

[7] 極低温下におけるコンクリートの特性

正会員 三浦 尚（東北大学工学部）

1. まえがき

コンクリートは極低温下においても構造材として優れた性能を持っているため、すでに液化天然ガス（沸点-162°C）等の極低温物質の貯蔵用タンクの材料として数多く用いられている。さらに近年、超伝導材料の研究が進み、液体窒素温度（沸点-196°C）においても安定した超伝導が得られる見通が付いたため、大型の超伝導機器を作ることが考えられている。そして、その場合においてもそれらの機器を入れる大型液体窒素タンクはコンクリートで作られる可能性が大きい。

一方、コンクリートは極低温に冷却された場合、種々の点で常温の時と違った性質を現す。したがって、コンクリートをこのような環境下で使用する場合には、あらかじめ極低温下におけるコンクリートの特性を十分理解しておかなければならぬ。

本報告は、筆者が行なってきた極低温下におけるコンクリートや鉄筋コンクリートの特性を調べる研究の内、主としてコンクリートの強度、温度変化による劣化、及び、コンクリートのひび割れ発生時に起きる衝撃が鉄筋に及ぼす影響について述べることとする。

2. コンクリートの強度

コンクリート供試体の冷却は、図-1に示すように行なった。すなわち、供試体を極低温用断熱槽の中に入れ、その中に液体窒素を噴霧して槽内の温度を所定の温度まで徐々に下げた。その後供試体の温度が所定の温度で一定になってから供試体を槽から取出して載荷し、強度を求めた。

コンクリートは冷却されると一般に常温の時と比べて圧縮強度が大きくなる。そして常温からの圧縮強度の増加量はコンクリートの種類にかかわらず、概略その含水率に比例する。

すなわち、

$$\sigma_{CL} = \sigma_{C0} + \Delta \sigma_C \quad \text{とすると、} \Delta \sigma_C \text{ はコンクリートの含水率 } w \text{ にはほぼ比例するのである}^1)。 \\ \text{ここに、}$$

σ_{CL} : 極低温下におけるコンクリートの圧縮強度

σ_{C0} : 常温におけるそのコンクリートの圧縮強度

$\Delta \sigma_C$: 極低温下におけるそのコンクリートの圧縮強度増加量

図-2に-160°Cにおける $\Delta \sigma_C$ と w との関係の一例を示す。

これからわかるように、 $\Delta \sigma_C$ はコンクリートの配合にかかわらずほぼ同じ関係にあるということができる。

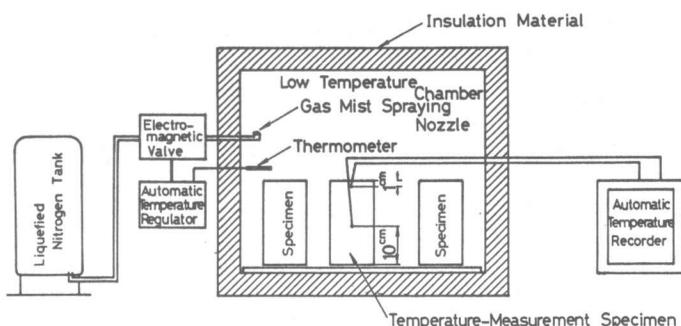


図-1 供試体冷却装置

$\Delta \sigma_c$ は温度が低下するにつれて値は増加する。しかし-120°C以下になるとコンクリート中の氷の状態が変化すると考えられており²⁾、さらに、測定値のばらつきが大きくなるので、実用上は-120°C以下は一定と考えるのが安全である。

これらの関係を図-3に示す³⁾。

以上の関係を用いることによって、コンクリートの常温における圧縮強度 σ_{c0} と含水率 w とがわかれれば、各温度における圧縮強度は簡単に計算することができる。

極低温下におけるコンクリートの引張強度も圧縮強度と同様、温度が低下するにつれて大きくなる。

図-4には圧縮強度と引張強度との関係を示すが、これより圧縮強度から引張強度を実用上ほぼ推定することができる。しかし、圧縮強度に比べて測定値のばらつきは大きく、より温度の高い所から値が頭打になると想る方方が良いようである。

