

# 論文 建築物地中梁の三次元 FEM 温度応力解析

起橋孝徳\*<sup>1</sup>・東 邦和\*<sup>1</sup>・上西 隆\*<sup>1</sup>

要旨：直交部材がある壁状構造物の温度応力について、三次元 FEM 解析結果を実施工時の計測値と比較した。また三次元 FEM 解析によって直交部材の影響を確認するとともに、CP法と比較した。その結果、三次元 FEM 解析結果は実測値に良く近似していた。また直交部材が温度応力に及ぼす影響は、直交部材の間隔に占める直交部材幅の割合が大きいのほど顕著で、直交部材が無い場合に比べて大きな引張応力が直交部材の間隔の中央に発生することが判った。直交部材がある壁状構造物の温度応力を、直交部材が無い三次元 FEM モデルの解析結果に補正を加えることで推定できると考えられる。

キーワード：マスコンクリート、温度応力、三次元 FEM、壁状構造物、直交部材

## 1. はじめに

マスコンクリートの施工に当たっては、事前にひび割れ発生について温度応力の検討を行うことが必要であり、壁状構造物の解析手法としては FEM の他に簡便な方法として CP 法が広く用いられている。しかし CP 法は、奥行き方向に同一断面が連続する形状の構造物を対象とした解析方法であり、建築物の基礎地中梁のように直交部材がある形状は三次元 FEM でしか解析できない。そこで本研究は、壁状構造物の応力に直交部材が及ぼす影響の度合いを確認して、直交部材の無い FEM モデルや CP 法での推定の可能性を検討した。

先ず、マスコンクリートとなる建築物基礎の温度とひずみの計測値を三次元 FEM 解析結果と比較した。この結果を踏まえて、直交部材の有無およびその大きさが発生する応力にどの程度の影響を及ぼすかを三次元 FEM 解析によって検討した。さらに直交部材が無い場合について、三次元 FEM と CP 法の解析結果を比較した。

## 2. 実測結果と三次元 FEM 解析結果の対比

### 2. 1 構造体概要

対象とした構造体規模は、地上 29 階、地下 2 階、平面形状 37.5m × 44.6m の建築物の基礎で、耐圧盤の厚さ 5.5m、地中梁は幅 1.2m、耐圧盤上面からの高さが 1.85m で格子状に配置されている。地中梁の平面を図-1、断面を図-2 に示す。

### 2. 2 解析モデル及び解析条件

解析モデルを図-3 に示す。X 方向は構造体長さの半分、Y 方向には地中梁の中心線の間隔（以下スパンと称する）の半分を切り出した形とした。また地盤は X 方向に構造体長さの 2 倍、深さ 12m までを解析対象とした。なお切断面は断熱境界で、

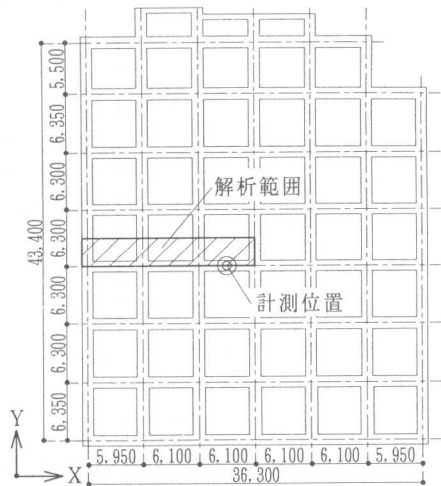


図-1 地中梁平面図 (単位:mm)

\* 1 (株) 奥村組技術研究所 (正会員)

