

論文

[1054] 高温下における鉄筋コンクリートはりの熱伝導特性と温度応力特性に関する研究

正会員 太田俊昭 (九州大学土木工学科)

正会員○黒田一郎 (九州大学大学院)

正会員 日野伸一 (九州大学土木工学科)

1. まえがき

コンクリート構造物の熱伝導・温度応力の研究は、これまで主として水和熱を生じるダムなどのマスコンクリート[1]やPCCVなどの原子炉格納容器[2]などを対象として数多く行なわれてきた。これらの大半の研究は100℃程度の比較的常温に近い状態を対象としており、このため、それらの熱伝導解析や温度応力解析においては、コンクリートの熱伝導率、弾性係数等の材料定数の温度依存性が十分に考慮されていない。しかし、コンクリート構造物が火災や爆発などの予期せぬ事故によって数100℃に及ぶ高温下に曝された場合、これら構造物の損傷、劣化の程度や健全度を評価するためには、高温下における材料特性の変化や部材の温度応力性状をできるだけ正確に把握する必要がある。一般に、コンクリートの弾性係数は100℃程度の温度でも1割程度の低下が確認されており、100℃以上の温度ではその他の定数についても変化が大きいといわれている[3]。しかし、高温下におけるコンクリートの熱伝導率や弾性係数の温度依存性については、高温状態での計測が困難なこともあり、未だ十分に明らかにされていないのが現状である。

そこで本研究では、コンクリートの熱伝導率と弾性係数の温度変化が構造物の熱伝導特性および温度応力特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。そのため、まず、コンクリートの熱伝導率と弾性係数の温度変化をそれぞれ最高温度250℃、400℃の範囲の加熱実験によって計測し、それらの温度依存性について考察する。次いで、これらの温度依存性を考慮して高温加熱を受けるRCはりの2次元有限要素法による熱伝導解析および温度応力解析を行ない、これら定数の温度依存性が熱伝導特性および温度応力特性に及ぼす影響について解明する。また、RCはりの鉄筋量の影響についても検討を加える。

2. 高温下におけるコンクリートの弾性係数と熱伝導率

2.1 実験方法

コンクリートの弾性係数の温度による変化を調べるために、高温下でのコンクリート円柱供試体の圧縮試験を行なった。図-1に実験の概要を示す。供試体を断熱材製の円筒容

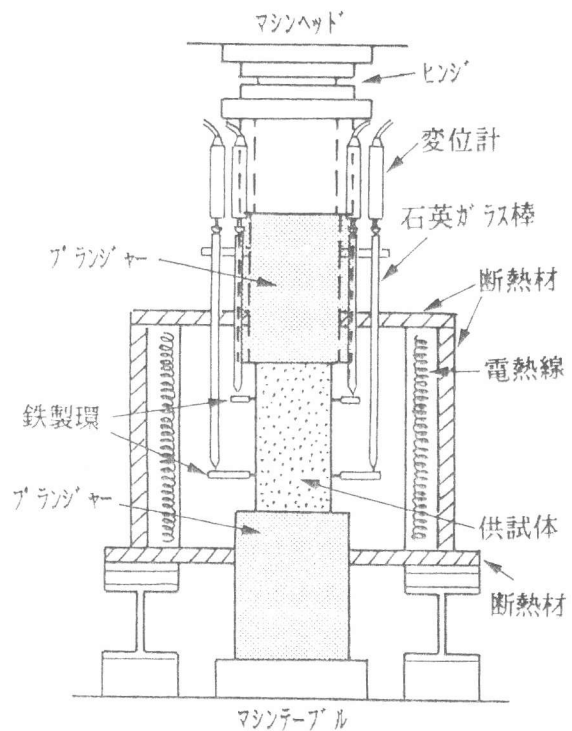


図-1 弾性係数測定実験

器内に設置し、電熱線により側面から加熱した。数時間にわたる供試体の加熱後、一定の高温を維持した状態で上下面からコンクリート製のプランジャーを介して圧縮荷重を行なった。供試体のひずみは鉄製環、石英ガラス棒を介して電気式変位計（感度1/1000mm）により測定し、荷重とひずみの関係からおよそ 50kgf/cm^2 の応力レベルにおける接線弾性係数を求めた。図-2 に供試体表面の加熱温度の時間経過を示す。最終的に到達する最高温度によって加熱温度の時間経過は異なるが、いずれの場合でも 5°C/min 程度のペースで温度を上昇させた。また急速な温度上昇に伴う過大な引張応力により供試体にひびわれが生じることを防ぐために、百数十度温度上昇するごとに90分間一定温度を保つこととした。

