共同研究報告書
整理番号 第328号

# 鋼材と吹付け繊維補強モルタルを用いたトンネル覆工の補強方法の開発に関する共同研究報告書

平成18年3月

独立行政法人土木研究所
基礎道路技術研究グループ
鹿島建設株式会社

Copyright © (2006) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

共同研究報告書
第328号2006年3月

# 鋼材と吹付け繊維補強モルタルを用いたトンネル覆工の補強方法の開発に関する共同研究報告書


| | | | |
|---|---|---|---|
| 独立行政法人土木研究所 | 基礎道路技術研究グループ | 上席研究員 | 真下　英人 |
| 同 | | 主任研究員 | 石村　利明 |
| 同 | | 前主任研究員 | 箱石　安彦 |
| 鹿島建設株式会社　技術研究所 | 岩盤･地下施設グループ | 上席研究員 | 山本　拓治 |
| 同 | 先端･メカトロニクスグループ | 主任研究員 | 名児耶　薫 |
| 同 | 土木構造・材料グループ | 上席研究員 | 坂田　昇 |
| 同 | | 研究員 | 平石　剛紀 |
| 同 | | 研究員 | 福田　一郎 |
| 同 | | 研究員 | 松原　功明 |


**要旨**

変状の発生したトンネルに対して耐荷力を強化することを目的とした各種の補強対策が実施されているが、内空断面に余裕がない場合の圧縮力に対する十分な補強対策が困難であった。このため、内空断面に余裕がない場合でも圧縮力に対し充分な安全性が確保でき、かつコスト縮減、工期短縮が計れるようなトンネル内巻工の薄肉化に関する開発を共同で進めてきた。本共同研究報告書は、共同で開発した「鋼材と吹付け繊維補強モルタルを用いた内巻補強工法」について、施工方法・耐荷力評価方法に関する検討と、実大規模の載荷実験から得られた知見について取りまとめたものである。

キーワード：トンネル、補強、内巻、繊維

# 目　次


1．研究概要・目的・・・

## 1．研究概要・目的

今後増大が予測される変状が発生したトンネルの効率的な維持管理を進めるために、このようなトンネルに対して適切な補修・補強を行うための合理的な設計手法の確立が求められている。変状の発生原因は過大な土圧の作用またはコンクリート覆工の材質劣化とに大きく分けられ、過大な土圧の作用による変状に対しては補強工を実施している。現在主に用いられている覆工への補強工は、内面補強工（鋼板接着工、繊維シート接着工法など）と内巻工（吹付け、現場打ちコンクリートなど）があり、これらに関する載荷実験、設計方法の提案なども行われて、耐荷力を強化することを目的に各種補強対策が実施されている。しかし、内面補強に関して、覆工に過大な圧縮力が働き、曲げ圧縮やせん断で破壊するような補強効果については十分に明らかにされていないため、内空断面に余裕のない場合の圧縮力に対する十分な補強対策が困難であった。

したがって、内空断面に余裕が無い場合でも圧縮力に対して十分な安全性を確保できる補強対策の開発が社会的に望まれている。このために、従来のコンクリート内巻工の薄肉化を計り、鋼材と吹付け繊維補強コンクリートを用いた内巻工による補強技術を開発することが本研究の目的である。

## 2．開発工法

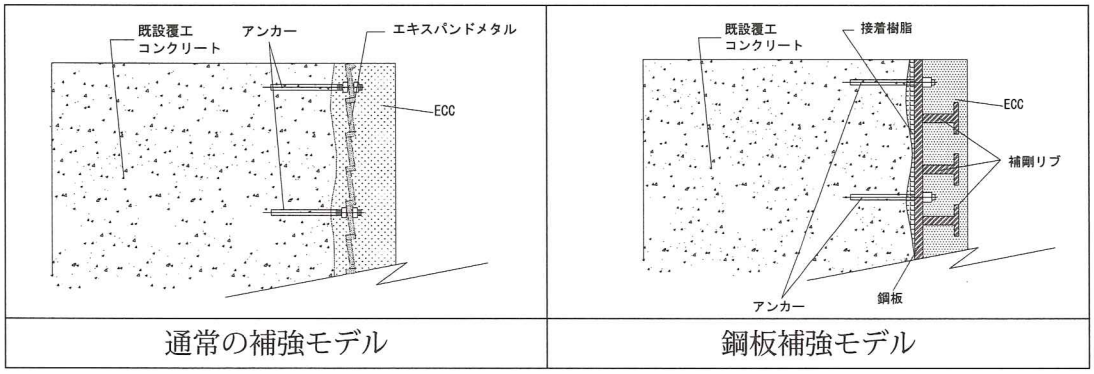
### 2．1　概要

地圧等の外力作用により変状が生じたトンネル覆工を対象としており，鋼材と吹付け施工の高靭性セメント複合材料（ECC）を用いたトンネル補強工法である。

### 2．2　仕様

（1）概要

既設覆工内面をブラストまたはウォータージェットによる表面処理を行った後，エキスパンドメタルなどの鋼材をアンカーで既設覆工に設置して ECC の吹付けを行う。エキスパンドメタルなどは，吹付け施工性の向上と長期的な剥落防止を目的として設置している。既設覆工の損傷度合いに応じて，鋼板などを併用した補強も可能である。




図－2．2．1　補強モデル

（2）特徴

本工法の特徴を以下に示す。

①薄肉断面

ECC は鋼材の降伏ひずみの 10 倍程度の引張ひずみが作用しても引張力を保持できる材料であり，また，同様に圧縮靭性も高い性能を示す。既設覆工の増厚材料として適用した場合，応力の分配効果に優れ，局所的な破壊を抑制する。既設覆工と合成した補強効果が期待できるため，補強断面の薄肉化により建築限界の確保が図れる。

②剥離・剥落抵抗性

ECC はモルタル中に多量の繊維を含み，繊維の架橋効果によりひび割れの貫通を抑制する。さらに，エキスパンドメタルを介して，アンカーにより機械的に既設覆工に定着されるため，コンクリート片の剥離・剥落を防止する。

③耐久性

ECC は耐久性に優れるため，補強材の腐食を抑制し，長期的な補強効果が得られる。

④施工性

ECC は吹付け施工のため，型枠支保工等の設置が必要なく工期短縮が図れる。また，プ

レミックス化されているため，現場での練混ぜ作業が容易である。

⑤汎用性

既設覆工の損傷度合いにより，部分的な鋼板補強が可能である。

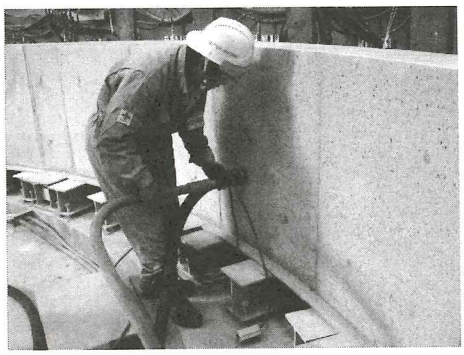
（3）補強工

本工法の補強工の流れを以下に示す。各工程の詳細を次頁以降に示す。

①既設覆工表面処理

↓

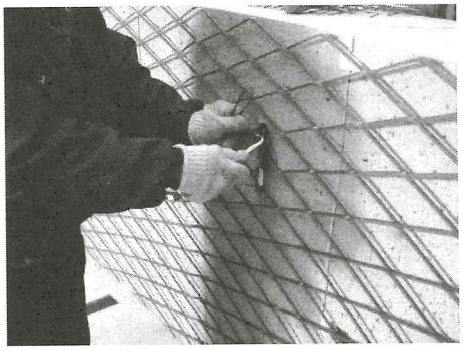
ECCと既設覆工の一体化を図るため，既設覆工の表面処理を行う。必要に応じてひび割れ注入などの止水処理や断面修復を併用する。



②鋼材設置

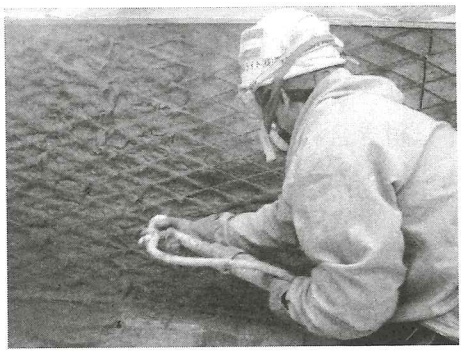
↓

既設覆工にアンカーを設置して，エキスパンドメタルの取付けを行う。部分的に鋼板を設置することも可能である。



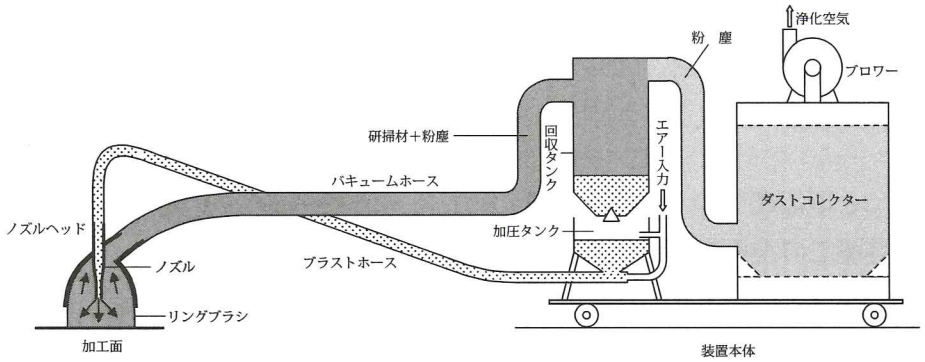
③ECC吹付け

ECCの吹付けを行う。ECCは設計厚さに応じて数層に分けて施工する。



①表面処理

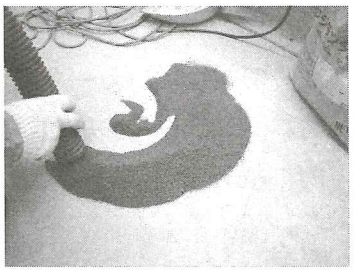
既設覆工と ECC の一体化を図るため，既設覆工内面はブラストやウォータージェットなどを用いた表面処理を行う。表面処理の仕様は，平均処理深さで 1～2mm 程度である。図－2.2.2 にサンドブラストを用いる場合の施工システムを，表－2.2.1 に標準的な研磨剤の仕様を示す。




