

トンネル覆工を想定した無筋コンクリートの 疲労特性に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON FATIGUE CHARACTERISTIC OF PLAIN CONCRETE OF TUNNEL LINING

小島芳之¹⁾・岡野法之¹⁾・齋藤 貴²⁾・村田一郎³⁾・木村元哉⁴⁾
Yoshiyuki KOJIMA, Noriyuki OKANO, Takashi SAITO,
Ichiro MURATA and Motoya KIMURA

When high-speed trains are running and passing each other in tunnels, comparative large air pressure transients are generated in the tunnels. Therefore, the air pressure transient may have fatigue effect on tunnel lining concrete.

First, we measured pressure transient on tunnel lining during the Shinkansen trains are running and passing each other in Fukuoka tunnel. Then, we performed bending tests of plane concrete specimens and their simulation analysis in order to elucidate the fatigue effect on tunnel lining concrete. As a result, we came to a conclusion that there is no problem if tunnel lining concrete is sound.

Key Words: tunnel lining concrete, air pressure transient, fatigue, specimen test, simulation analysis

1. はじめに

山岳工法トンネルの覆工は一般に無筋コンクリートで造られているが、地山に囲まれたアーチ構造であり、環境変化の少ない地中に位置しているので、明かり構造物に比較して長い耐用年数を有する。しかし、施工中にやむを得ず生じたひび割れ等の構造欠陥や、供用中の地圧等の外力による変状が生じている場合は、進行すればコンクリートの剥落に至ることもある。

このような剥落を引き起こす要因の一つとして、新幹線等の高速列車走行が行われるトンネルにおいては、空気圧変動や列車振動の繰返しによる無筋コンクリートの疲労が考えられる¹⁾。

そこで筆者らは、ひび割れを有する無筋コンクリート梁の繰返し載荷試験およびそのシミュレーション解析を行い、トンネル内の列車走行に伴う空気圧変動がトンネル覆工コンクリートの疲労に及ぼす影響について検討を行った。本稿ではその検討結果を報告する。

2. 列車走行時の覆工コンクリート挙動測定

2. 1 測定概要

新幹線走行時の動的挙動がトンネル覆工コンクリートに及ぼす影響の程度を評価するため、JR 山陽新幹線福岡トンネル内（剥落箇所付近）で、新幹線走行時の空気圧変動、振動加速度およびトンネル覆工のひずみを測定した。

-
- 1) 正会員 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部(トンネル)
 - 2) 正会員 東日本旅客鉄道(株) 上信越工事事務所 (前 鉄道総合技術研究所)
 - 3) 正会員 ジェイアール西日本コンサルタンツ(株) (前 西日本旅客鉄道)
 - 4) 正会員 西日本旅客鉄道(株) 鉄道本部 施設部