一方、コンクリートの熱伝導率は通常多く用いられる円筒法[4]により求めた。すなわちコンクリート円柱供試体の中心軸上に配置した電熱線により加熱を行ない、定常温度分布に達したときに測定した半径方向の温度勾配より熱伝導率を算定した。

弾性係数、熱伝導率の測定実験に使用したコンクリートの設計基準強度は 300kgf/cm^2 で、 $\phi 10 \times 20(\text{cm})$ の円柱供試体を用いた。表-1 に供試体コンクリートの示方配合を示す。実験は、コンクリート打設後、10週間養生した後行なった。

2. 2 実験結果および考察

実験で求められた高温下におけるコンクリートの弾性係数 E と温度 T の関係を示せば、図-3（図中黒丸）のようになる。これを最小2乗法を用いて整理すれば図中の実線で示される次式が与えられる。

$$E = 2.71 \times 10^5 e^{-0.0018047T} \quad (1)$$

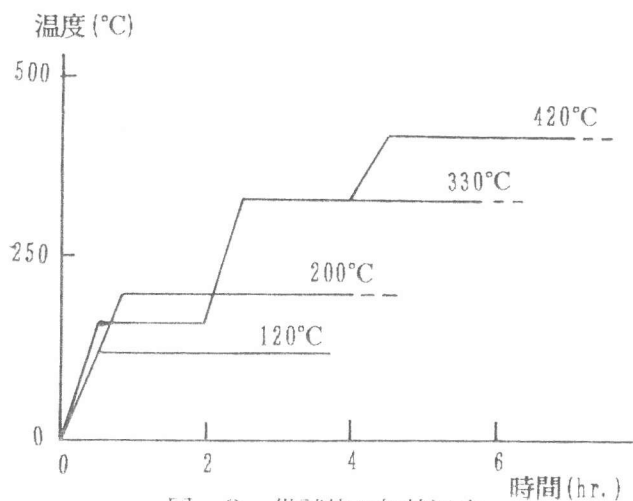


図-2 供試体の加熱温度

表-1 コンクリートの示方配合

単位重量 (kg/m ³)				
セメント	水	細骨材	粗骨材	AE減水剤
326	163	781	1086	0.815

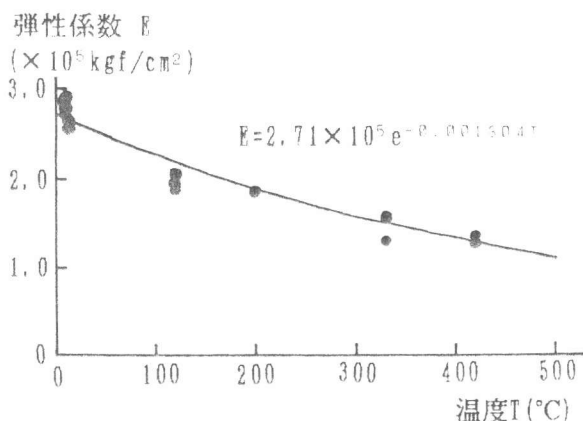


図-3 温度と弾性係数の関係

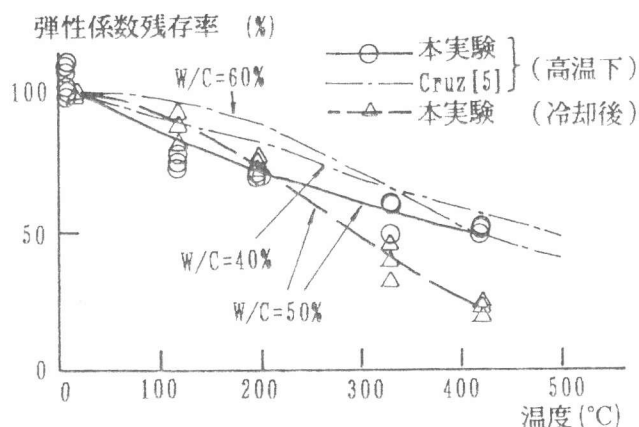


図-4 温度と弾性係数残存率の関係

ここに、 E は弾性係数 (kgf/cm^2)、 T は温度 ($^{\circ}\text{C}$)である。弾性係数は温度が高くなるに従い低減しており、常温時に比べて 200°C 台で約70%、 400°C 台で約50%の値となっている。

