

コンクリート円形圧力水路の構造設計と適用可能水圧

目次

| | | |
|------|---|----|
| 1. | 概要 | 1 |
| 2. | 構造設計の考え方 | 1 |
| 2.1 | 基本思想 | 1 |
| 2.2 | 覆工厚 | 2 |
| 2.3 | 鉄筋量 | 2 |
| 2.4 | ひび割れ幅算定式と許容ひび割れ幅 | 2 |
| 3. | モデル断面によるコンクリート円形圧力水路の挙動予測 | 4 |
| 3.1 | 検討概要 | 4 |
| 3.2 | 試設計用断面設定 | 4 |
| 3.3 | 採用断面 | 4 |
| 3.4 | 解析モデル | 5 |
| 3.5 | 解析ケース | 10 |
| 3.6 | 熱伝導解析結果 | 10 |
| 3.7 | 応力解析結果 | 13 |
| 4. | 適用限界内水圧の算定 | 20 |
| 4.1 | 適用限界内水圧算定結果 | 20 |
| 4.2 | グラウトによるプレストレス効果の試算 | 21 |
| 4.3 | 温度分布を簡略化した場合の影響 | 23 |
| 5. | まとめ | 26 |
| 付録 A | ひび割れ幅算定式と許容ひび割れ幅 | 27 |
| A.1 | ACI 224R-80 (Revised 1984) Control of Cracking in Concrete Structures | 27 |
| A.2 | STANDARD SPECIFICATIONS FOR CONCRETE STRUCTURES-2007, Design : JSCE | 28 |
| 付録 B | 岩盤の温度応力解析用物性値の事例 | 29 |
| 付録 C | 既往実績の例 | 29 |
| 付録 D | 導放水路の配筋事例 | 30 |
| 付録 E | 導放水路のコンソリデーショングラウチング設計事例 | 30 |

1. 概要

圧力水路には、圧力水（内水圧・地山からの外水圧）に対する構造的安全性と止水性が要求される。このため、作用水圧にもよるが、一般には、覆工を鉄筋コンクリート構造とし、水路外周部をコンソリデーショングラウトングにより改良する構造がとられる。また断面形状は、応力的に有利となる円形断面が採用されることが多い。ここでは、内水圧と水温変化を考慮したコンクリート円形圧力水路の構造設計の事例と適用限界水圧算定結果について述べる。

2. 構造設計の考え方

2.1 基本思想

① 内水圧に対する安全性確保

- 圧力水路では、覆工コンクリートへのひび割れ発生を前提とし、内水圧による発生応力は鉄筋が負担し、鉄筋の発生応力が、所定の応力を超過しないものとする。
- コンクリートのひび割れ幅は、鉄筋の腐食防止のために要求されるひび割れ幅の制限値を超過しないものとする。
- 圧力水路の応力計算においては、周辺岩盤による拘束効果を考慮する。
- 周辺岩盤による拘束効果は、通常、岩盤の弾性係数により評価し、岩盤弾性係数は平板載荷試験や弾性波速度測定結果より推定する。

② 止水性の確保

- 圧力水路としての止水性を考慮し、必要範囲を水路全長にわたりコンソリデーショングラウト工により改良する。
- コンソリデーショングラウト工による改良範囲は、通常、掘削により緩んだ領域とする。
- 掘削による緩み領域とは、応力開放による緩み、発破による緩み双方を指し、弾性波速度測定結果等により判断する。

③ 外水圧に対する安全性確保

- 外水圧に対しては、覆工の全断面（コンクリート及び鉄筋）でこれを支持する。
- 外水圧の大きさは、地山被り、地表ボーリングによる地下水位測定結果、トンネル内ボーリングによる間隙水圧測定結果等より評価する。

④ 特殊設計

- 外水圧が存在せず、また止水性に対する性能確保に万全を期す場合は、内張管を設置する。
- 外水圧が内圧より高いことが明らかな場合は、鉄筋量は最小鉄筋量とし、必要に応じて水抜工の実施、覆工厚の増加、高強度コンクリートの採用などの措置を講じる。ただしコンソリデーショングラウト工は、水路抜水時の高い導水勾配発生を防止する（パイピング防止など）ため省略しない。

⑤ 補足説明

- 弱層部においても、覆工厚・鉄筋量の増加、入念なグラウト工の実施、内張管設置などにより、一般部と同等の安全性を確保する。
- コンソリデーショングラウト工は、水路周辺の止水性の改善を主目的とするため、注入圧力は原則として作用内水圧以上とし、注入効率を高めるため、覆工や周辺地山に悪影響を与えない範囲で高圧とするほうが良い。
- コンソリデーショングラウト工による圧力注入により、覆工にプレストレス（事前圧縮力）を導入する効果も期待できる。このプレストレスは、将来に亘って保持し続けられるかという議論もあるが、ひび割れ発生を遅らせる効果は期待できるため、設計注入圧力はプレストレス効果を考慮して定める場合もある。
- コンソリデーショングラウト工を行いながらも、圧力水路の構造を鉄筋コンクリートとしている理由は以下を考慮していることによる。

- プレストレス導入により理論的に無筋構造とできるが、経時的にプレストレスが減少することは避けられず、これに伴いひび割れ発生リスクは増大する。
- 良好な施工を行ったとしても、充排水の繰り返しによる環境変動の中で、将来的に全くひび割れが発生しないことを保証する根拠が乏しい。

2.2 覆工厚

日本国内における圧力導水路・放水路の内径と覆工厚の関係を下図に示す。(出典：「(社)電力土木技術協会=編：電力施設地下構造物の設計と施工，1986.3」に加筆)

水路内径が大きくなると覆工厚は大きくなる傾向にはあるが、ばらつきは大きい。覆工厚は 400~600mm の間のものが多く、力学的必要性よりは、鉄筋組立やコンクリート締め固めなどの施工性により選択されているものが多いと考えられる。

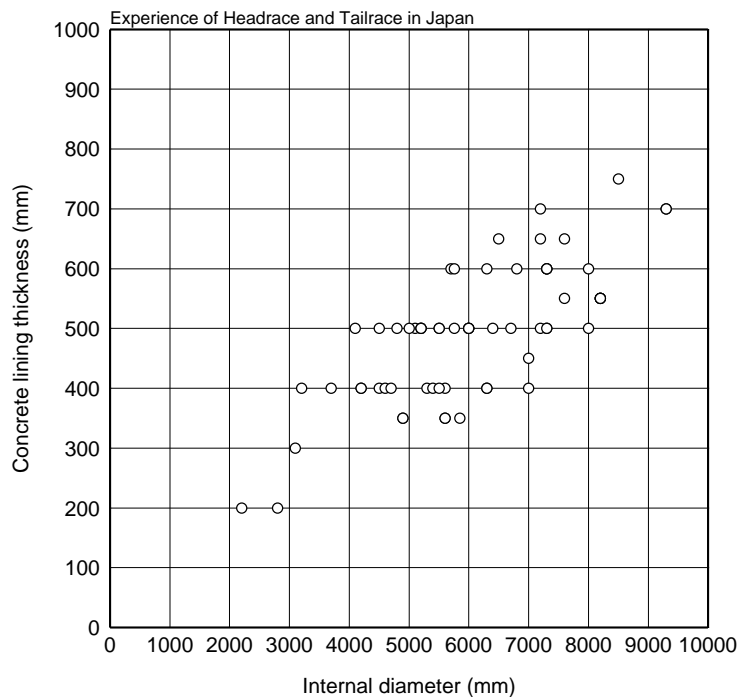


図1 圧力導・放水路の内径と覆工厚の関係の実績

2.3 鉄筋量

鉄筋量は、2007年制定 コンクリート標準示方書 [設計編：標準](5編 10章) 「シェルの配筋」に従い、以下の条件を満足するよう定める。

| | |
|---------|--------------------------|
| 主鉄筋中心間隔 | 部材厚さの2倍以下かつ300mm以下とする |
| 主鉄筋断面積 | コンクリート断面積の0.25%以上5%以下とする |
| 配力鉄筋断面積 | 主鉄筋断面積の1/4以上とする |

2.4 ひび割れ幅算定式と許容ひび割れ幅

(1) ひび割れ幅算定式

ひび割れ幅は、以下の式にて算定する。この式は、アメリカ合衆国 ACI 224R-80 (Revised 1984) による純引張を受ける場合のひび割れ幅算定式を、SI 単位に換算したものである。

$$w' = 0.0145 \cdot f'_s \cdot (d'_c \cdot A')^{1/3} \times 10^{-3} \quad (1)$$

w' = ひび割れ幅 (mm)

f'_s = 鉄筋応力 (MPa)

d'_c = 鉄筋中心と引張縁の距離 (mm)

A' = 鉄筋 1 本が分担するコンクリート断面積 (mm^2)

(2) 許容ひび割れ幅

許容ひび割れ幅は、以下に示す、日本国土木学会：2007年制定 コンクリート標準示方書 [設計編：本編] 8.3.2 によるひび割れ幅の限界値のうち、「一般の場合」により定める。

本来圧力水路は水密性が要求される構造物であるが、水密性は水路外周に行われるコンソリデーショングラウチングにより確保するため、ひび割れ幅の許容値は、「鋼材の腐食に対する環境のうち一般の環境によるもの」とした。

表 1 鋼材の腐食に対するひび割れ幅の限界値 (mm)

| 鋼材の腐食に対する環境条件 | | |
|---------------|--------|------------|
| 一般の環境 | 腐食性環境 | 特に厳しい腐食性環境 |
| 0.005c | 0.004c | 0.0035c |

注) c : かぶり (100mm 以下)

3. モデル断面によるコンクリート円形圧力水路の挙動予測

3.1 検討概要

- 圧力水路に作用する荷重は、内水圧・外水圧・温度荷重であるが、ここでは内水圧と温度荷重を受ける円形圧力水路を対象として、FEM を用いた挙動予測を行った。
- 水路内の温度変化量は、既往設計事例に基づき設定し、水路および岩盤内の温度分布を二次元熱伝導解析より推定した。
- 温度変化量および内水圧を荷重として、二次元応力解析を行い、応力状態を推定した。
- 具体的検討手順は以下のとおり。
 - ① 断面設定
 - ② 物性値設定
 - ④ 解析モデル・解析ケース設定
 - ⑤ 水路覆工および岩盤内温度分布の推定 (二次元熱伝導解析)
 - ⑥ 内水圧のみを荷重とした場合の応力状態の推定 (二次元応力解析)
 - ⑦ 内水圧および温度変化量を加重とした場合の応力状態の推定 (二次元応力解析)
 - ⑧ 温度変化のみが作用する場合の応力状態の推定 (⑤-④による)
 - ⑨ 温度応力と岩盤弾性係数に着目した挙動の考察
- ここで鉄筋を有する覆工のコンクリートは No-tension 材料としており、荷重が温度低下のみでは応力値が収束しないため、上述の⑥⑦⑧のステップを踏んでいる。No-tension 材料を扱う場合、有限要素法においては収束計算が必要となるが、力学モデルとしては二次元平面要素を 1 方向剛性のみを有するパネに置き換えるだけである。よって構造系は、重ね合わせの原理が適用可能な線形系として扱って問題ない。

3.2 試設計用断面設定

3.3 採用断面

ここでは、試設計用として、既往実績を参考に、以下の設計諸元の断面を採用する。

コンクリートおよび鉄筋の物性値は、2007 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編：本編] に従い、標準値を用いる。岩盤物性については、弾性係数はパラメータとして変化させることとし、その他物性については、TEPCO 実績を参考に定めた。

なお、鉄筋腐食防止のための限界ひび割れ幅および限界ひび割れ幅となる時の鉄筋応力 (限界鉄筋応力) は、設計諸元より ACI の方法に従い定めたものである。

表 2 採用断面の寸法諸元と材料の力学特性

| 断面区分 | | 最大鉄筋断面 | 最小鉄筋断面 |
|-------------|--------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 寸法特性 | 水路内径 | 8,000 mm | 8,000 mm |
| | 覆工厚 | 800 mm | 600 mm |
| | 内側主鉄筋 | D32@200 mm | D25@250 mm |
| | 外側主鉄筋 | D32@200 mm | — |
| | かぶり | 100 mm | 100 mm |
| | 全鉄筋量 | 7,942 mm ² /m | 2,027 mm ² /m |
| | 鉄筋比 (全断面) | 0.99 % | 0.34 % |
| 材料の 力学特性 | コンクリート設計基準強度 | 24 N/mm ² | 24 N/mm ² |
| | コンクリート引張強度 | 1.91 N/mm ² | 1.91 N/mm ² |
| | コンクリート弾性係数 | 25,000 N/mm ² | 25,000 N/mm ² |
| | コンクリートポアソン比 | 0.2 | 0.2 |
| | コンクリート熱膨張係数 | 10×10 ⁻⁶ °C ⁻¹ | 10×10 ⁻⁶ °C ⁻¹ |
| | 鉄筋降伏強度 | 345 N/mm ² | 345N/mm ² |
| | 鉄筋弾性係数 | 200,000 N/mm ² | 200,000 N/mm ² |
| | 鉄筋熱膨張係数 | 10×10 ⁻⁶ °C ⁻¹ | 10×10 ⁻⁶ °C ⁻¹ |
| | 限界ひび割れ幅 | 0.5 mm | 0.5 mm |
| | 限界鉄筋応力 | 172 N/mm ² | 140 N/mm ² |

コンクリートの引張強度

コンクリートの引張強度 f_{tk} は以下の式より設定している。

$$f_{tk} = 0.23 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad \text{ここに, } f_{ck} \text{ は設計基準強度}$$