図－２．２．２　ブラスト施工システム

表－２．２．１　研磨材仕様

| 項目 | 摘要 |
|---|---|
| 材質 | アルミナ |
| 粒度 | 500～595 μm |
| 比重 | 3.94g/cm³ 以上 |



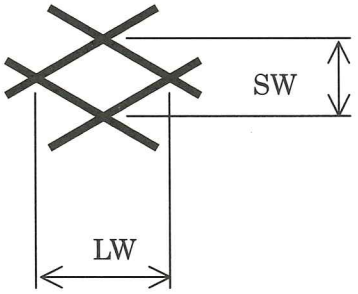
写真－２．２．１　研磨剤

②エキスパンドメタル

エキスパンドメタルのメッシュ形状を表－2.2.2 に示す。エキスパンドメタルの材質は SPHC（JIS G 3131 熱間圧延軟鋼板および鋼帯の一種）である。エキスパンドメタルの継手は付き合わせ継手とし，エキスパンドメタルの取付けには金属拡張系の M8 以上のアンカーを用いる。なお，エキスパンドメタルの他に溶接金網 D6～D22 を用いることも可能である。但し，鋼材と既設覆工間は，ECC の充填性を確保するため，10mm 以上でかつ鋼材径以上の間隔を確保する必要がある。

表－２．２．２　エキスパンドメタルのメッシュ形状

| エキスパンドメタルの種類 | メッシュ寸法（mm） | | |
|---|---|---|---|
| | SW | LW | 板厚 |
| XS-82 | 75 | 203.2 | 4.5 |

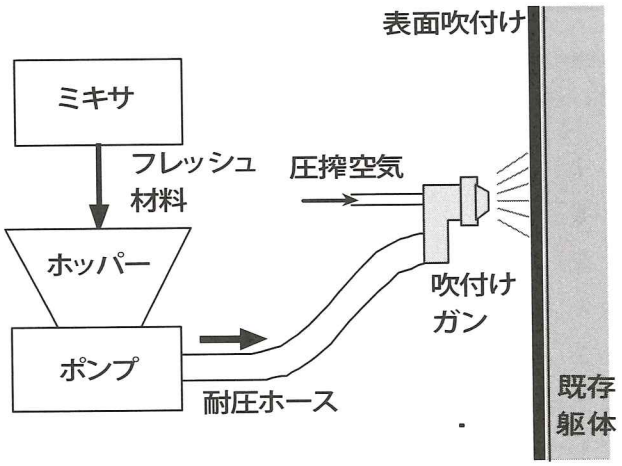


③ECC

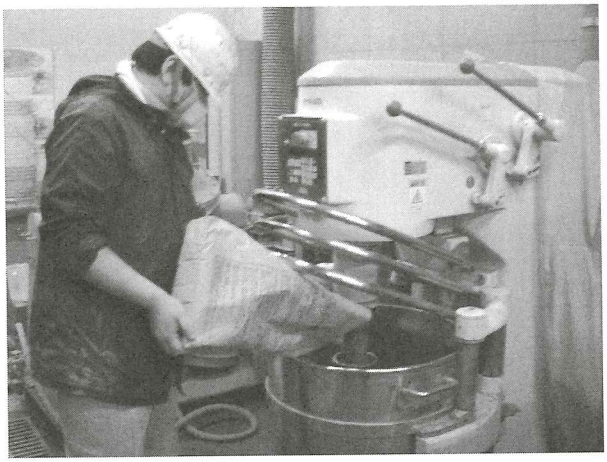
ECC の仕様を表－2.2.3 に示す。図－2.2.3 に ECC の吹付け施工システムを示す。写真－2.2.2 に ECC の練混ぜ状況を示す。ECC の練混ぜは通常，ホバートミキサで行う。ECC はプレミックスされており，現場での練混ぜ施工性に優れている。

表－２．２．３　ECC の仕様

| 項目 | 摘要 |
|---|---|
| 圧縮強度の下限値（N/mm²） | 24 |
| 使用繊維 | 高強度PVA繊維 |
| 繊維混入率（vol.%） | 2.1 |
| モルタルの仕様 | プレミックス材 |

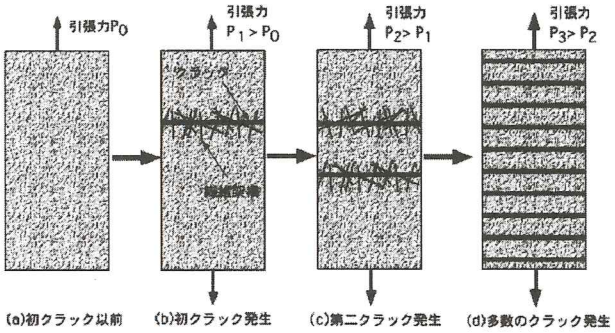



図－２．２．３　ECC 吹付け施工システム

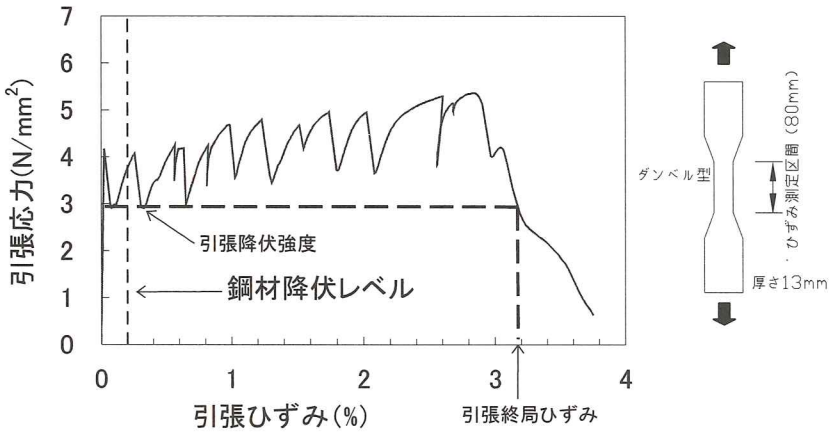


写真－２．２．２　ECC の練混ぜ状況

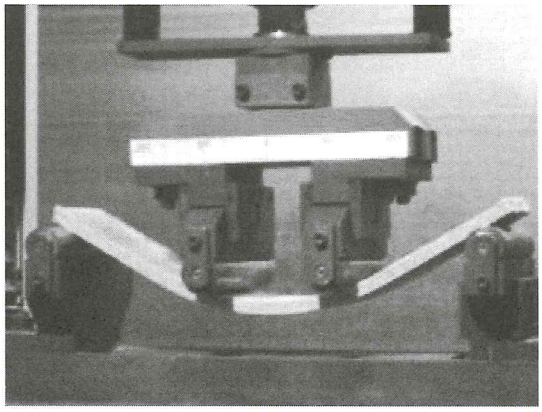
ECC は，ひび割れ発生後もモルタルマトリックス中の繊維の架橋効果により，引張力を負担するセメント系材料で，準自己充填型の ECC ならびに汎用的な吹付け施工システムで施工可能な ECC が実用化のレベルに達している。鋼材の降伏ひずみの 10 倍程度の引張ひずみが作用した場合でも引張力を保持できる材料である。(図－2.2.4 および図－2.2.5 参照) 写真－2.2.3 に曲げ試験での ECC の状況を示す。従来の吹付けコンクリートと異なり，長期的な剥離・剥落の可能性が非常に少ない材料である。




