

# 報告 PC 鋼線用シースを利用した空気によるパイプクーリング工法

三厨晋也\*<sup>1</sup>・小坂寛巳\*<sup>2</sup>・山口正晃\*<sup>3</sup>・吉田光男\*<sup>4</sup>

要 旨：PC 構造物のマスコンクリート対策技術として、シースに冷却媒体として空気を通すパイプクーリング工法を開発した。ファンとパイプだけの簡単な設備でありながら、基礎試験により大きな効果が有ることが分かった。実構造物への適用も行い、温度ひび割れ制御に十分な効果を得ることができた。

キーワード：マスコンクリート、シース、パイプクーリング、新工法

## 1. はじめに

近年の土木構造物は大型化とともに、景観を重視した構造物が多くなってきている。また、都市域では、十分な作業空間を確保することが一段と難しくなってきた。高速湾岸線（5期）鳥浜地区・BY513工区（その2）高架橋新設工事はそういった条件下にあり、上下3車線の自動車専用道路で、景観を考慮した3径間連続PC箱桁ラーメン構造であった。図-1の橋脚断面図を見ても分かる通り、基礎は地中連続壁基礎、橋脚は下端を曲線的にデザインした横梁を有するウィングラス型、上部工は上下線分離の変断面PC箱桁であり、橋脚上で横梁と一体構造（柱頭部）になっている。また、横梁は張り出しが10m程度あるため、PC構造である。このため、図-2に示すように柱頭部は補強鉄筋とPCケーブルシースが極めて過密に配置され、梁高も高い。そこで、柱頭部に用いるコンクリートは次の3つの条件を有しなければならない。①プレストレストコンクリートであること。②締固め作業が非常に

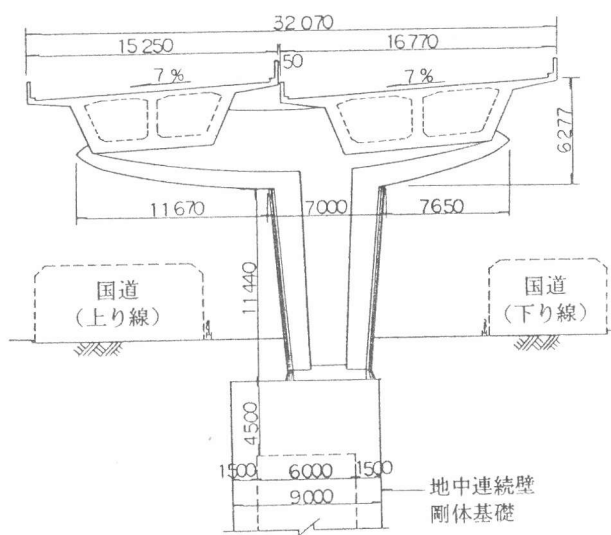


図-1 橋脚断面図

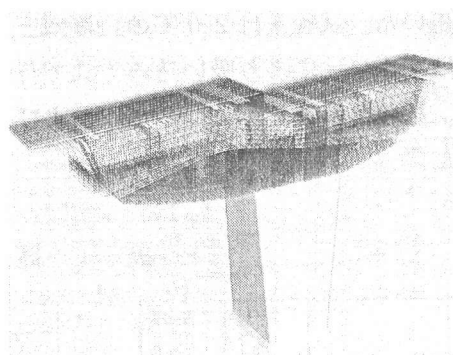


図-2 CGによる鉄筋・PC配置

- \* 1 三井建設（株）技術研究所、工修（正会員）
- \* 2 首都高速道路公団神奈川建設局設計課課長、工修（正会員）
- \* 3 首都高速道路公団神奈川建設局設計課、工修
- \* 4 三井建設（株）東京土木支店

困難と予測されるため、高流動コンクリートを採用すること。③本構造物は部材厚も大きく、②により富配合となるためマスコンクリート対策技術を必要とすること。ここでは、マスコンクリート対策の検討を述べる。マスコンクリートの対策技術は主に配合修正、プレクーリング工法、ポストクーリング工法に大別される。配合修正は①、②により制約された。プレクーリング工法は効果不十分とわかった。そして、当作業所は供用中の国道上にあるため、重厚な設備と完全な止水を要求される従来の水を使ったパイプクーリング工法は適しないと考えられた。そこで、シースに冷却媒体として空気を通すパイプクーリング工法を採用することにした。ファンとパイプだけの簡単な設備でありながら大きな効果を期待できると思われた。本工法を「シースクーリング工法」と定義した。本報告では、この基礎研究から実施工及び結果までを報告する。

