

論文 トンネル2次覆工コンクリートのひび割れに関する研究

服部 鋭啓*1・入矢 桂史郎*2

要旨：2次元解析でモデル化しにくいトンネル2次覆工コンクリートを対象とし、3次元 FEM 解析にてトンネル軸方向と円周方向の温度応力を解析した。簡易解析法である2次元 FEM 解析および CP 法とその違いを明確にした。2次元 FEM および CP 法は、3次元 FEM に比べ円周方向の応力を過少評価し、軸方向の応力は逆に過大評価する。また、トンネル覆工コンクリートは場所によって応力の卓越する方向が異なるため、2次元的に解析を行なう場合、円周方向の応力と軸方向の応力を合せて検討する必要があることがわかった。

キーワード：温度応力、トンネル2次覆工コンクリート、3次元有限要素法

1.はじめに

近年、都市部におけるトンネルは、大断面に加えて地山荷重および背水圧を考慮するため2次覆工コンクリートの覆工厚が1m程度となる場合がある。覆工厚が1m程度のコンクリートとなるとセメントの硬化時の水和熱に起因する温度応力によるひび割れの発生が懸念される。従来、マスコンクリートと考えられなかった覆工コンクリートも温度ひび割れ制御対策が必要となってきたといえる。この温度応力を事前に予測する場合、一般に、CP法(日本コンクリート工学協会 以下、JCI)、2次元 FEM、3次元 FEM 等が用いられる。しかし、トンネル覆工コンクリートの温度応力予測は事例が少なく参考とする文献も少ない。また、トンネルのひび割れは拘束によってあるいは断面形状によって、トンネルの軸方向と垂直方向の2方向のひび割れが発生する場合が多い。従って、トンネルの温度応力を検討する場合、3次元的に検討する必要がある。そこで、トンネル2次覆工コンクリートを対象とし、3次元温度応力解析を行うと共に2次元温度応力解析との比較検討を

行ない、予測に用いる解析手法として2次元温度応力解析にて簡素化できるか検討を行なった。

2.対象構造物

対象構造物は、図-1に示す半径5.60mの都市部に設けられる道路トンネルの2次覆工コンクリートである。この2次覆工コンクリートの打設は1スパン7.5m、壁厚0.9mの鉄筋コンクリートであり、掘削後、吹付けコンクリート、防水シート、覆工コンクリートの順で行う。

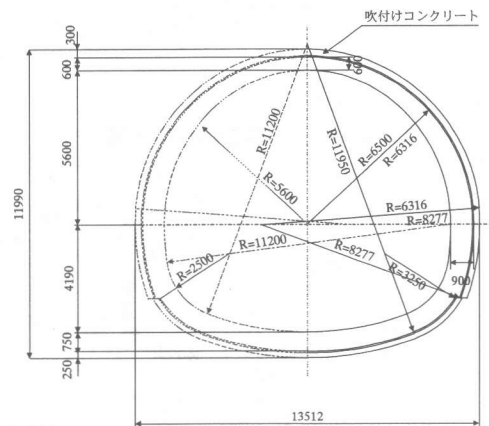


図-1 対象断面図

*1(株)大林組 土木技術本部 技術第五部 工修(正会員)

*2(株)大林組 土木技術本部 技術第五部 工博(正会員)

また、周辺地盤は軟質の砂岩である。

3. 解析手法および条件

図-2に示すように、トンネル2次覆工コンクリートのひび割れは、インバートの拘束による垂直方向のひび割れと地山の拘束によるトンネル軸方向のひび割れと2方向のひび割れが考えられる。そこで、トンネル軸方向と円周方向にどの程度引張応力が発生するか解析にて算出する。解析概要を表-1に示す。ここでは、3次元FEM、2次元FEM、CP法¹⁾の3種類の解析手法を用いて温度応力の検討を行った。FEM解析には、非線形温度応力解析プログラムであるASTEAMACSを使用した。また、2次元解析における横対象断面図および縦断面図を図-3に示す。3次元FEMにおけるモデルを図-4に示す。対象とするスパンNo.2(L=7.5m)の前後1スパンを考慮して3スパンにおける吹付けコンクリート、インバートコンクリートおよび覆工