図－２．２．４　引張荷重を受ける ECC のひび割れ発生メカニズム




図－２．２．５　一軸引張試験における ECC の引張応力－ひずみ曲線の測定例

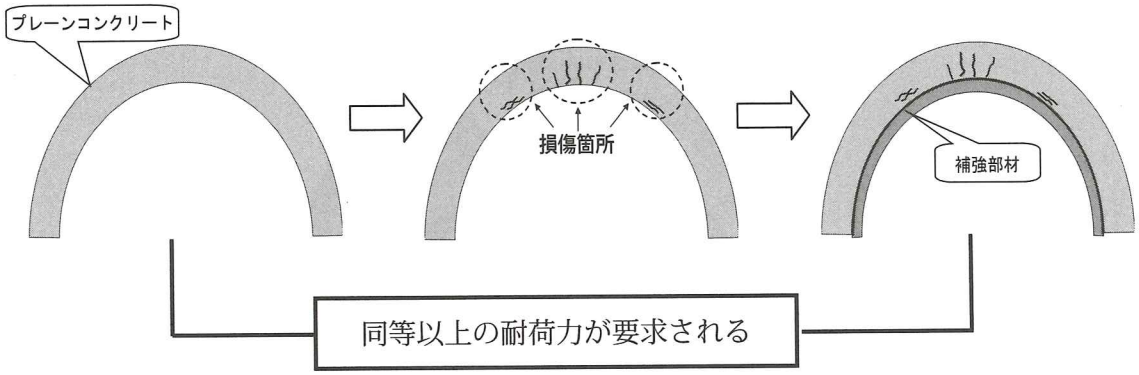


写真－２．２．３　吹付け ECC の優れた変形性能

## ２．３　適用範囲

（１）基本的な考え方

トンネル覆工は，周辺地山に弾性支承されたアーチ構造であり，背面の拘束状態に応じて，発生する断面力が異なる。ECC を用いた補強工法では，損傷を受けた覆工の補強後のトンネル構造全体の耐荷力が既設覆工を上回ることを目標とした（図－2.3.1)。耐荷力の評価は，材料非線形を考慮したフレーム解析などを用いることができる。




図－２．３．１　要求性能のイメージ

（２）ECC

室内検証実験の実績では、ECC の吹付け厚さは ７ｃｍまでである。これ以上の厚さを吹き付ける場合には，適用に先立ち，施工性の試験を行って評価を行う必要がある。なお，トンネル湧水が発生している場合は，ECC 吹付けに先立ち，適切な止水処理が必要である。

（３）エキスパンドメタル

エキスパンドメタルとして適用実績があるのは，XS－82 であり，これと大幅に異なるエキスパンドメタルを使用する場合には，適用に先立ち，施工性の試験を行って評価を行う必要がある。なお，溶接金網等を適用する場合には，D6～D22 まで実績がある。但し，鋼材と既設覆工間は，ECC の充填性を確保するため，10mm 以上でかつ鋼材径以上のあきを確保する必要がある。

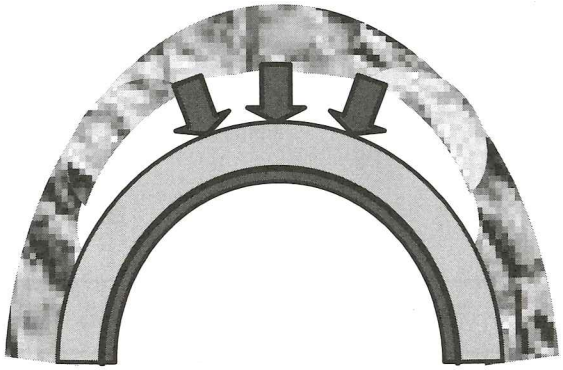
## ２．４　性能

### ２．４．１　耐荷力

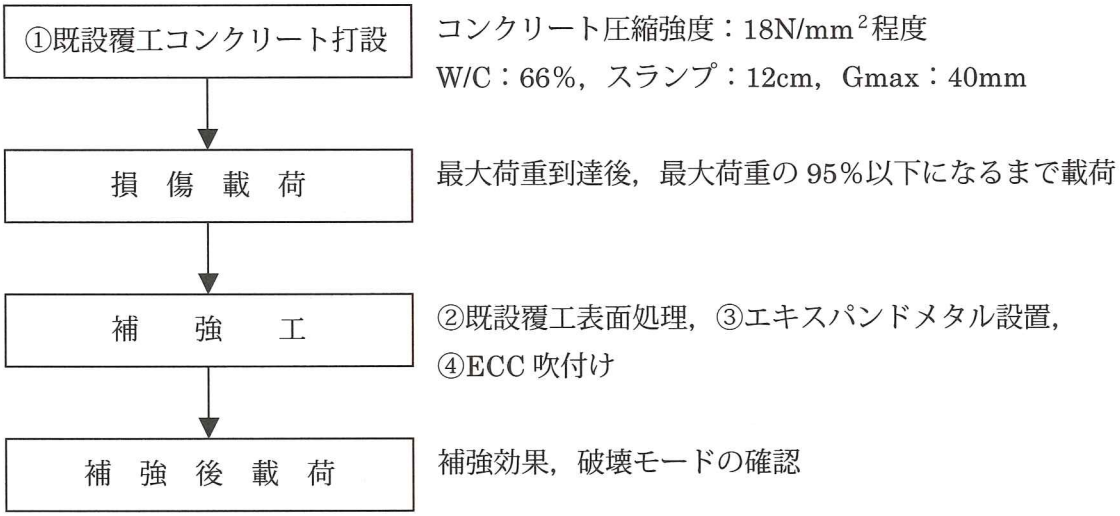
（１）載荷形式Ⅰ試験概要および結果

１）目的

緩み圧のような曲げ卓越型の荷重状態を対象として，本工法の補強効果の確認を目的に実大規模の載荷実験を実施した。図－2.4.1 に試験対象のイメージを示す。図－2.4.2 に試験の流れを示す。損傷が生じた状態での耐荷力確認のため，補強工実施前に既設覆工単体で最大荷重の 95%以下になるまで損傷載荷を実施した後，補強後載荷を実施した。



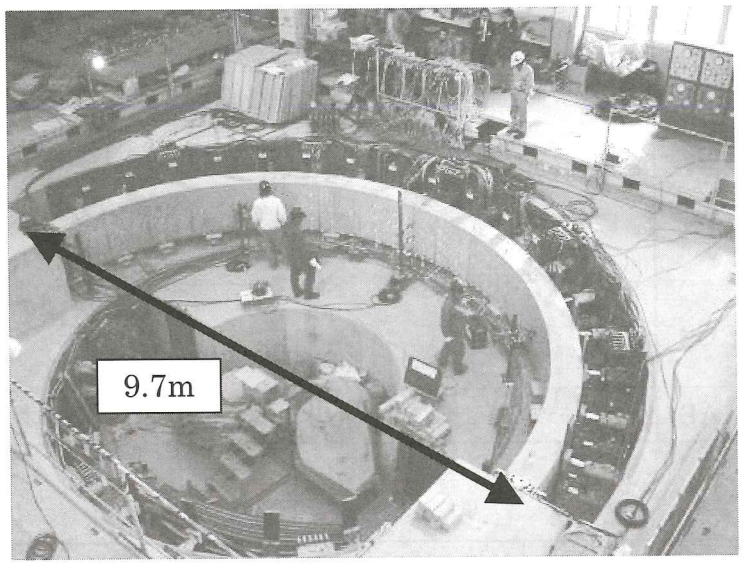
図－２．４．１　試験対象イメージ




図－２．４．２　試験の流れ

2）試験体製作

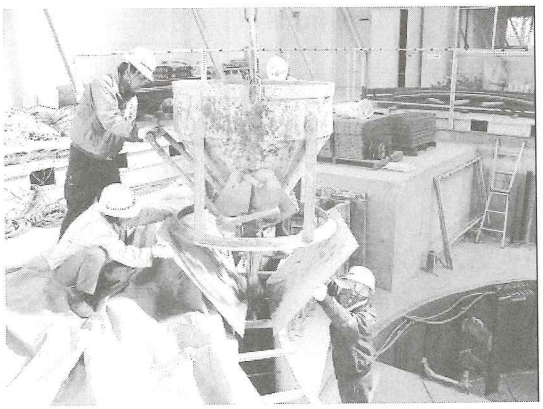
試験は写真－2.4.1 に示す（独）土木研究所所有の実大試験装置を使用して行った。図－2.4.2 に示す①～④の試験体製作項目について，それぞれの詳細を示す。




写真－２．４．１　試験施設

①既設覆工打設

表－2.4.1～表－2.4.3 に既設覆工の配合，使用材料，品質管理試験結果を示す。



写真－２．４．２　既設覆工打設状況

表－２．４．１　既設覆工の配合

| W/C | s/a | 単位量(kg/m³) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (%) | (%) | W | C | S1 | S2 | G1 | G2 | AE |
| 66.0 | 42.6 | 157 | 238 | 563 | 241 | 728 | 392 | 2.52 |

表－２．４．２　使用材料

| 使用材料 | 記号 | 名称 | 摘要 |
|---|---|---|---|
| 水 | W | 新治村水道水 | － |
| セメント | C | 普通ポルトランドセメント | 密度：3.16g/cm³，比表面積：3280cm²/g |
| 細骨材 | S1 | 行方産中目砂 | 表乾密度：2.59g/cm³，粗粒率：2.68 |
| | S2 | 新治産砕砂 | 表乾密度：2.64g/cm³，粗粒率：2.78 |
| 粗骨材 | G1 | 新治産砕石 | 骨材最大寸法：20mm<br>表乾密度：2.69g/cm³，粗粒率：6.65 |
| | G2 | 新治産砕石 | 骨材最大寸法：40mm<br>表乾密度：2.71g/cm³，粗粒率：7.99 |
| AE 減水剤 | AE | ポゾリス No.70 | リグニンスルホン酸系 |

