

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、本年度で委員会活動は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みら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束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。

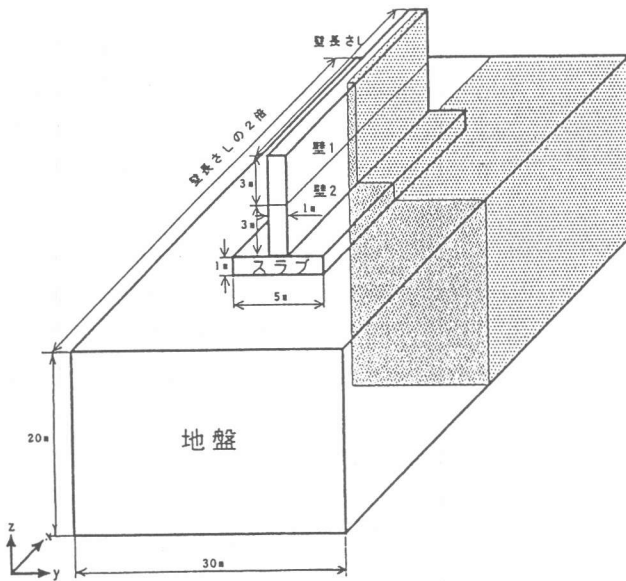


図-1 解析対象構造物

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 (E_c/E_r) 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 E_c/E_r 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_{M1} および R_{M2} 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_{M1} および R_{M2} が1.0の曲線の右側の領域は、すべて $R_{M1}=1.0$ および $R_{M2}=1.0$ 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_{M1} および R_{M2} 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。

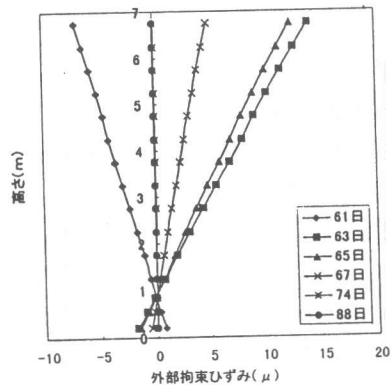
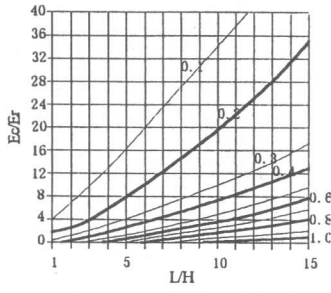


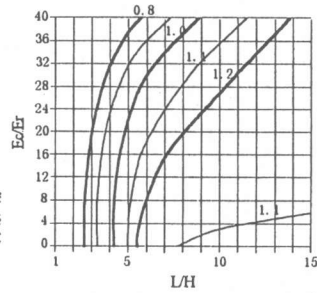
図-2 外部拘束ひずみの断面内分布
($L=63m$ 、 $L/H=9.0$ 、 $E_c/E_r=10$)

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

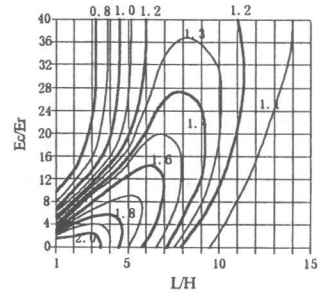
代表的な解析ケースについて、CP法、CP法



軸拘束係数 R_N

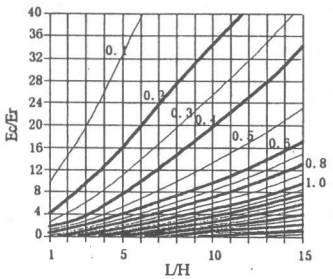


曲げ拘束係数 R_{M1}

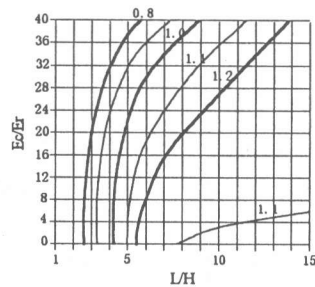


曲げ拘束係数 R_{M2}

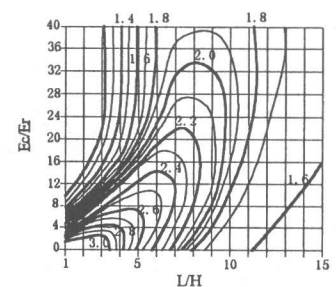
(a) スラブ



軸拘束係数 R_N



曲げ拘束係数 R_{M1}



曲げ拘束係数 R_{M2}

(b) 壁 1 層目

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)