いずれにしても、骨材とコンクリートとは線膨張率が異なり⁴⁾、極低温下においてはそのための内部応力が発生していると考えられる。一方、極低温下においては、コンクリートは脆くなり、破壊時には内部応力の影響を受けやすくなる。

したがって、その内部応力が極低温下におけるコンクリートの強度や強度のばらつきに影響を与えていると思われる。また、その内部応力の大きさは、使用した材料の種類、その含水量、温度、冷却速度、温度持続時間、その他によって大きく異なると考えられるため、強度にはこれらの影響が現れるものと思われる。

3. 温度変化による劣化

コンクリートが極低温まで冷却されると、常温では無かったような、普通の凍害とは違った劣化が起きることがある。すなわち、コンクリートを冷却してゆくと、一般に、初めは収縮するの

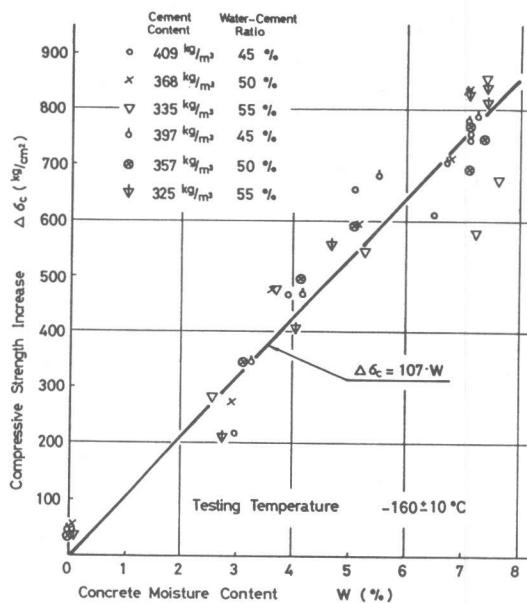


図-2 -160 °Cにおける $\Delta \sigma_c$ と w の関係

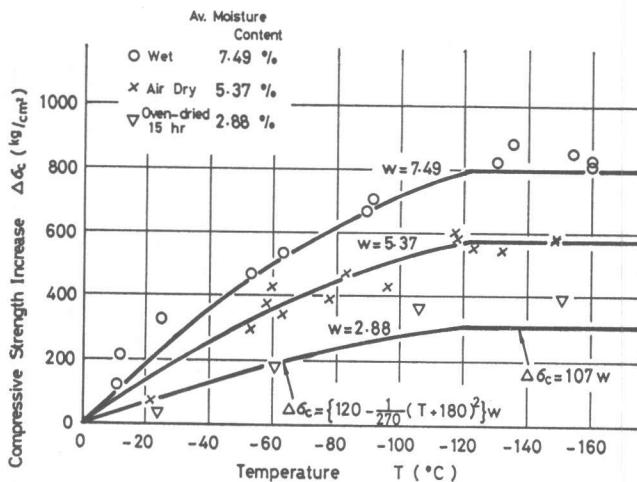


図-3 コンクリートの圧縮強度増加量に及ぼす温度及含水率の影響

であるが、ある温度になると急に歪は膨張に転じ、さらに温度を下げてゆくと再び収縮するようになる。そしてこのようなコンクリートを常温に戻しても最初の寸法に戻らず歪を残留する。また、歪を残留したコンクリートは強度が低下している。

図-5にコンクリートを-196℃まで冷却した時に測定した歪と供試体表面温度との関係の一例を示す⁵⁾。

測定したコンクリートは、W/Cが56%で、断熱材の厚さを変えることによって供試体の冷却速度を変えている。すなわち、断熱材が無い場合には常温から-196℃まで冷却するのに要する時間が約30分であるのに対し、断熱材の厚さが2mmの物は約5時間、4mmの物は約9時間である。

これより、コンクリートを冷却してゆくと、一般に、0℃を過ぎた所で若干膨張はするものの、全体としてはどんどん収縮してゆき、-30℃から-70℃の間では急激に大きな膨張を示し、その後は-196℃まで一様な収縮となることがわかる。常温にもどる時には-50℃までは一様に膨張するが、その後急激に収縮し、-20℃から再び一様な膨張に戻る。また温度は常温に戻っても歪は最初の値には戻っておらず、残留歪として残る。