表－２．４．３　既設覆工品質管理試験結果

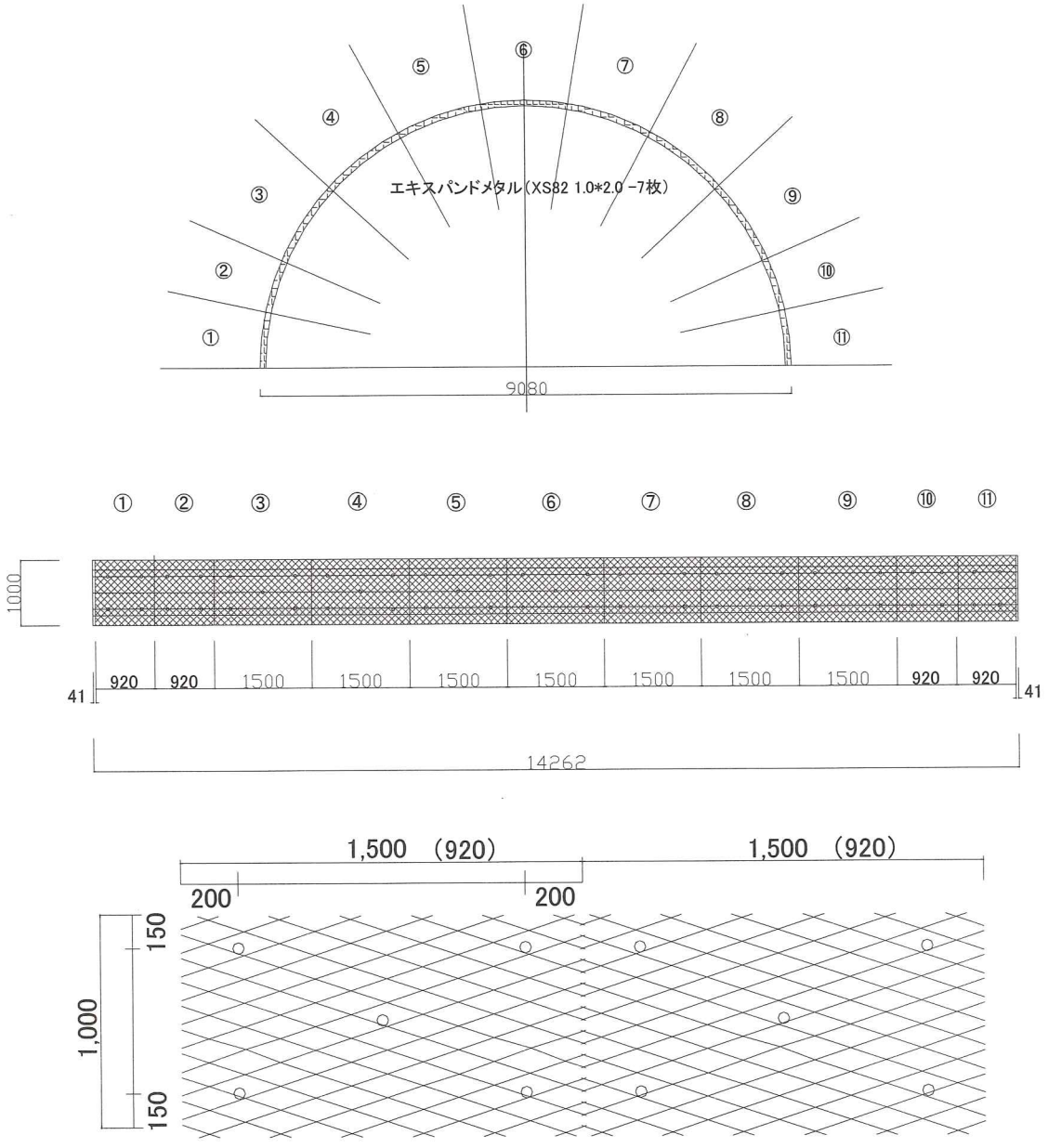
| 試験項目 | | 目標値 | 試験値 | | 摘要 |
|---|---|---|---|---|---|
| フレッシュ性状 | スランプ | 12±2.5cm | 11.0cm | | JIS A 1101 |
| | 空気量 | 4.5±1.5% | 4.2% | | JIS A 1128 |
| 硬化性状 | 圧縮強度 | 18N/mm²以上 | 損傷載荷時（材齢 14 日） | 20.0N/mm² | JIS A 1108（現場封緘養生） |
| | | | 本載荷時（材齢 53 日） | 22.4N/mm² | |

②既設覆工表面処理

損傷載荷後，施工の支障となる計測機器類を撤去し，基盤コンクリート内面全体（縦 1m×横約 14m＝約 14m²）をサンドブラストによる表面処理を行った。サンドブラストの仕様は，2.2 仕様の（３）と同様である。

③エキスパンドメタル設置

既設覆工表面とエキスパンドメタルの離隔は 10mm とした。エキスパンドメタルの覆工周方向を“たたみ目”とし，あらかじめ覆工曲面にあわせて曲げ加工したものを用いた。また、継手は付き合わせ継手とし，治具によりアンカーに固定した。




＊　図中内単位：mm

図－２．４．３　エキスパンドメタル設置方向

④ECC 吹付け

ECC の吹付け厚さは 50mm とし，3 層に分けて吹付けを行った。ECC の品質管理試験結果を表－2.4.4 に示す。吹付け状況を写真－2.4.3 に示す。吹付け後の出来形は良好であり，吹付け厚さ 50mm に対して，±3mm 程度の範囲だった。引張降伏強度，引張強度，引張終局ひずみの測定は次頁に示すダンベル型供試体を用いた一軸引張試験によって行なった。

表－２．４．４　ECC の品質管理試験結果

| 試験項目 | | 目標値 | 試験値 | | | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1 層目 | 2 層目 | 3 層目 | |
| ﾌﾚｯｼｭ性状 | ｽﾗﾝﾌﾟﾌﾛｰ | 325mm±75m | 375×350m | 370×350m | 370×355m | — |
| | 単位容積質量 | — | 1,401kg/m$^3$ | 1,404kg/m$^3$ | 1,421kg/m$^3$ | — |
| | 空気量 | — | 20%over | 20%over | 20%over | — |
| | 練り上がり温度 | — | 19.1℃ | 19.3℃ | 20.0℃ | — |
| | 吹付け性状 | — | 良好 | 良好 | 良好 | — |
| 硬化性状 | 圧縮強度 | — | 43.9N/mm$^2$ | — | — | 材齢 53 日封緘養生 |
| | 引張降伏強度 | | 3.5N/mm$^2$ | | | |
| | 引張強度 | — | 5.6N/mm$^2$ | — | — | |
| | 引張終局ひずみ | — | 2.5% | — | — | |



写真－２．４．３　ECC 吹付け状況

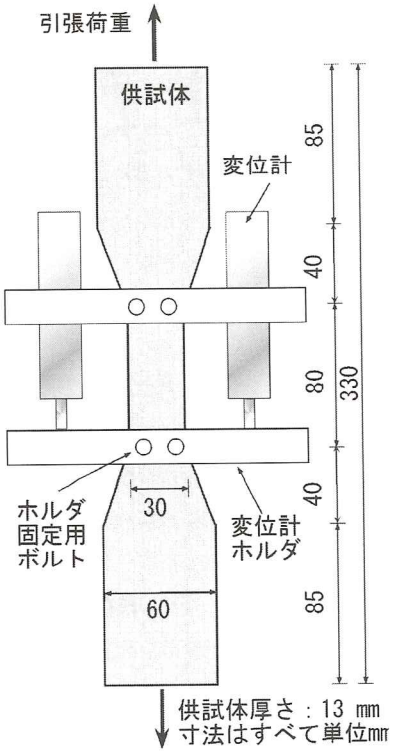
〔ダンベル型供試体を用いた一軸引張試験の方法〕

一軸引張試験に用いる供試体は，図－2.4.4 に示す試験区間 80mm，幅 30mm，厚さ 13mm に形成したダンベル型の供試体とする。試験体の厚さは、混入する繊維の長さ以上とした。幅は試験体の厚さの 2 倍以上、試験区間は幅の 2.5 倍以上として設定した。

試験は，両端の支持条件をピン-固定で行い、載荷を 0.5mm/min のひずみ制御とする。ひずみは試験区間における伸び量を試験区間長で除した値である。

データ整理は引張降伏強度、引張強度、引張終局ひずみについて行なう。引張降伏強度は，金属材料の下降伏点に相当する値として求める。引張強度は引張応力度の最大値である。引張終局ひずみは，規格引張降伏強度（今回の吹付け ECC の場合は 2.0N/mm²）を確保できる最大のひずみとして求める。