限界ひび割れ幅と限界鉄筋応力

限界ひび割れ幅は、JSCE：コンクリート標準示方書により、限界鉄筋応力は、ACI 224R-80 により、以下のとおり設定している。

| | |
|--------------------------|---|
| 限界ひび割れ幅 | $w' = 0.5 \text{ mm}$ (かぶり $c = 100 \text{ mm}$: かぶりの 0.5%) |
| 鉄筋中心と引張縁との距離 | $d'_c = 100 \text{ mm}$ (近似的にかぶりと等しく設定) |
| 鉄筋 1 本が負担する コンクリート断面積 | 覆工厚 800 mm, 鉄筋 D32@200x2 の場合, $A' = 80,000 \text{ mm}^2$ (200x800/2) 覆工厚 600 mm, 鉄筋 D25@250x1 の場合, $A' = 150,000 \text{ mm}^2$ (250x600) |

限界鉄筋応力 f'_s 算定式は ACI に基づく以下の式による。

$$f'_s = \frac{w' \times 10^3}{0.0145(d'_c \cdot A')^{1/3}}$$

| 覆工厚 | 鉄筋 | w' (mm) | d'_c (mm) | A' (mm ²) | f'_s (N/mm ²) |
|--------|-----------|-----------|-------------|-------------------------|-----------------------------|
| 800 mm | D32@200x2 | 0.5 | 100 | 80,000 | 172 |
| 600 mm | D25@250x1 | 0.5 | 100 | 150,000 | 140 |

3.4 解析モデル

(1) 概要

- 水路モデルは、最大鉄筋断面、最小鉄筋断面、およびこれらより鉄筋を削除した無筋コンクリート断面の 4 断面とする。
- 熱伝導解析・応力解析共、解析モデルは二次元断面モデルとし、単純化のため水路断面は円形・一定覆工断面とする。

- またモデル化範囲は、解析条件の対称性を考慮し、水路覆工-岩盤系の 1/4 モデルとする。
- 熱伝導解析結果における温度変化量を応力解析モデルに引き継ぐため、熱伝導解析と応力解析では同一要素分割を用いる。
- 鉄筋コンクリート構造におけるコンクリートは No-tension 材料とする。
- 鉄筋は等価な板厚の鉄板に置き換えてモデル化する。
- 鉄筋位置 (鉄板位置) は覆工内面および外面からのかぶりを考慮した位置に配置する。
- 熱伝導解析においては鉄筋は断面が小さいためモデル化しない。
- 熱伝導解析の境界条件は、水路覆工内面を温度指定境界 (温度時系列付与) とし、その他を断熱境界とする。
- 応力解析の境界条件は、水路覆工内面を拘束無し (荷重付与) とし、水平面は鉛直変位拘束、鉛直面は水平変位拘束、岩盤外周面は水平・鉛直変位拘束境界とする。

(2) 熱伝導解析モデル

コンクリートの熱物性値は、2007 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編：本編] に従い、標準値を用いている。岩盤の熱物性については、TEPCO 設計実績を参考に定めた。なお、鉄筋は断面積が小さく温度分布に与える影響は小さいことからモデルからは省略した。

表 3 熱伝導解析モデル概要

| モデル | 覆工厚 800mm | 覆工厚 600mm |
|------|---------------|-----------|
| 水路内径 | 8,000mm | |
| 岩盤 | 外縁半径 50,000mm | |
| 覆工厚 | 800mm | 600mm |
| 初期温度 | 全節点 10°C | |

注) 鉄筋は断面積が小さいため省略。

表 4 熱伝導解析用入力物性値

| 特性 | 単位質量 kg/mm ³ | 熱伝導率 kJ/(mm day °C) | 比熱 kJ/(kg °C) |
|--------|----------------------------|------------------------|------------------|
| 岩盤 | 2,700/10 ⁹ | 0.288 | 0.80 |
| コンクリート | 2,350/10 ⁹ | 0.221 | 1.05 |

(3) 応力解析モデル

複鉄筋断面および単鉄筋断面においては、コンクリートにひび割れが生じることを前提に、コンクリートを No-tension 材料とした。無筋断面においては、コンクリートにひび割れを生じないことを前提に、コンクリートを完全弾性体 (強度制限無しの弾性体) とした。

表 5 応力解析モデル概要

| モデル | 複鉄筋断面 D32@200x2 | 単鉄筋断面 D25@250x1 | 無筋断面 厚さ 800mm | 無筋断面 厚さ 600mm |
|-------------|---------------------------|--------------------|------------------|------------------|
| 水路内径 | 8,000mm | | | |
| 岩盤 | 外縁半径 50,000mm | | | |
| 覆工厚 | 800mm | 600mm | 800mm | 600mm |
| コンクリート | No-tension | No-tension | 完全弾性体 | 完全弾性体 |
| 内側鉄筋 (等価板厚) | 3.971mm | 2.027mm | - | - |
| 外側鉄筋 (等価板厚) | 3.971mm | - | - | - |
| 内水圧 | 1MPa | | | |
| 温度変化量 | 熱伝導解析結果による (内壁温度低下量 10°C) | | | |

注) 内側鉄筋・外側鉄筋共, かぶり厚は 100mm とする。

鉄筋の等価板厚の求め方

D32@200 mm 公称直径 $\phi = 31.8\text{mm}$ より $t = (\pi * 31.8^2 / 4 * 5) / 1000 = 3.971\text{mm}$

D25@250 mm 公称直径 $\phi = 25.4\text{mm}$ より $t = (\pi * 25.4^2 / 4 * 4) / 1000 = 2.027\text{mm}$

表 6 応力解析用入力物性値

| 項目 | 特性 | 弾性係数 N/mm ² | ポアソン比 | 熱膨張係数 (°C) ⁻¹ |
|------------------|------------------|---------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| 岩盤 | 完全弾性体 | 1~100,000 | 0.25 | 7×10^{-6} |
| コンクリート (鉄筋有り) | No-tension 材料 | 25,000 | 0.20 (圧縮時) 0 (No-tension 時) | 10×10^{-6} |
| コンクリート (鉄筋無し) | 完全弾性体 | 25,000 | 0.20 | 10×10^{-6} |
| 鉄筋 | 完全弾性体 | 200,000 | 0.30 | 10×10^{-6} |

コンクリートのポアソン比について

コンクリートを No-tension 材料として扱った場合のポアソン比については、2007 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編：本編]5.2.6 に従い、「引張を受けひび割れを許容する場合」として 0 を採用している。弾性範囲内 (No-tension としない場合) は標準値の 0.20 とした。

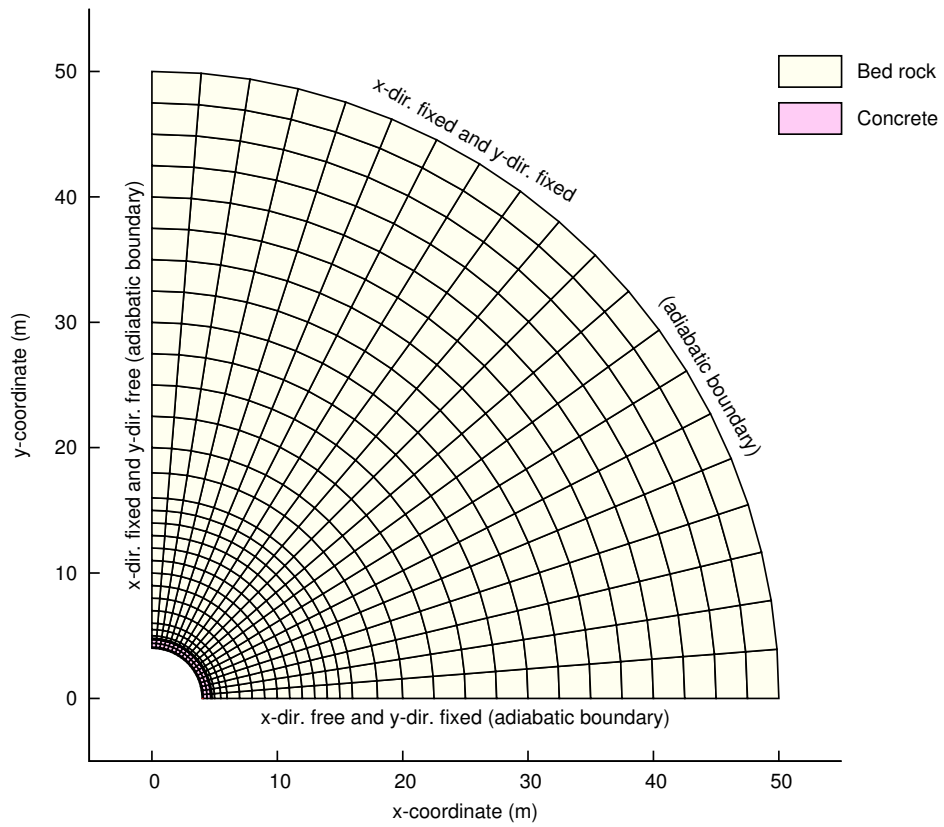


図 2 解析モデル要素図 (全体：最大鉄筋断面，覆工厚 800mm)

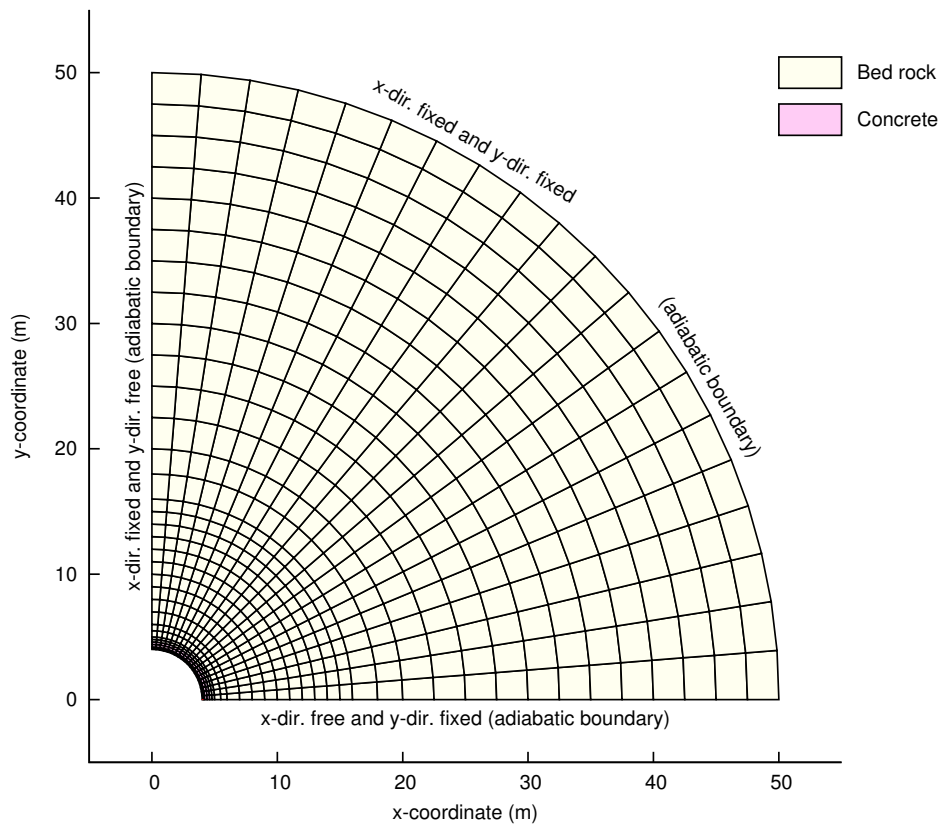


図 3 解析モデル要素図 (全体：最小鉄筋断面，覆工厚 800mm)

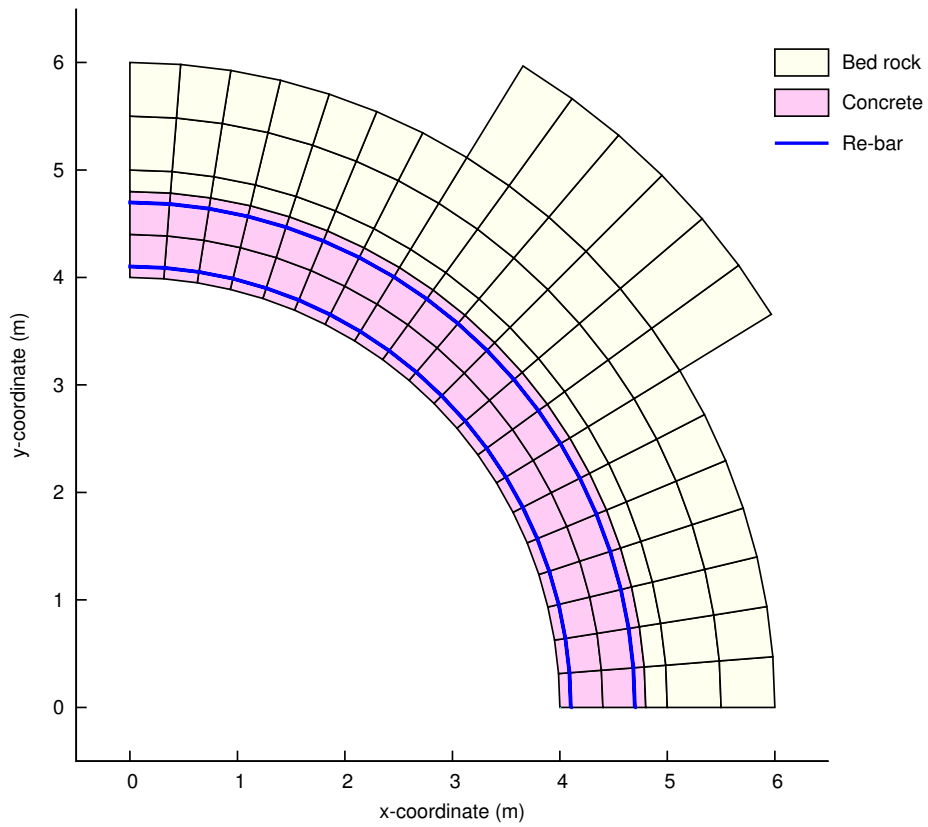


図4 解析モデル要素図詳細 (水路覆工周辺：最大鉄筋断面，覆工厚 800mm)