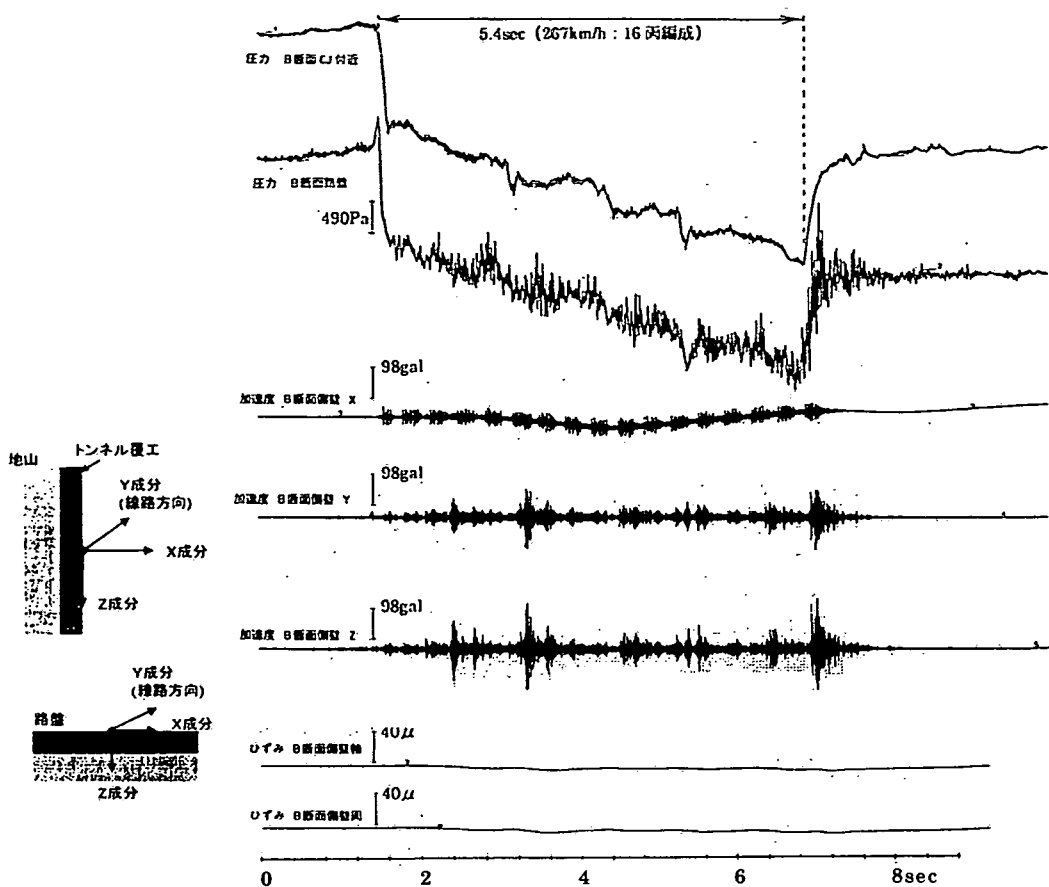


図1 空気圧変動、振動加速度およびトンネル覆工ひずみの計測結果

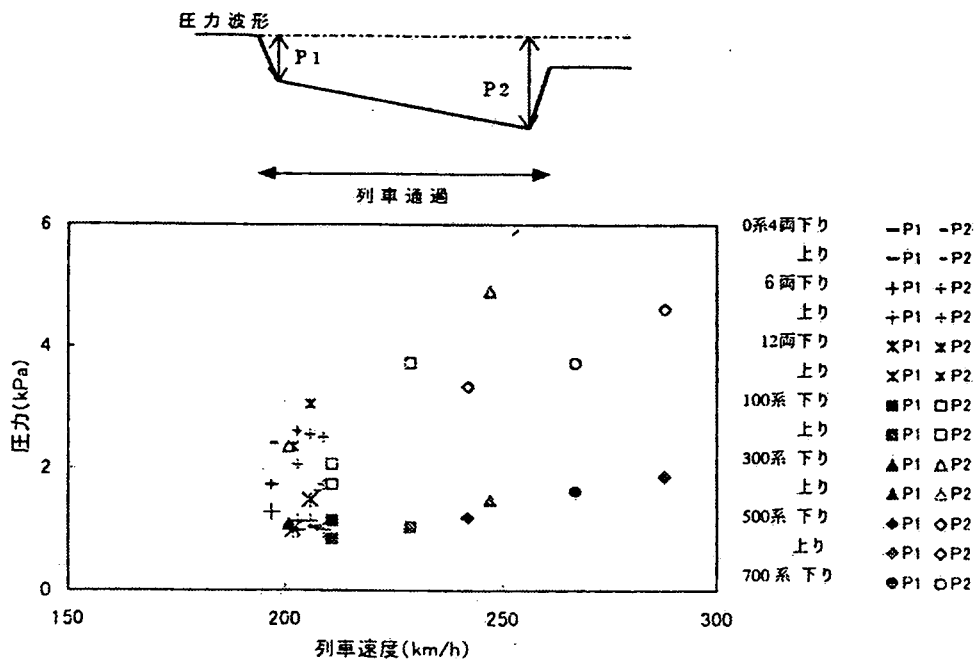


図2 空気圧変動と列車速度との関係

2. 2 調査結果

測定結果の例を図 1 に、その内、空気圧変動についてまとめたものを図 2 に示す。
トンネル覆工のひずみは非常に小さく、最大 10μ 程度であった。
一方、空気圧変動は先頭部が計測箇所に差し掛かった直後に圧力が急激に低下し、その後、最後尾が抜けるまで緩やかに圧力降下が続く、最後尾通過後に圧力が再び一定となる。
剥落箇所付近の覆工表面では列車先頭部が到達するとまず 1~2kPa 程度圧力が降下し、最後尾が通過する際には圧力効果幅が 2~5kPa 程度に達した。この値はトンネル内圧力変動シミュレーション結果と一致している。
なお、トンネルを単一剛性・巻厚の円環と仮定し、上記の値を用いて覆工内圧を作用させ、覆工のひずみの変化を計算により求めると、10~20μ 程度となり、(2)の計測値とよい整合が見られた。