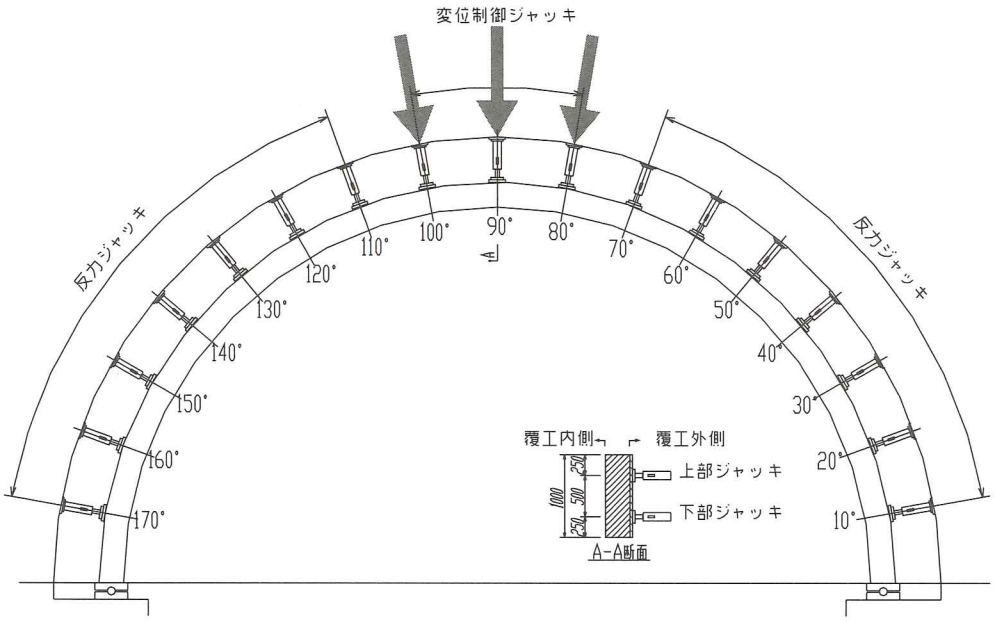
試験体数は 5 体とし、5 体の試験結果のうち，上下 2 体を除いた 3 体の平均値とする．




図－２．４．４　ダンベル型一軸引張試験

3）載荷概要

図－2.4.5 に載荷概要図を示す。補強後載荷に先立ち，ジャッキ，載荷板，覆工供試体および支承部の固定を図るため，初期軸力導入を行った。初期軸力導入は全ジャッキにて等圧載荷（荷重制御）し，各ジャッキが 20kN／本に達するまで、荷重増加分約 5kN ずつ段階的に載荷した。各ジャッキが約 20kN に達した時点で、載荷部（80 度、90 度、100 度）以外のジャッキを閉め、以降の本載荷では反力ジャッキとした。本載荷は、載荷部（80 度、90 度、100 度）のジャッキ（全 6 本）を、変位制御に切り替え、強制変位を段階的に載荷した。1 ステップあたりの強制変位量は、90 度累計変位が 10 ㎜に達するまでは、前述の増分変位量の 1/2 とした。




図－２．４．５　載荷概要図

4）計測要領

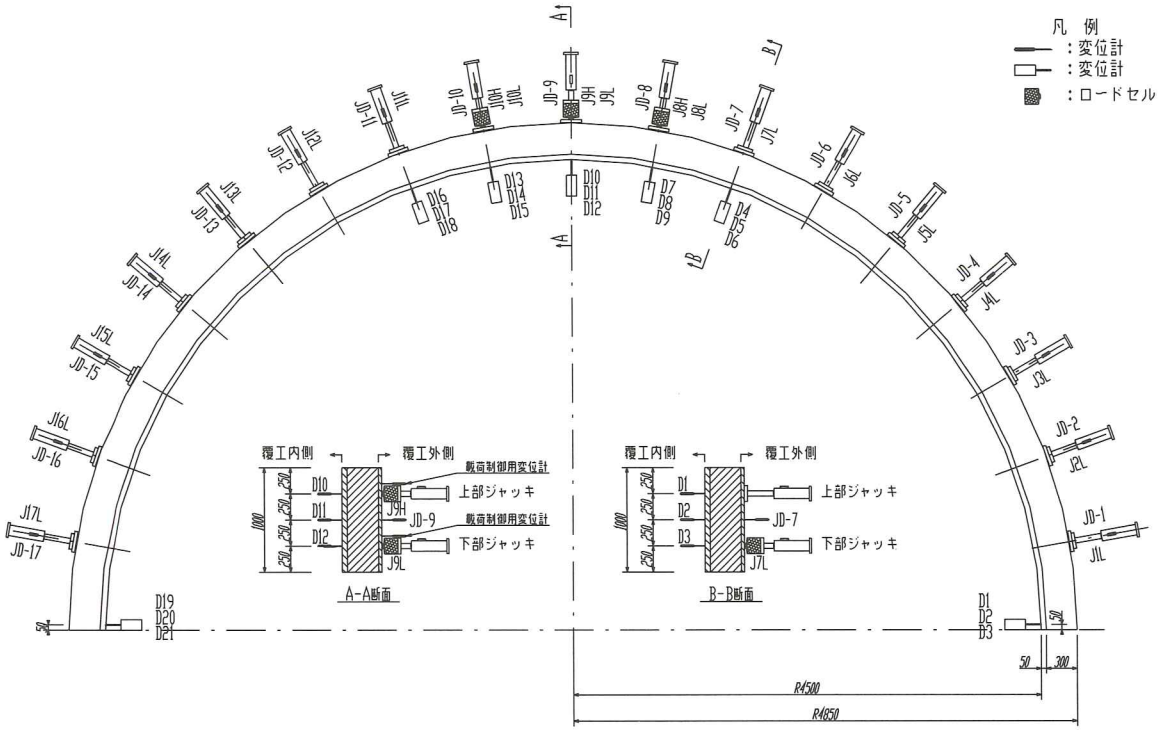
表－2.4.5 および表－2.4.6 に，損傷載荷および補強後載荷での計測要領を示す。図－2.4.6～図－2.4.8 に計測位置図を示す。

表－２．４．５　損傷載荷の計測項目および計測点数

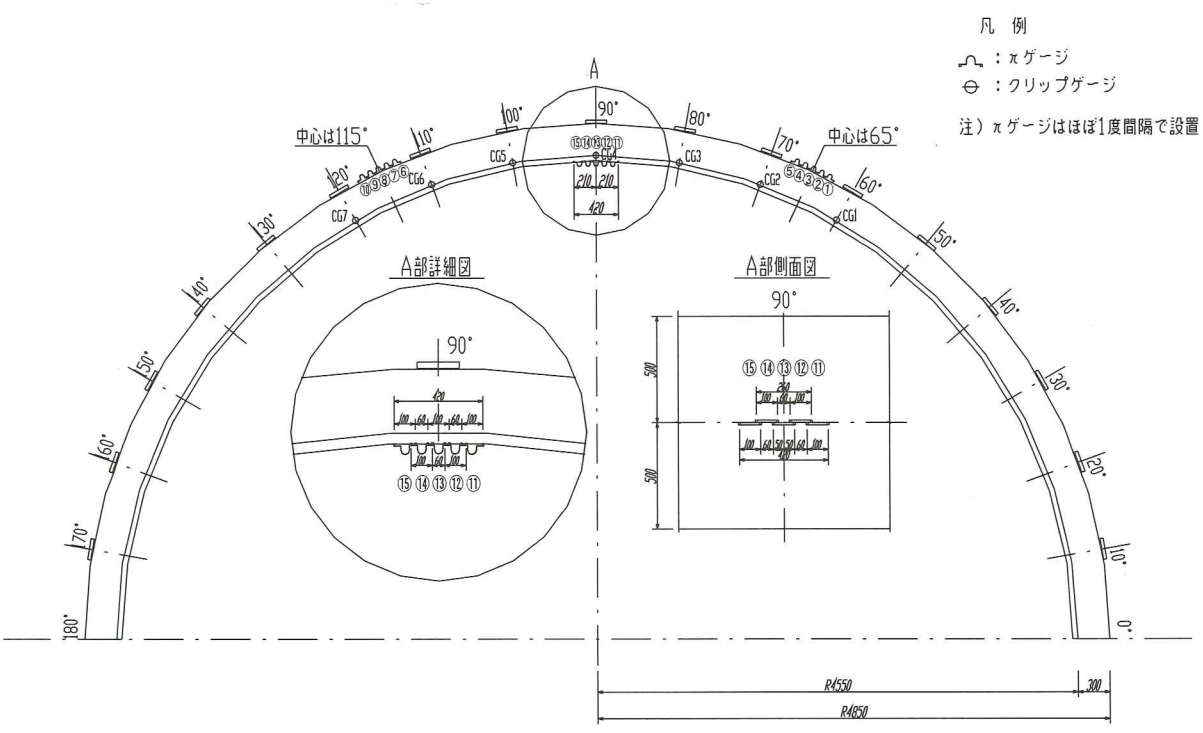
| 測定項目 | 測定機器 | 数量 | 備　　考 |
|---|---|---|---|
| 試験体開口幅 | 変位計(π型) | 15 | 5台×　3ヶ所 |
| 試験体ひずみ | ひずみゲージ | 73 | |
| ｼﾞｬｯｷｽﾄﾛｰｸ | 変位計(ひずみ型) | 23 | 1段×17箇所＋　2段×　3ヶ所 |
| 試験体変位 | 変位計(ひずみ型) | 21 | 3段×　7ヶ所 |
| 載荷荷重 | ﾛｰﾄﾞｾﾙ，圧力変換器 | 12 | ﾛｰﾄﾞｾﾙ：2段×　3ヶ所，変換器：2段×　3ヶ所 |
| ｼﾞｬｯｷ反力 | ﾛｰﾄﾞｾﾙ | 14 | ﾛｰﾄﾞｾﾙ：下段×14ヶ所 |