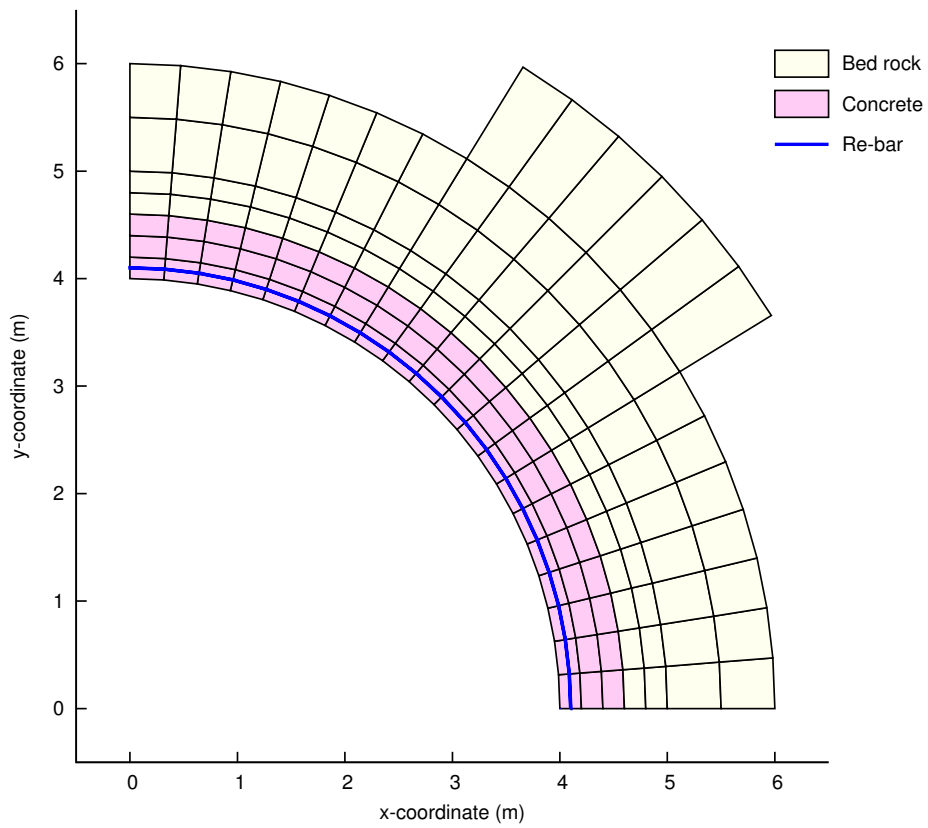


図5 解析モデル要素図詳細 (水路覆工周辺：最小鉄筋断面，覆工厚 600mm)

3.5 解析ケース

表 7 熱伝導・応力解析ケース

| 解析方法 | 解析条件 | 複鉄筋断面 | 単鉄筋断面 | 無筋断面 | 無筋断面 |
|----------|-----------------|-----------|-----------|----------|----------|
| | | D32@200x2 | D25@250x1 | 厚さ 800mm | 厚さ 600mm |
| 熱伝導解析 | 内壁温度履歴 1case | — | — | ○ | ○ |
| 応力解析 (1) | 内水圧のみ 1MPa | ○ | ○ | ○ | ○ |
| 応力解析 (2) | 内水圧 1MPa + 温度変化 | ○ | ○ | ○ | ○ |

注) 温度変化のみによる応力 (温度応力) は応力解析 (2) と (1) の差分により算出

3.6 熱伝導解析結果

岩盤内年平均温度および年平均水温を 10 度, 年間の水温変動を ± 10 度として以下の温度条件で解析を行った.

- 全節点の初期温度を 10 度とする (岩盤内年平均温度).
- 年平均水温 10 度に, 年間の水温変動 ± 10 度を加味し, 図 6 に示す 2 年分の正弦波による温度変化を覆工内面に与える.

最初の 1 年は温度変化を安定させるためのものであり, 2 年目の温度降下時に着目して温度分布を示したものが図 7 および図 9 である. 図中の黒塗り記号は, コンクリート内の節点を示す. 図より, 水路中心より 20m 程度の地点で水路内水の温度変化の影響は概ね無くなること, 水路内壁に近い範囲で大きな温度勾配ができることがわかる.

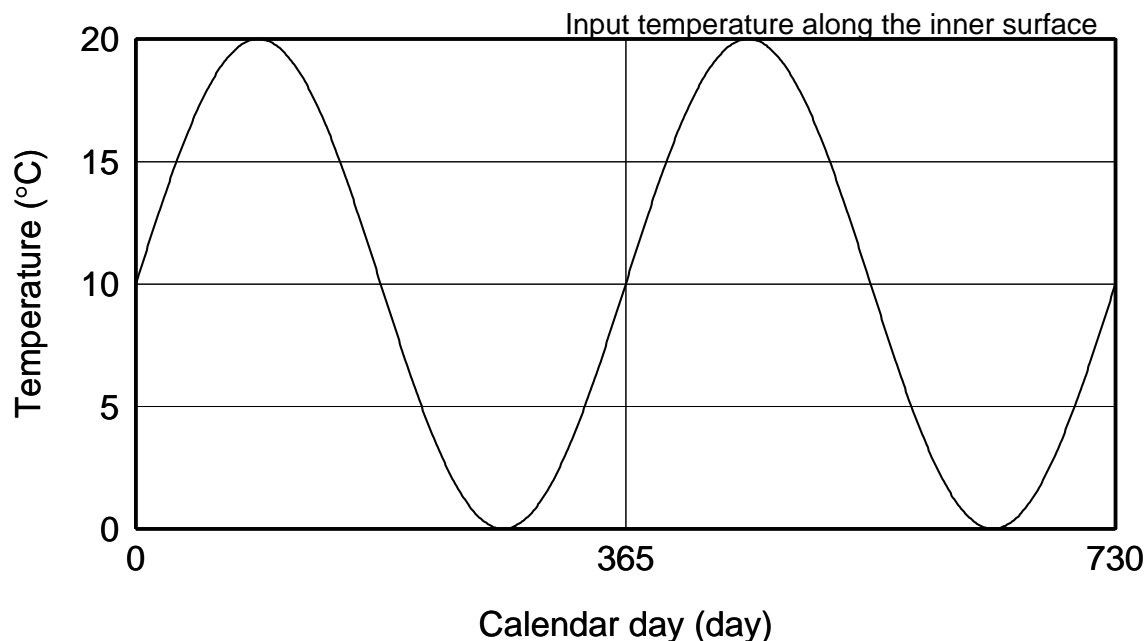


図 6 水路内壁温度 (入力値)

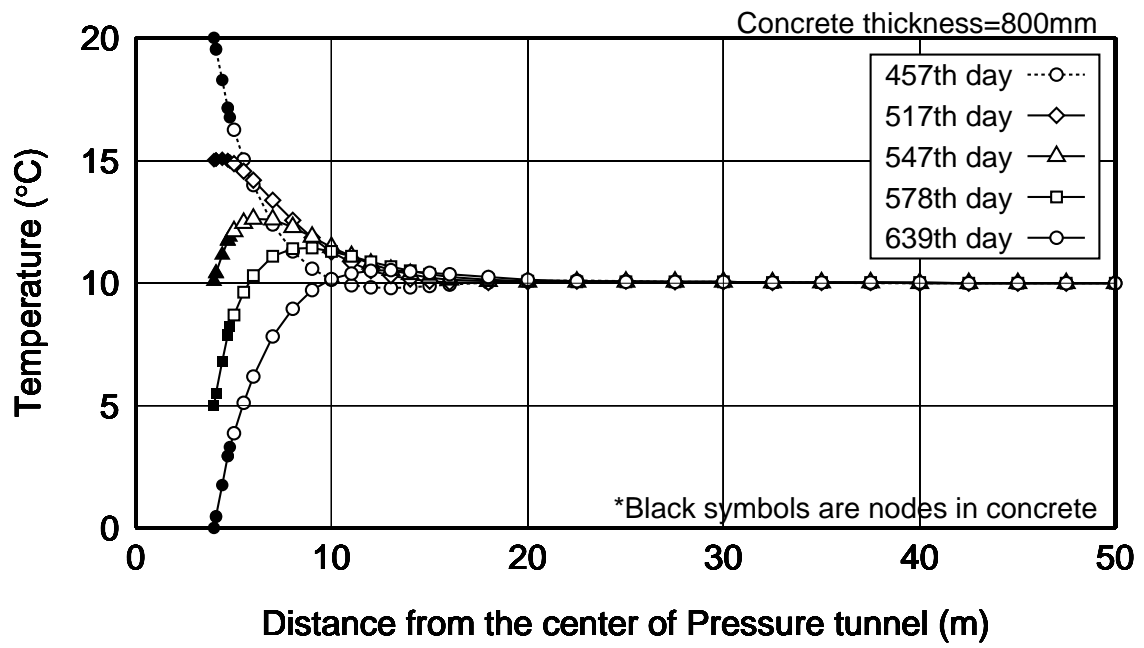


図7 覆工コンクリートおよび岩盤内温度分布 (覆工厚：800mm)

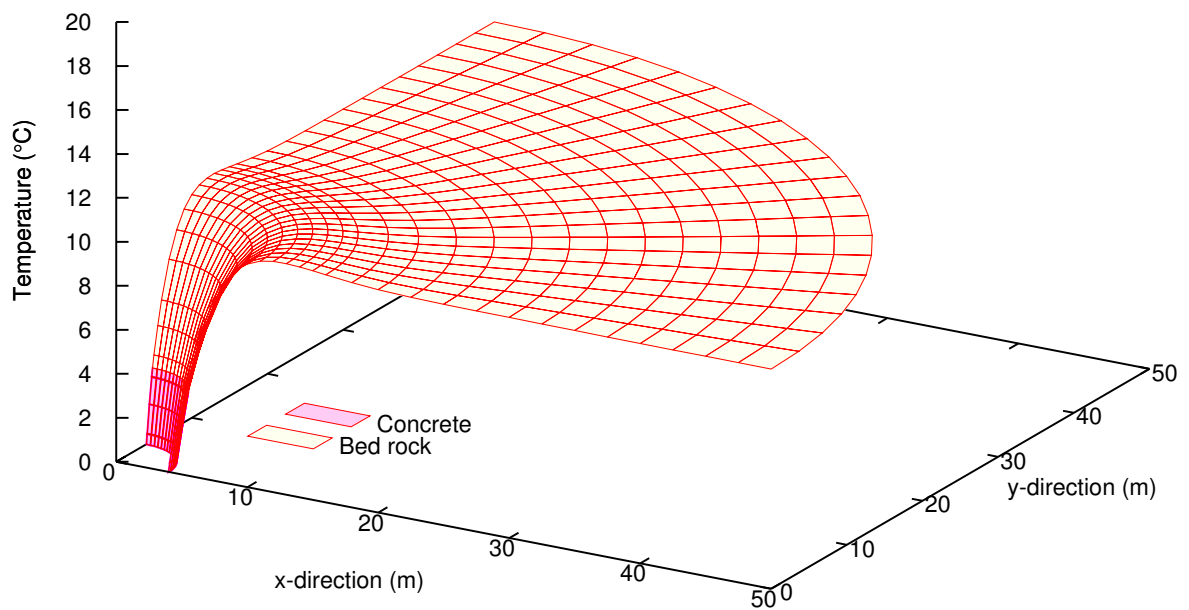


図8 覆工コンクリートおよび岩盤内温度分布 (覆工厚：800mm, 639th day)

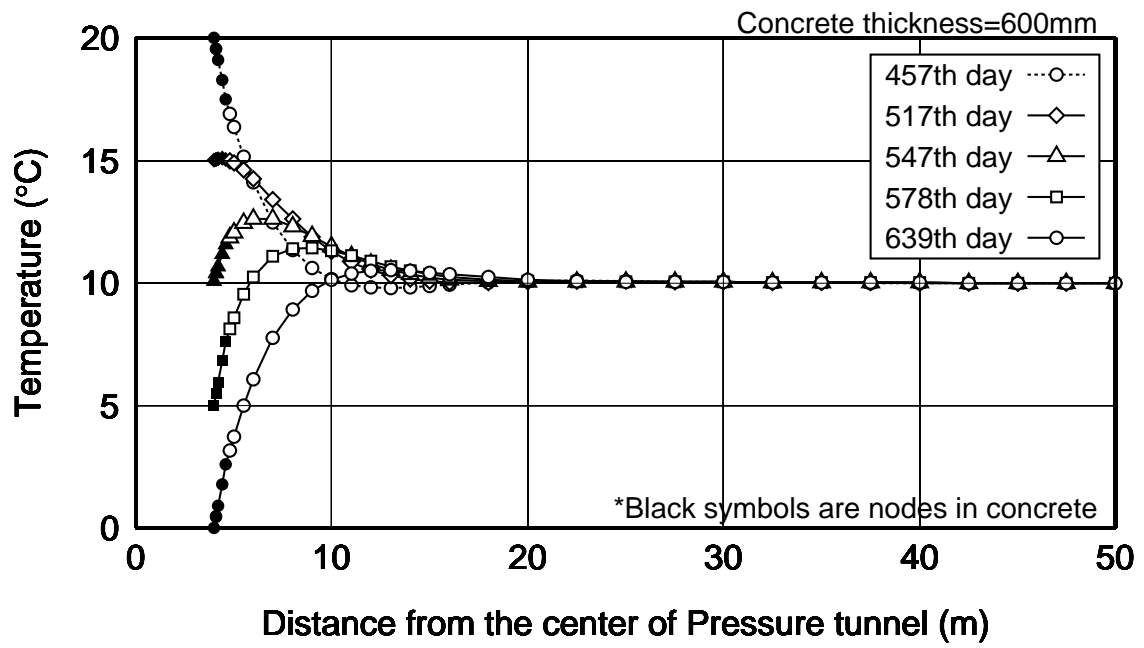


図9 覆工コンクリートおよび岩盤内温度分布 (覆工厚：600mm)