3. 無筋コンクリート曲げ疲労試験

2. の計測結果を踏まえ、列車通過時の空気圧降下幅に着目し、その空気圧変動がトンネルの無筋コンクリート覆工に与える影響を

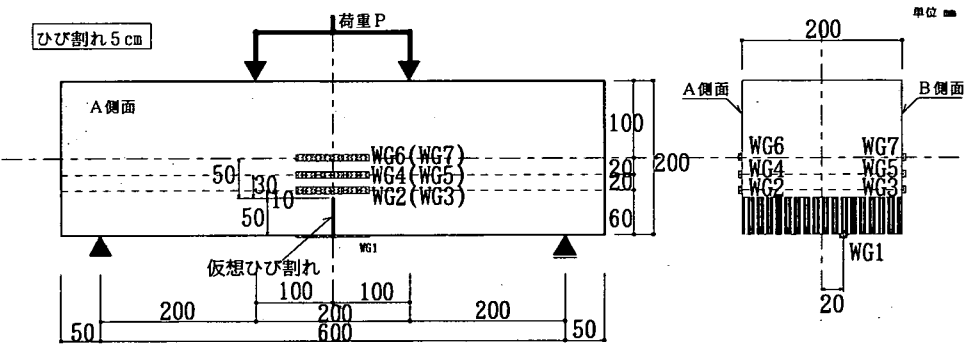


図 3 供試体形状および寸法

評価するため、模型実験を実施した。

(1) 試験体形状

試験体寸法は、幅 20×高さ 20×長さ 70cm とし、ひび割れ無し及び試験体中央載荷面下側にひび割れを模擬した厚さ 0.2mm テフロン板を挿入し、ひび割れ深さを 1cm、5cm と変えた計 3 種類の試験体 ($\sigma_{ck}=18\text{N/mm}^2$) を作製した (図 3)。

(2) 試験方法及び測定項目

試験体を水平に設置し、片側ピン、片側ローラー支持によるスパン 60cm の中央 2 点載荷 (20cm) とし、静的及び繰返し載荷の 2 種類の試験を行った。測定項目は載荷荷重、載荷点直下及び支点変位、試験体両側面 (ひび割

表 1 実験ケース

試験ケース		ひび割れ		載荷方法	載荷速度	備考
		無	有			
			1cm 5cm			
静的載荷	1	△		単調	毎分 0.8~1.0N/mm ²	△×3 ○×5 計 13 体
	2		○			
	3		○			
繰返し載荷	4	□		繰返し	5Hz	□×15 計 45 体
	5		□			
	6		□			

表 2 想定ひび割れ荷重

試験体	ひび割れ荷重 P_{cr} (kgf)	ひずみ ϵ_{cr} ($\times 10^{-6}$)	たわみ δ_{cr} (mm)	減少率		
				断面 $B \times D$ (cm ²)	I (cm ⁴)	Z (cm ³)
無し	3220 (1.0)	121 (1.00)	0.047 (1.00)	400 (1.00)	13333 (1.00)	1333 (1.0)
1cm	2905 (0.95)	121 (1.00)	0.049 (1.04)	380 (0.95)	11432 (0.86)	1203 (0.90)
5cm	1811 (0.56)	121 (1.00)	0.062 (1.32)	300 (0.75)	5625 (0.42)	750 (0.56)

れ有りの場合は、ひび割れ上部)及び
 び荷荷面下側に貼付したひずみゲ
 ージによるコンクリート表面のひずみ、
 繰返し回数とした。

最初に静的曲げ荷試験を行い、
 ひび割れの有無による最大荷重
 (P_{max})、破壊状況等の無筋コンク
 リートの性状についての確認を行った。
 その結果を踏まえ、疲労試験の荷
 荷重(上限荷重)を決定し、疲労試
 験を行った。疲労試験での荷荷振
 動数は5Hzとし、上限荷重は、 $\alpha \times P$
 $_{max}$ ($\alpha = 0.5 \sim 0.9$)、下限荷重 3.2kN
 とした。