図-4に、常温時に対する弾性係数残存率と温度の関係を示す。図中、実線は高温下で測定したものであり、破線は高温加熱後冷却し常温下で測定したものである。また、一点鎖線は既往の研究結果の一例である[5]。図より、コンクリートの配合条件や計測法によっても異なる傾向を示すものの、一様に温度の上昇とともに弾性係数が低減することがわかる。また、同一供試体による本実験においても高温下で測定したものと、冷却後常温下で測定したものとでは弾性係数低減の傾向が違ふことが認められる。本実験では、冷却後測定したものは、高温下で測定したものと比較して $100\sim 200^{\circ}\text{C}$ 付近まではやや大きく、 300°C 以上では逆に小さくなる傾向がみられた。

次に実験で得られた熱伝導率 k と温度 T の関係を図-5(図中黒丸)に示す。図より、温度が高くなるに従い 1°C につき約0.1%の割合で熱伝導率が低下していることが認められる。また、この結果を最小2乗法によって整理すれば図中実線で示される次式が与えられる。

$$k = 2.066 - 0.00234T \quad (2)$$

ここに、 k は熱伝導率 ($\text{kcal/mh}^{\circ}\text{C}$)、 T は温度 ($^{\circ}\text{C}$)である。

3. 熱伝導解析および温度応力解析

3.1 有限要素解析

熱伝導率、弾性係数の温度依存性が熱伝導および温度応力特性に及ぼす影響を明らかにするため、外部から加熱を受ける両端固定の単鉄筋RCはり(2次元平面応力モデル)を対象とした熱伝導解析と温度応力解析を行なった。図-6に解析対象としたRCはりを示す。本解析では、コンクリート中の鋼材として加熱面側の軸方向鉄筋のみ考慮し、スターラップや組立筋など、その他の鋼材は無視した。

図-7に示すように、熱伝達境界温度を最初の1時間は 10°C から 960°C まで直線的に上げつつ加熱し、その後1時間にわたって 960°C に維持したまま加熱を続けることとした。ここで、熱伝達境界温度とはRCはりの表面の温度ではなく、RCはりの加熱面に接する外気の温度を指す。また、このRCはりは図-6に示す加熱面以外はすべて断熱されている。