## 2. 基礎試験

### 2. 1 室内試験

シースクーリング工法効力の有無を確認した。試験体形状を図-3に示す。試験体はコンクリート部で400×400×1400mm(22

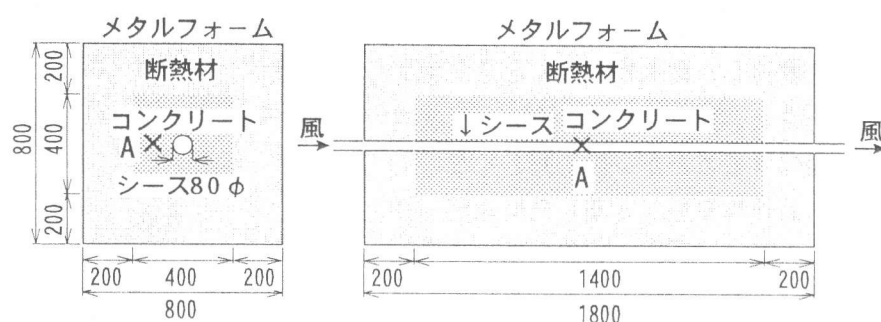


図-3 試験体形状

40)とし、それに内径80mmのシース1本を通し、全面を厚さ200mmの断熱材とメタルフォームで覆った。室内試験で用いたコンクリートの配合を表-1に示す。実施工での配合も併せて示す。実施工では、入手の容易さとマスコンクリート対策を必要とすることから、シースクーリング工法の適用を前提として高炉セメントB種を用いることにした。使用骨材の違う2プラントから出荷したため、2つの配合となっている。室内試験では実施工にあわせて高炉セメントB種を用いた。試験室は20℃の恒温室とした。シース入口での空気温度を約20℃とするために、風はブロワーにより吸い込み方式で与えた。送風はコンクリート打設直前から試験終了まで続けた。試験は風速0, 2, 7.5 および15m/sの4水準で行った。各打設温度は20±3℃とした。

表-1 高流動コンクリート配合

|        | W/C<br>[%] | s/a<br>[%] | Air<br>[%] | 単位量 [kg/m³] |     |     |     | SP<br>[C×wt%] | AE<br>[C×wt%] |
|--------|------------|------------|------------|-------------|-----|-----|-----|---------------|---------------|
|        |            |            |            | C           | W   | S   | G   |               |               |
| 室内試験配合 | 33.4       | 50.0       | 4.5        | 500         | 167 | 814 | 839 | 1.50          | 0.004         |
| 実施工配合A | 35.0       | 51.4       | 5.0        | 470         | 165 | 829 | 828 | 1.80          | 0.004         |
| 実施工配合B | 34.5       | 41.9       | 5.0        | 474         | 163 | 687 | 994 | 1.85          | 0.005         |

C : 高炉セメントB種 [比重3.04] SP : 高性能AE減水剤 AE : AE助剤  
 室内試験... S : 鬼怒川産川砂 [比重2.61] , G : 笠間産碎石 [比重2.70]  
 実施工配合A... S : 君津産山砂 [比重2.56] , G : 美祢市産碎石 [比重2.70]  
 実施工配合B... S : 君津産山砂 [比重2.60] , G : 津久見産碎石 [比重2.71]

各風速での温度上昇量の経時変化を図-4に示す。最大温度上昇量は、無風で約55℃であるのに対し、2 m/sで約35℃、7.5 m/sで約28℃、15 m/sで約25℃であった。シースクーリング工法に効力があることを確認できた。次に、2次元FEM非定常伝熱解析におけるシースクーリング効果の表現を検討した。シースクーリング効果の表現方法是对流熱伝達とし、式(1)で与えた。すなわち、熱伝達率を定

$$Q = k \Delta T \quad \dots (1)$$

[Q: 熱量, k: 熱伝達率,  $\Delta T$ : 温度差]

