

# [57] マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関する検討

正会員 田 辺 忠 顕 (名古屋大学工学部)

正会員 原 口 晃 (電力中央研究所)

正会員 ○石 川 雅 美 (法政大学大学院)

## 1 まえがき

マスコンクリートの温度応力を解析的にあらわすためには、その発生メカニズムを的確に把握することが必要である。温度応力発生メカニズムは従来から、外部拘束と内部拘束の、二つの要因から論じられている。しかし、外部拘束については水平方向の温度変位を単に拘束するものと考えられているだけであって、その実体には不明な点が多い。

本研究では、実測と解析との対比から外部拘束の実体を検討したものである。その手段として、コンクリート有効応力計を原子力発電所基礎マットに埋設し、温度応力を直接実測した。この結果をもとに、外部拘束を検討する上での問題点を抽出すると同時に、今回新しく考案した「コンクリート継目すべり計」を用い、実験によって、はじめてコンクリート相互リフト間の水平方向拘束係数を測定した。この実験から得られた拘束係数を用いて、さらに様々な解析をおこなった。

## 2. 実測から抽出された問題点

今回、実測をおこなった原子炉基礎マットコンクリートは、直径3.9m、高さ1.4mの円形で、水平方向放射状に4ブロックに分割されている。このうちの1ブロックに埋設したコンクリート有効応力計とカールソン型歪計の位置を<図-1>に示した。この応力計より半径方向の応力を直接実測したところ、次のようなことが考察された。(図-2、図-3の実測値を参照)

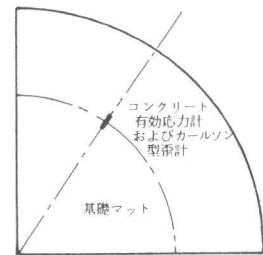


図-1 応力計および歪計の埋設位置

a) 材令3日程度で、断面下部に発生している圧縮応力は増加傾向から減少傾向へと反転している。また、断面上部においても応力は引張応力増加傾向から、圧縮応力増加傾向へと、やはり反転している。この図では、この傾向は十分明瞭であるとは言えないとも考えられるが、その後の他の実測結果では、この傾向は明瞭である。

b) 材令7日程度になると、それぞれの減少あるいは増加の傾向は抑制され、応力は横ばい状態となる。

などの従来の歪計測からでは把握し得なかった現象が明らかにされた。

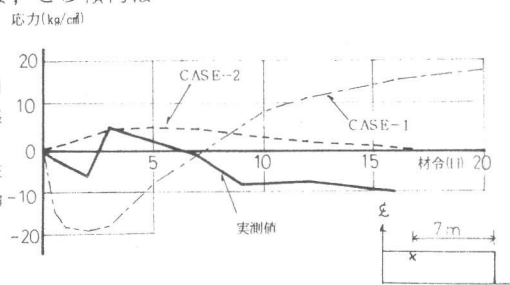


図-2 基礎マット上部における実測値と解析値の比較

同時に、有限要素法を用いて、セメントの水和熱と外気温の変化に対する温度応力の解析をおこなった。<図-2、図-3>にCASE-1として示したのは、コンクリートと岩盤との境界面が材令によらず常に一体であると仮定した場合の解析結果である。しかし、上述の仮定を用いた解析では、実測との対比において、次のような問題点が見いだされた。

