# 委員会報告

## 「マスコンクリートの温度応力研究委員会報告」

#### 田辺 忠顕\*1、梅原 秀哲\*2、小野 定\*3

#### 1. 委員構成

委員	長	田辺	忠顕	(名古屋大学)
幹	事	梅原	秀哲	(名古屋工業大学)
幹	事	小野	定	(清水建設(株))
委	員	石川	雅美	(東急建設(株))
		遠藤	孝夫	(東北学院大学)
		大久	保孝昭	(建設省建築研究所)
		川口	徹	((株)大林組)
		倉林	清	(戸田建設(株))
		黒岩	秀介	(大成建設(株))
	. ·	近藤	吾郎	(千葉大学)
		佐藤	良一	(宇都宮大学)
		庄野	昭	((株)間組)
		浜田	純夫	(山口大学)
		三島	徹也	(前田建設工業(株))
		森本	博昭	(岐阜大学)
		横関	康祐	(鹿島建設(株))
協力委	員	中村	秀明	(山口大学)
		杉山	律	((株)間組)

#### 2. 委員会活動の概要

第一次のマスコンクリート温度応力委員会 が発足したのは 1981 年であり、委員会が途切 れたり、委員が交替したりしたものの、基本的 に継続性は保たれ、本年で委員会活動は 17 年 になる。第一次委員会では、広範な文献調査か ら始めて State of the Art Report の作成、次 いで、CP 法、CL 法なる当委員会独自の簡易温度 応力解析法の提案を行った[1][2][3][4][5]。 第二次温度応力委員会の発足は、1992 年であり、 温度応力によるひび割れ幅の制御を目指して、 新たなひび割れ幅解析理論をCP 法、CL 法の拡張 として提案した。同時に FEM によるひび割れ幅 の簡易解析も CP 法と同様に等価付着損失長さ の概念を用いて提案した[6][7]。幸いにこれら の結果は広く初期温度応力問題に取り組まれ ている技術者に受け入れられている。しかし、 これらの使用に伴って問題点も指摘されるよ うになり、特に委員会が示した外部拘束係数の 規定範囲が狭いこと、層状打設の場合の外部拘 東係数が十分に明らかにされていない事が指 摘された。

これらを受けて第三次の温度応力委員会が 発足したのは、1995年であり、外部拘束係数の 範囲を拡張すると同時に層状打設の場合の精 度良い外部拘束係数を同定し直すことにした。

今回、新たに提案した外部拘束係数は、3 次元 場が対象であり、層状打設の壁状構造物の温度 応力が直ちに推定できるようになっている。し たがって、従来の外部拘束係数とオーバーラッ プする部分もあるが、より広い意味での CL, CP 法の適用範囲の拡大がなされたと考えて頂い てよい。これにより、壁状層状打設の場合のひ び割れ幅制御も精度が向上したと考えている [8]。

また、本委員会では、全く外部拘束係数を使 用しない簡易温度応力計算法の可能性につい て検討した。その結果、FEMの計算を通じてヒン トが示唆され、将来、有望であるとの感触が得 られた[8]。

昨年の本大会で本委員会活動の中間報告[9] が行われていることから、ここでは、過去3年間 の活動で得られた主な成果をとりまとめた。

\*1名古屋大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 工博(正会員) \*2名古屋工業大学大学院教授 都市循環システム工学専攻 工博(正会員) \*3清水建設(株)土木本部技術第一部担当部長 工博(正会員) 3. 外部拘束係数の同定

3.1 解析モデルおよび解析条件

解析対象壁状構造物を図-1に示す。拘束体で ある地盤の領域は、壁状構造物の温度変化に伴 う挙動の影響を受けない範囲を考慮して、深さ 20m、幅 30m および長さは壁長さLの2倍とした。 壁厚は、壁状マスコンクリートの一般的な寸法 から 1.0m とした。



図-1 解析対象構造物

### 3.2 数値計算の組合せ

数値計算で考慮したヤング係数比(Ec/Er)の 水準は、1、5、10、15、20、25、30、35、40、45、50 およ び∞である。壁長さ L(m)は、6、9、12、15、18、21、 27、33、39、45、51、57、63、72、84、96 および 105 で ある。