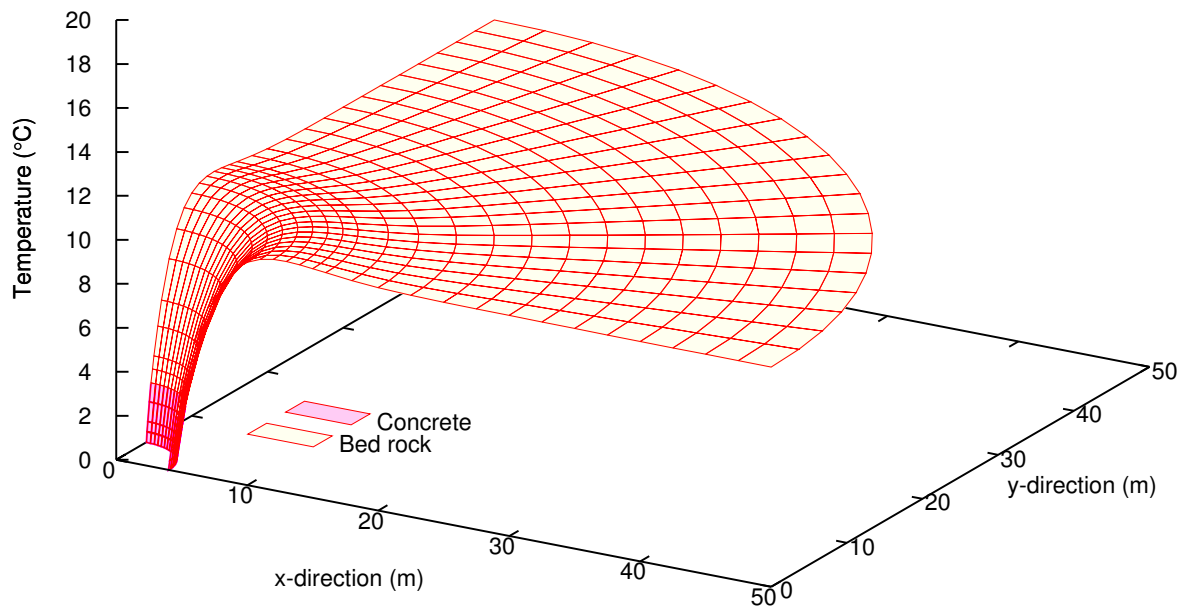


図10 覆工コンクリートおよび岩盤内温度分布 (覆工厚：600mm, 639th day)

3.7 応力解析結果

熱伝導解析における温度低下側の覆工内温度勾配が一番大きい639日目の温度分布に基づき、初期温度10度からの温度変化量を各節点の温度変化量として与えた、内水圧は1MPaとし、内水圧のみ作用時の応力分布、内水圧および温度変化作用時の応力分布および、これらの差分による温度変化のみによる応力分布を推定した。解析結果に基づき、特に温度変化による応力(温度応力)に着目すると、以下のことがわかる。

- いずれのケースにおいても、岩盤の弾性係数が大きくなると温度応力は大きくなる。
- 鉄筋あるいはコンクリートの温度応力は、岩盤弾性係数が小さくなると一定値に収束する傾向となり、また岩盤弾性係数が大きくなっても一定値に収束する傾向を示す。
- これに対し岩盤応力(覆工コンクリート外面に接する岩盤要素)は、岩盤弾性係数が大きくなると急速に増大する傾向にある。
- 覆工コンクリートの内面および外面変位についても、鉄筋応力あるいはコンクリート応力と同様の傾向にある。
- 覆工コンクリートの変位は、岩盤弾性係数が小さい場合は内側(断面縮小方向)となるが、岩盤弾性係数が大きくなると外側(断面拡大方向)となる。
- 上記挙動は、以下のように解釈できる。
 - 岩盤弾性係数が小さい、すなわち岩盤拘束が小さい場合は温度降下によりコンクリートは自由に収縮するため、コンクリートの内部拘束による応力のみしか発生しない。
 - 岩盤弾性係数が大きくなるに従い、岩盤拘束が増加し、コンクリートに発生する温度応力は増大する。
 - 岩盤弾性係数が大きくなるにつれ、岩盤の変位量(覆工外周変位)は減少し0に近づくため、岩盤に拘束されて挙動するコンクリートの温度応力も収束する傾向を示す。

(1) 複鉄筋断面

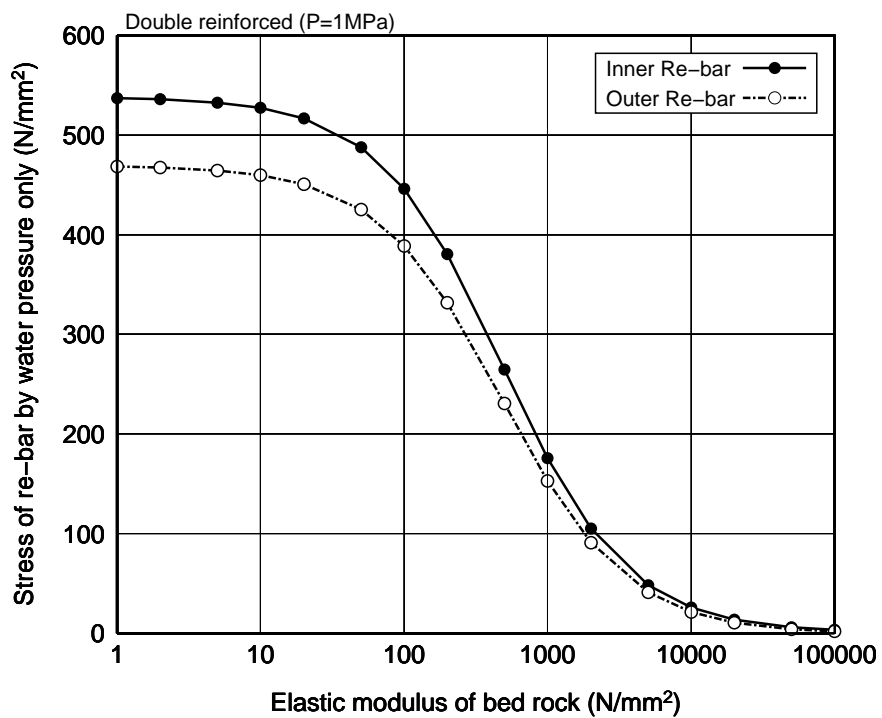


図 11 水圧のみによる鉄筋応力 (複鉄筋断面)

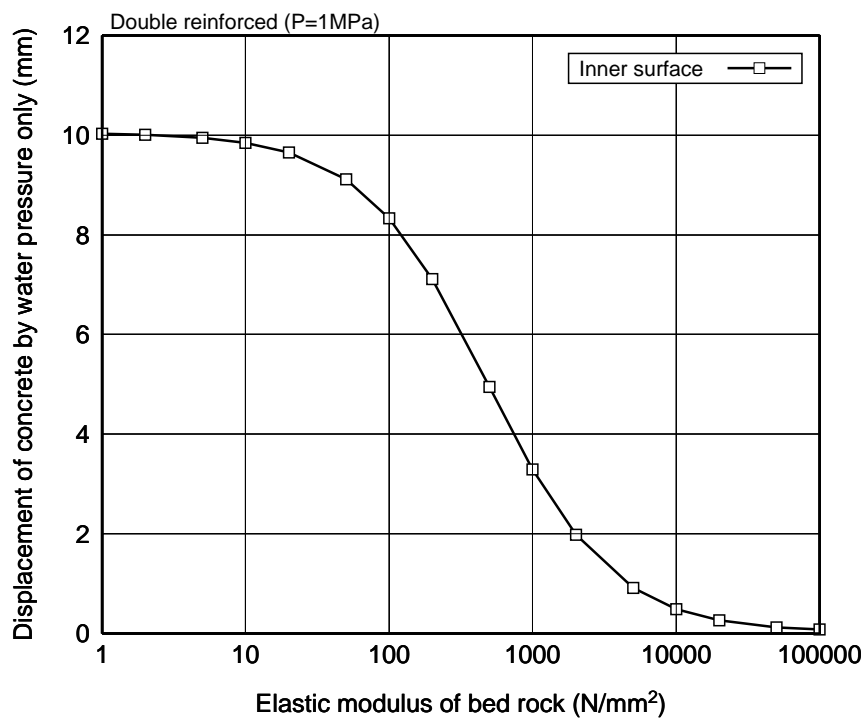


図 12 水圧のみによる覆工変位 (複鉄筋断面)

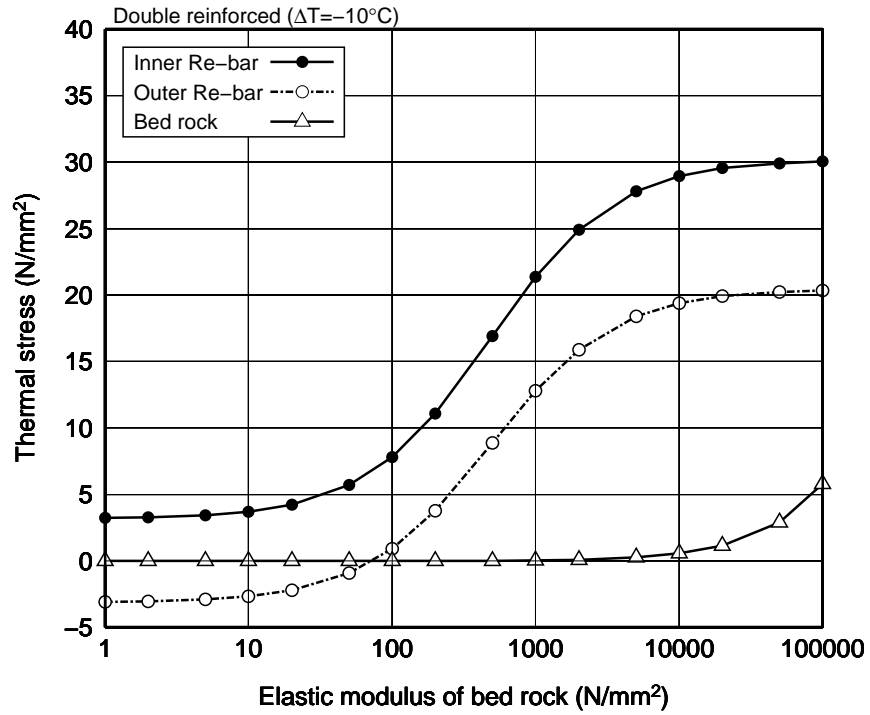


図 13 温度低下のみによる応力 (複鉄筋断面)

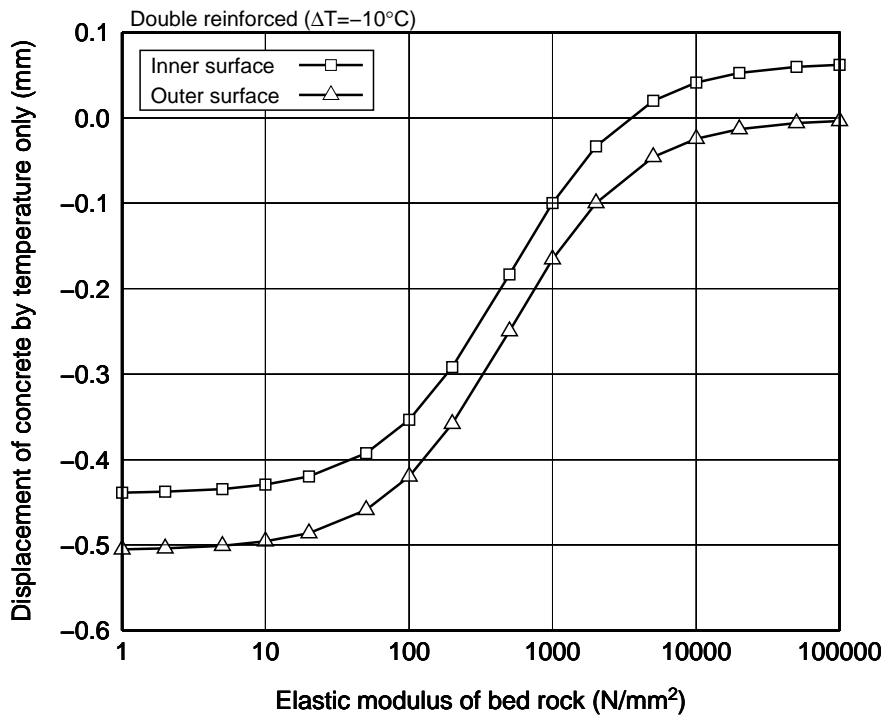


図 14 温度低下のみによる覆工変位 (複鉄筋断面)