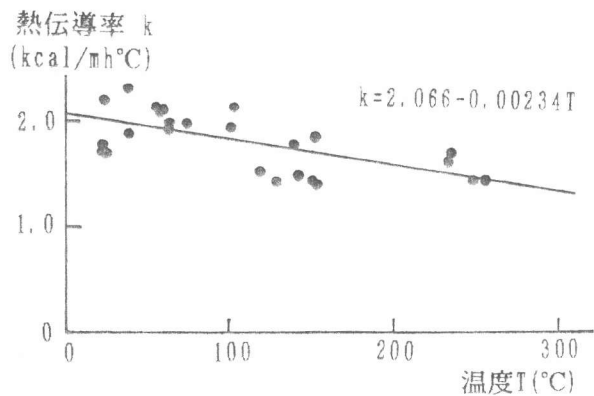


図-5 温度と熱伝導率の関係

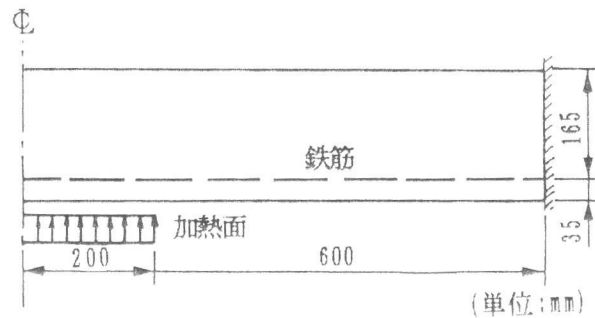


図-6 解析対象のRCはり

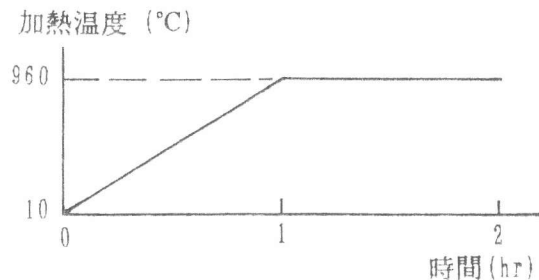


図-7 熱伝達境界加熱温度

表-2 解析に用いた諸定数[7][8]

	熱伝導率 kcal/mh°C	熱容量 kcal/m ³ °C	熱伝達係数 kcal/m ² h°C	線膨張係数 ×10 ⁻⁶ /°C	弾性係数 kgf/cm ²	ポアソン比
コンクリート	図-5	420	10.0	10.0	図-3	0.2
鉄筋	60-0.06T	890	—	11.7	2.1×10 ⁵	—

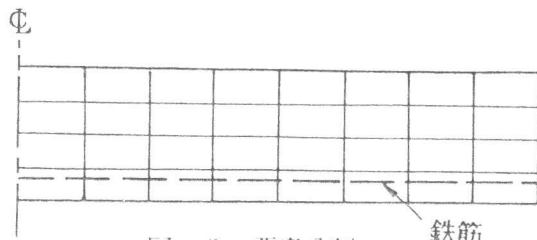


図-8 要素分割

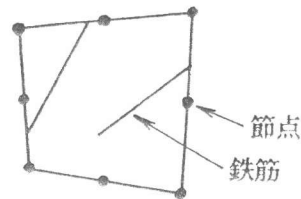


図-9 埋め込み鉄筋モデル

熱伝導解析と温度応力解析は、2次元8節点アイソパラメトリック要素を用いた有限要素法により行なった[6]。また、熱伝導解析では非定常解析を行なうためにクランク・ニコルソン法を採用した[6]。解析に用いた諸定数を表-2に示す。コンクリートの熱伝導率、弾性係数は前述の実験により求めたものである。熱伝導率の温度依存性を考慮したため、熱伝導解析は非線形解析となる。非線形解析を行なうために単純繰り返し代入法を採用した。一方、温度応力解析は、短時間で高温負荷を受ける場合の熱伝導解析により得られた温度分布を用い、ある時間ステップにおいて線形解析により行なった。

3. 2 要素分割と埋め込み鉄筋有限要素モデル

解析に用いた要素分割を図-8に示す。本解析では、埋め込み鉄筋モデル[6][9]を採用し鉄筋の影響を解析に取り入れた。この鉄筋モデルでは、図-9に示すように、コンクリート要素内の任意の位置に複数の鉄筋要素を挿入することが可能である。この要素の採用により有限要素解析の際の要素分割は、図-8に示すように鉄筋の配置による制約を受けず自由に行なうことが可能となる。通常の離散鉄筋モデルを用いてRCはりの解析を行なうと鉄筋の配置状態により要素分割が制約を受けるため、要素数、節点数が多くなったり要素の形がいびつになったりし、解析精度に悪影響を与えることがある。これに対し、埋め込み鉄筋モデルを用いれば鉄筋配置に関係なく要素分割を行なうことができるため、要素数、節点数が大幅に低減するとともに要素分割をスムーズにすることが可能である。埋め込み鉄筋モデルでは、鉄筋要素とコンクリート要素の形状関数が同一であることを特色としており、鉄筋とコンクリートとの間のずれを考慮することはできない。なお、本解析においては要素総数32、総節点数121とした。