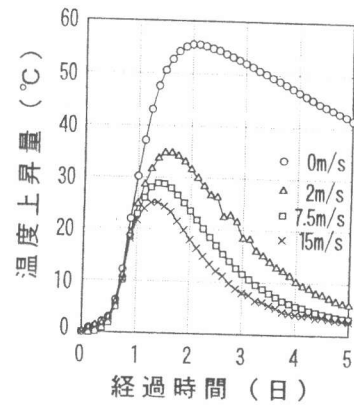


図-4 各風速の温度上昇量

める必要があった。土木学会標準示方書(施工編)における通常コンクリートの露出面での値から各風速の熱伝達率を設定し、室内試験の非定常伝熱解析を行い、計測値と解析値を比較した。図-5に測点Aにおける各風速の計測および解析の温度上昇量最大値を示す。計測値と解析値は各風速でほぼ一致した。すなわち、シースクーリングの熱伝達率は土木学会標準示方書の値を用いて良いとわかった。

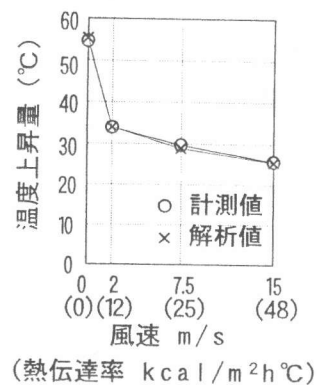


図-5 計測値と解析値の比較

## 2.2 模擬試験

式(1)における $\Delta T$ はコンクリートとシース内空气の温度差を表す。すなわち、吸い込む空气の温度がクーリング温度に影響を及ぼすことが推測された。そこで、前述の室内試験モデルを用いて、空气温度を10℃、20℃、30℃として解析した。その結果、最大温度上昇量は、空气温度10℃で約25℃、20℃で約32℃、30℃で約38℃となった。空气温度管理が重要であると分かった。また、空气は比熱が小さいため、風速が遅い、またはコンクリート温度が極

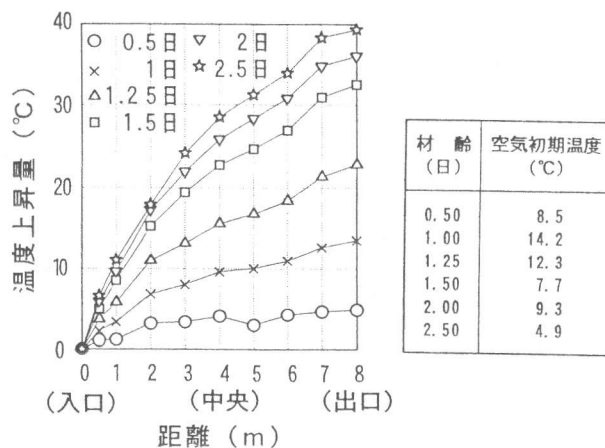


図-6 空气の温度上昇量分布

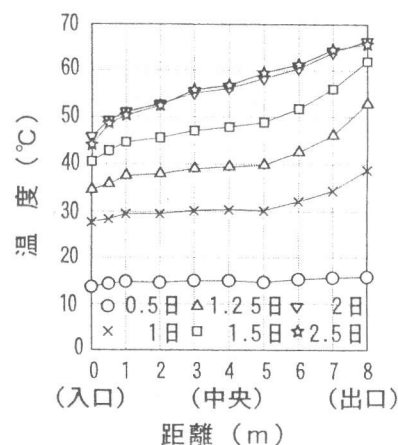


図-7 コンクリートの温度上昇量分布

めて高かった場合、空気温度がシース通過途中でコンクリート温度と等価となり、効力が消失する可能性がある。そこで、室内試験体と同形状で大きな試験体により確認を行った。試験体はコンクリート部で $600 \times 600 \times 8000 \text{ mm}$ とした以外は、ほぼ室内試験と同様とした。試験は室外で行った。風速 $2 \sim 3 \text{ m/s}$ を設定した。コンクリートは実施工での配合とほぼ同じとした。材齢ごとの空気の温度上昇量分布を図-6に示す。コンクリートのそれを図-7に示す。測点は室内試験測点Aと同位置である。空気温度は急上昇し、それに伴いコンクリート温度に勾配ができた。これにより空気温度とコンクリート温度が相互に影響を受けることがわかった。実施工では、一方からのみ風を通すと、入口と出口では効力差が生じると思われたため、構造物両端から同じ本数だけ同じ風速を与え、内部の温度勾配を平均化させるのがよいとわかった。また、大きな空気温度上昇が見られたが、コンクリート温度と等価にはならなかった。