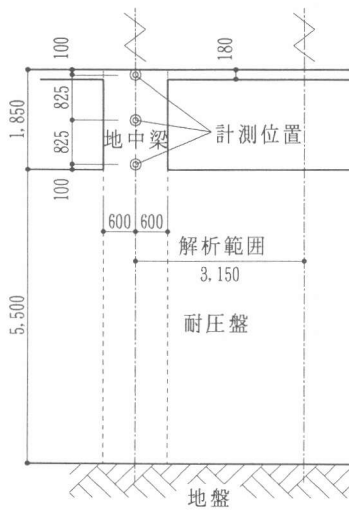


図-2 地中梁断面図

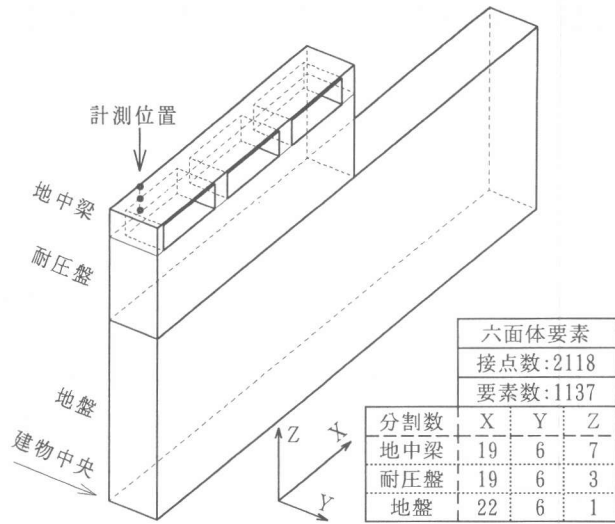


図-3 解析モデル

表-1 解析条件

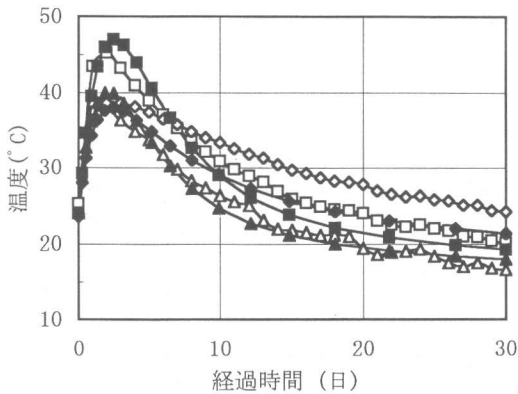
且つ面外方向への変形のみを拘束した。解析条件を表-1に示す。熱物性値は実施工時の計測結果を元に設定した。解析はコンクリート打設後50日目の耐力盤の上に地中梁上部の1.85mを打設した時点から開始し、材齢30日まで行った。外気温は打設時に20℃から30日目の解析終了時に17℃へと一様に漸減する様にし、打設時のコンクリート温度は24℃と設定した。

2. 3 比較結果及び考察

図-3の計測位置における温度の実測値と解析結果の比較を図-4に、X方向の全ひずみに温度補正を行ったひずみ（以下計測ひずみと称する）の比較を図-

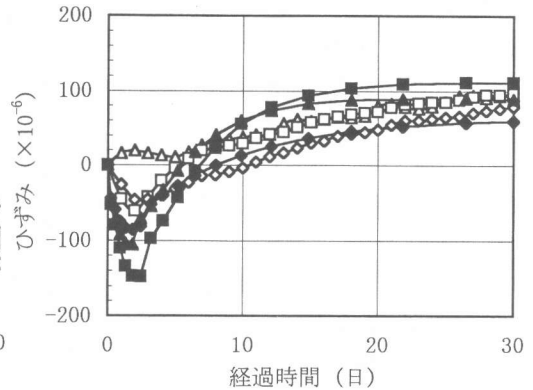
		物性値
共通	コンクリート密度	2.3 t/m <sup>3</sup>
	ポアソン比	1/6
	熱膨張係数	1.0 × 10 <sup>-5</sup> °C <sup>-1</sup>
地盤 (N値 ≥ 50)	熱伝導率	1.51 W/m・K
	比熱	0.84 kJ/kg・K
	密度	1.5 t/m <sup>3</sup>
	ヤング係数	257.5 N/mm <sup>2</sup>
耐力盤及び 地中梁下部 コンクリート (発熱無し)	熱伝導率	1.16 W/m・K
	比熱	1.72 kJ/kg・K
	熱伝達係数	3.5 W/m <sup>2</sup> ・K
	圧縮強度	36.0 N/mm <sup>2</sup>
	ヤング係数	2.06 × 10 <sup>4</sup> N/mm <sup>2</sup>
地中梁上部 コンクリート (低発熱セメント)	熱伝導率	2.09 W/m・K
	比熱	1.30 kJ/kg・K
	熱伝達係数	型枠面: 3.5 W/m <sup>2</sup> ・K 天端: 5.8 W/m <sup>2</sup> ・K
	断熱温度上昇	T=32.0 × (1-e <sup>-0.7t</sup> )
	圧縮強度 (M:積算温度(°D・D))	σ <sub>c</sub> =2.94 · (logM) <sup>2</sup> +0.88 · logM (N/mm <sup>2</sup> )
	引張強度	σ <sub>t</sub> =0.172 · σ <sub>c</sub> <sup>0.789</sup> (N/mm <sup>2</sup> )
	ヤング係数	E <sub>c</sub> =4650.36 · σ <sub>c</sub> <sup>0.5</sup> (N/mm <sup>2</sup> )
クリープ応力緩和	温度上昇時:0.73 温度降下時:1.0	