4. 解析結果

4. 1 温度分布

解析によって求めたRCはり（鉄筋比8%）の温度分布を図-10に示す。加熱開始後2時間の時点での温度分布であり、実線と破線は各々、熱伝導率の温度依存性を考慮した非線形解析、考慮しない線形解析の結果である。鉄筋比8%は、はりの場合には極端に大きい値であるが柱などの場合には考えられる値であるので、ここで比較検討の値として用いることとする。今回測定した熱伝導率は、300°C程度までの温度範囲では常温時と大きな差がなかった。そのため、非線形解析と線形解析の差は顕著でない。非線形解析では線形解析に比べて温度勾配が若干大きくなっ

ているが、これは温度が高くなるに従い熱伝導率が低減することを考慮したためである。

次に、鉄筋比を8、4、0%と変化させた場合の温度分布を図-11に示す。いずれの鉄筋比の場合も熱伝導率の温度依存性を考慮しない線形解析である。図より、コンクリートよりもはるかに熱伝導率の大きな鉄筋に沿って、温度勾配が小さくなっていることがわかる。以上より、熱伝導特性に関しては、熱伝導率の温度依存性よりも、鉄筋比の及ぼす影響の方がより顕著であるといえる。

4.2 応力分布

解析によって求めたRCはり（鉄筋比8%）の-span方向応力分布を図-12に示す。図中、実線は弾性係数の温度依存性を考慮した解析値であり、破線は常温時の弾性係数を用いた解析値である。本解析は、はりの両端変位が拘束された限定された条件下での解析である。なお、本解析ではコンクリートの応力-ひずみ関係の非線形性が考慮されていないため、応力の計算値は実際より過大評価（安全側）されることになる。また、弾性係数以外のパラメーター（例えば線膨張係数、鉄筋の付着等）の中にも影響が大きいものがあると考えられるが、本解析ではこれらの影響については考慮していない。弾性係数の温度依存性を考慮した解析によれば、加熱面付近の圧縮応力がかなり低減することが認められる。両端