表－２．４．６　補強後載荷の計測項目および計測点数

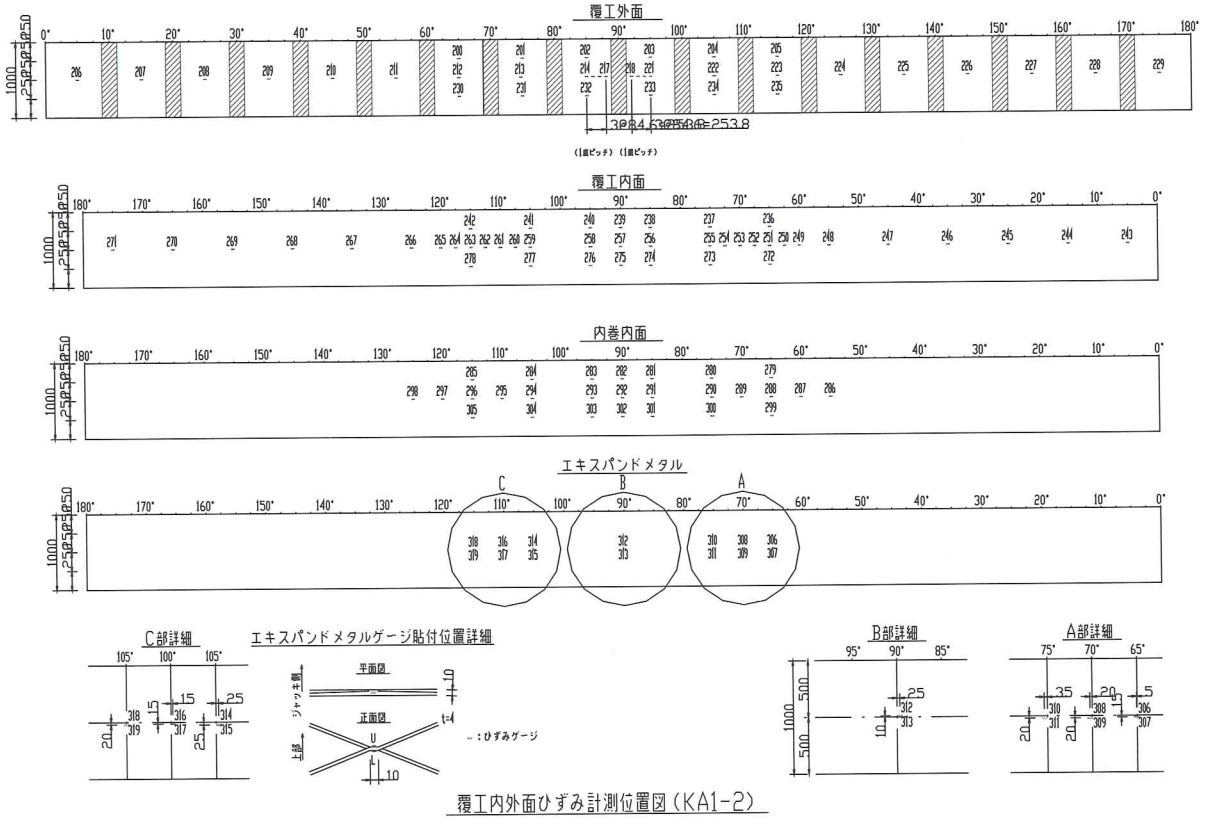
| 測定項目 | 測定機器 | 数量 | 備　　考 |
|---|---|---|---|
| 試験体開口幅 | 変位計(π型) | 9 | 3台×　3ヶ所 |
| 界面の開き | 変位計(π型) | 7 | 60度から120度の範囲に等間隔に設置 |
| 試験体ひずみ | ひずみゲージ | 114 | 既設73箇所，補強部27箇所，ｴｷｽﾊﾟﾝﾄﾞﾒﾀﾙ14箇所 |
| ｼﾞｬｯｷｽﾄﾛｰｸ | 変位計(ひずみ型) | 23 | 1段×17箇所＋　2段×　3ヶ所 |
| 試験体変位 | 変位計(ひずみ型) | 21 | 3段×　7ヶ所 |
| 載荷荷重 | ﾛｰﾄﾞｾﾙ，圧力変換器 | 12 | ﾛｰﾄﾞｾﾙ：2段×　3ヶ所，変換器：2段×　3ヶ所 |
| ｼﾞｬｯｷ反力 | ﾛｰﾄﾞｾﾙ | 14 | ﾛｰﾄﾞｾﾙ：下段×14ヶ所 |




図－２．４．６　荷重計・変位計設置位置




図－２．４．７　π型変位計・クリップゲージ設置位置



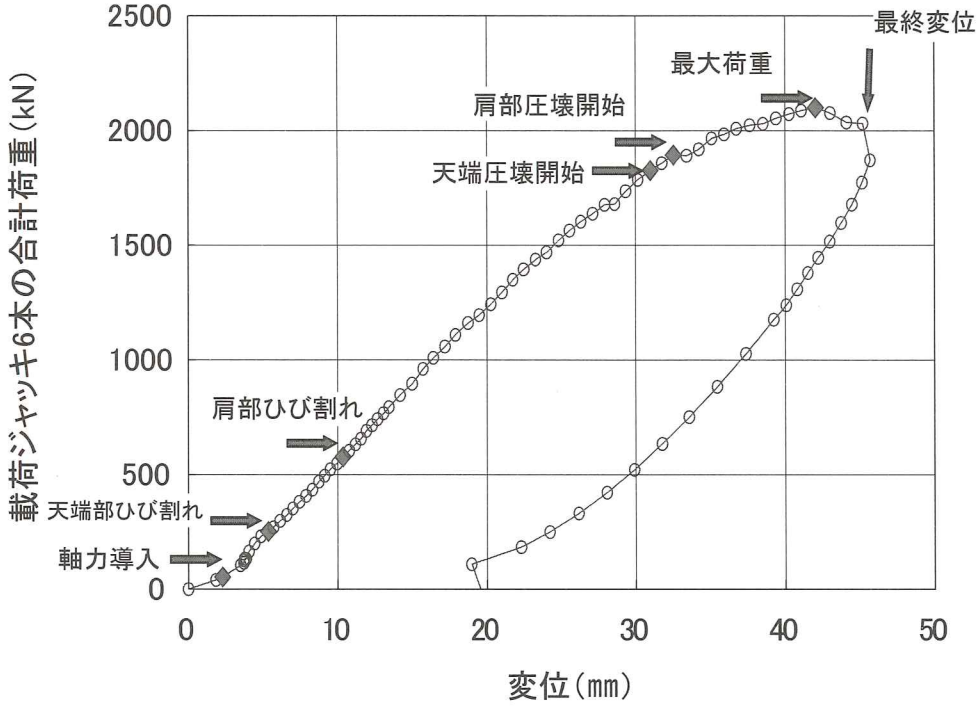

図－２．４．８　ひずみゲージ設置位置

5）試験結果

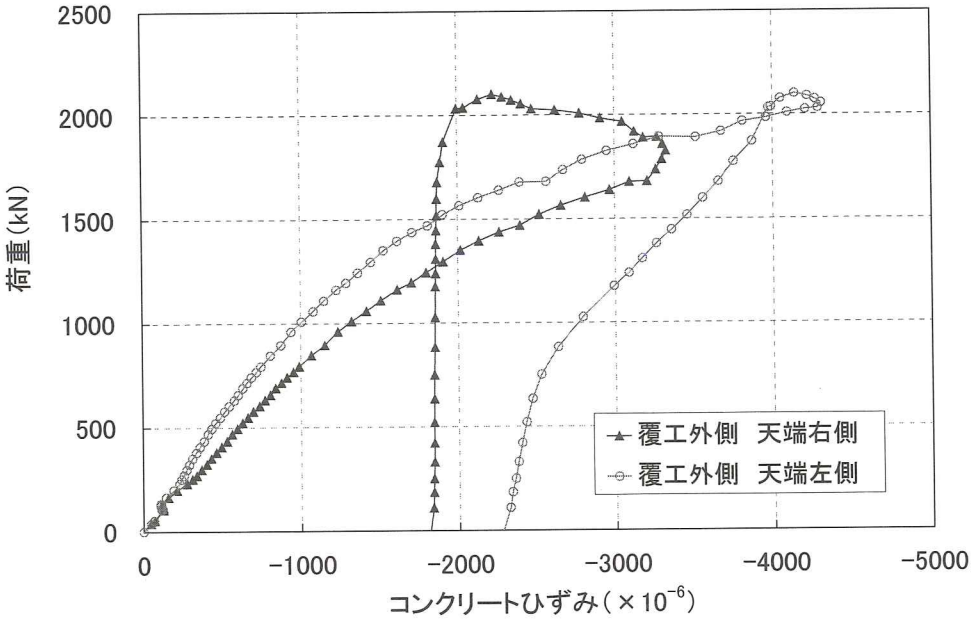
①損傷載荷

図－2.4.9 に荷重（載荷ジャッキ 6 本合計，以下同様）と天端部覆工内側変位の関係を示す。図－2.4.10 および図－2.4.11 に荷重と天端部および肩部のコンクリートひずみの関係を示す。図－2.4.12 に終局時のひび割れ状況を示す。写真－2.4.4～写真－2.4.6 に実験終了時の状況を示す。