表-1 解析概要

解析モデル 算出応力	3次元FEM	2次元FEM [Ⓐ]	2次元FEM [Ⓑ]	CP法
円周方向応力	○	○	×	○
軸方向応力	○	×	○	×

コンクリートなどすべての材料をモデル化した。2次元FEMはトンネル軸方向の応力および円周方向の応力をそれぞれ異なるモデルを用いて応力を算出した。円周方向応力の算出には図-3に示す横断面の半断面をモデル化した。モデル図を図-5に示す。このモデルでは、1スパンのみを対象とし前後のスパンの影響を考慮できない。軸方向応力の算出には図-3に示す縦断面をモデル化した。モデル図を図-6に示す。このモデルは覆工コンクリートの打設順序を考慮できるがインバートコンクリートや断面変化などの影響を考慮できない。CP法は図-6に示すモデルを用い、円周方向の応力を算出した。本トンネルの壁厚は60cmから90cmに変化する。ここで、図-6に示した2次元FEMにおける軸方向応力およびCP法に用いるモデルのコンクリート厚さは90cmとした。従って、スプリングライン部(以下、SL部)をモデル化したことになり、コンクリート厚さが600mmのクラウン部(以下、CR部)とは厚さが異なる。

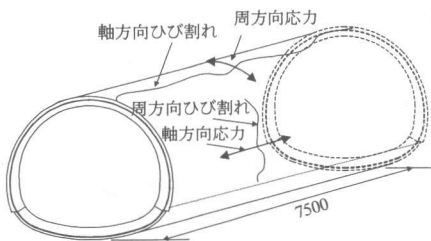


図-2 ひび割れ方向

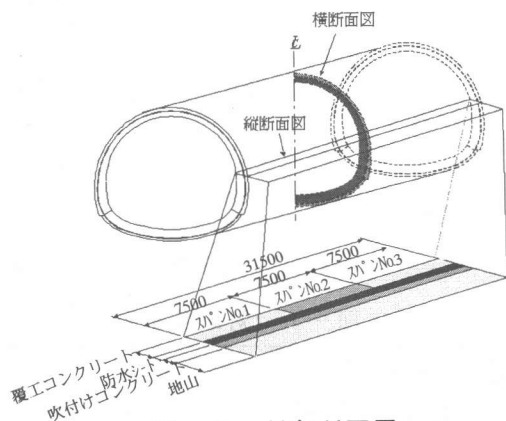


図-3 対象断面図

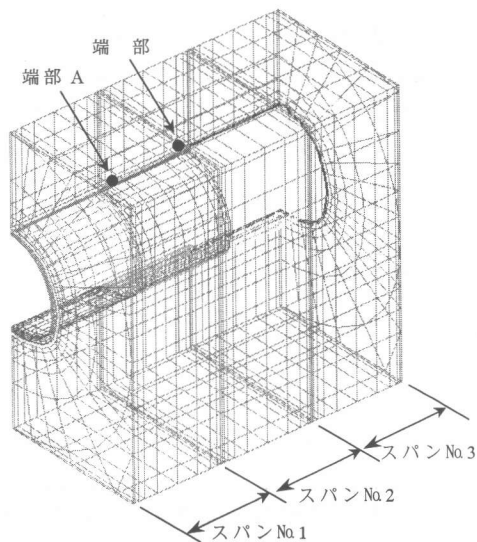


図-4 3次元FEM解析モデル

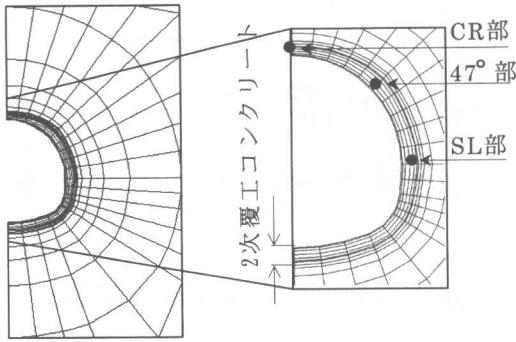


図-5 2次元FEM解析モデルA
(円周方向応力算出用)