このように、コンクリートを-196℃まで冷却した場合、常温から-70℃までの間の歪の変化は一様ではなく、この部分が劣化には大変重要である事が予想される。

図-6には同じ配合のコンクリートを-70℃まで繰返し冷却した湿潤状態のコンクリートの歪と供試体平均温度との関係の一例を示す⁶⁾。図-7は-50℃まで繰返し冷却したコンクリートの歪と供試体平均温度との関係である。

これより、コンクリートが繰返し冷却されると歪はその時の温度に対して一定ではなく、冷却過程と加熱過程とでループを描く事、冷却温度が-70℃と-50℃とではその歪変化の傾向が一致

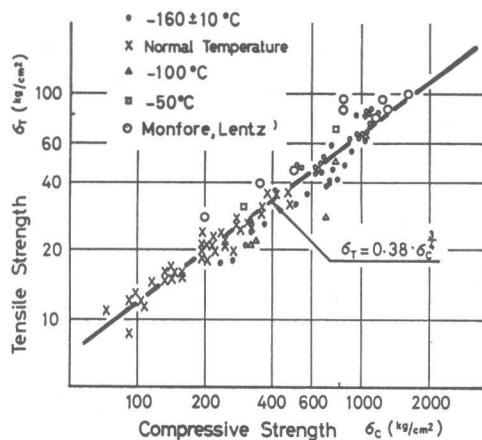


図-4 圧縮強度と引張強度との関係

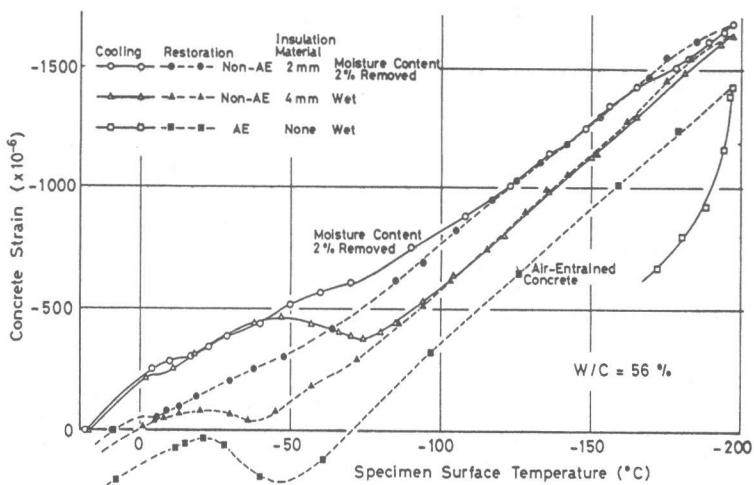


図-5 コンクリートの温度歪の一例

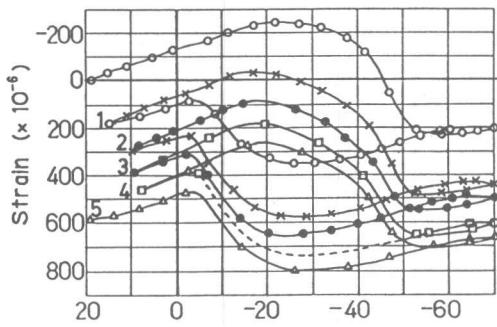


図-6 -70°Cまで繰返し冷却した一例

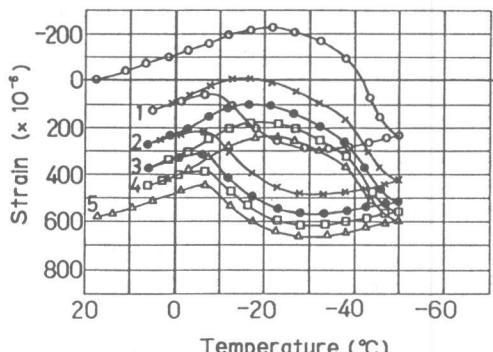


図-7 -50°Cまで繰返し冷却した一例

している事、冷却を繰り返すにしたがって残留歪が増大するものの、その増加量は減少する事、等がわかる。

図-8は最低温度を変えて繰返し冷却したW/C=56%のコンクリートの残留歪と繰返し回数との関係を⁶⁾、図-9は繰返し冷却によるコンクリートの劣化を⁶⁾、図-10は残留歪と相対動弾性係数との関係を⁶⁾、夫々示す。