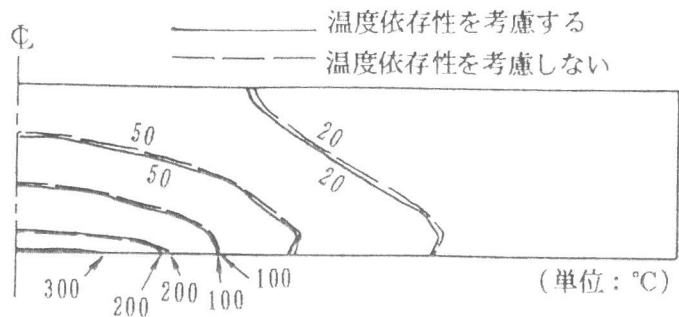


図-10 RCはりの温度分布に及ぼす、熱伝導率の温度依存性の影響

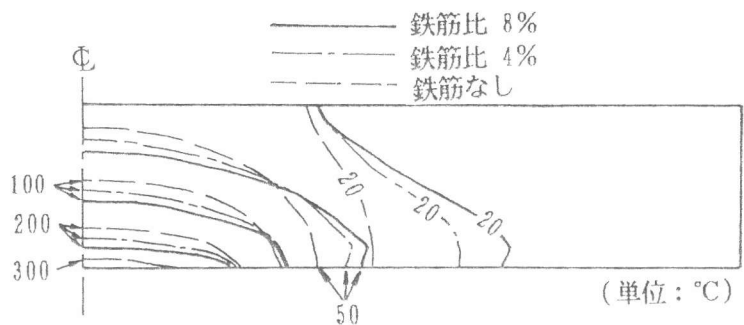


図-11 RCはりの温度分布に及ぼす鉄筋比の影響

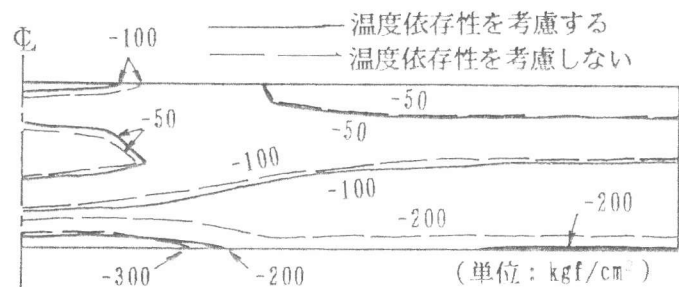


図-12 RCはりの応力分布に及ぼす、弾性係数の温度依存性の影響

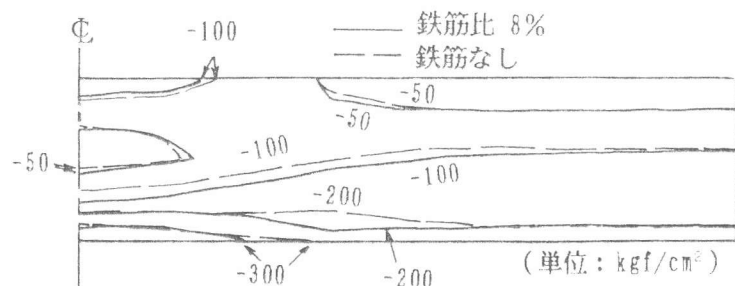


図-13 RCはりの応力分布に及ぼす鉄筋の影響

固定という極端な拘束条件下ではあるが、これより、高温下におけるRCはりなどのコンクリート構造物の温度応力解析を行なうに当たっては、弾性係数の温度依存性が影響を与えることが確かめられた。

次に、鉄筋比8%のRCはりとは無筋コンクリートのスパン方向応力分布を図-13に示す。どちらも常温時の弾性係数を用いた解析である。鉄筋の有無によっては応力分布に顕著な差が認められない。

5. まとめ

本研究では、高温下におけるコンクリートの熱伝導率、弾性係数の温度変化を実測し、さらに有限要素解析により、これらの定数およびコンクリート中の鉄筋量がRCはりの熱伝導特性および温度応力特性に与える影響について検討した。得られた結果をまとめれば以下のとおりである。

- (1) 今回の実験によれば、高温下のコンクリートの弾性係数は200℃で常温時の70%、400℃で50%程度まで低減する。しかし加熱後、自然冷却した後に測定した弾性係数は異なる低減傾向を示す。
- (2) 300℃までの範囲では、今回使用したコンクリートの熱伝導率は温度が1℃上昇するごとに約0.1%の割合で低減する。
- (3) 両端固定の単鉄筋RCはりの熱伝導解析によれば、300℃までの温度範囲では熱伝導率の温度依存性がRCはりの温度分布に与える影響は小さい。一方、温度分布に対する鉄筋比の影響は顕著にみられた。
- (4) RCはりの応力分布に対する弾性係数の温度依存性の影響が認められた。

なお現在、本解析の妥当性を検証するために実構造物を対象とした実験的なアプローチを計画中である。

参考文献

- 1) 例えば、木村克彦・小野定・後藤貞雄・江渡正満：プレクーリングによるマスコンクリート温度ひびわれ制御効果の解析、構造工学論文集、Vol. 35A、pp. 1129-1136、1989. 3
- 2) 例えば、吉田一：原子炉建屋の熱応力設計、コンクリート工学、Vol. 22、No. 3、pp. 66-69、1984. 3
- 3) 森永繁監訳：コンクリートの熱的性質、技報堂出版、1983
- 4) 西山啓伸・田中辰明・尾崎義典・江村健三：人工骨材コンクリートの温度特性に関する試験、セメント技術年報、Vol. 19、pp. 376-380、1965
- 5) Cruz, C.R.: Elastic properties of concrete at high temperatures. J. PCA Research and Development Laboratories, Vol. 8, No. 1, p. 37, 1966
- 6) 太田俊昭・黒田一郎・山口栄輝・日野伸一：外的温度負荷を受けるRCおよび合成構造部材の熱伝導および温度応力特性に関する研究、構造工学論文集、Vol. 37A、1991. 3
- 7) 渡辺正紀・佐藤邦彦：溶接力学とその応用、朝倉書店、p. 163、1979
- 8) 徳田弘：コンクリートの熱的性質、コンクリート工学、Vol. 22、No. 3、pp. 29-37、1984
- 9) 山口栄輝・太田俊昭・金田克明・弘重智彦：コンクリート部材の熱伝導解析に関する一考察、土木学会第45回年次学術講演集（第1部）、pp. 220-221、1990