実験ケースを表 1 に示
 す。

(3) 事前検討

試験に先立ち、ひび割
 れ発生荷重についての検
 討を行った。その結果を
 表 2 に示す。

(4) 試験結果

① 静的曲げ荷試験

試験結果の一例を図 4 に
 示す。

それらをまとめると以下
 のようになる。なお、全試
 験体が等曲げ区間で破壊し
 た(写真 1)。

- 1) 全試験体が、最大荷重
 (ひび割れ発生)に達
 すると同時に荷重を維
 持できずに、ひび割れ
 が進展し破壊に至った。
- 2) ひび割れ無しの試験体
 に比べ、ひび割れ深さ
 が 1cm、5cm と深くな
 るに従い最大荷重が小
 さくなり、かつ、破壊
 時のたわみ(供試体中
 央部)が大きくなる。
- 3) ひび割れ発生荷重は、
 実験値と計算値¹⁾が比
 較的良く近似した(表
 3 参照)。

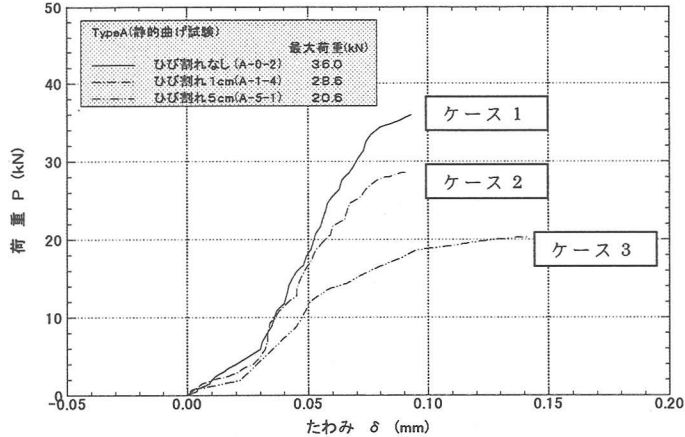


図 4 荷重と供試体中央部のたわみとの関係

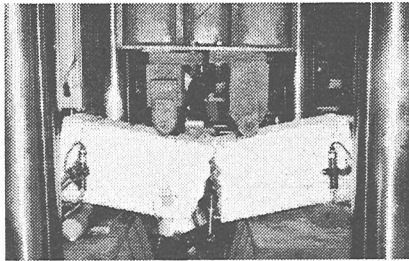


写真 1 静的曲げ試験状況

表 3 実験値と計算値との比較

ケース No	ひび 割れ	P_{max} 平均 値 (kN)	実験値 ／ 計算値
1	無し	37.5	1.03
2	1cm	28.5	0.87
3	5cm	20.4	1.00

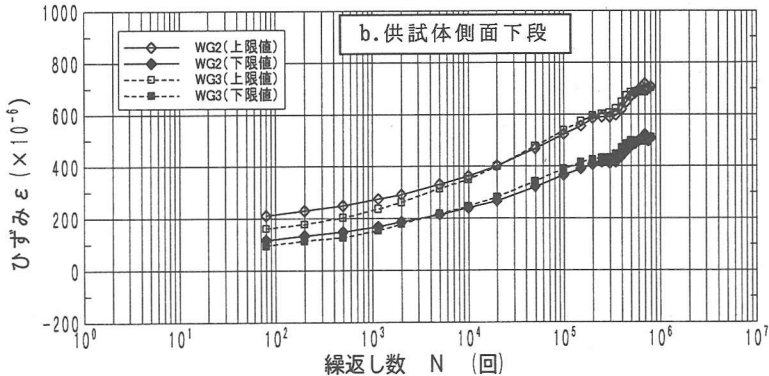
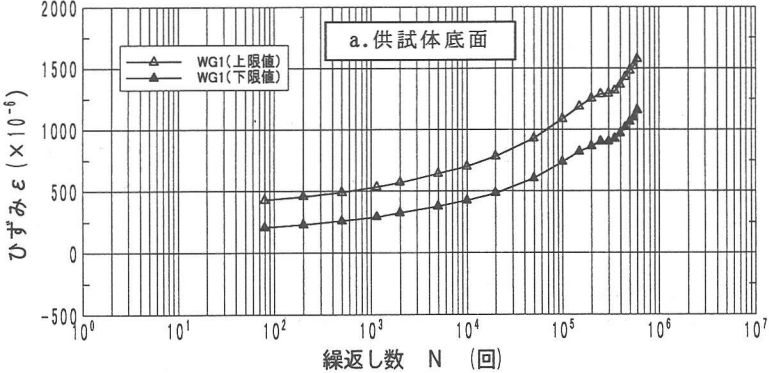