(2) 単鉄筋断面

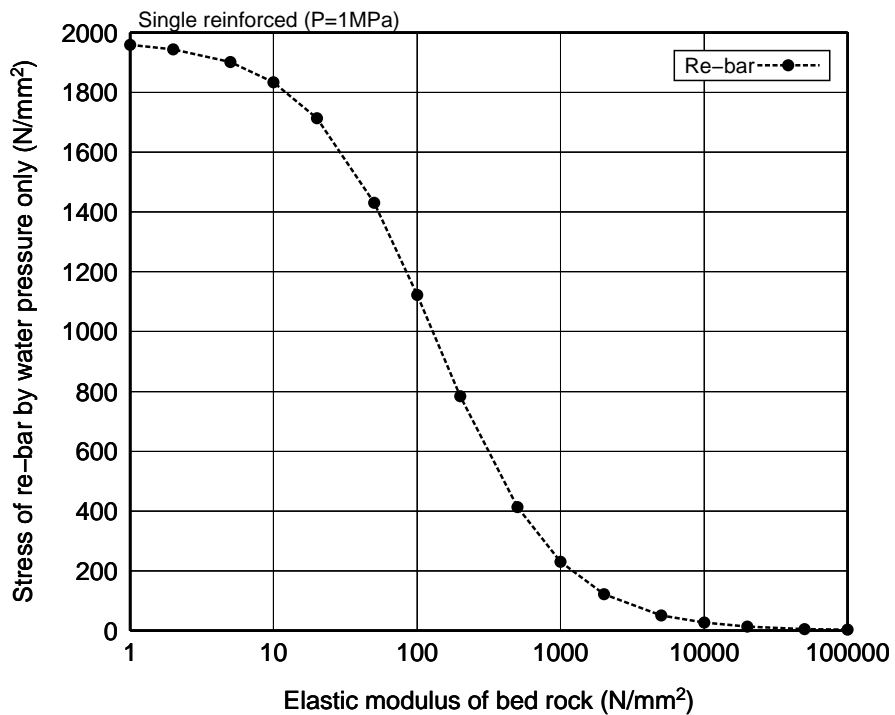


図 15 水圧のみによる鉄筋応力 (単鉄筋断面)

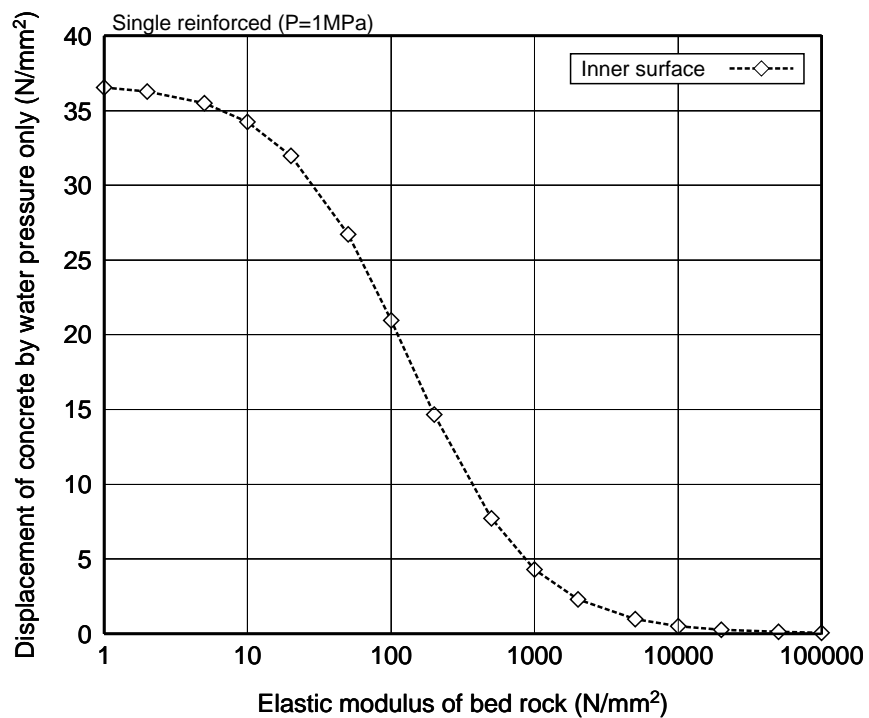


図 16 水圧のみによる覆工変位 (単鉄筋断面)

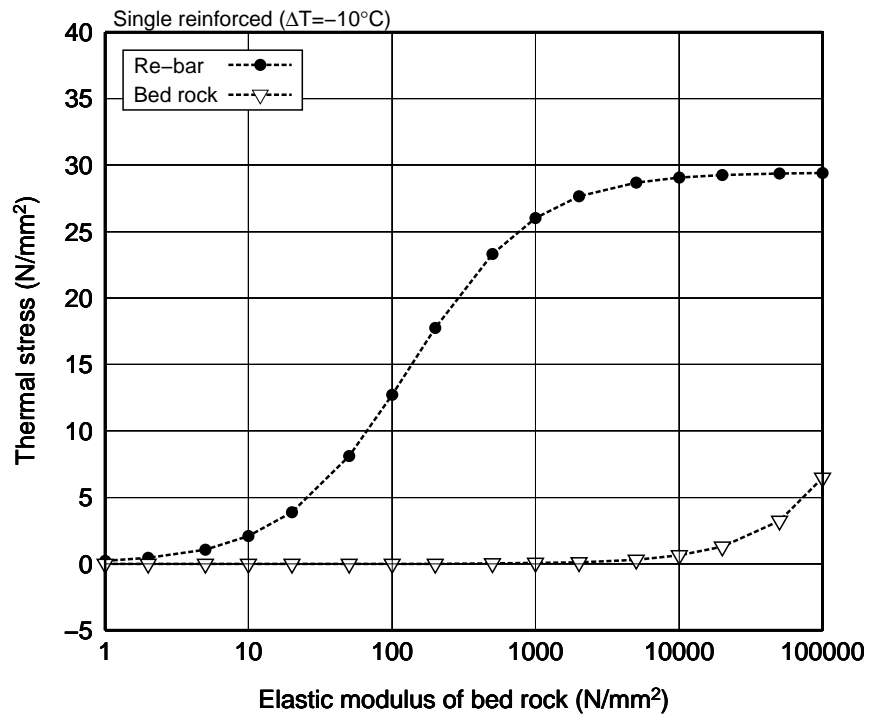


図 17 温度低下のみによる応力 (単鉄筋断面)

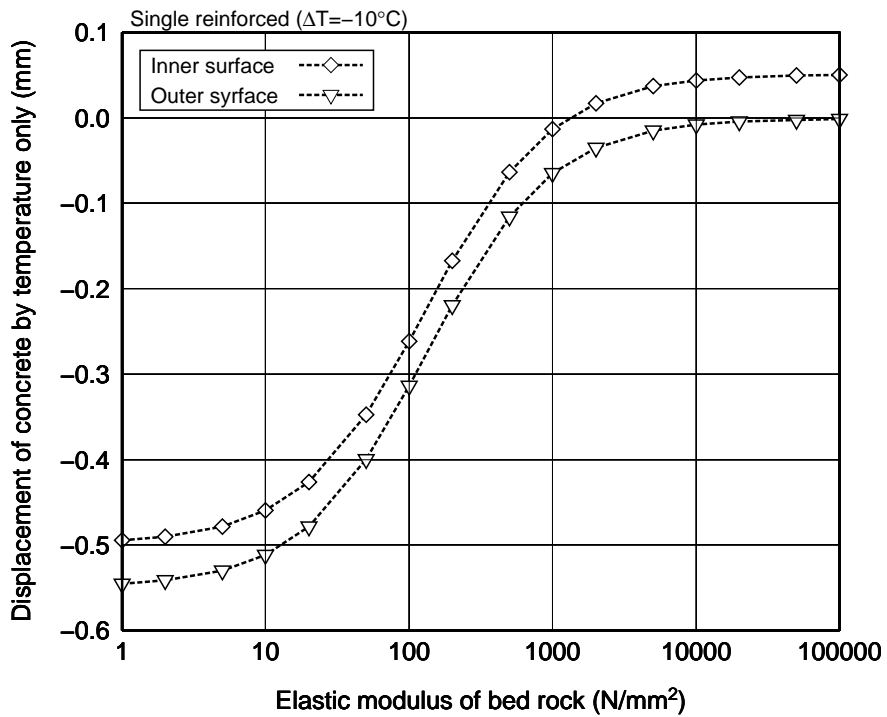


図 18 温度低下のみによる覆工変位 (単鉄筋断面)

(3) 無筋断面

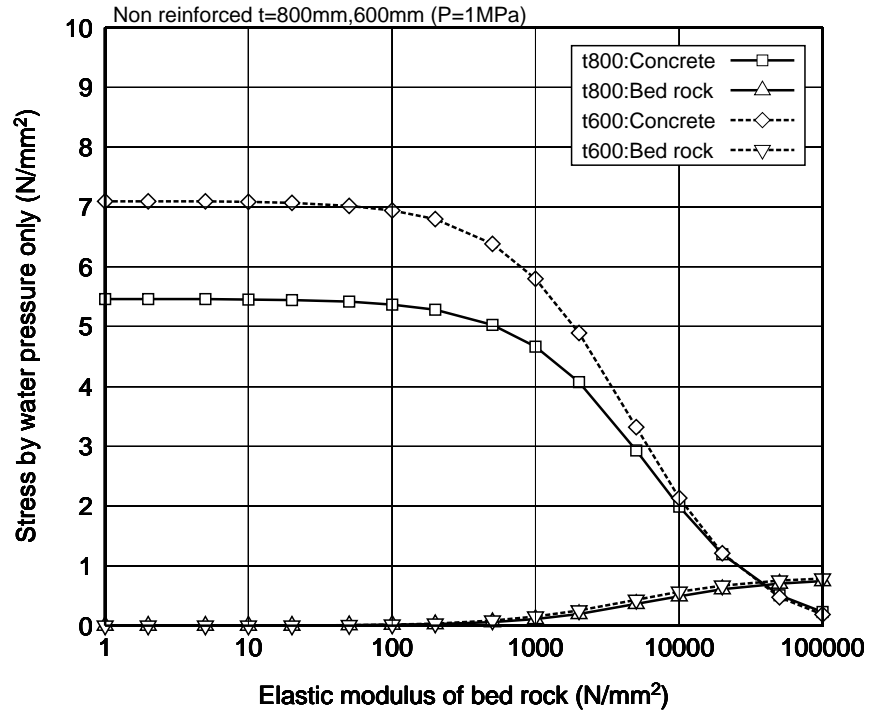


図 19 水圧のみによる応力 (無筋断面)

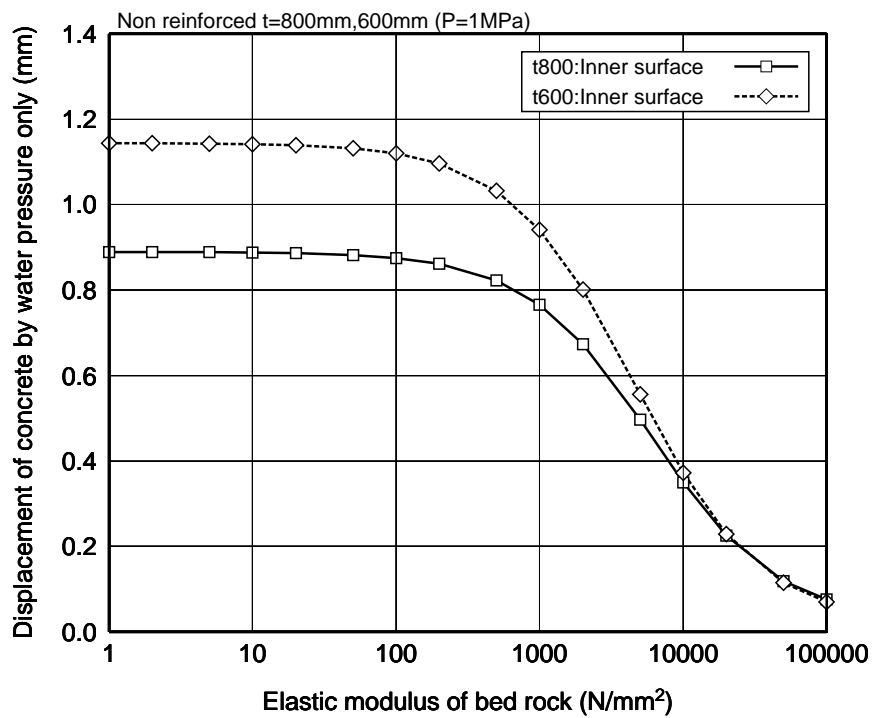


図 20 水圧のみによる覆工変位 (無筋断面)