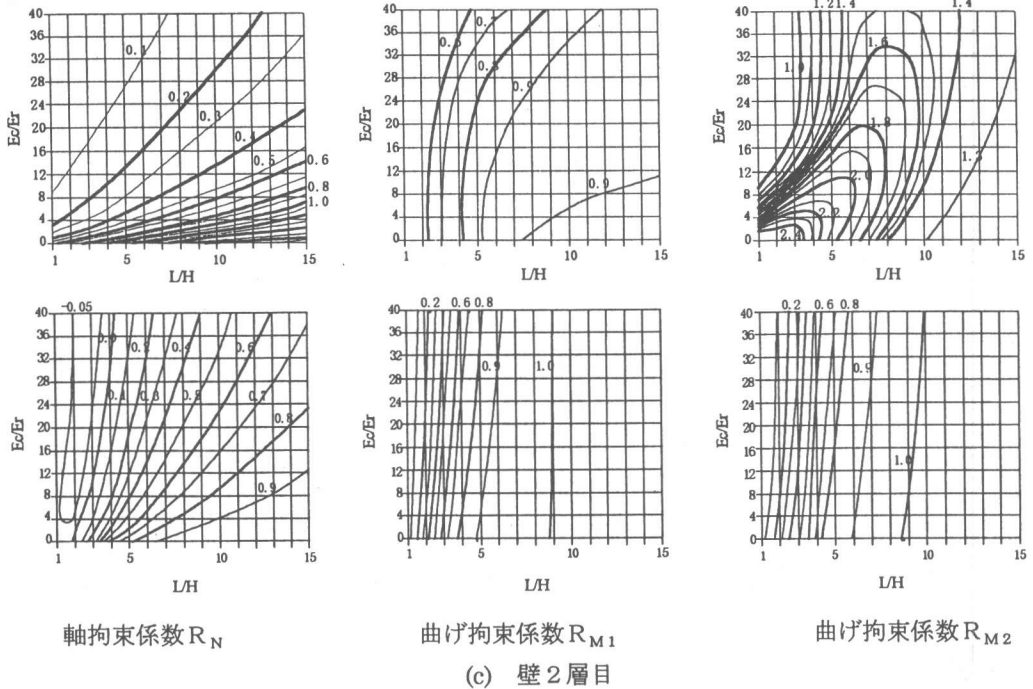


図-4 提案した外部拘束係数(その2)(上段:従来の係数、下段:提案した係数)

(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/E_r 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 、 E_c/E_r 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 、 E_c/E_r が小さい領

表-1 最大応力の比較

打設間隔	E_c/E_r	解析	スラブ			壁1層			壁2層		
			L=12m	L=21m	L=39m	L=12m	L=21m	L=39m	L=12m	L=21m	L=39m
30日	10	CP法	1.55	1.75	-	4.42	4.84	3.81	2.89	4.22	4.60
		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
	30	CP法	1.12	1.23	-	2.70	3.42	3.81	2.31	2.63	3.40
		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	10	CP法	0.43	0.52	0.52	3.24	3.43	2.85	2.46	3.62	3.99
		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
	30	CP法	0.34	0.47	0.56	2.30	2.59	2.68	1.93	2.20	2.87
		CP法(新係数)	0.35	0.42	0.91	2.28	2.34	2.19	1.02	1.11	1.90
		3DFEM	1.06	1.20	1.51	1.57	1.75	1.94	1.01	1.26	1.95

(単位: N/mm²)