### 3. 実施工

#### 3.1 施工方針の検討

各試験結果を用いて、実構造物の2次元FEMによる非定常伝熱解析および熱応力解析を行った。解析モデルを図-8に示す。非定常伝熱解析は柱中心軸の断面で行った。熱応力解析は、橋軸方向断面で行った。熱応力解析での温度分布履歴には非定常伝熱解析結果を橋軸方向に平均化した値を要素別に与えた。シース60本、風速 $15 \text{ m/s}$ （熱伝達率： $48 \text{ kcal/m}^2\text{h}^\circ\text{C}$ ）とした。シース内の空気温度上昇は、模擬試験結

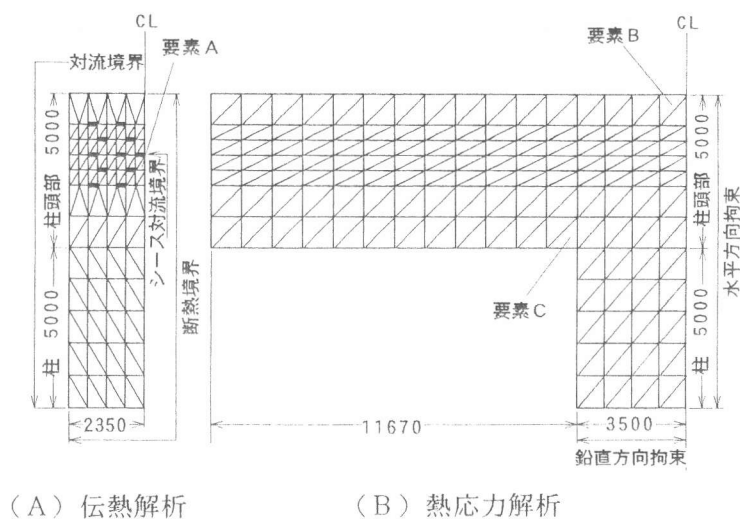


図-8 解析モデル

果より推測した。打設温度は $10.3^\circ\text{C}$ と設定した。温度ひび割れ指数は $1.2$ 以上を目標とした。シースクーリング無し・有りの解析結果を比較した。要素Aにおいて、無しでは最大約 $71^\circ\text{C}$ であったのに対し、有りでは約 $43^\circ\text{C}$ であった。大きな温度低減効果を確認できた。温度ひび割れ発生の予測は、内部拘束または外部拘束によるものに分けて検討した。要素B、要素Cは内部拘束によるひび割れが懸念された要素である。クーリング無しでは温度ひび割れ指数がそれぞれ $1.0$ および $0.9$ であったのに対し、クーリングを行った場合にはそれぞれ $2.1$ 、 $2.6$ と改善された。よって、実施工では風速 $15 \text{ m/s}$ をシース60本に与えることにした。この解析では送風期間を無限としていたため、送風期間の検討を行った結果、温度ひび割れ指数 $1.2$ 以上を満足する送風期間は $3.5$ 日間となった。外部拘束によるひび割れは、シースクーリング工法の適用では改善されず、発生は $14$ 日となったが、それ以前のプレストレスの導入によって解決できると考えた。以上より定めた施工方針をまとめると以下の通りとなる。

- ① 両端から30本ずつ計60本のシースに風速 $15 \text{ m/s}$ を与える。
- ② 送風期間は $3.5$ 日間とする。
- ③ プレストレスの導入は、打設終了後 $14$ 日目以前に行う。

### 3. 2 施工設備

施工設備を図-9に示す。クーリングの対象としたシースは中央部60本とし、左右千鳥配置で引き込み口を設置した。左右30本のパイプをファンに集め、シースの入口で風速が15m/sとなるように吸引した。また、配管途中にダンパーを設けることにより風量の微調整を行えるようにした。温度、応力等を計測し、不都合が生じれば制御することにした。