5に示す。温度履歴は温度上昇時には近似しているが発熱終了後の温度降下時には一致しなかった。一方計測ひずみは温度履歴の相違に因る誤差と、梁上部の初期の動向に若干の相違はあるが、材齢30日目のひずみの大きさや全体の傾向としては良く近似しており、この三次元FEM解析プログラムで実構造物の温度応力を評価できると考えられる。



△ 計測値(上) □ 計測値(中) ◇ 計測値(下)  
 ▲ 解析値(上) ■ 解析値(中) ◆ 解析値(下)

図-4 温度履歴



△ 計測値(上) □ 計測値(中) ◇ 計測値(下)  
 ▲ 解析値(上) ■ 解析値(中) ◆ 解析値(下)

図-5 計測ひずみ履歴

### 3. 直交部材の影響についての検討

#### 3.1 解析要因

直交部材の影響について、スパンと梁幅を要因にパラメトリックスタディを全24ケース行った。解析要因を表-2に示す。直交部材が無い場合

表-2 解析要因

要因	水準						
	有			無			
X方向スパン	4m	6m	8m	-			
Y方向スパン	4m	6m	8m	4m	6m	8m	
梁幅	0.8m, 1.2m, 1.6m						

のY方向スパンの値は耐圧盤の幅を示している。一方、直交部材がある場合にはX方向とY方向のスパンが等しいケースと、Y方向スパンが6mでX方向スパンのみを変更するケースについて、それぞれ3水準の梁幅で解析した。なおX方向とY方向の梁幅は同じとした。

#### 3.2 解析モデル及び解析条件

解析は、既に硬化した耐圧盤の上に地中梁上部のコンクリートを打設する事として行った。外気温を20℃、打設時のコンクリート温度は25℃とし、これ以外の解析条件は表-1と同じとした。解析モデルの例と外部境界条件を図-6に示す。構造体はX方向の長さが48m、耐圧盤の厚さは