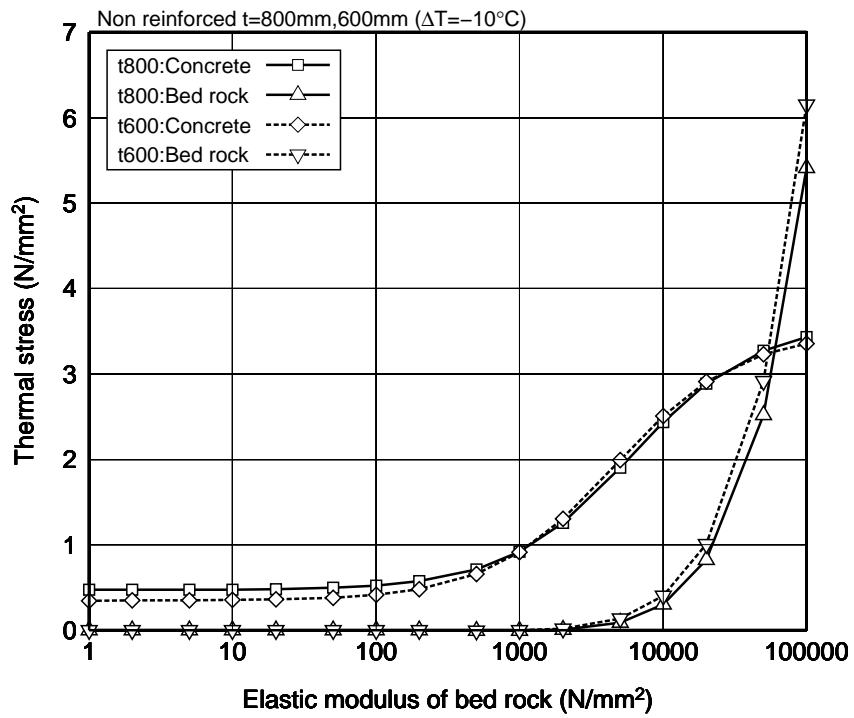


図 21 温度低下のみによる応力 (無筋断面)

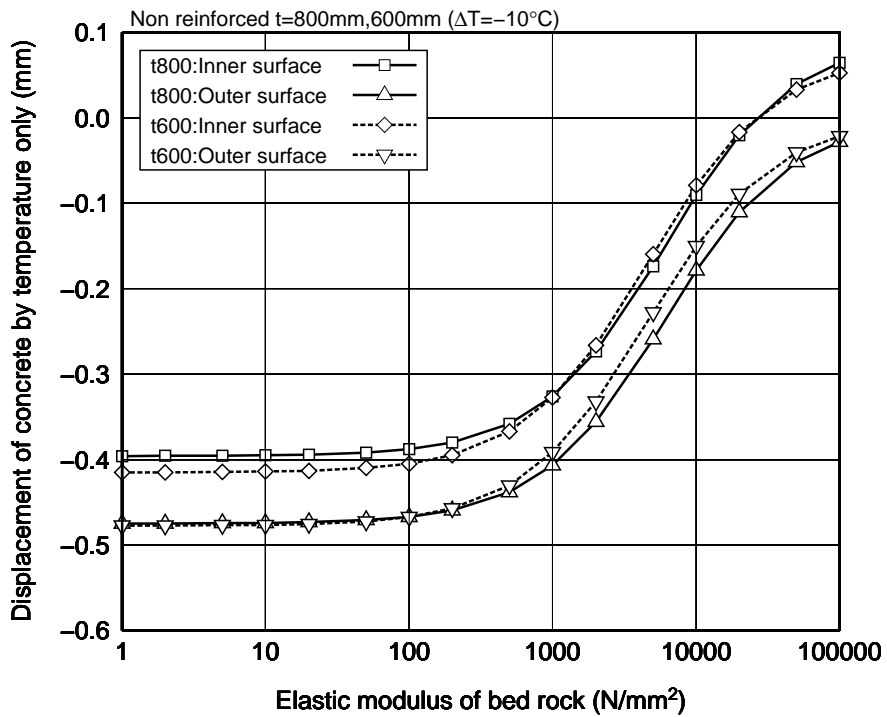


図 22 温度低下のみによる覆工変位 (無筋断面)

4. 適用限界内水圧の算定

4.1 適用限界内水圧算定結果

適用限界内水圧は，FEM 応力解析結果を用い，以下の式で算定する．符号は引張を正とする．

$$P_{cr} = \frac{f - \sigma_T}{\sigma(p)} \cdot p \quad (2)$$

P_{cr} : 適用限界内水圧 f : 材料発生応力の限界値
 σ_T : 温度応力 $\sigma(p)$: 内水圧 p のときの発生応力
 p : 発生応力を算定したときの内水圧 (ここでは 1MPa)

表 8 材料発生応力の限界値 f

| 検討断面 | 項目 | 限界値 | 限界値算定根拠 |
|-------------------|------------|-------------------------|-------------|
| 複鉄筋断面 (D32@200x2) | 鉄筋引張応力 | 172 N/mm ² | ひび割れ幅 0.5mm |
| 単鉄筋断面 (D25@250) | 鉄筋引張応力 | 140 N/mm ² | ひび割れ幅 0.5mm |
| 無筋 t=800mm | コンクリート引張応力 | 0.764 N/mm ² | 引張強度の 40% |
| 無筋 t=600mm | コンクリート引張応力 | 0.764 N/mm ² | 引張強度の 40% |

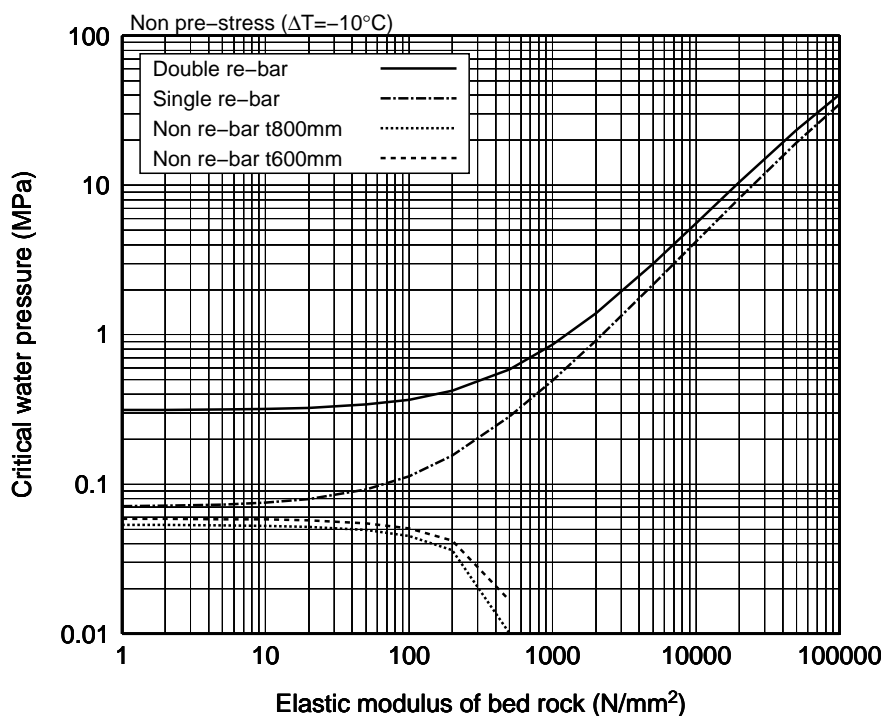


図 23 適用限界内水圧 (プレストレス無し)

図より，以下のことがわかる．

- 鉄筋を有する場合は，適用限界内水圧は岩盤弾性係数の増加に伴い増大することがわかる．また岩盤弾性係数が大きくなると複鉄筋断面と単鉄筋断面での適用可能内水圧の差異は小さくなる．
- 無筋コンクリートでは，岩盤弾性係数が増加すると適用限界内水圧は低下する．これは，無筋コンクリートの場合，岩盤弾性係数の増加に伴い温度応力が増加するため，温度応力がコンクリートの引張応力の限界値を超過した時点で適用可能内水圧は 0 となる．
- また無筋コンクリートの場合，覆工厚が大きいほうが適用限界内水圧は小さい．これは，水圧のみによる発生応力は覆工厚が大きいほうが小さいが，温度応力を考慮する場合，覆工厚が小さいほうが温度応力が小さく適用可能内水圧に及ぼす影響が大きいことによる．

4.2 グラウトによるプレストレス効果の試算

コンソリデーショングラウトによるプレストレスの効果の試算を行った。検討方法の概要は、以下のとおり。

- 解析モデルは、内水圧に対する検討モデルと同一の要素分割とした。
- 覆工コンクリートの外周に、グラウト圧 2.5MPa 相当の水圧を載荷した。
- プレストレスを考慮した適用限界内水圧は以下の式で算定した。符号は引張を正とする。

$$P_{cr} = \frac{f - \sigma_T - \sigma_{gr}}{\sigma(p)} \cdot p \quad (3)$$

P_{cr} : 適用限界内水圧 f : 材料発生応力の限界値
 σ_T : 温度応力 σ_{gr} : 残留プレストレス力
 $\sigma(p)$: 内水圧 p のときの発生応力 p : 発生応力を算定したときの内水圧 (ここでは 1MPa)

- プレストレス力は、施工直後から岩盤の塑性変形などにより減少するため、残留率を 10%、20% と仮定して適用限界内水圧を算定した。
- 具体的には下表に示す、2.5MPa の外圧作用時の各箇所の発生応力に、残留率 10%、20% を乗じてプレストレスによる発生応力 σ_{gr} としている。

表 9 Pre-stresses and displacements by grouting

$P_{gr} = -2.5\text{MPa}$, $\Delta T = 0^\circ\text{C}$, $E_g = 0.001\text{N/mm}^2$

| Items | (unit) | Double bar t=800mm | Single bar t=600mm | Non Re-bar t=800mm | Non Re-bar t=600mm |
|----------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| σ_{c1} | (N/mm ²) | -0.189 | -0.248 | -0.203 | -0.254 |
| σ_{c2} | (N/mm ²) | -15.034 | -19.718 | -16.156 | -20.249 |
| σ_{si1} | (N/mm ²) | -0.443 | -0.542 | (-0.404) | (-0.501) |
| σ_{si2} | (N/mm ²) | -124.676 | -163.553 | (-15.952) | (-19.998) |
| σ_{so1} | (N/mm ²) | -2.244 | — | (-2.252) | — |
| σ_{so2} | (N/mm ²) | -107.395 | — | (-14.106) | — |
| σ_{r1} | (N/mm ²) | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| σ_{r2} | (N/mm ²) | -0.000 | -0.000 | -0.000 | -0.000 |
| u_a | (mm) | -2.337 | -3.065 | -2.511 | -3.148 |
| u_b | (mm) | -2.271 | -2.989 | -2.438 | -3.068 |

σ_{c1} : 覆工内壁第一主応力 σ_{c2} : 覆工内壁第二主応力
 σ_{si1} : 内側鉄筋第一主応力 σ_{si2} : 内側鉄筋第二主応力
 σ_{so1} : 外側鉄筋第一主応力 σ_{so2} : 外側鉄筋第二主応力
 σ_{r1} : 覆工外周に接する岩盤の第一主応力 σ_{r2} : 覆工外周に接する岩盤の第二主応力
 u_a : 覆工内壁変位置量 u_b : 覆工外周変位置量

なお、() 内の数値は、鉄筋位置でのコンクリート要素の応力を示す。また、応力の符号は引張が正、変位の符号は膨張側が正である。

解析結果によれば、鉄筋を有する場合、コンクリートにひび割れが発生することを前提とした解析となっているため、プレストレスは鉄筋の初期圧縮応力を高める効果しかなく、適用限界水圧はプレストレスを考慮しない場合と大差は無い。しかし無筋コンクリート断面では、コンクリートの初期圧縮応力を高めるため、適用限界水圧を高める効果が顕著となっている。

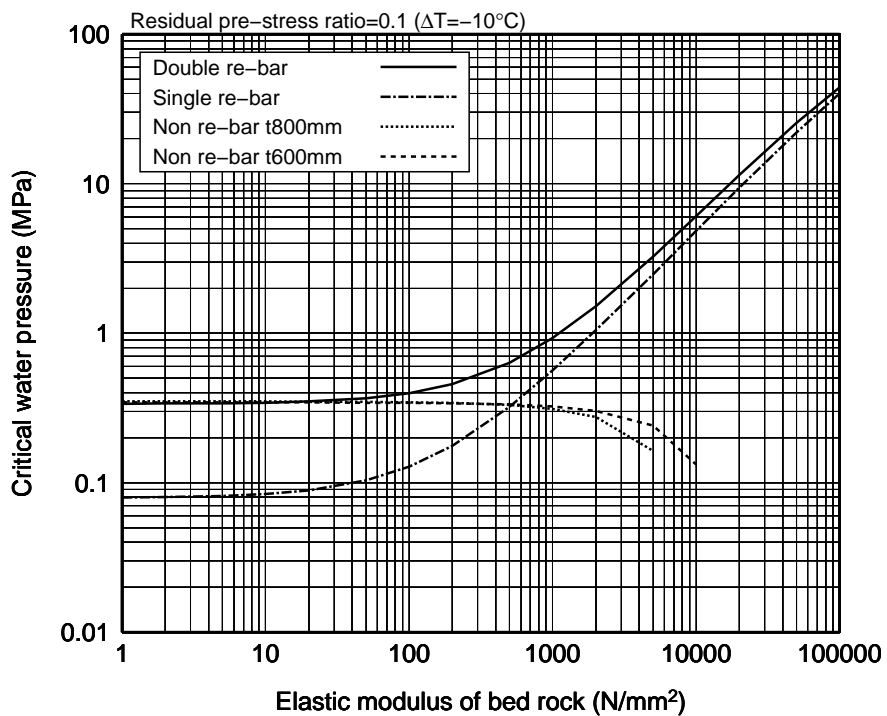


図 24 適用限界内水圧 (残留プレストレス率 10%)