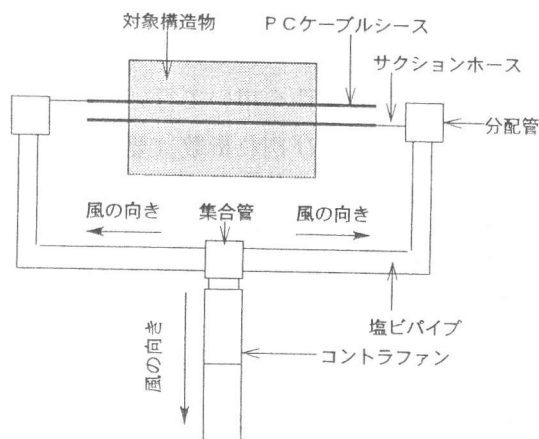
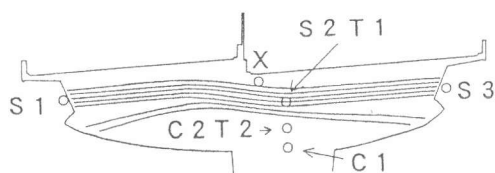


図-9 施工設備

### 3. 3 施工結果

実施工では温度や風速等の計測を行った。測点を図-10に示す。風速の計測値を図-11に示す。送風は打設直後から開始した。風速を抑えたこともあったが、3.5日間送風した。コンクリート温度の例を図-12に示す。クーリング無しの解析結果も併せて示す。T1では解析上クーリング無しの場合はピーク温度が約80℃まで達するのに対して、計測は約49℃であり、



S1, S2, S3 : シース内温度  
X : コンクリート温度、応力  
T1, T2 : コンクリート温度  
C1, C2 : コンクリートひずみ

図-10 測点

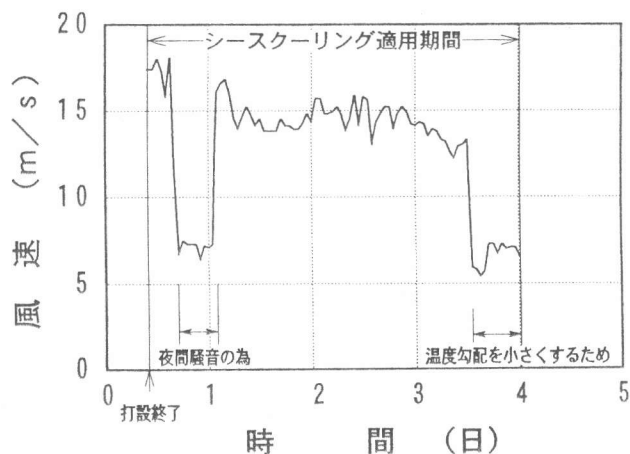


図-11 風速の計測値

約31℃低減された。本工法適用による効果を確認できた。また、表面付近Xで最高52℃、中心部T2で最高72℃であった。図-11で温度勾配を小さくするために風速を小さくした。それは著しく温度が低下したT1とT2の温度勾配を小さくするためであった。シース内の空気温度を図-13に示す。S1は外気温に相当する。S2は中央部、S3は出口である。中央部で最大14℃平均11℃上昇し、出口で最大21℃平均17℃

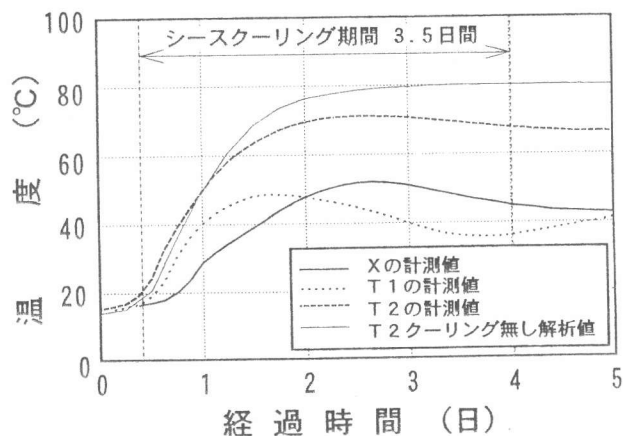


図-12 コンクリート温度 (X, T1, T2)