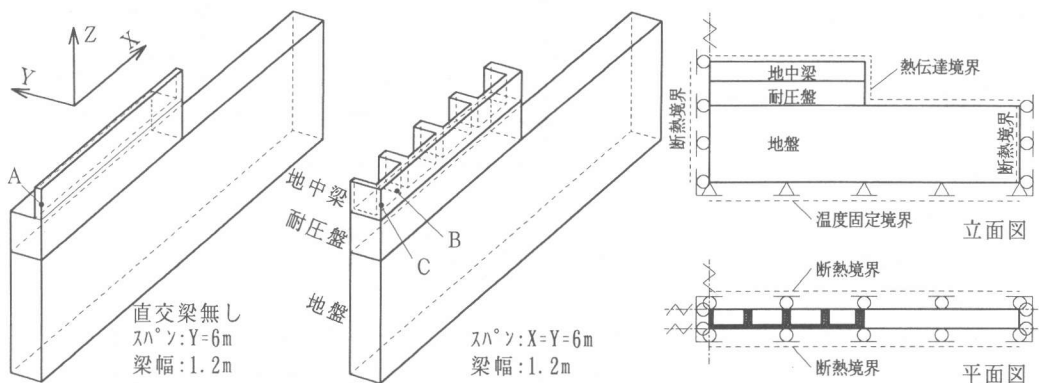


図-6 解析モデルの一例および境界条件

4 m、地中梁せいは7 mとし、応力の検討には耐圧盤上面から突出した地中梁上部3 mの部分を対象として行った。解析モデルはX方向は構造体全長の半分を、Y方向にはスパンの半分を切り出した形とし、地盤はX方向に構造体長さの2倍、深さ12 mまでを解析対象とした。なお切断面は断熱境界で且つ面外方向への変形を拘束した。

### 3. 3 解析結果及び考察

直交部材の影響の検討は、梁上部断面中央について、直交部材がある場合の交差部分中央

(図-6のC点)とスパン中央(同B点)の各点のX方向応力を、直交部材が無い場合の構造体中央(同A点)のそれと比較した。各点の最高温度を図-7に示す。温度への影響は梁幅によるものが大きく、スパンによる違いはほとんど無かった。また直交部材がある場合の温度は直交部材が無い場合に比べて、交差部分は高くなるがスパン中央ではほとんど差はなかった。

打設後30日目の応力と梁幅の関係を図-8に示す。発生する引張応力は梁幅が大きくなると何れも大きくなっているが、これは最高温度の違いによる影響と考えられる。またC点では直交部材が無い場合に比べて、最高温度は高くなるが、引張応力は小さくなる事が判った。

打設後30日目のB点の応力と

X方向スパンの関係を図-9に示す。梁幅が同じでY方向スパンを6 mに一定とした場合には、X方向のスパンが大きくなるほど引張応力は小さくなる。これはX方向のスパンが大きいのほど直交部材による拘束が小さくなるためと考えられる。しかしY方向のスパンがX方向と同じ場合で

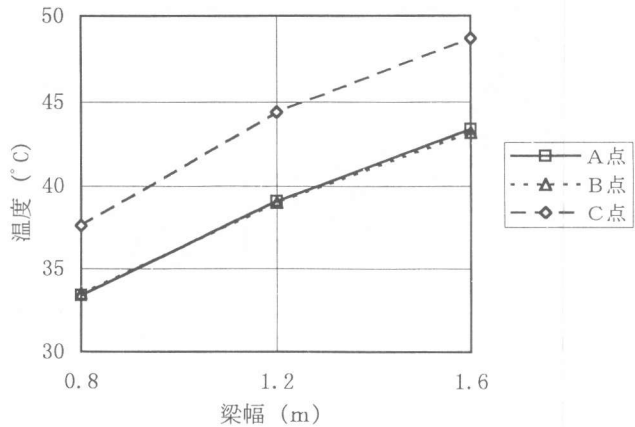


図-7 最高温度の比較

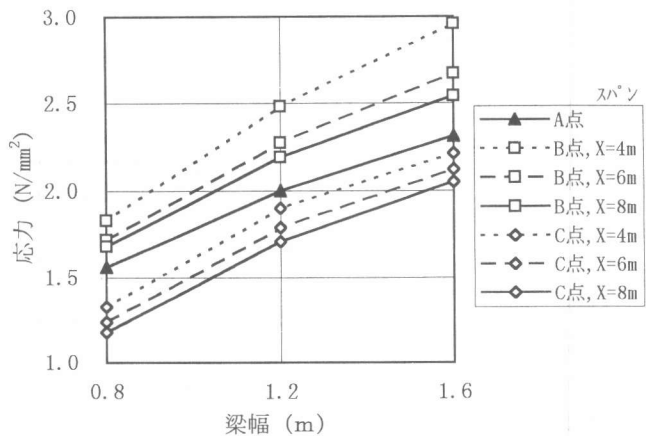


図-8 X方向応力と梁幅の関係 (スパン:Y=6m)