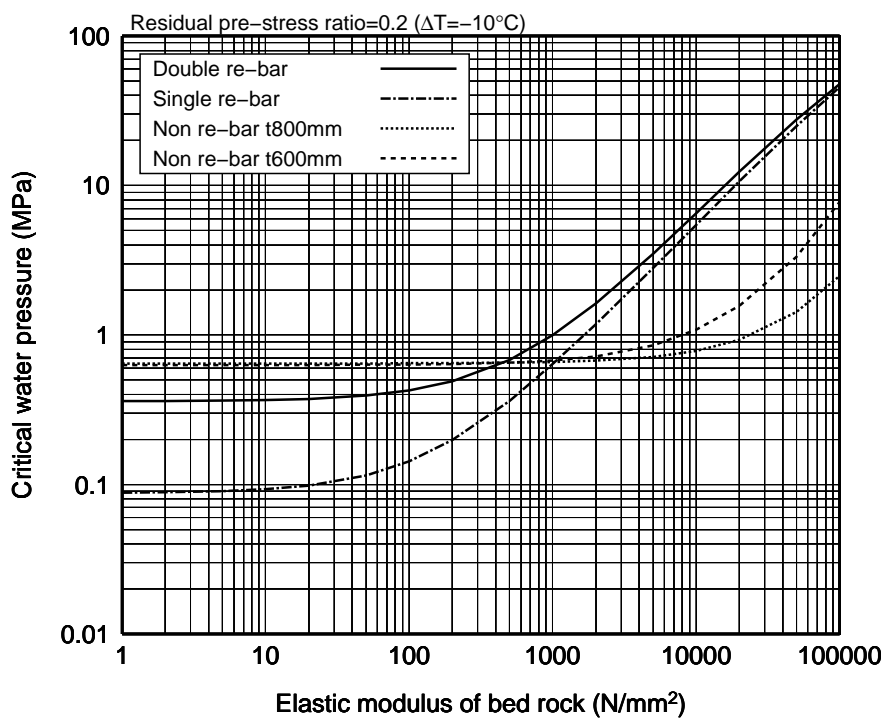


図 25 適用限界内水圧 (残留プレストレス率 20%)

4.3 温度分布を簡略化した場合の影響

これまでの検討では、熱伝導解析結果に基づき、覆工-岩盤内部の温度分布を考慮した応力解析により適用限界水圧の検討を行ってきたが、ここでは、温度分布を簡略化した場合の影響について検討を行った。

実構造物においても水温の季節変動は生じるため、温度変化の影響は無視することは設計上好ましくない。そこで、簡略化のため、岩盤内での温度変化は無いものと仮定し、覆工部に均一に -10°C の温度降下を与えた場合の適用限界水圧を試算した。その結果をまとめると以下のとおりである。

- コンクリートにひび割れが生じることを前提とした鉄筋を有する断面では、覆工-岩盤内部の温度分布を考慮した場合と概ね同等の適用限界水圧が得られた。
- コンクリートにひび割れが生じないことを前提とする無筋断面では、温度分布を考慮した場合より高い適用限界水圧となった。
- 無筋断面において、温度分布を考慮した場合は、覆工厚が大きいほうが適用限界水圧は小さいが、覆工内均一温度降下を与えた場合、覆工厚が大きいほうが適用限界水圧は大きくなった。

これらの挙動の差異の発生原因は以下のよいに解釈できる。

- 複鉄筋断面では、適用限界水圧算定において支配的となる内側鉄筋に着目した場合、岩盤弾性係数が小さい場合は覆工内均一温度降下の場合の温度応力が小さく、岩盤弾性係数が大きくなると覆工内均一温度降下の場合の温度応力のほうが大きくなる。しかし鉄筋応力の限界値が $140\sim 172\text{N}/\text{mm}^2$ なのに対し、温度応力の値は $0\sim 30\text{N}/\text{mm}^2$ 程度までであり、その割合は比較的小さいため、適用限界水圧に与える影響は小さいものと考えられる。
- 単鉄筋断面の場合、温度分布を考慮した場合と覆工内均一温度降下の場合で、発生温度応力の差はほとんどないため、同等の適用限界水圧が得られたと考えられる。
- 無筋断面では温度分布を考慮した場合、特に岩盤弾性係数が小さい場合、覆工厚が大きいほうが覆工の内部拘束により大きな温度応力が発生する。これに対し、覆工内均一温度降下の場合には内部拘束による温度応力は発生せず覆工厚によらず同程度の温度応力が発生する。このため内水圧に対する抵抗性の高い覆工厚が大きい断面のほうが適用限界水圧は大きくなるものと考えられる。また、適用限界水圧算定時のコンクリートの限界強度は $0.8\text{N}/\text{mm}^2$ 程度であるのに対し、温度分布を考慮した場合に発生する温度応力は $0.2\sim 0.5\text{N}/\text{mm}^2$ と相対的に大きいため、適用限界水圧は発生温度応力の大きさに大きく影響されると考えられる。

表 10 覆工内均一温度分布①と覆工-岩盤内温度分布考慮②の場合の比較

| E_g (MPa) | 複鉄筋断面 (t=800mm,D32@200x2) | | | 単鉄筋断面 (t=600mm,D25@250x1) | | |
|----------------|---------------------------|--------|-------|---------------------------|--------|-------|
| | 適用限界水圧 (MPa) | | 比較 | 適用限界水圧 (MPa) | | 比較 |
| | ① | ② | ①/② | ① | ② | ①/② |
| 1 | 0.321 | 0.314 | 1.022 | 0.071 | 0.071 | 1.000 |
| 2 | 0.322 | 0.315 | 1.022 | 0.072 | 0.072 | 1.000 |
| 5 | 0.323 | 0.317 | 1.019 | 0.073 | 0.073 | 1.000 |
| 10 | 0.326 | 0.319 | 1.022 | 0.075 | 0.075 | 1.000 |
| 20 | 0.331 | 0.325 | 1.018 | 0.079 | 0.079 | 1.000 |
| 50 | 0.347 | 0.341 | 1.018 | 0.092 | 0.092 | 1.000 |
| 100 | 0.374 | 0.368 | 1.016 | 0.113 | 0.113 | 1.000 |
| 200 | 0.428 | 0.423 | 1.012 | 0.154 | 0.156 | 0.987 |
| 500 | 0.588 | 0.586 | 1.003 | 0.279 | 0.283 | 0.986 |
| 1000 | 0.855 | 0.857 | 0.998 | 0.488 | 0.494 | 0.988 |
| 2000 | 1.386 | 1.396 | 0.993 | 0.902 | 0.916 | 0.985 |
| 5000 | 2.956 | 2.990 | 0.989 | 2.136 | 2.170 | 0.984 |
| 10000 | 5.502 | 5.575 | 0.987 | 4.157 | 4.225 | 0.984 |
| 20000 | 10.341 | 10.489 | 0.986 | 8.074 | 8.206 | 0.984 |
| 50000 | 23.116 | 23.460 | 0.985 | 18.904 | 19.215 | 0.984 |
| 100000 | 39.962 | 40.565 | 0.985 | 34.381 | 34.948 | 0.984 |

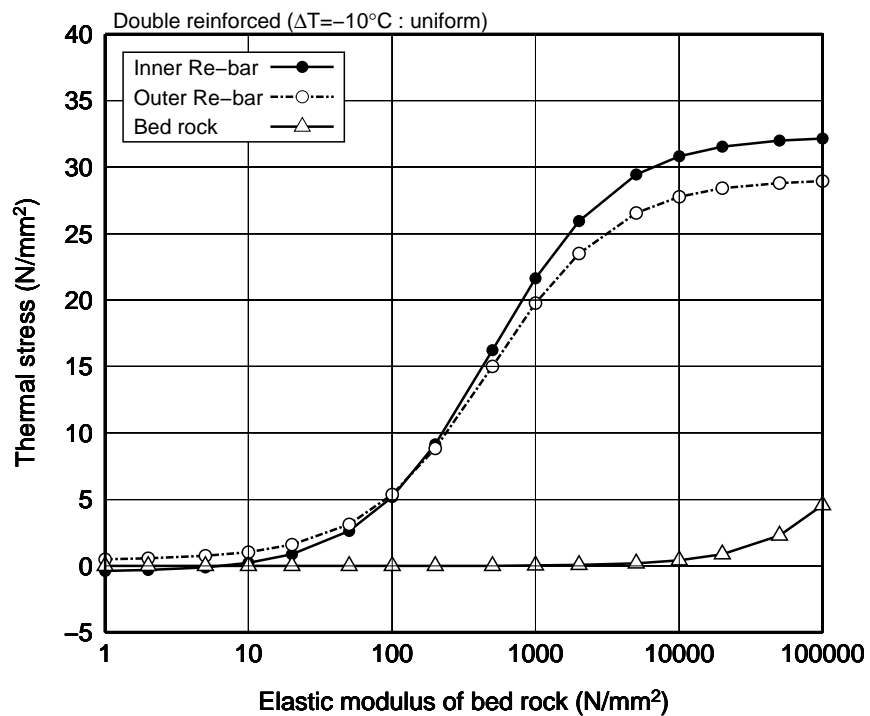


図 26 温度低下のみによる応力 (複鉄筋断面 : 覆工均一温度降下)

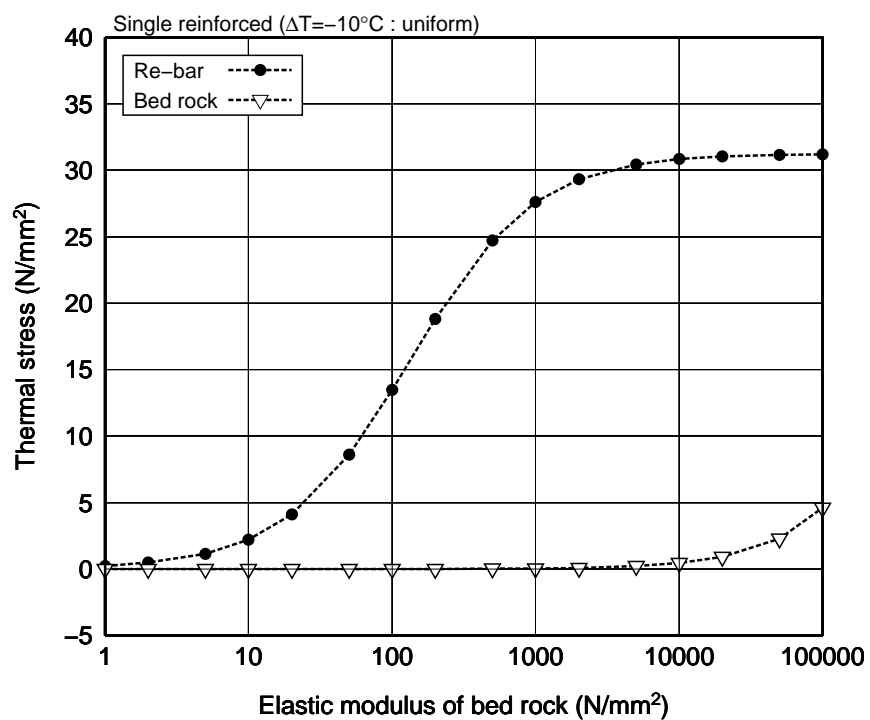


図 27 温度低下のみによる応力 (単鉄筋断面 : 覆工均一温度降下)

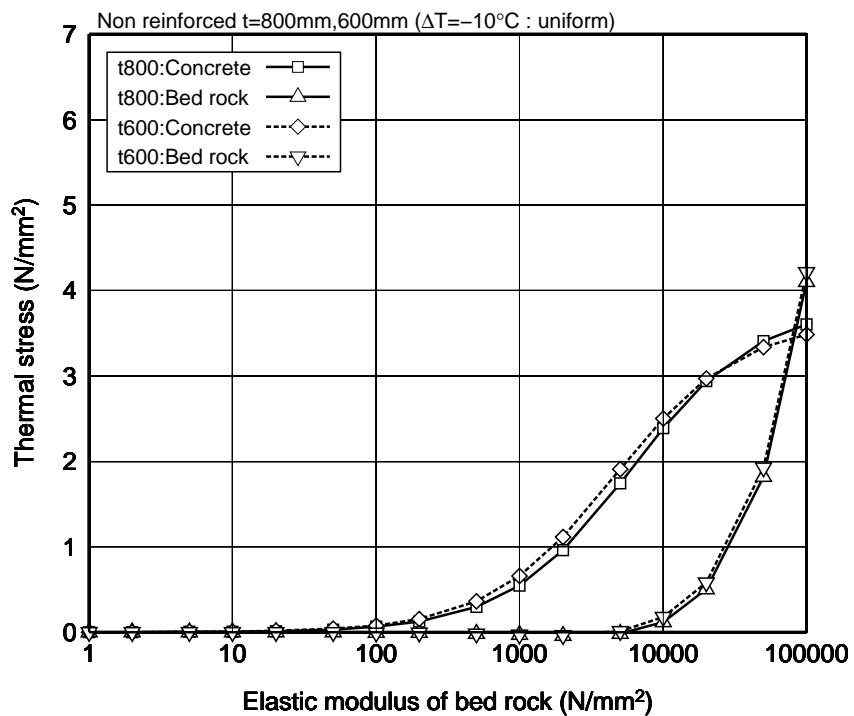


図 28 温度低下のみによる応力 (無筋断面：覆工均一温度降下)