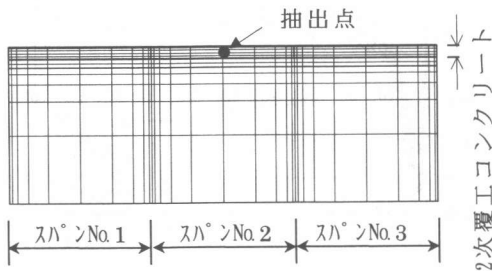


図-6 2次元FEM解析モデル(軸方向応力)
CP法モデル(周方向応力)

表-2 配合表

SI (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)				
				W	C	S	G	AD
15	4.5	54.0	44.3	164	304	770	1011	3.04

表-3 解析条件

項目	単位	定数
単位容積質量	kg/m ³	2250.0
熱伝導率	w/m°C	2.0
比熱	k J/kg°C	0.88
熱伝達率	w/m ² C	14.0
断熱温度 上昇式		Q(t)=Q _∞ (1 - exp(- γ t)) Q _∞ : 46.75 γ : 0.663
線膨張係数	10 ⁻⁶ /°C	10.0
圧縮強度 fc(t) t:材齢(日)	N/mm ²	$\frac{t}{6.2+0.93t} \times 345$
引張強度	N/mm ²	0.44 fc(t) ^{0.5}
有効弾性係数	N/mm ²	φ × 4700 fc(t) ^{0.5} φ:カリ-γ ² 係数
ポアソン比		0.2

4.解析条件

2次覆工コンクリートの配合を表-2に示す。また、解析条件を表-3に示す。施工時期は吹付けコンクリートを7月、インバートコンクリートは翌年5月、覆工コンクリートはその次の年の1月とした。

5.解析結果

5.1 円周方向応力の比較

円周方向応力を3次元 FEM、2次元 FEM および CP 法を用いて算出した。2次元 FEM における抽出点は図-5に示したCR部、47°部およびSL部の3箇所とした。3次元 FEM における応力抽出点はスパン中央部のCR部、47°部およびSL部の3箇所とした。図-7~図-9に温度の経時変化を比較したものを示す。3次元 FEM と2次元 FEM による温度履歴は上昇速度、最高温度および降下時とほぼ一致している。基本的にはトンネル2次覆工コンクリートは軸方向の熱の流れは小さく、断面方向への2次的な熱の流れが卓越することがわかる。そこで、図-7に2次元 FEM によるCR部の結果と3次元 FEM によるスパン端部のCR部における温度履歴を比較した。端部Aは先に施工したスパンの打継ぎ付近であり端部Bは後に施工するスパンの打継ぎ付近である。端部Aは最高温度はほぼ同じであるが、最高温度に達するまでが速く、また降下速度も速くなっている。端部Bは最高温度は低く降下速度も速くなっている。これは、対流境界付近であるためである。また、端部Bは次のスパンのコンクリート打設の影響を受け再び温度が約4.0°Cほど上昇している。

図-10~12に応力の経時変化を示す。CR部において、2次元 FEM の引張応力は3次元 FEM に比べ約0.2N/mm²下回った。同様に47°部およびSL部も2次元 FEM の引張応力は3次元 FEM に比べ約0.1~0.2N/mm²下回った。すなわち、いずれの箇所においても円周方向応力は2次元 FEM では3次元 FEM に比

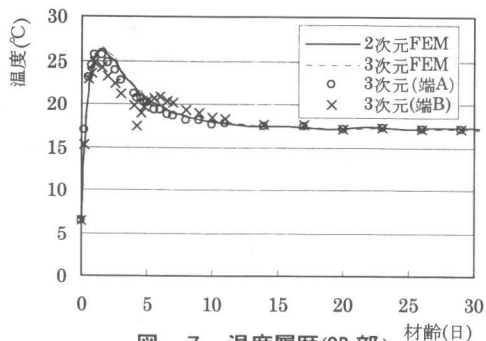


図-7 温度履歴(CR部)