図 5(a) コンクリート表面のひずみと繰返し回数との関係

② 曲げ疲労試験

本試験結果を整理したもののうち、コンクリート表面のひずみと繰返し数の関係（ひび割れ深さ5cmの場合の1例、図中の記号は図3を参照）を図5に、破壊直前のひび割れ先端部の曲げ応力度と繰返し回数の関係を図6に示す。

疲労試験結果をまとめると以下ようになる。なお、全試験体が等曲げ区間で破壊した。

- 1) 繰返し回数が多くなるにつれ、ひずみが増加する傾向が確認された。すなわち、ひび割れが進展していることを示しており、疲労の影響が確認された。
- 2) 破壊した試験体は、ある繰返し回数に達すると同時に、荷重を維持できずに、急激にひび割れが進展し破壊に至った。

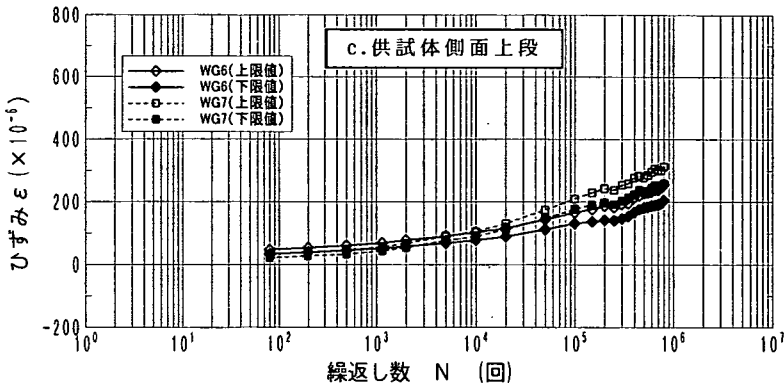


図 5(b) コンクリート表面のひずみと繰返し回数との関係

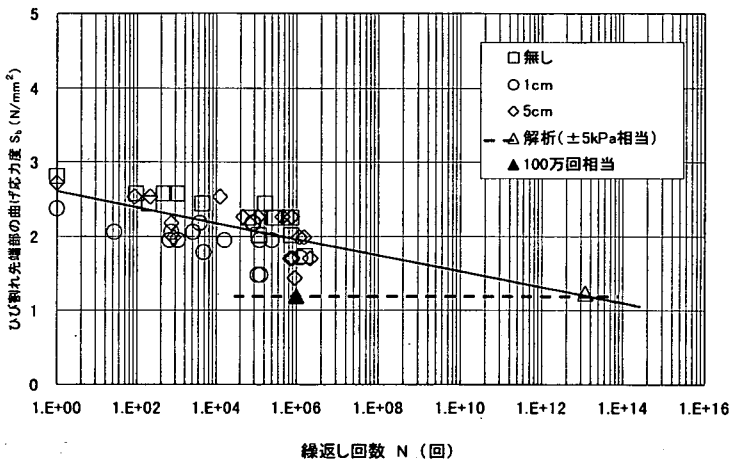


図 6 破壊直前のひび割れ先端の曲げ応力度と繰返し回数

4. FEM による検討

福岡トンネルでの剥落箇所のひび割れ先端部分での応力状態を弾性 FEM 解析により算出し、疲労試験における等価な載荷荷重を求め、疲労試験との比較を行った。

(1) 解析モデル

覆工剥落箇所および今回実施したひび割れ幅 5cm の試験体の 2 つをモデル化した。前者の解析モデルを図 7 に示す。

(2) 解析条件

解析は 2 次元弾性 FEM により行った。解析条件を表 4 に示す。ひび割れは 2 重節点によりモデル化を行った。

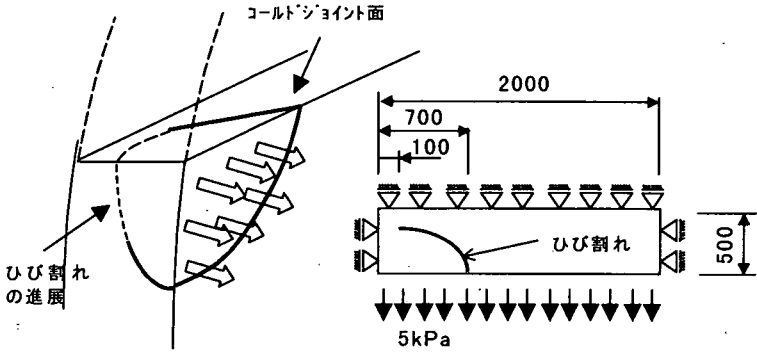


図 7 覆工剥落箇所の解析モデル

表 4 解析条件

	覆工剥落箇所モデル	試験体モデル
境界条件	3 辺固定、1 辺自由	固定、ローラー
荷重	0.05kgf/cm ²	1tf
弾性係数	2.1 × 10 ⁵ kgf/cm ²	
ポアソン比	0.2	
解析ケース	ひび割れ長 90 度	ひび割れ 5cm

(3) 解析結果

解析結果の例を図 8 に示す。

その結果、覆工剥落箇所モデルに空気圧変動 (5kPa) を作用させた時の初生的なひび割れ先端部で生じる引張応力に対し、試験体モデルのひび割れ 5cm の先端に生じる引張応力が等価となる疲労試験での載荷荷重 P は、3.78kN となった。(ひび割れ先端付近の応力はメッシュ割等により変化するので、実際にはひび割れ先端からある一定距離離れた箇所の応力を比較した。)