これらから次の事が言える。

1) コンクリートが冷却された場合に発生する残留歪は、冷却の繰返し回数が多くなるにつれて大きくなる。

2) コンクリートが低サイクル冷却された場合に発生する残留歪は冷却温度が低いほど大きくなる傾向にあるが、

-50°C以下ではほぼ等しく、-30°Cになるとかなり小さくなり、-20°Cでは無視できるほど小さくなる。

3) コンクリートが低サイクル冷却された場合の劣化は残留歪と同じように冷却温度が高いほど小さくなる傾向にあるが、さらに、水中養生したNon-AEコンクリートと比べて、AEコンクリートや、気間養生したコンクリートでも小さくなる。さらに、冷却速度を遅くしても小さくなる。

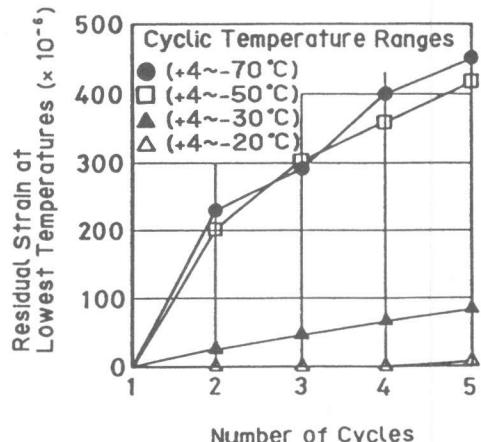


図-8 残留歪と繰返し回数との関係

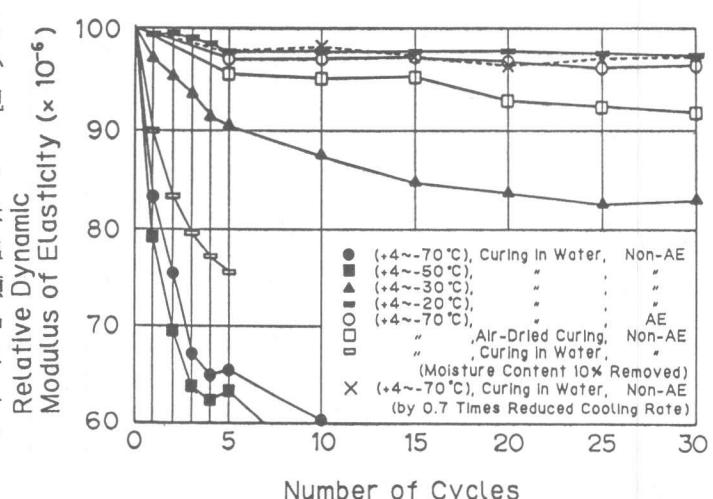


図-9 繰返し冷却によるコンクリートの劣化

- 4) 残留歪と相対動弾性係数の減少量とはほぼ比例関係にある、すなわち、残留歪とコンクリートの劣化とはほぼ一対一の関係にある。
- 5) 以上の事より、極低温まで冷却されるコンクリートの温度変化による劣化は、主として-20°Cから-50°Cまでの間で発生すると考えることができる。

4. 破壊時の衝撃

極低温下においては、コンクリートは常温下と比べて強度及び剛度が大きく、硬くなるため、鉄筋コンクリート部材の引張部においてコンクリートにひび割れが発生すると、大きな衝撃を発生する。また一方、極低温下においては鉄筋も脆的になるため、場合によってはその衝撃によって部材中の鉄筋が脆性破断することも考えられる。

図-11に鉄筋を埋込んだ W/C=50% の円柱コンクリート供試体を割裂破壊させて、その時の破壊の加速度と鉄筋応力度とを測定した時の測定手順を示す。図-12は用いた供試体である。