#### 3.3 解析結果

外部拘束ひずみの断面内分布を、L/H=9.0 の 場合について図-2 に示す。外部拘束ひずみの直 線性は、L/H が小さい範囲では幾分崩れている が、L/H が 3 以上の範囲ではほぼ保たれており、 CP 法の仮定が妥当であることが確認できる。

### 4. 提案した新しい外部拘束係数

スラブ状構造物の外部拘束係数として、図-3

の (a) にスラブ部分の係数を従来の係数と対比 させて示す。これらの外部拘束係数の形状は、 従来のものとほとんど同じであるが、L/H が 15 から 100 まで、また Ec/Er を 40 から 50 まで拡 張しており、従来から指摘されていた適用範囲 が狭かった点が改善されている。なお、曲げ拘 束係数  $R_{u1}$ および  $R_{u2}$ については、L/H が 20 以上 はほとんど 1.0 で一定であるため、図では L/H

が 20 以下の場合を示した。すなわち、 $R_{\mu_1}$ および  $R_{\mu_2}$ が 1.0の曲線の右側の領域は、すべて  $R_{\mu_1}$ =1.0 および  $R_{\mu_2}$ =1.0 としてよい。

次に、壁状構造物の外部拘束係 数として、図-4 の(b)、(c)に示す 外部拘束係数を提案した。スラブ と同様に、従来の外部拘束係数と 対比させて示した。すなわち、壁 の第 1 リフトに対しては(b)を適 用し、第 2 リフトに対しては(c) を適用する。なお、R<sub>u1</sub>および R<sub>u2</sub> が 1.0 または 1.1 の曲線の右側の 領域は、スラブ状構造物と同様、 1.0 または 1.1 としてよい。



図-2 外部拘束ひずみの断面内分布 (L=63m、L/H=9.0、Ec/Er=10)

# 5. 新外部拘束係数と3次元 FEM および従 来の外部拘束係数との比較

代表的な解析ケースについて、CP 法、CP 法

-12-



図-3 提案した外部拘束係数(その1)(上段:従来の係数、下段:提案した係数)



(c) 壁2層目

図-4 提案した外部拘束係数(その2)(上段:従来の係数、下段:提案した係数)

(新係数)および 3DFEM の最大応力の解析結果の 比較を表-1に示す。

CP 法と 3DFEM との差違をスラブについてみる と、広い範囲について両者の結果は一致してい る。しかし、壁1層、壁2層については、L/H、E

c/Er が小さくなると両者の差が大きくなる 傾向が認められ、両者が一致する範囲も CP 法 (新係数)の場合に比べて小さくなっている。従 来の外部拘束係数では、補正係数[13][14]を導 入することにより壁状構造物への適用範囲の 拡大を図ってきたが、L/H、Ec/Er が小さい領域 では補正係数によって精度を向上させるまで の補正ができていないことが認められる。

一方、CP法(新係数)の場合、スラブ、壁2層に ついては、3DFEMの結果と良く一致している。た だし、壁1層については、L/H、Ec/Er が小さい領

			スラブ			壁1層			壁2層		
打設間隔	Ec/Er	解析	L=12m	L=21m	L=39m	L=12m	L=21m	L=39m	L=12m	L=21m	L=39m
30日		CP法	1.55	1.75	-	4.42	4.84	3.81	2.89	4.22	4.60
	10	CP法(新係数)	1.65	2.11	2.48	2.73	3.15	3.15	1.26	1.63	2.44
		3DFEM	1.54	2.05	2.65	1.62	2.18	2.68	1.33	1.79	2.53
		CP法	1.12	1.23	-	2.70	3.42	3.81	2.31	2.63	3.40
	30	CP法(新係数)	1.25	1.57	2.05	2.18	2.80	2.90	1.24	1.41	2.25
		3DFEM	1.03	1.30	1.95	1.47	1.92	2.43	1.27	1.59	2.31
5日		CP法	0.43	0.52	0.52	3.24	3.43	2.85	2.46	3.62	3.99
	10	CP法(新係数)	0.29	0.59	1.64	2.54	2.51	2.42	1.01	1.32	2.21
		3DFEM	1.54	1.85	2.36	1.62	1.92	2.20	1.02	1.44	2.27
		CP法	0.34	0.47	0.56	2.30	2.59	2.68	1.93	2.20	2.87
	30	CP法(新係数)	0.35	0.42	0.91	2.28	2.34	2.19	1.02	1.11	1.90
		<b>3DFEM</b>	1.06	1.20	1.51	1.57	1.75	1.94	1.01	1.26	1.95