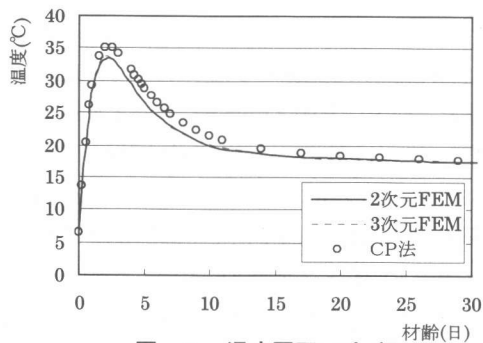


図-8 温度履歴(47°部)

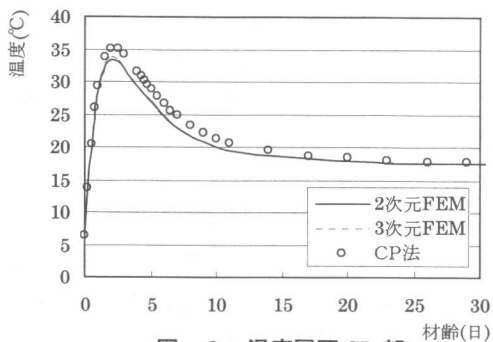


図-9 温度履歴(SL部)

べ過小評価をしたことになる。これは、3次元では端部が外気温にさらされるため、内部拘束応力が付加されていることによる。次に、3次元 FEM と CP 法を比較する。CP 法における軸拘束度は文献²⁾によると 0.4~0.6 といわれている。そこで、軸拘束度を 0.4、0.5、0.6 の 3 水準とし比較を行なった。これによると 47°部の拘束度 0.6 の場合を除き、3次元 FEM の結果を下回った。よって、CP 法も 3次元 FEM と比較し円周方向の応力を過小評価する。また、CR 部において温度結果と同様に 3次元

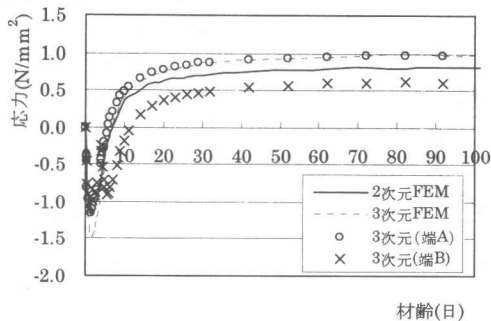


図-10 周方向応力履歴(CR部)

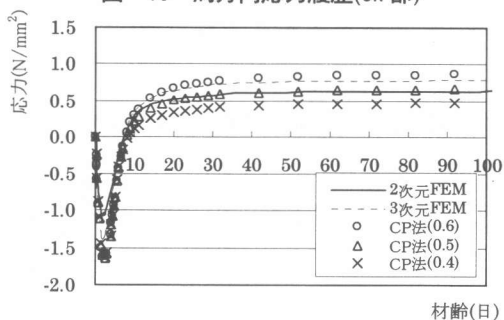


図-11 周方向応力履歴(47°部)

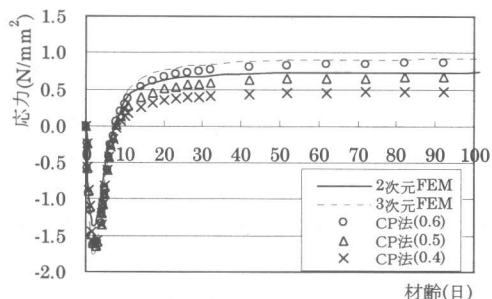


図-12 周方向応力履歴(SL部)

FEM による端部 A および端部 B と 2次元 FEM の結果を比較した。端部 B における引張応力は 2次元 FEM より小さくなっているが、端部 A における引張応力は 3次元 FEM 中心部より若干大きくなっており、2次元 FEM の結果を上回った。

以上より、円周方向応力を 2次元 FEM および CP 法で算出すると、打継ぎの効果や軸方向に生じる内部拘束の効果を考慮できないので 3次元 FEM の結果より過小評価をする。