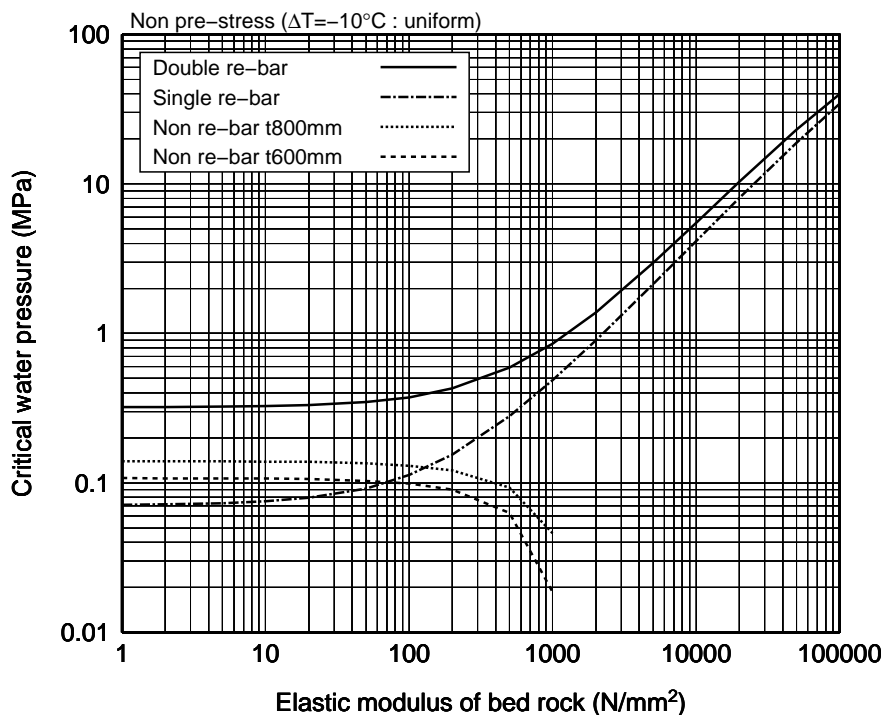


図 29 適用限界内水圧 (プレストレス無し，覆工均一温度降下)

5. まとめ

- これまでの設計実績で用いられてきた物性値，温度変化量を考えた場合，水路内の水温変化の影響が及ぶ範囲は，水路内壁から 20m 程度の範囲である．
- 水温変化に伴い覆工材料に発生する温度応力の値は，岩盤の拘束度の影響を受ける．
- 岩盤拘束が小さい，すなわち岩盤弾性係数が小さい場合，覆工は自由収縮するため変形は起こるが温度応力は小さい．
- 岩盤弾性係数が大きい場合は，覆工の変形が岩盤に拘束されるため，覆工に発生する温度応力は大きくなる．
- 完全拘束の場合に 10°C の温度低下が発生した場合，コンクリートでは 2MPa ，鉄筋では 20MPa の温度応力が発生することになるが，岩盤弾性係数が大きな場合には更に大きな温度応力が発生する．この現象は，温度低下により覆工は収縮しようとするが，岩盤も温度低下により収縮しようとして覆工を岩盤側に引張る挙動が生じることにより起因すると考えられる．
- 覆工-岩盤内の温度分布を正確に入力した場合と，覆工内のみ均一の温度変化を与えた場合とで，鉄筋コンクリート断面では大差ない適用限界水圧が得られた．このため，鉄筋コンクリート断面の実務設計においては，熱伝導解析は省略し，覆工内に均一の温度変化を与えた計算を行っても差し支えないものと考えられる．
- コンクリートにひび割れが発生することを前提とした鉄筋コンクリート断面では，プレストレスや温度分布の影響は受けにくい，コンクリートにひび割れが発生しないことを前提とした無筋コンクリート断面では，プレストレスや温度分布の影響を受けやすい．
- プレストレスの残留率や覆工-岩盤内の温度分布の信頼性が十分であると判断される場合以外は，鉄筋コンクリート断面による構造設計を行うほうが好ましいと考えられる．
- 圧力水路周辺岩盤が非常に堅硬・緻密で漏水発生を問題にする必要が無い場合は，コンクリート断面には摩擦損失係数低下の機能のみを持たせ，ひび割れ発生を前提とした無筋コンクリート断面の採用も考えられる．

付録 A ひび割れ幅算定式と許容ひび割れ幅

アメリカ合衆国 ACI および日本のコンクリート標準示方書におけるひび割れ算定式とひび割れ幅の許容値を示す。なお日本のコンクリート標準示方書には、曲げひび割れ算定式のみが示されており、軸引張に対するひび割れ算定式は記載されていない。

A.1 ACI 224R-80 (Revised 1984) Control of Cracking in Concrete Structures

$$w = 0.076 \cdot \beta \cdot f_s \cdot (d_c \cdot A)^{1/3} \times 10^{-3} \quad (\text{Flexural crack}) \quad (4)$$

$$w = 0.10 \cdot f_s \cdot (d_c \cdot A)^{1/3} \times 10^{-3} \quad (\text{Tension crack}) \quad (5)$$

w = most probable maximum crack width, in.

β = ratio of distance between neutral axis and tension face to distance

between neutral axis and centroid of reinforcing steel ≈ 1.20 in beams

f_s = reinforcing steel stress, ksi

d_c = thickness of cover from tension fiber to center of bar closest thereto, in.

A = area of concrete symmetric with reinforcing steel divided by number of bars, in².

表 11 Tolerable crack widths, reinforced concrete

| Exposure condition | Tolerable | |
|--|------------------|--------|
| | crack width, in. | (mm) |
| Dry air or protective membrane | 0.016 | (0.41) |
| Humidity, moist air, soil | 0.012 | (0.30) |
| Deicing chemicals | 0.007 | (0.18) |
| Seawater and seawater spray; wetting and drying | 0.006 | (0.15) |
| Water retaining structures | 0.004 | (0.10) |

引張クラックの式を SI 単位に変換すると、以下のとおりとなる。換算条件は、1ksi=6.894757MPa, 1in=25.4mm とした。

$$w' = 0.0145 \cdot f'_s \cdot (d'_c \cdot A')^{1/3} \times 10^{-3} \quad (6)$$

w' = ひび割れ幅 (mm)

f'_s = 鉄筋応力 (MPa)

d'_c = 鉄筋中心と引張縁の距離 (mm)

A' = 鉄筋 1 本が分担するコンクリート断面積 (mm²)

A.2 STANDARD SPECIFICATIONS FOR CONCRETE STRUCTURES-2007, Design : JSCE

2007 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編：本編] 7.4.4 による曲げひび割れ幅算定式は以下のとおり。

$$w = 1.1k_1k_2k_3\{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \left(\frac{\sigma_{se}}{E_s} \right) \quad (7)$$

- k_1 : 鋼材の表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数
一般に、異形鉄筋の場合 1.0、普通丸鋼および PC 鋼材の場合 1.3
- k_2 : コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数
 $k_2 = \frac{15}{f'_c + 20} + 0.7$ f'_c = コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)
- k_3 : 引張鋼材の段数の影響を表す係数
 $k_3 = \frac{5(n + 2)}{7n + 8}$ n = 引張鋼材の段数
- c : かぶり (mm)
- c_s : 鋼材の中心間隔 (mm)
- ϕ : 鋼材径 (mm)
- ϵ'_{csd} : コンクリートの収縮・クリープによるひび割れ幅の増加を考慮するための数値
一般の場合 150×10^{-6} 、高強度コンクリートで 100×10^{-6}
- σ_{se} : 鋼材位置のコンクリートの応力度が 0 の状態からの鉄筋応力度の増加量 (N/mm²)

2007 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編：本編] 8.3.2 および 10.6 によるひび割れ幅の限界値は以下のとおり。

表 12 鋼材の腐食に対するひび割れ幅の限界値 (mm)

| 鋼材の腐食に対する環境条件 | | |
|---------------|--------|------------|
| 一般の環境 | 腐食性環境 | 特に厳しい腐食性環境 |
| 0.005c | 0.004c | 0.0035c |

注) c : かぶり (100mm 以下)

表 13 水密性に対するひび割れ幅の限界値の目安 (mm)

| 要求される水密性の程度 | | 高い水密性を確保する場合 | 一般の水密性を確保する場合 |
|-------------|---------|--------------|---------------|
| 卓越する 断面力 | 軸引張力 | —* | 0.1 |
| | 曲げモーメント | 0.1 | 0.2 |

*) 全断面において圧縮状態とし、最小圧縮応力度を 0.5N/mm² 以上とする

付録 B 岩盤の温度応力解析用物性値の事例

| 項目 | 神流川 | 葛野川 | 塩原 |
|---------------------------|-------|-------|-------|
| 熱伝導率 kcal/(mh°C) | 3.7 | 3.7 | 2.1 |
| 比熱 kcal/(kg°C) | 0.17 | 0.22 | 0.19 |
| 密度 kg/m ³ | 2,700 | 2,700 | 2,650 |
| 熱膨張率 10 ⁻⁶ /°C | 7.3 | 6.8 | 8.0 |
| ポアソン比 | 0.25 | 0.25 | 0.25 |
| 弾性係数 MPa | 5,000 | 4,500 | 4,500 |

付録 C 既往実績の例

TEPCO における近年の揚水発電所導放水路のコンクリート覆工厚等の実績は下表のとおりである。塩原発電所では、既往実績を考慮して覆工厚を 600~800mm としていたが、葛野川・神流川では塩原での実績を踏まえ更なる断面縮小を図り、覆工厚を 550~750mm に低減している。

ここでの試設計では、塩原発電所を参考に、水路内径を 8.0m、覆工厚を 600~800mm、コンクリートの設計基準強度を 24 N/mm² とする。

| 項目 | 神流川 | 葛野川 | 塩原 | 試設計 |
|--------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 水路内径 | 8.2 m | 8.2 m | 8.0m | 8.0 m |
| 一般部覆工厚 | 550 mm | 550 mm | 600 mm | 600 mm |
| 高水圧・弱層部覆工厚 | 750 mm | 750 mm | 800 mm | 800 mm |
| コンクリート設計基準強度 | 24 N/mm ² | 24 N/mm ² | 24 N/mm ² | 24 N/mm ² |

付録 D 導放水路の配筋事例

| 地点 | 塩原導水路，水路内径：8000mm | | | | | |
|------------|-------------------|---------|---------|---|---|---|
| 覆工厚 (mm) | 600 | 600 | 800 | — | — | — |
| 内側鉄筋 (mm) | D25@250 | D32@250 | D32@200 | — | — | — |
| 内側配力筋 (mm) | D19@400 | D22@400 | D22@400 | — | — | — |
| 外側鉄筋 (mm) | — | D32@250 | D32@200 | — | — | — |
| 外側配力筋 (mm) | — | D22@250 | D22@400 | — | — | — |

| 地点 | 葛野川導水路上口，水路内径：8200mm | | | | | |
|------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 覆工厚 (mm) | 550 | 550 | 550 | 500 | 750 | 750 |
| 内側鉄筋 (mm) | D22@250 | D29@250 | D32@290 | D32@225 | D32@225 | D32@200 |
| 内側配力筋 (mm) | D19@400 | D22@400 | D22@300 | D22@400 | D22@400 | D22@300 |
| 外側鉄筋 (mm) | — | — | — | — | D32@225 | D32@200 |
| 外側配力筋 (mm) | — | — | — | — | D22@400 | D22@300 |

| 地点 | 葛野川導水路下口，水路内径：8200mm | | | | | |
|------------|----------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 覆工厚 (mm) | 550 | 550 | 550 | 750 | 750 | 750 |
| 内側鉄筋 (mm) | D22@250 | D25@250 | D32@200 | D29@250 | D32@200 | D32@125 |
| 内側配力筋 (mm) | D19@400 | D19@400 | D22@400 | D22@400 | D25@400 | D29@300 |
| 外側鉄筋 (mm) | — | — | — | D29@250 | D32@200 | D32@125 |
| 外側配力筋 (mm) | — | — | — | D22@400 | D25@400 | D29@300 |

| 地点 | 神流川導放水路，水路内径：8200mm | | | | | |
|------------|---------------------|---------|---|---|---|---|
| 覆工厚 (mm) | 550 | 750* | — | — | — | — |
| 内側鉄筋 (mm) | D22@250 | D32@120 | — | — | — | — |
| 内側配力筋 (mm) | D19@400 | ? | — | — | — | — |
| 外側鉄筋 (mm) | — | D32@120 | — | — | — | — |
| 外側配力筋 (mm) | — | ? | — | — | — | — |

*) 鉄筋 SD390, コンクリート設計基準強度 50N/mm²

付録 E 導放水路のコンソリデーショングラウチング設計事例

| 地点名 | 改良目標値 | 改良長 | 孔ピッチ | 最大注入圧 | |
|-------------|-----------|-----------------|------|-----------------------|--|
| 塩原 (導水路) | 覆工厚 600mm | 5Lu | 3m | 4.0m ² /本 | 20kg/cm ² |
| | 覆工厚 800mm | 5Lu | 3m | 4.0m ² /本 | 25kg/cm ² |
| 葛野川 | 導水路上口 | 5Lu | 3m | 10.0m ² /本 | 15~25kg/cm ² |
| | 導水路下口 | 5Lu | 3m | 5.6m ² /本 | 20kg/cm ² |
| | 放水路上口 | 5Lu | 3m | 10.5m ² /本 | 20kg/cm ² |
| | 放水路下口 | 5Lu | 3m | 5.6m ² /本 | 20kg/cm ² |
| 神流川 | 一般部 | 平均 5Lu, 最大 10Lu | 2m | 5.6m ² /本 | 20kg/cm ² |
| | 弱層部 | 平均 5Lu, 最大 10Lu | 5m*) | 5.6m ² /本 | 25kg/cm ² |
| | 水槽周辺 | 平均 2Lu | 2m | 5.6m ² /本 | 20kg/cm ² (鉄管周辺：15kg/cm ²) |

*) パイピングに対する安全率 6 以上．その他改良長は弾性波速度測定結果による

参考文献

- [1] (社)電力土木技術協会=編：電力施設地下構造物の設計と施工，pp42-46，1986.3
- [2] (社)水門鉄管協会：水門鉄管技術基準 水圧鉄管・鉄鋼構造物編，pp57，1997.5
- [3] (社)土木学会：コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]，pp97-102，2002.3