この傾向は弾性係数の場合に著しく、微小ひびわれの発生がコンクリートの弾性係数に大きな影響を与えていることがわかる。また、累積AEカウントが約4000程度までの範囲はコンクリートが高温の状態に保持されており、それ以上では温度の降下状態にある。このことから、コンクリートの力学的性質の低下は温度降下に伴うコンクリート内部の微小ひびわれの形成に大きく影響されるものと思われる。

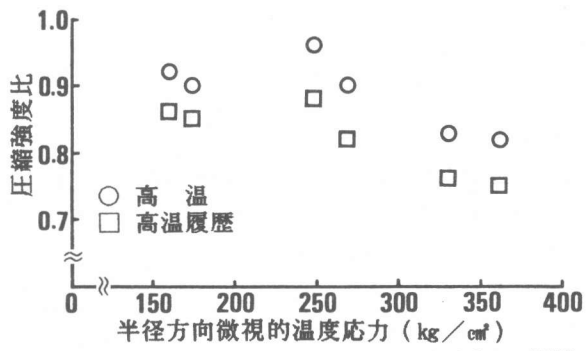


図-7 高温過程での圧縮強度比と微視的温度応力との関係

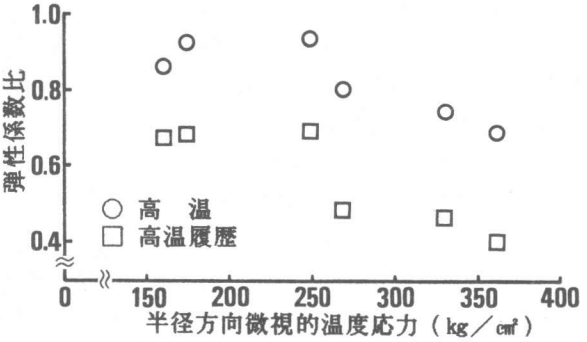


図-8 高温過程での弾性係数比と微視的温度応力との関係

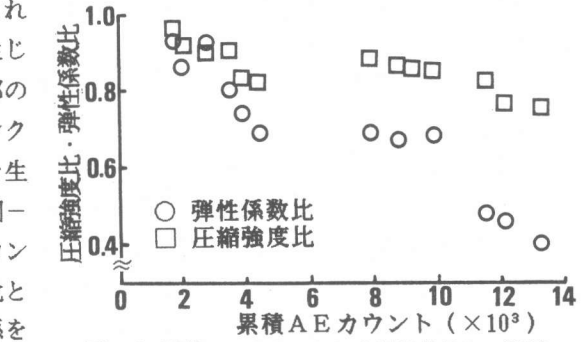


図-9 累積AEカウントと力学的特性との関係

5.2 低温の影響を受けるコンクリートの力学特性に及ぼす微視的温度応力の影響

図-10および11は低温下ならびに低温履歴を受けるコンクリートの圧縮強度比および弾性係数比とモルタルと粗骨材との界面の接線方向に生じる最大微視的温度応力との関係を示している。低温下におけるコンクリートの圧縮強度および弾性係数は、常温の場合に比較すると著しい

増加を示している。これは、コンクリート中の自由水の凍結による空隙の減少や自由水の凍結部分と他のコンクリート部分との熱膨張係数の相違による自己応力の影響によるものと思われる。すなわち、低温下のコンクリートの力学的性質の増加は、コンクリート中の自由水の量によって影響されるものと思われる。また、微視的温度応力の増加に伴い、その増加率は低下する。これは、接線方向の引張応力の発生によって粗骨材界面の半径方向に微小ひびわれが生じ、このためにコンクリートの力学的性質の増加が低下しているものと思われる。一方、低温履歴を受けるコンクリートの圧縮強度および弾性係数は常温の場合に比べ低下する。これは、自由水の凍結部分の凍結膨張によって一部に非回復性の塑性変形が生じ、自由水が凍結した後も元の状態に完全に回復せず、コンクリートの内部構造の弛緩が生じるためと考えられる。また、微視的温度応力の増加に伴い、低下の傾向は大きくなるが、どの供試体においても配合は同じであり、自由水の凍結および融解の影響はほぼ同程度であると考えられるため、低温履歴を受けることによるコンクリートの力学的性質の低下の使用骨材による相異は、骨材の組合せによって生じる微視的温度応力の影響によるものと思われる。

6. 結論

高温あるいは低温の影響を受けるコンクリートの力学的性質は、コンクリート中の水分の挙動、すなわち脱水あるいは凍結によって著しい影響を受ける。しかしながら、コンクリートの力学的性質の変化が使用した骨材の種類による相異により、さらに高温あるいは低温の履歴を受けることによって著しく変化することから、微視的温度応力によって引き起こされるコンクリート内部の微小ひびわれの形成が複合的な影響を与えていることがわかる。本研究では、このことを微視的温度応力とコンクリートの力学的特性との関係、ならびにアコースティック・エミッション法による温度上昇および降下過程におけるコンクリート内部の微小ひびわれの検出結果と力学的特性との関係によって確認することができた。

<参考文献>

- 1) 田澤、南、影山、渡辺：高温の影響を受けるコンクリートの力学的特性に及ぼす骨材種類の影響、コンクリート工学年次論文報告集、第9巻、1987、pp. 13-18.

<謝辞>

本研究の実施にあたり昭和62年度セメント協会研究奨励金の授与を受けました。ここに深く感謝致します。

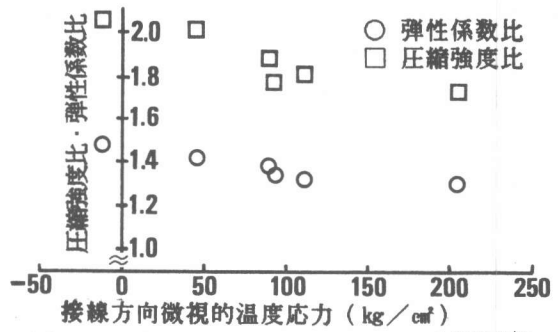


図-10 低温下におけるコンクリートの力学的特性

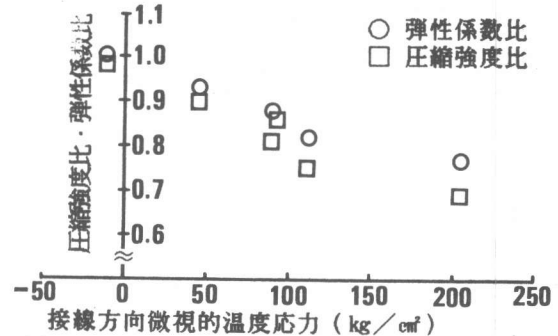


図-11 低温履歴を受けるコンクリートの力学的特性