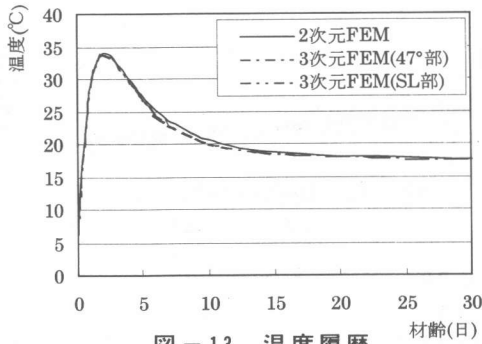


図-13 温度履歴

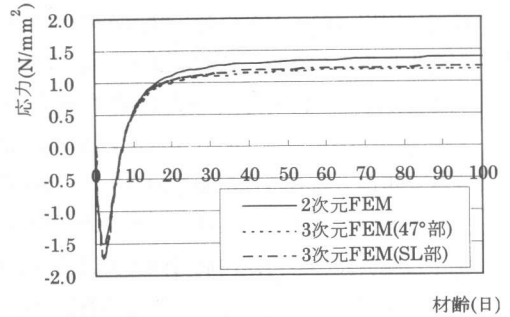


図-14 軸方向応力履歴

5.2 軸方向応力の比較

軸方向応力を3次元 FEM および2次元 FEM を用いて算出した。抽出点は覆工の厚さが 900mm である3次元 FEM におけるスパン中央部の 47° 部および SL 部の2箇所と2次元 FEM におけるスパン中央部とした。温度の経時変化を図-13 に示す。3次元 FEM と2次元 FEM による温度履歴は上昇速度、最高温度および降下速度とほぼ一致している。先に、熱の流れが2次的と述べたが、長さ比べ厚さが極端に短いのでほぼ厚さ方向へ1次的に熱が流れている。そのため覆工の厚さが同じであれば2次元 FEM は3次元 FEM と一致すると思われる。あるいは、1次元解析でも可能であると思われる。

図-14 に3次元 FEM における CR 部、47° 部および SL 部と2次元 FEM におけるスパン中央部におけるトンネル軸方向応力を比較した。2次元 FEM の引張応力は3次元 FEM のいずれの箇所よりも約 0.1N/mm² 上回っており過大評価となった。

6. 解析手法が及ぼす

ひび割れ発生評価への影響

図-15 に3次元 FEM による最小ひび割れ指数を示す。表-4 に各解析モデルによる最小ひ

表-4 最小ひび割れ指数

解析モデル	部 位	最小ひび割れ指数	材齢(日)	主応力方向
3次元 FEM	CR 部(スパン中央)	2.5	100	円周方向
	CR 部(端部A)	2.5	100	軸方向
	47° 部	2.1	100	軸方向
	SL 部	2.0	100	軸方向
2次元 FEM (モデルA)	CR 部	3.1	100	円周方向
	47° 部	4.0	100	円周方向
	SL 部	3.5	100	円周方向
2次元 FEM (モデルB)	47° 部	1.6	100	軸方向
	SL 部	1.6	100	軸方向

び割れ指数、最小ひび割れ指数となる材齢および主応力の方向を示す。ここで、ひび割れ指数は式(1)に示すように定義する。

$$I_{cr}(t) = \frac{f_t(t)}{\sigma_t(t)} \quad (1)$$

$I_{cr}(t)$: 材齢 t 日の温度ひび割れ指数

$\sigma_t(t)$: 材齢 t 日における部材内の応力の最大値(N/mm²)

$f_t(t)$: 材齢 t 日におけるコンクリートの引張強度(N/mm²)

2次元 FEM において、モデルAとモデルBにおけるそれぞれの最小ひび割れ指数を抽出し、ひび割れ指数の小さい方のモデルのひび割れ指数をその部位の最小ひび割れ指数とすることによって、3次的にひび割れの発生を評価できると思われる。すなわち、周方向応力と軸方向応力を重ね合わせるにより3次的に応力を評価できる。