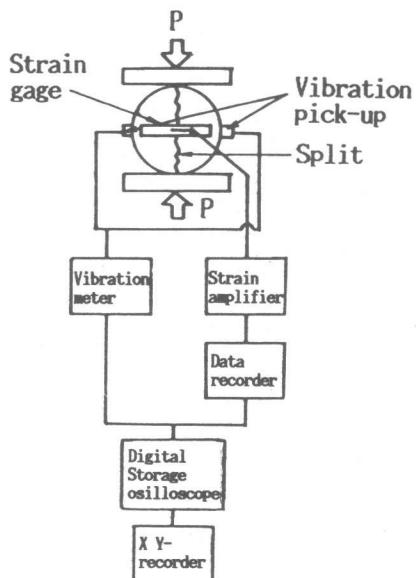


図-11 測定手順

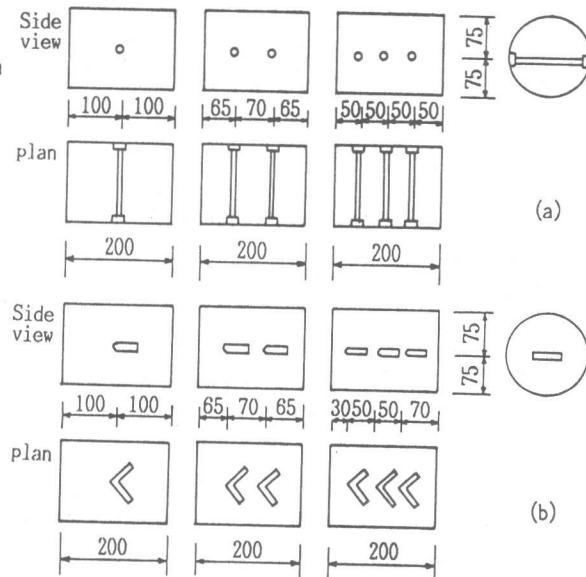


図-12 円柱供試体

供試体中の鉄筋を一部曲げているのは、鉄筋の曲げ加工部の影響を見るためのものである。なお、ここで使用した鉄筋は市販の異形棒鋼 (SD30), D10, (降伏点 34kg/mm^2 、引張強度 51kg/mm^2 伸び 27%、C = 0.22%、Si = 0.17%、Mn = 0.72%、P = 0.17%、S = 0.17%) である。

図-13に破壊時のコンクリートの加速度と試験温度との関係を示す⁷⁾。図-14には直な鉄筋の歪速度と試験温度との関係に及ぼす鉄筋本数の影響を示す⁷⁾。なお、これらはすべてコンクリ

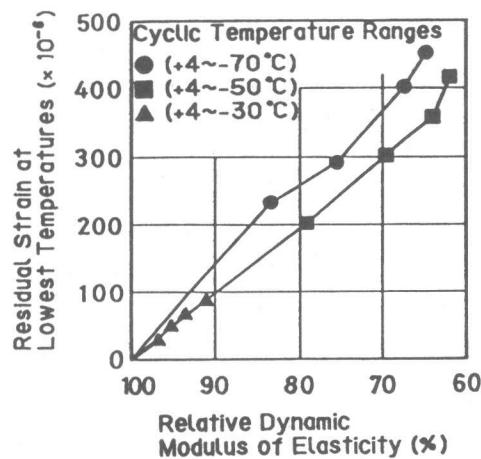


図-10 残留歪と相対動弾性係数との関係

ートが湿润状態の場合である。

図-15には直な鉄筋が一本埋込まれた供試体において、鉄筋の歪速度と試験温度との関係に及ぼすコンクリートの養生条件の影響を示す⁸⁾。

図-13より、破壊時のコンクリートの加速度は試験温度の低下に伴い大きくなることがわかる。また、供試体中の鉄筋の本数が増えるに従って小さくなる。

常温時の加速度はこれと比べて非常に小さく、測定が困難な程であった。したがって極低温下におけるコンクリートの破壊は非常に衝撃的なものとなり、加速度は少なくとも常温時の1000倍以上となっていると推定される。