上昇した。表面近くXでの応力の計測値を図-14に示す。解析値も併せて示す。解析は実施工時の条件を用いて行い、内部拘束による温度ひび割れ指数は要素B、Cで、それぞれ1.5および2.0であり、1.2以上を満足した。初期にはシースクーリングの適用によって圧縮応力が発生した。シースクーリングの効果により、図-12に示したように表面付近Xの温度が内部T1よりも高くなったためである。クーリング終了後は応力が反転し、引張応力が増加し、最大引張応力は $11 \text{ kgf/cm}^2$ であった。6日以降の応力が横ばいになっているのは床版部PC鋼線の横締めが行われたためと思われる。9日以降はシースクーリングに利用した梁部の緊張により急激に応力が圧縮側に転じた。また、外部拘束によるひび割れの発生が懸念された部分でのひずみ測定値から推測した応力を図-15に示す。それぞれプレストレスの導入により、圧縮応力が増加した。それぞれ、およそ5日目以降圧縮側にあり、解析上14日目に発生すると予想された外部拘束による温度ひび割れは無いことを確認できた。また、ひび割れ調査において、有害と思われる温度ひび割れの発生は認められなかった。

#### 4. まとめ

冷却媒体に空気を使用したシースクーリング工法では、施工設備がファンとパイプと簡易となり、さらに、大きな冷却効果を得ることが実証された。しかし、空気であるが故に温度管理等が難しいことがわかった。シースクーリング工法は風速を上げ、風を通すシースを増し、空気の初期温度を低くすることによって能力を上げることができ、様々な状況にも対応できることがわかった。また、本工法はPC構造物に対してしか利用できないわけではなく、他の構造物にも同様に管を通し、風を送れば冷却が可能であり、汎用性も兼ね備えているものと考えられる。

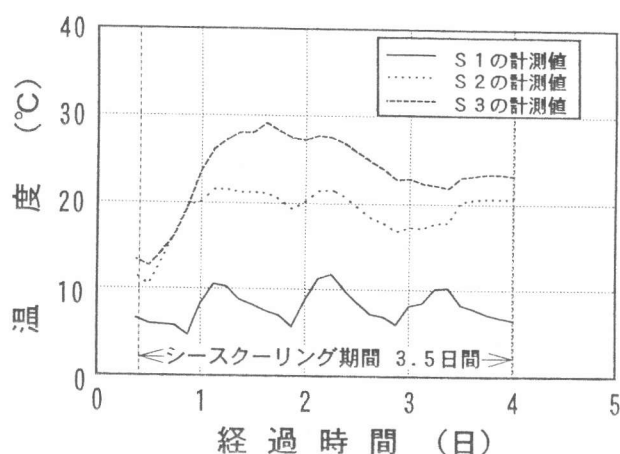


図-13 シース内空気温度 (S1, S2, S3)

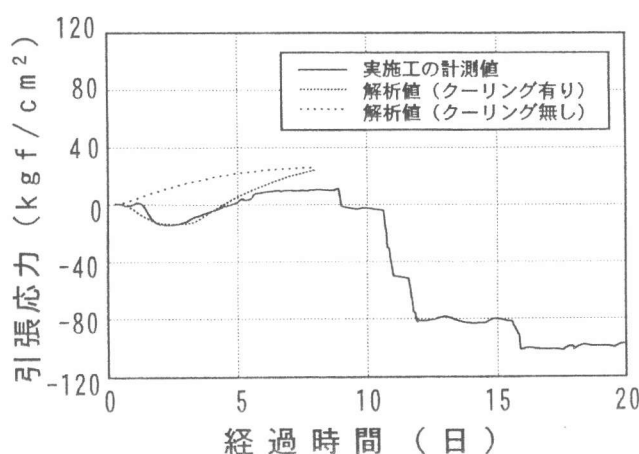


図-14 表面近くでの応力 (X)

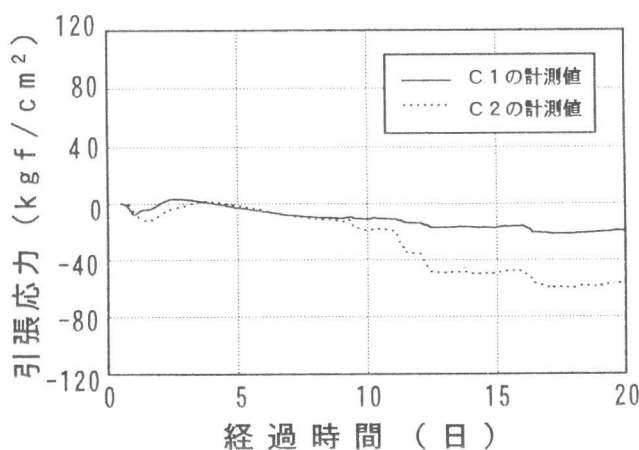


図-15 中心部での応力 (C1, C2)