図-16~18 に3次元 FEM 解析による CR 部、47° 部および SL 部における円周方向応力と軸

方向応力を示す。3次元 FEM によると、CR 部では円周方向応力が卓越し軸方向のひび割れが発生しやすく、47° 部および SL 部では軸方向応力が卓越し円周方向のひび割れが発生しやすいことがわかる。このトンネルでは、断面が大きく円周方向の長さが軸方向の1スパン長に比べて長いにもかかわらず、47° 部および SL 部では軸方向の応力が円周方向に比べて卓越する結果となっている。ここで注意しなければならないのは、CR 部の応力である。CR 部の応力は、軸方向の応力より円周方向の応力が卓越している。今回対象とした構造物では、CR 部のコンクリート厚さがその他に比べて薄いため(600mm)このような結果に至ったものと推定され、同じコンクリート厚さであった場合には、CR 部は、長手方向に直角のひび割れが生じるように軸方向の応力が卓越したのと思われる。

CR 部において2次元 FEM の場合、過小評価するが、CP 法で推奨される最大拘束度をとればほぼ評価できる。しかし、端部に発生するひび割れについては2次元 FEM では、評価できなかった。今回のモデルでは、端部の応力は、スパン中央部の応力と比較して、発生パターンは異なるものの、応力の大きさから見るとスパン中央部の応力を上回るものではなかった。したがって、寒冷地の施工などで内部拘束応力が卓越する場合を除き、端部応力に着目する必要はないと思われる。

7.まとめ

- 1)円周方向応力は、2次元 FEM で算出すると3次元 FEM に比べ過少評価し危険である。
- 2)軸方向応力は、2次元 FEM で算出すると3次元 FEM に比べ過大評価し安全である。
- 3)トンネルの温度応力解析は、2次元モデルによる解析が可能である。しかし、その場合、円周方向応力と軸方向応力に分けてモデルを二種類作成し、3次元効果を考慮できる。

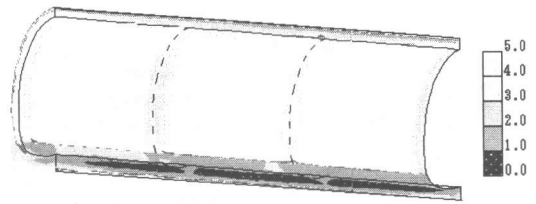


図-15 最小ひび割れ割れ指数 (3次元FEM)

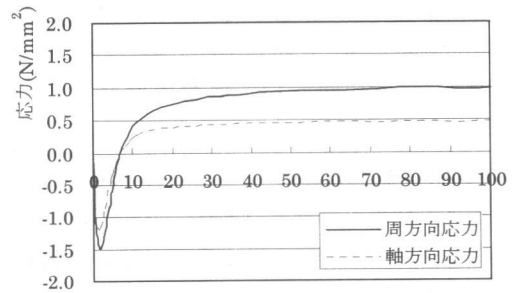


図-16 3次元応力履歴(CR部)

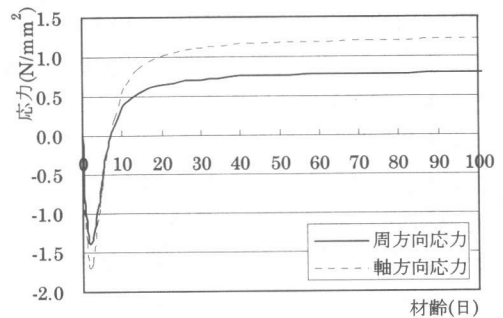


図-17 3次元応力履歴(47°部)

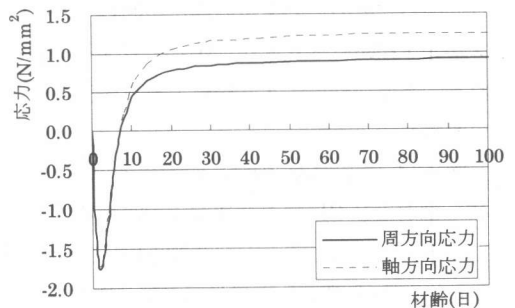


図-18 3次元応力履歴(SL部)

参考文献

- 1)マスコリートの温度応力研究委員会報告書
日本コンクリート工学協会 1985
- 2)江村康博、山本和夫、出頭圭三：NATM における 2 次覆工のクラック、トンネルと地下
vol.13, No8, pp.33 - 41, 1982