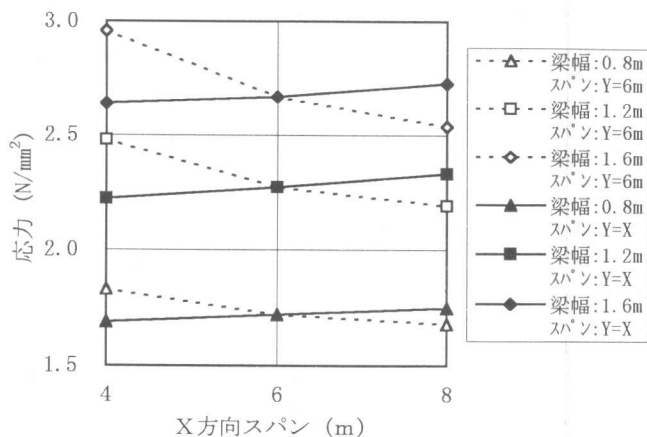


図-9 X方向応力とX方向スパンの関係 (B点)

は逆に、スパンが大きくなるほど引張応力も大きくなる傾向が見られる。これはY方向のスパンが大きくなるにもなって耐圧盤による拘束が大きくなる事と、Y方向スパンの影響の方がX方向スパンの変化よりも大きく応力に寄与していることによるものと考えられる。

X方向スパンに占める直交部材の幅の割合（以下梁幅/X方向スパンと称する）と、直交部材の有無による引張応力比（直交部材がある場合の引張応力/

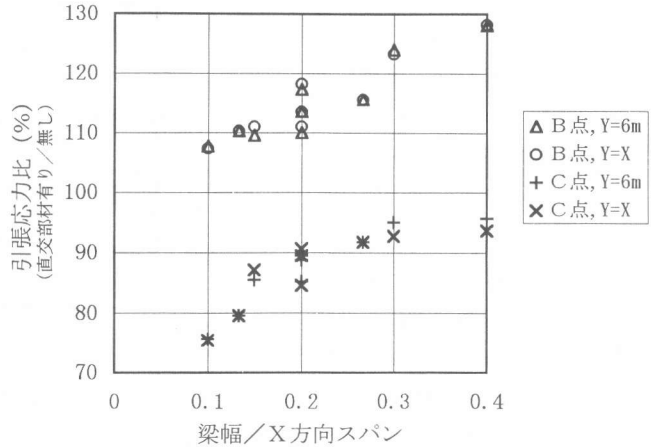


図-10 引張応力比と梁幅/X方向スパンの関係

直交部材が無い場合の引張応力) の関係を図-10に示す。今回の解析範囲では、Y方向スパンに関わらず、これらの関係は同じ傾向を示している事が判る。直交部材が引張応力に及ぼす影響については、交差部（C点）では梁幅/X方向スパンが小さいほど直交部材が無い場合に比べて引張応力が小さくなるが、スパン中央部（B点）では梁幅/X方向スパンが大きいほど直交部材が無い場合に比べて大きな引張応力が生じることが判った。

直交部材がある壁状構造物の温度応力を、直交部材が無いFEMモデルで推定することは、X方向スパンと直交部材の幅による補正を加えることで可能になると考えられる。

#### 4. CP法と三次元FEMの対比

##### 4.1 解析要因、モデル及び解析条件

解析は、3. で用いた要因及びモデルのうち直交部材が無い場合について行い、Y方向スパンと梁幅を要因にCP法と三次元FEMのそれぞれの結果を比較した。CP法の外部拘束係数を表-3に、CP法の解析モデルを図-11に示す。なお外部拘束係数は参考文献[1][2]を元に設定した。

表-3 外部拘束係数

$E_c / E_r$	80
$L / H$	6.86
$R_N \times 2.0$	0.08
$R_{M1}$	0.66
$R_{M2} \times 1.5$	1.00