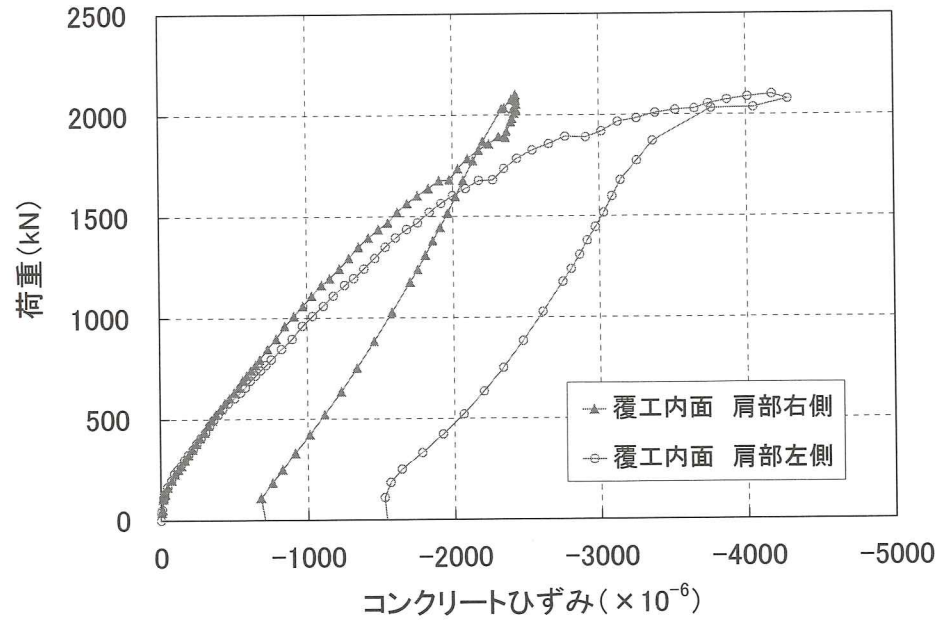
天端部内面からひび割れが発生し，次に肩部外側でひび割れが発生した。天端部，肩部のコンクリートひずみがいずれも $3,500\times10^{-6}$ に達してから，周方向のひび割れが発生した後も荷重は増加した。天端部の変位が 42mm で，最大荷重 2,100kN に達した。その後，荷重が緩やかに低下し，荷重 2,030kN，変位 45mm に達した後，1,871kN まで急激に低下したため実験を終了し，荷重の除荷を行った。