図-14から、コンクリート中の鉄筋の歪速度も加速度と同様に温度の低下とともに大きくなり、また、鉄筋の量が多くなると鉄筋の歪速度は小さくなることがわかる。

常温における鉄筋の歪速度は約 $6.0 \times 10^{-4} \text{ sec}^{-1}$ であったので、-100°Cにおける歪速度は常温時の約1万倍と非常に大きくなっている。一方、破壊時の鉄筋の歪の値は、常温時の約4倍程度であった。

これより、極低温になるとコンクリート破壊時に生じる鉄筋の歪も増えるが、それにも増して衝撃による歪速度が非常に増大することがわかる。

図-15より鉄筋に生じる歪速度は含水量の増加に従い増加することがわかる。

図-16及び17は、それぞれ-80°C及び-100°Cにおいて、曲げ内半径が鉄筋直径の2倍に曲げ加工された鉄筋（残留歪20%に相当）に発生する歪速度である⁸⁾。これらの図において、黒く塗りつぶした点は、供試体破壊時の衝撃によって、供試体中に埋込まれた鉄筋が脆性破断することを示している。

なお、鉄筋の歪測定用のゲージは鉄筋の曲げ加工部に貼ってあるため、曲げ加工した鉄筋に生じる歪及び歪速度は、曲げ加工していない鉄筋に生じる歪及び歪速度の10~20倍程度である。

これらを見ると、試験温度-80°Cにおいて破壊した鉄筋に発生していた歪速度は 135 sec^{-1} 以上、試験温度-100°Cにおいて破壊した鉄筋に発生していた歪速度は 120 sec^{-1} 以上であった。

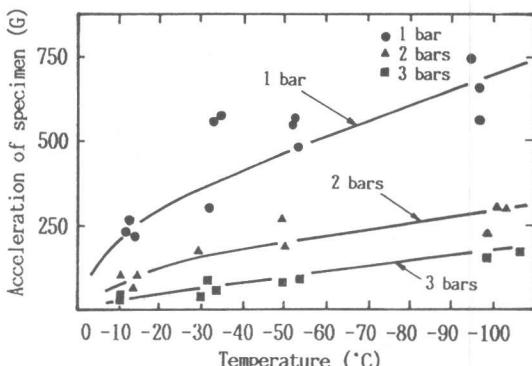


図-13 コンクリートの加速度と試験温度との関係

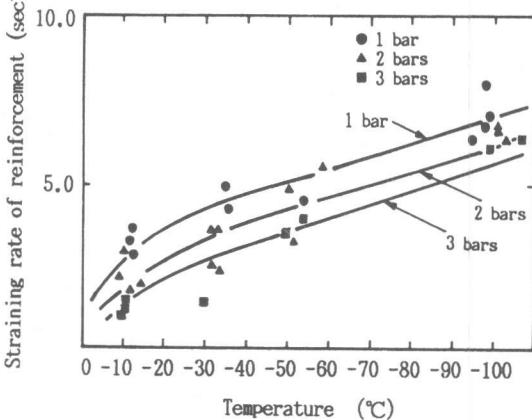


図-14 歪速度と試験温度との関係

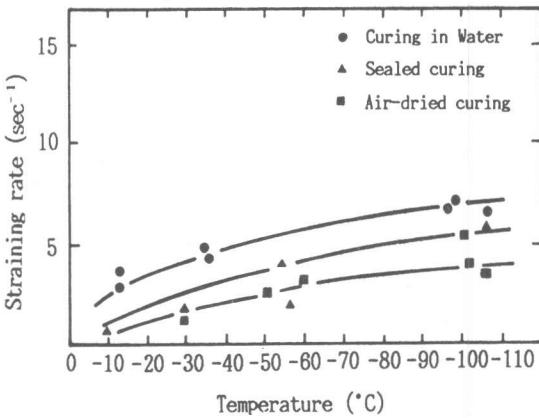


図-15 歪速度と試験温度との関係

コンクリートの養生方法の影響を見ると、水中養生したもののは全て鉄筋が破断していたのに対し、膜養生のものは-100°Cでは全て破断しているものの-80°Cでは破断したものと破断しなかったものとがあり、また、気中養生のものは-80°Cでは全て破断せず-100°Cでは鉄筋比の小さいもののみ破断した。すなわち、コンクリート中の鉄筋の破断の可能性に対するコンクリートの含水量の影響は大きいということがわかる。