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。

6. 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。

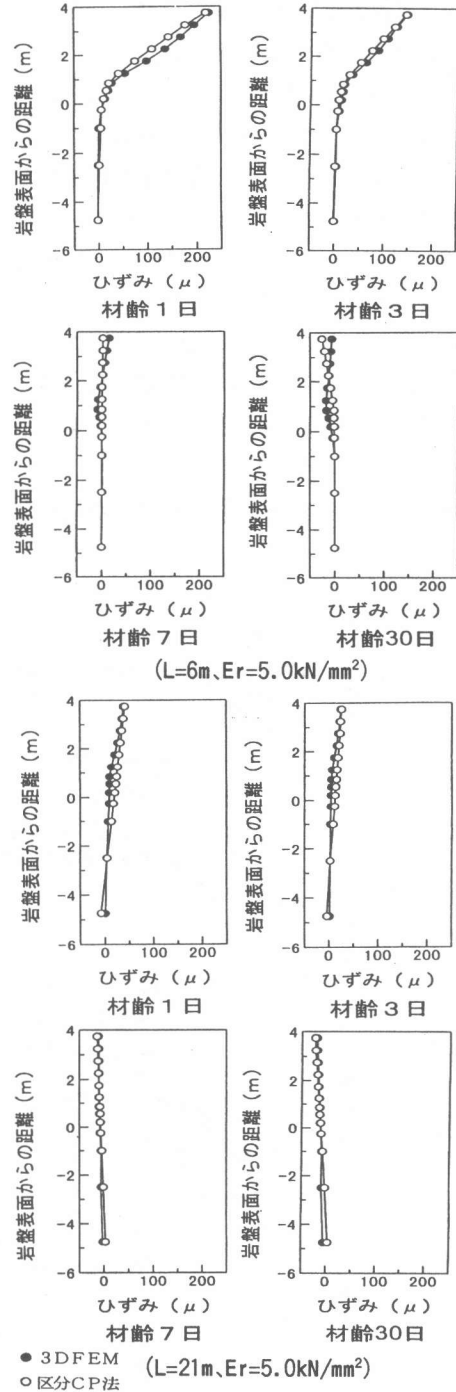


図-5 全ひずみ経時変化

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隨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_{i+1}/ϕ_i 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。

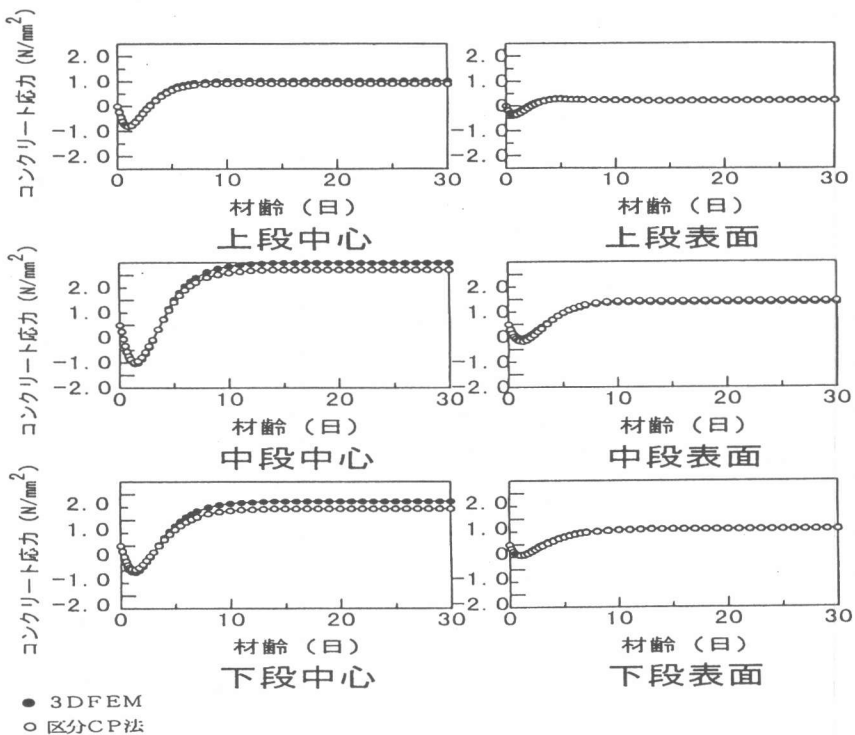


図-6 コンクリート応力の経時変化
(L=21m, Er=5.0kN/mm²)

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 E_c/E_r 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の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束係数(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—外部拘束係数の見直しとCP法の適用範囲拡大—、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.: Visco-elastic 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

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