その等価荷重 ($P=3.78\text{kN}$) を作用させた時のひび割れ先端部の応力を図 6 中の点線で表す。実験結果は、いずれもこの直線より上にある。

5. 結 論

以上述べた疲労試験および FEM 解析結果から、以下の結論が導かれる。

- (1) ひび割れのない健全なトンネル覆工では、耐用期間 100 年 ($N=200$ 万回) 以上を想定しても列車走行に伴う空気圧変動による疲労の影響は考えられない。
- (2) トンネル覆工に多少のひび割れが生じていても、覆工の一体化した部分が広い場合には、空気圧変動に伴う疲労の影響は考えられず、ひび割れが広範囲に広がり、覆工の一体化した部分が非常に狭い場合には、空気圧変動による疲労の影響が生じるものと考えられる。

6. おわりに

無筋コンクリート覆工は、地山に囲まれたアーチ構造であり、顕著な構造欠陥がなければ、ひび割れが生じても軸力により十分安定した構造が維持される。このことは、過去の実績、模型実験、数値解析等^{3), 4)}においても実証されている。

今回、高速列車通過時の空気圧変動がトンネル覆工に与える疲労の影響は大きくないものの、ひび割れが広範囲に進展した状態では影響が生じ得ることが確認された。しかし、このようなひび割れの進展は、定期的な検査により確実に把握でき、剥落の可能性を除去できる。

今回の実験では、曲げに着目した検討を行ったが、ひび割れ部には曲げのみならず複合的な力が作用することも考えられるので、今後はひび割れ先端の応力状態を適切にモデル化し得る解析法を検討し、メカニズムの解明を試みたい。

【参考文献】

- 1) トンネル安全問題検討会報告書—事故の原因推定と今後の保守管理のあり方—、2000.2.28
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説
- 3) 朝倉俊弘、他：トンネル覆工の力学的挙動に関する基礎的研究、土木学会論文集、1994.6
- 4) 今田徹：コンクリート覆工の強度、トンネルと地下、1977.9

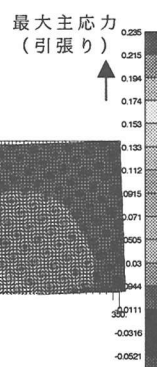


図 8(a) 試験体モデルの主応力

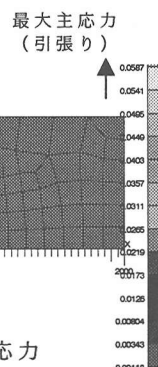


図 8(b) 覆工剥落箇所モデルの主応力