図-18に鉄筋の歪速度測定用の両引供試体を示す。
両引供試体を引っ張ると、ノッチの所のコンクリートが破断し、その衝撃で鉄筋に大きな歪速度が発生する。
なお、ここで使用したコンクリート及び鉄筋は円柱供試体の物と同じであるが、鉄筋の残留歪は15%である。

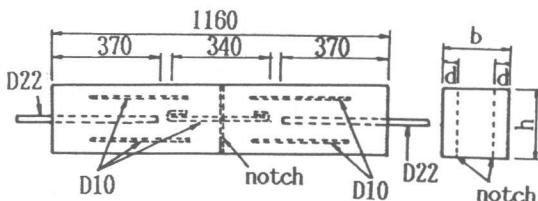


図-18 鉄筋の歪速度測定用両引供試体

図-19に鉄筋比と鉄筋の歪速度との関係（水中養生）を示す。なお、ここで言う歪速度とは、歪の時間変化曲線における鉄筋弾性域内での最大の傾きである。

これより、鉄筋比の増加によって鉄筋に発生する歪速度は小さくなることがわかる。また、常温では鉄筋比の増加とともに急激に減少するのに対し、低温では減少はゆるやかである。-150°Cで減少が大きく、かつ値のばらつきも大きくなっているのは、-150°Cにおいて鉄筋とコンクリートとの線膨張係数の違いが大きくなり、鉄筋比が大きくなるとその影響が大きくなるからであろうと思われる。なお、脆性破断を起したのは、-150°C・鉄筋比0.18~0.52%の時で、その時の歪速度は $8\sim14\text{ sec}^{-1}$ であった。

図-20に含水比が異なる場合の関係を示す。なお、ここで言う水中養生は、ゲージを貼るために、材令5日以後は養生剤を塗布して材令7日まで20°Cの恒温室内に放置したものである。そのため、含水量は一般的の水中養生と比べて若干低目になっている。

図-21は試験温度と鉄筋の歪速度との関係を示す。これより、ばらつきは大きいものの、傾向としては、歪速度は-100°Cまでは温度が低下するにしたがって増加するが、その後がピークであり、それよりさらに温度が低下すると歪速度は減少するようになるということがわかる。

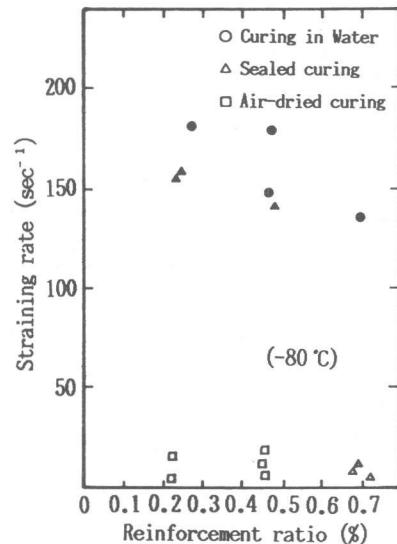


図-18 曲げ加工鉄筋に発生する歪速度（-80°C）

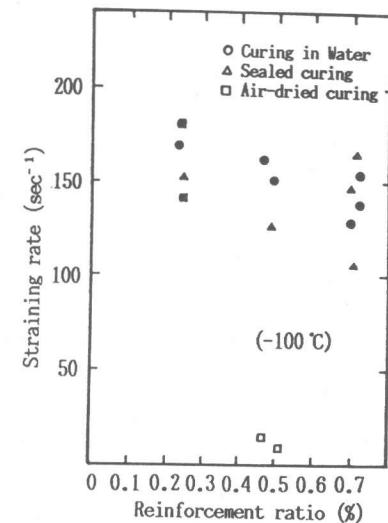


図-17 曲げ加工鉄筋に発生する歪速度（-100°C）

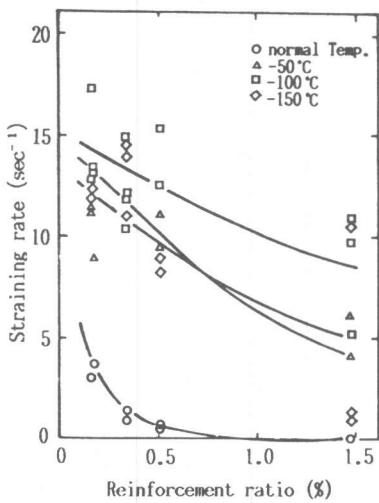


図-19 鉄筋比と歪速度との関係
(水中養生)