表-1 最大応力の比較

(単位:N/mm<sup>2</sup>)

域では、差が幾分大きくなる傾向がある。この領 域で新係数を適用する場合には、幾分精度が低 下することを考慮する必要があるが、広範囲の L/H、Ec/Er に対して CP 法(新係数)と 3DFEM との 結果よく一致しており、新係数の信頼性が向上 したことが認められる。

## 外部拘束係数を用いない温度応力計算 法の可能性

6.1 計算方法の基本的な考え方

CP 法の解析精度に影響を及ぼす主要因は、外 部拘束係数と構造物全体についてのひずみの直 線性である。したがって、これらを必要としな い CP 法が開発されると CP 法の適用性および解 析精度が大きく向上することが推察される。

本委員会では、このような問題について検討 を行った。まず、外部拘束係数を用いない方法 に関しては、現行の CP 法では拘束体と考えてい る地盤(岩盤)を被拘束体の一部と考えれば、 被拘束体は外部拘束が作用しない「フリーボデ ィ」となり、結果として外部拘束係数を用いな くてもよいことになる。

次に、現行の CP 法では被拘束体の全ひずみ が系全体を通して直線分布となることを基本仮 定としている。しかし、被拘束体の形状などに より全ひずみの直線性が保たれない場合がある。 ただし、このような場合でも、地盤(岩盤)、 スラブおよび壁の各区分では全ひずみの直線性 が保たれていることが多い。したがって、各区 分で全ひずみ平面(以下、区分 CP)を定義すれ ば、これら複数の区分 CP で系全体の全ひずみを 表すことができると考えられる。このように複 数の区分 CP で系全体の全ひずみを表すことで、 現行の CP 法と同様の手順で温度応力計算法の 定式化を行うことができる。

本委員会では、前述の仮定のもとに外部拘束 係数を用いない計算法の定式化を行い、幾つか のケーススタディを実施し、将来的に外部拘束 係数を用いない温度応力計算法(仮称、区分 CP 法)が有望であることを提示した。

### 6.2 区分 CP 法の適用例

解析の対象とした構造物は、岩盤上のスラブ の上に構築される壁状構造物である。壁厚 1m、 壁高さ(H)を 3m の一定とし、壁長さ L は 6m、15m、 21m の 3 水準とした。



- 15 -

図-5 に、壁長さ L=6m で、 区分 CP 法および 3 次元 FEM による全ひずみの比較を示す。FEM 解 析結果から、壁に生じる温度変形に追随してス ラブと岩盤の表層部に全ひずみが生じている。 壁、スラブおよび岩盤の各層それぞれの全ひず み分布は直線性がほぼ保たれている。しかし、 各層の境界では全ひずみ分布は折れ曲がりが 生じており、構造系全体についてみれば全ひず みの直線性は保たれていない。岩盤底面では全 ひずみは生じておらず、しかも温度解析からこ の位置では温度変化も殆ど認められていない ので、岩盤底部では拘束外力は作用せず、構造 物モデルは区分 CP 法の基本仮定であるフリー ボディの状態にあることが確認できる。次に、 区分 CP 法による全ひずみの解析結果は、岩盤、 スラブ、壁の各層において FEM の結果とよく合 致している。

図-5 から認められるように、壁長さが長くな

ると、全ひずみの直線性は構造物モデル全体に ついてもほぼ成立しており、壁長さ 6m に比べ て FEM の結果との合致性がよくなっている。図 -6 に、L=21m の応力の経時変化を示す。当然の ことながら応力的にも FEM の結果とよく合致し ている。

前述のように曲率比 φ<sub>in</sub>/φ<sub>i</sub>が適切に評価 できれば、FEM に近い結果が得られるが、実際に はこの曲率比が部位の剛性比、構造物モデルの 全体形状、材齢等により変化するために、これ をどのように同定するかが今後の検討課題の 一つとして上げられる。残された課題の二つ目 としては、適切な構造物解析モデルの設定方法 の確立が上げられる。今後、このような課題が 解決されれば、外部拘束係数を用いない CP 法が 有効な温度応力計算法として実用化されるも のと思われる。