a) 実測では、材令7日程度以降に全ての応力がほぼ横ばい状態を示すのに対して、解析ではこの傾向はあらわし得ない。

b) 基礎マット上部では、応力傾向が全て異なり、逆転の傾向があらわれない。

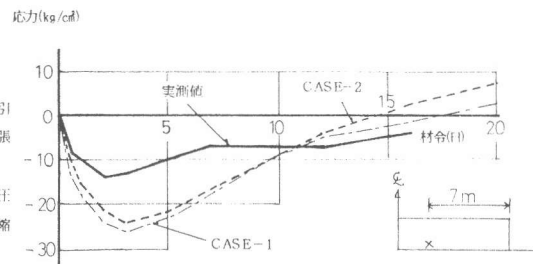


図-3 基礎マット下部における実測値と解析値の比較

c) 実測に比べると解析では、各材令において発生する応力が基礎マットの部位によらずかなり大きな値となる。

さらに歪分布についても、実測と解析との対比をおこなった。〈図-4、図-5〉に示すように、この解析結果 CASE-1 では基礎マットの部位によらず歪が一定となるのに対して、実測された歪は境界面より上方へいく程大きく、またその歪量も解析値より大きい。すなわち実際には、境界面を一体として考えた解析モデルよりも、外部拘束力は小さいものと思われることから、境界面での一体性について疑問をいだかせる問題点が示唆された。そこで、この変位の不連続性の影響を検討する手段として、境界面に高さゼロのジョイント要素を用いて解析をおこなうことにした。しかし、実際にコンクリート相互リフト間の摩擦係数がどの程度であり、経時的にどのように変化するか、資料がない現状であるため、以下に述べるような実験を行った。

### 3. 境界面における拘束係数の実測

実際のコンクリート相互リフト間の拘束係数を測定するため、〈図-6〉に示すような中心軸上に15cm×20cmのせん断面を有する一面せん断試験モデルを考案した。せん断面中心部には、今回、新しく考案した「コンクリート継目すべり計」をセットし、所定の材令に従い新旧両コンクリートを打ち分けた。なお、実験に用いたコンクリートの配合は、実測をおこなった原子力発電所基礎マットと同程度のものである。試験に際しては、せん断面と平行にコンクリートの打込み高さ2mに相当する圧力を加えた。

この条件のもとで、単位の変位量を与えるのに必要なせん断応力を測定し、これを水平方向の拘束係数とした。

本実験ではせん断面の表面処理方法のちがいでより、次の二つのケースに分けた。〈図-7〉にCASE-Aとして示したのは旧コンクリート打設1日後に打継面にワイヤブラシをかけ、ノミで軽くチッピングをおこなった場合の水平方向拘束係数の経時変化である。CASE-Bとして示したのは、打継面に何も施さなかった場合である。また、実験の都合上コンクリートの打込み高さを2mと想定しているが、解析モデルでは打込み高さは1.4mである。この打込み高さが水平方向の拘束係数に与える影響は明らかではないが、線形に影響すると仮定して、図に示すような値を解析に用いた。

〈図-7〉に示す実験結果が変動している原因については、次のようなことが考えられる。

- 各供試体が同一バッチでないために、それぞれで条件が多少異なり、せん断面の付着に影響を与えた。
- せん断面の付着力が一様でない場合が考えられ、このため偏心力が作用してしまふことはさげがたい。ところが、コンクリート継目すべり計はせん断面中心にセットされているために偏心による回転変位を測定することが難しい。
- コンクリート継目すべり計の精度的な問題により、水平方向の拘束係数を算出する過程において、誤差が大きくなってしまふ場合がある。

### 4. 各種の拘束係数を用いた解析および考察

前述のように境界面の拘束条件を完全拘束状態であると仮定した場合の解析結果では、実測のような応力傾向とはかなり異なるものであった。それで、まずジョイント要素を用いて境界面の拘束条件を水平方向と鉛

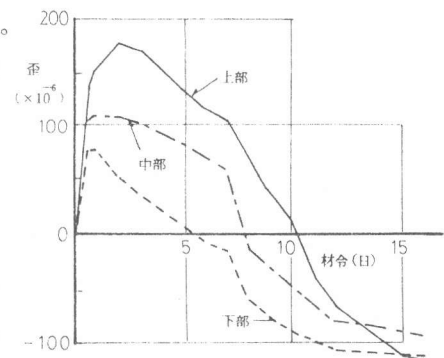


図-4 歪分布実測値

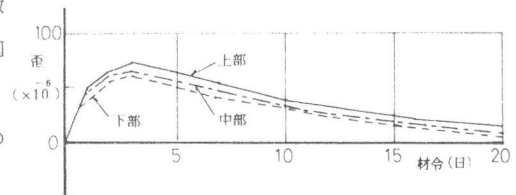


図-5 境界面を完全拘束として解析した場合の歪分布 (CASE-1)