##### 4.2 解析結果及び考察

温度解析の結果は三次元FEM解析とCP法（二次元FEM解析）ともほぼ同じ値を示した。

応力解析結果の経時変化例を図-12に示す。CP法による応力の経時変化は三次元FEM解析と同様の動向を示したが、発生する応力の大きさは異なった。

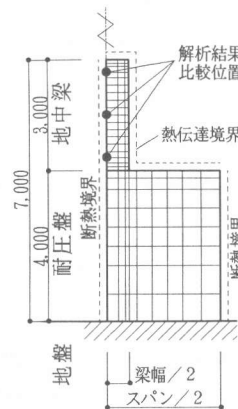


図-11 CP法解析モデル

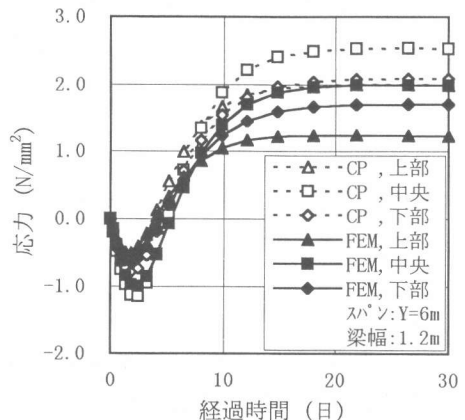


図-12 応力経時変化例

打設後30日目の梁上部断面中央のX方向応力について、CP法と三次元FEMの各解析結果を比較したものを図-13に、また引張応力の比率を表-4に示す。CP法の解析結果では三次元FEMとは異なり、耐圧盤の幅による影響はほとんど見られない。CP法によって得られた引張応力は三次元FEMの結果に比べて2~51%大きな値となり、Y方向スパンが小さく、また梁幅が大きくなるほどその差は開く傾向にあった。

今回の解析で外部拘束係数の決定に用いた $E_c/E_r$ や $L/H$ は1ケースのみであり、その他の解析条件も限られた範囲であるため、CP法と三次元FEMの整合性については今後更に検討を要すると考えられる。

## 5. まとめ

建築物基礎の温度応力を対象とした一連の解析を三次元FEMで行った。これらの解析範囲の結果から得られた所見を以下に示す。

- (1) 三次元FEMによる応力解析結果は実測値に良く近似しており、格子状に配置された壁状構造物の応力の評価に適している。
- (2) 直交部材が温度応力に及ぼす影響は、X方向スパンに占める直交部材の幅の割合が大きいほど顕著で、直交部材が無い場合に比べて大きな引張応力がスパンの中央に発生する。直交部材がある壁状構造物の温度応力を直交部材が無い三次元FEMモデルで推定することは、解析結果にX方向スパンと直交部材の幅による補正を加えることである程度可能になると考えられる。
- (3) 三次元FEMとCP法を比較した結果、CP法によって得られた引張応力は三次元FEMの結果よりも大きな値となり、Y方向スパンが小さくまた梁幅が大きくなるほどその差は開く傾向にある。

## 謝辞

本研究の遂行にあたって、多大な御指導を頂きました名古屋工業大学の梅原教授に深く感謝の意を表します。

## 参考文献

- [1] 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]、pp.173-193、1996
- [2] 今井智満、上原匠、梅原秀哲：マスコンクリートの外部拘束係数における適用範囲の拡張に関する研究、土木学会第46回年次学術講演会、V-222、pp.460-461、1991.9

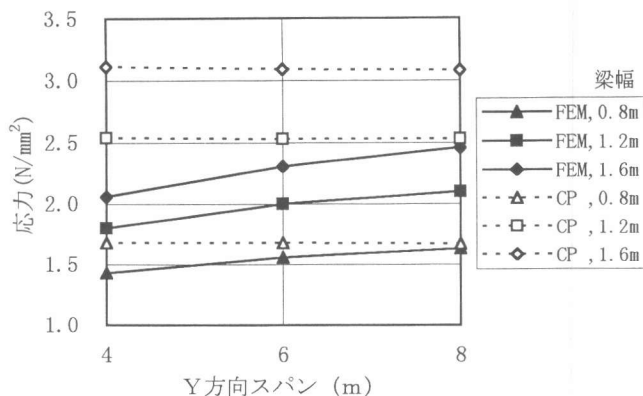


図-13 X方向応力とY方向スパンの関係

表-4 引張応力比 (CP/FEM)

		Y方向スパン		
		4m	6m	8m
梁幅	0.8m	1.17	1.08	1.02
	1.2m	1.41	1.27	1.20
	1.6m	1.51	1.34	1.25