## 図-6 コンクリート応力の経時変化

 $(L=21m Er=5.0kN/mm^2)$ 

-16-

7. まとめ

3年間にわたる委員会活動で得られた主な 成果を列挙すれば次のとおりである。

- (1)我が国で使用されている幾つかの3次元温 度応力解析プログラムの比較検討を行い、各 プログラムの定量的な関係を把握した。
- (2) L/H および Ec/Er をパラメーターにした壁状 コンクリート構造物の3次元温度応力解析 を行った。
- (3)3次元解析の結果、L/Hが3以上で、全ひず
  みの直線性が保たれることが確認された。
- (4)3 次元解析結果を基にして、外部拘束係数 (軸拘束係数、曲げ拘束係数)を同定した。
- (5)3 次元解析結果から同定した外部拘束係数 と3次元解析結果との比較検討により、新た に同定した外部拘束係数が妥当なものであ ることを確認した。
- (6)3 次元解析結果から同定した外部拘束係数 と従来の係数との比較検討により、新たに同 定した外部拘束係数がより的確な係数であ ることを確認した。
- (7)3 次元解析結果を基にして同定した外部拘 東係数(軸拘束係数、曲げ拘束係数)を、新 たにCP法(CL法)に適用する外部拘束係数と して提案した。
- (8)外部拘束係数を用いない CP 法(区分 CP 法) の定式化を行い、将来的に外部拘束係数を用 いない温度応力の計算法が有望であること を示した。
- (9)実構造物における実測値との比較により、新 たに提案した外部拘束係数の適用性を確認 した。

今回の委員会活動で、外部拘束係数の見直し と適用範囲の拡大を図ることができた。これに より、現行の CP 法の計算精度が向上していくも のと期待している。

約 17 年間にわたったマスコンクリート温度 応力研究委員会の活動により、マスコンクリー トの温度応力制御技術の枠組みはほぼ完成に至 ったと考えている。これまでに本委員会で作成 した研究報告書ならびに解析ソフトが、今後と もマスコンクリートの品質向上に寄与すること を期待している。

最後に、本委員会活動に対して、長期にわた り、御援助、御支持頂いた関係各位に心からなる 謝意を表する次第である。

参考文献

- [1]日本コンクリート工学協会:マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集、1982.9
- [2]日本コンクリート工学協会:第2回マスコン クリートの温度応力発生メカニズムに関す るコロキウム論文集、1984.3
- [3]日本コンクリート工学協会:マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書、1985.11
- [4]日本コンクリート工学協会:マスコンクリー ト温度応力の計算方法とそのパソコンプロ グラム、1985.11
- [5]日本コンクリート工学協会:コンクリート構 造物の体積変化によるひびわれ幅に関する コロキウム論文集、1990.8
- [6] 日本コンクリート工学協会:マスコンクリー トの温度応力研究委員会報告書、1992.9
- [7]日本コンクリート工学協会:JCI COMMITTEE REPORT/A Proposal of a Method of Calculating Crack width Due to Thermal Stress, September 1992
- [8]日本コンクリート工学協会:マスコンクリート温度応力研究委員会報告書ー外部拘束係数の見直しと CP 法の適用範囲拡大ー、 1998.4
- [9]石川雅美:委員会報告「マスコンクリートの 温度応力研究委員会報告」、コンクリート工
   学年次論文報告集、Vol.19、No.1、1997
- [10]Tanabe.T.; Isikawa.Y. and Ando.N.:Viscoelastic and visco-plastic modeling of transient concrete, Euro-C Budzustein , 1998

[11]石川靖晃・田辺忠顕:時間依存性を考慮する

-17-

境界面モデルの開発およびその層打ちコン クリート構造物温度応力解析への適用、土木 学会論文集、No585/V-38、1998.2

- [12]石川雅美・前田強司・西岡哲・田辺忠顕: マスコンクリートの熱変形および熱応力に 関する実験的研究、土木学会論文集、No.408/ V-11、1989.8
- [13]土木学会:平成 8 年制定コンクリート標準 示方書・施工編、1996
- [14]梅原秀哲・今井智満:CL法および CP 法にお ける外部拘束係数に関する研究、コンクリー ト構造物の体積変化によるひび割れ幅制御 に関する JCI コロキウム論文集、1990.8