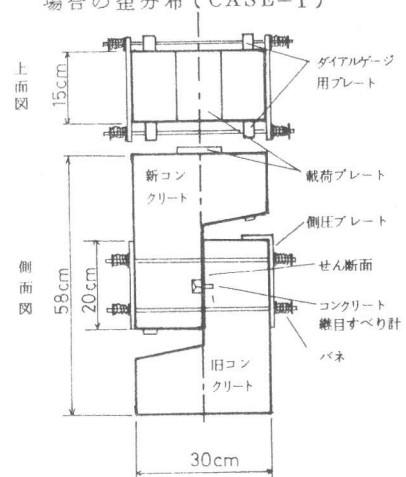


図-6 一面せん断供試体

直方向の二つに分けた。そして、先の実験によって得られた拘束係数が、水平、鉛直、それぞれの方向で同等であると考えて、コンクリートの強度変化に比例するかたちで解析をおこなったが、この場合にもやはり実測のような応力分布は得られなかった。

しかし、さらに解析をおこなったところ、水平方向の拘束係数については先の実験値を用い、鉛直方向の拘束係数を材令によらずほぼゼロである。と仮定すると、実際の応力傾向に近い解析結果が得られた。この解析によって得られた応力経時変化を〈図-2、図-3〉CASE=2として示し、次のような考察をした。

a) 基礎マット上部は、打設値後より引張応力を示し、材令5日程度で引張応力は最大となるが、これ以降引張応力は徐々に減少する。この傾向は、完全拘束を仮定した解析結果とは異なり実際の場合に近くなったと言える。

b) 断面下部において材令10日以内に発生する応力は、完全拘束を仮定した解析結果に比べ一般に小さくなり、実測値に近づいた。

また、歪分布についても鉛直方向の拘束を無視して解析をおこなってみたところ、〈図-8〉に示すように上部における歪量が最も大きく、ついで中部、下部といった具合に完全拘束を仮定した解析結果と比較すると、かなり実際の傾向に近づいたものと思われる。

## 5 外部拘束の実体

これまで、外部拘束を水平方向と鉛直方向の二つに分けて、水平方向については実験値を用い、鉛直方向の拘束をほぼゼロに近いと仮定しておこなった解析結果が実際の場合に近いということを述べた。しかし、この場合でも材令7日程度以降にみられる応力増加傾向が抑制されるという現象は、あらかし得なかった。また、内部拘束の影響のみを考慮した場合の解析をおこなってみたが、この結果からも上述のような傾向は見えなかった。それで、この原因について次のような推察をおこなった。

今回、実験より得られた水平方向の拘束係数が実際のリフト相互間をよく反映しているものと仮定すると内部拘束と水平方向の外部拘束は、応力増加を抑制させる原因でないということが考えられる。したがってこの現象を最も大きく左右する要因は、鉛直方向の外部拘束にあるという可能性が示された。一方、実測された応力分布および歪分布に最も近い傾向を示した解析ケースは、鉛直方向の拘束を無視した場合であった。この解析ケースでは特に応力抑制現象が見られる以前の材令においては、応力傾向が実際の場合に近いことから、鉛直方向の拘束は水平方向の拘束に比べて非常に小さいのではないかと考えられる。鉛直方向の<sup>1)</sup>変位を抑制する要因として、少なくとも自重の効果は存在する。それで鉛直方向の拘束を自重程度と考えて、材令7日程度より応力が横ばい状態となる原因について考察することにした。

鉛直方向の拘束を無視し、水平方向のみ拘束した場合の解析結果 CASE-2 の変形および反力分布をシュミレートしてみると〈図-9〉に示すようであった。すなわち、温度上昇時にはコンクリートは膨張し水平方向へ変位しようとするが、最大温度となる材令2日付近では先の実験結果からすでに水平方向の拘束力は十分大きくなっている。このため水平方向の温度変位は拘束され、中央部が浮き上がった形となる。また、温度降下時にはコンクリートは収縮しようとする。対流境界面に近いコンクリートは内部あるいは岩盤付近のコンクリートに比べ温度が低いために、収縮量も当然大きくなる。この結果として、基礎マットの外端付近は浮き上るのである。こ