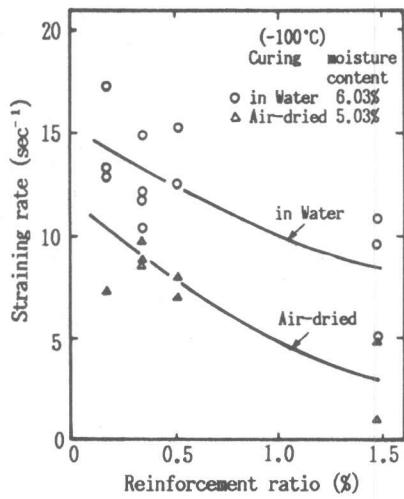


図-20 鉄筋比と歪速度との関係
(含水比の影響)

参考文献

- 1) 後藤幸正・三浦尚・阿部喜則：極低温下におけるコンクリートの性質について，土木学会第30回年次学術講演会講演概要集，土木学会，pp. 165～166，1975.10.
- 2) Wischer,Gerd und Juenger,Dahms : Das Verhalten des Betons bei Sehr Niedrigen Temperaturen , Beton Herstellung Vermendung Jg.20, Heft 4 , pp. 135～139 , April 1970 .
- 3) 三浦尚・後藤幸正・阿部喜則：極低温下で使用されるコンクリートの性質と含水比との関係について，土木学会第32回年次学術講演会講演概要集 土木学会，pp. 46～47，1977.10.
- 4) 長谷川明巧・三浦尚・藤原正雄：冷熱衝撃を受けるコンクリートの歪と劣化との関係について，土木学会 第35回年次学術講演会講演概要集，土木学会，pp 341～342，1980.9.
- 5) 三浦尚・後藤幸正・小島宏：極低温の繰返しを受けたコンクリートの劣化に関する研究，コンクリート工学年次講演会講演論文集，コンクリート工学協会，pp. 29～32，1979.5.
- 6) 李道憲・三浦尚・竹内淳：低温にさらされたコンクリートの歪と劣化に関する研究，土木学会東北支部技術研究発表会講演概要，土木学会東北支部，pp. 428～429，1988.2.
- 7) 三浦尚・村野清一郎・伊藤円：極低温下におけるコンクリートの破壊衝撃が鉄筋に及ぼす影響，セメント技術年報 38，セメント協会，pp. 437～440，1984.
- 8) 三浦尚・村野清一郎：極低温下で使用される鉄筋に要求される耐衝撃性に関する研究，コンクリート工学年次講演会論文集，コンクリート工学協会，pp. 285～288，1985.6.
- 9) 鈴木知洋・三浦尚・阿部裕彰：極低温下において使用される鉄筋に必要な耐衝撃性に関する研究，土木学会東北支部技術研究発表会講演概要，土木学会東北支部，pp.361～362，1986.3.

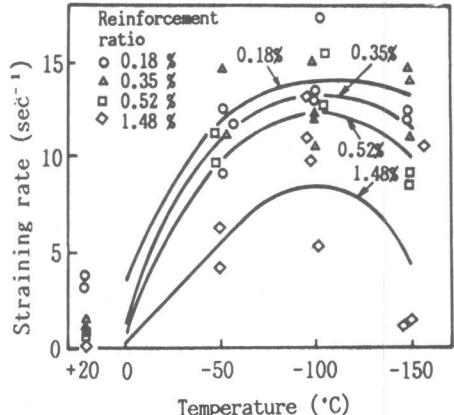


図-21 試験温度と鉄筋の歪速度との関係