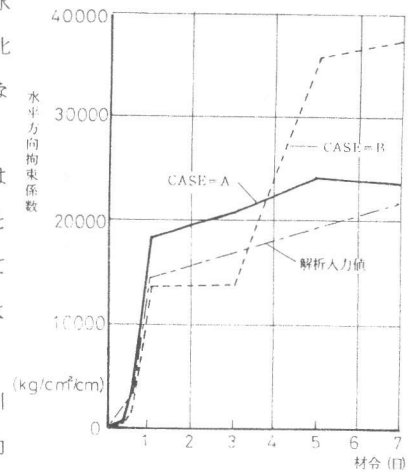


図-7 材令に伴う水平方向拘束係数の変化

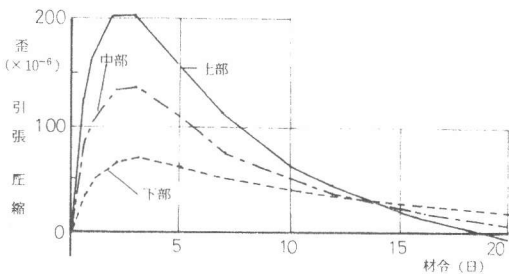


図-8 鉛直方向の拘束を無視して解析した場合の歪分布

のような原因によって起こる温度的な曲げ，すなわち基礎マット両端の浮き上り現象は実際には見られないようである。これは温度的な曲げによって，この浮き上り現象が始まろうとするときより絶えず変位しようとする方向と反対の向きに自重が作用するので，鉛直方向の変位が拘束されてしまうからである。

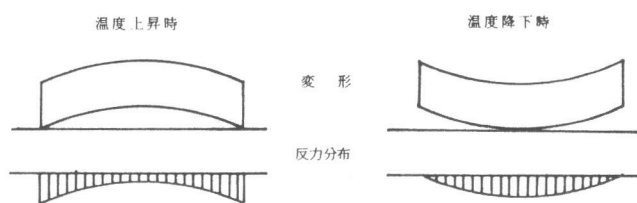


図-9 鉛直方向の拘束を無視した場合の変形シュミレーション

たとえば，この基礎マットをはりのような部材におきかえて考えてみる。基礎マットの温度的な曲げが拘束され，フラットな状態を示しているということは，はりが負の曲げモーメントを受けているのと同じような状態であると考えられる。このような場合はりの応力分布は中立軸より上側が引張り，それより下方が圧縮となる。それで断面上部において実測応力経時変化が示す材令7日以降の応力抑制現象の原因は温度収縮によって増加しようとする圧縮応力が，自重の作用に起因する引張応力と合いまって減じられてしまうためと考えられる。また断面下部において実測応力経時変化が示す引張応力抑制現象の原因についても同様にこの自重作用によるものと考えられる。

これまで，温度応力発生メカニズムについて様々な考察を行ってきたが，その中で述べた温度降下時に見られる基礎マットの浮き上り現象，そしてそれが自重の作用によって拘束されることなどについて果たしてこういった現象が実際に起っているか否かを裏付けるための資料が不足している。特に決め手と思われるのは，反力分布であるが，これについてはまだ実測データがないのが現状である。ゆえに，これまでの理論は推測の域を出ないものになってしまったが，今後このような研究が進められ温度応力の発生メカニズムがさらに詳しく解明されることを期待するものである。

## 6. 結論

- a) 外部拘束は打継目の処理いかんによって大きく影響されるが重要な要点は外部拘束が水平方向拘束と鉛直方向拘束に分類され，それぞれの拘束が前記の要因によって影響されることである。
- b) 水平方向の拘束係数は，材令1日以内で著しく増進しその後は増加傾向がゆるやかになる。また現在原子力発電所基礎マットに使用される条件下で材令7日において $20000 \text{ kg/cm}^2/\text{cm}$ 程度が適切なようである。
- c) 打継目を「はつり仕上げ」とした場合に比べ無処理では水平方向の拘束係数は3割程度低下する。
- d) 現場実測結果と解析結果とを比較すると鉛直方向拘束は水平方向拘束に比べかなり小さいと考えられ，鉛直方向の拘束を促す外部要因としては自重の要因が大きいようである。すなわち，水平拘束は打継面の付着が仮に少なくても物理的摩擦抵抗は大きくなるのに対し，付着力が少ない場合の鉛直方向の拘束は自重分程度のようである。

過去に考えられていた外部拘束はこれら各種要因の結合と考えられ熱応力ひびわれを的格に推定するためにはさらにこれらの要因の詳少な検討が必要である。

## 参考文献

- 1) 山川秀次 田辺忠顕 阿部博俊 「秋田火力4号機本館基礎盤の測定および挙動解析」電研技二報告 昭和55年3月