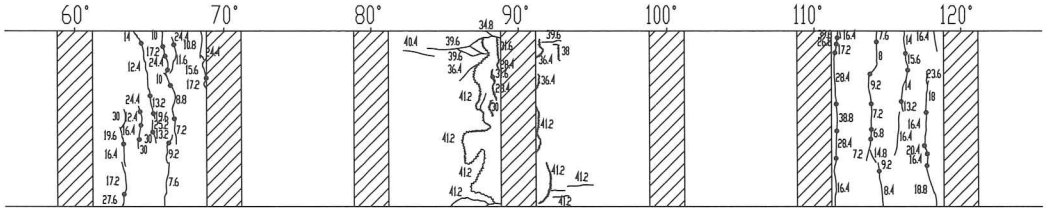

図－２．４．９　荷重－天端部内側変位関係



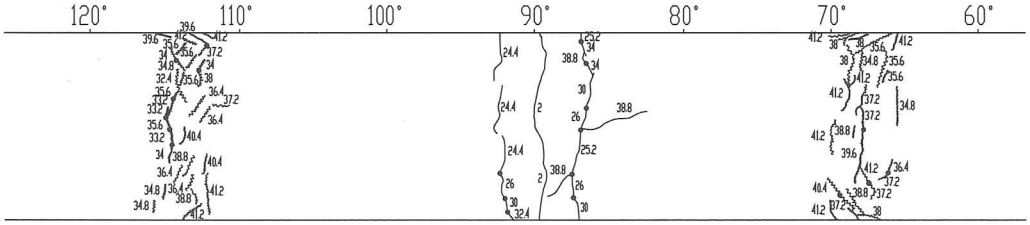

図－２．４．１０　荷重－コンクリートひずみ関係（天端部）



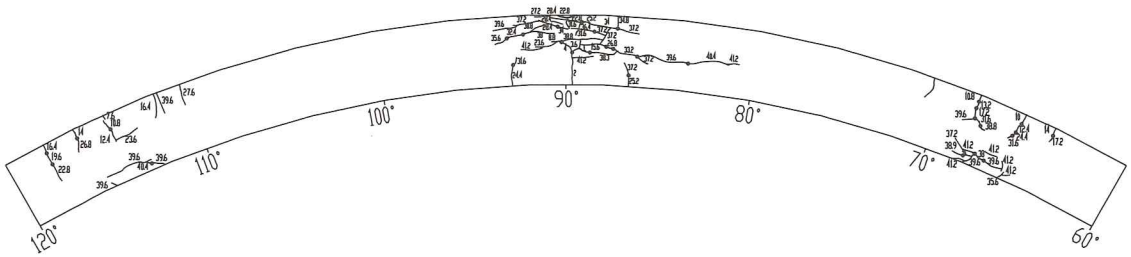

図－２．４．１１　荷重－コンクリートひずみ関係（肩部）




外面




内面




上面

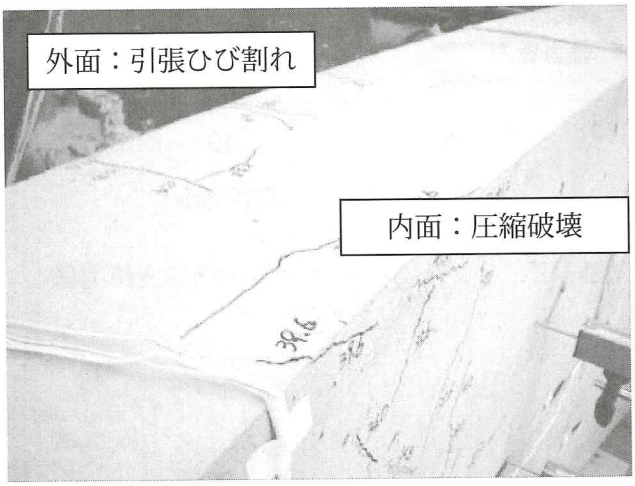
図－２．４．１２　ひび割れ状況（終局時）




写真－２．４．４　最終状況　天端部




写真－２．４．５　最終状況　65 度



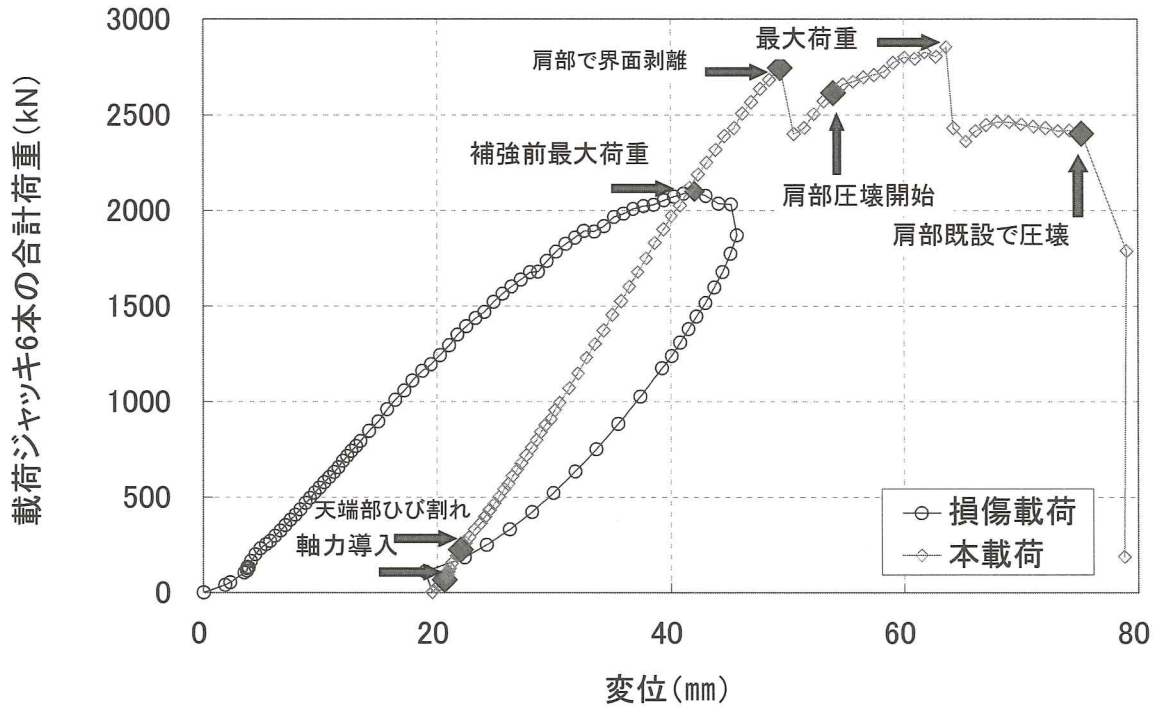

写真－２．４．６　最終状況　135 度

②補強後載荷

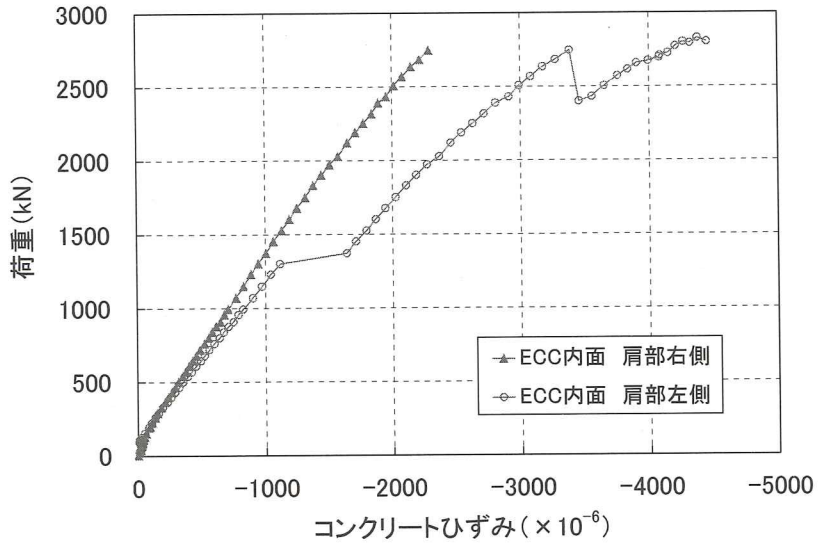
補強後載荷の荷重－変位関係を，損傷載荷終了時の荷重変位曲線に，損傷載荷時の残留変位を考慮して重ね合わせたものを図－2.4.13 に示す。図－2.4.14 に荷重と肩部のコンクリートひずみの関係を示す。図－2.4.15 に終局時のひび割れ状況を示す。写真－2.4.7～写真－2.4.12 に実験終了時の状況を示す。

荷重 224kN で天端部内側の ECC にひび割れが発生したが，ひび割れ幅は 0.04mm 以下であった。その後も荷重の増加に伴い天端部内側の ECC のひび割れ本数が増加したが，ひび割れ幅は小さく，ECC のひび割れ抑制効果が認められた。

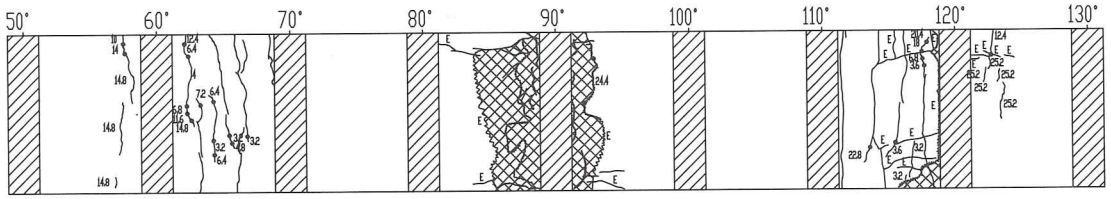
荷重 2,745kN，変位 49.5mm において，肩部で覆工と ECC 界面にずれが生じた。ずれが生じた後も荷重は増加し，天端部外面の圧縮破壊が進行した後，肩部内面の ECC で圧縮破壊が進行した。その後も，荷重を保持した状態で変形が進み，最終的には肩部の既設覆工が圧壊した。



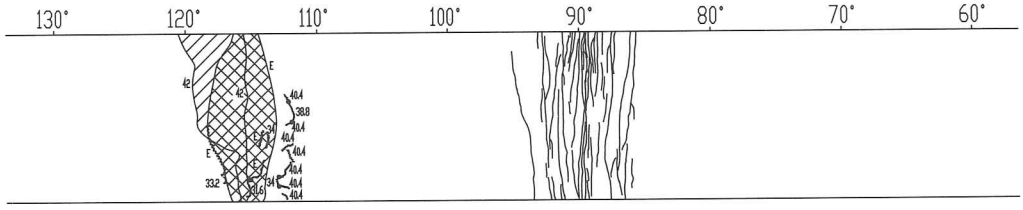

図－２．４．１３　荷重－天端内側変位関係



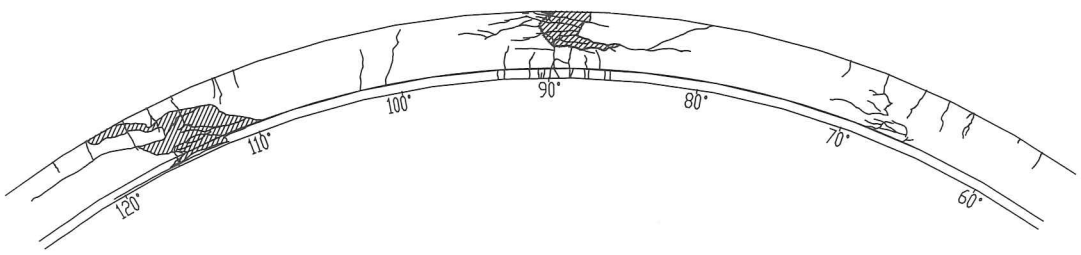

図－２．４．１４　荷重－ECC ひずみ関係（肩部）




外面

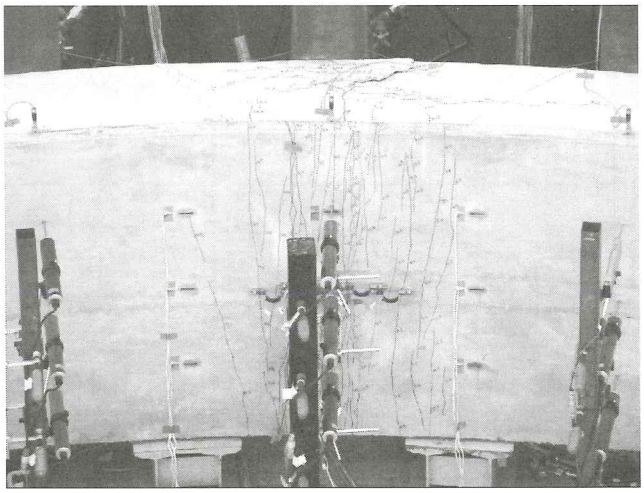



内面

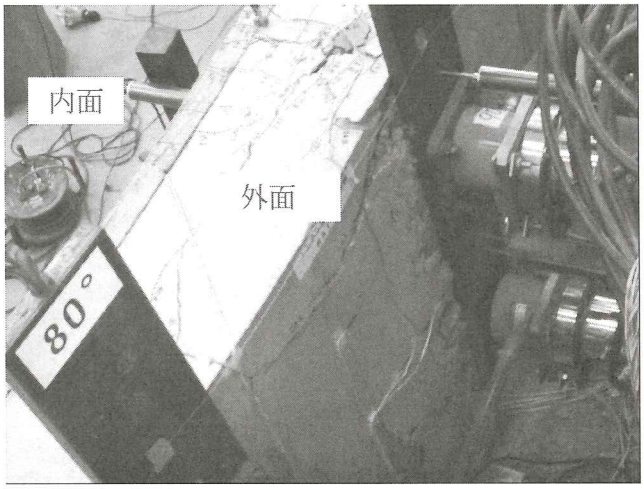



上面

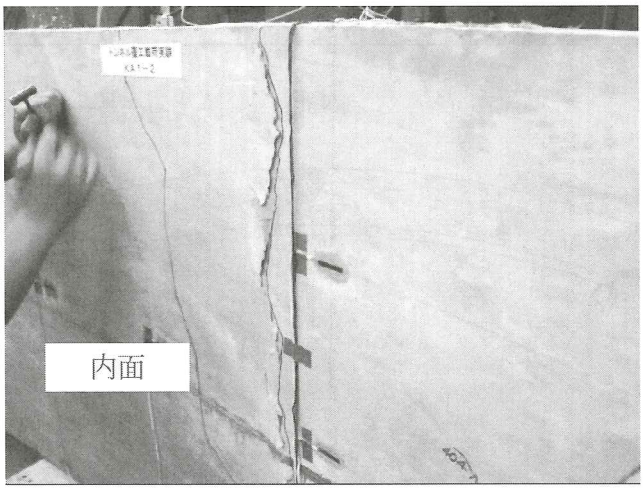
図－２．４．１５　ひび割れ状況（終局時）



写真－２．４．７　天端部内側



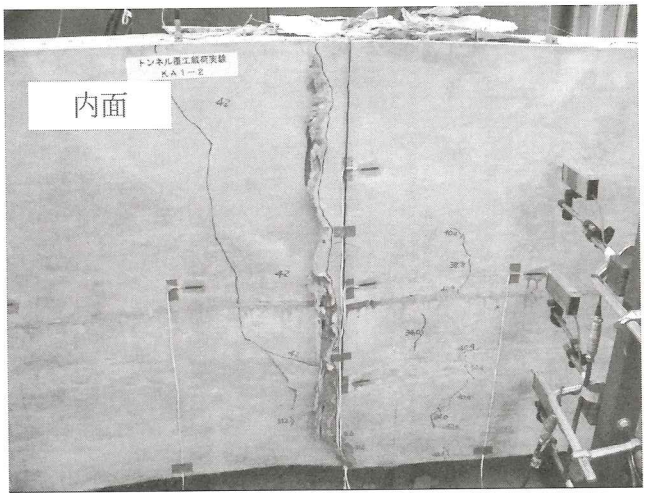

写真－２．４．８　天端部外側



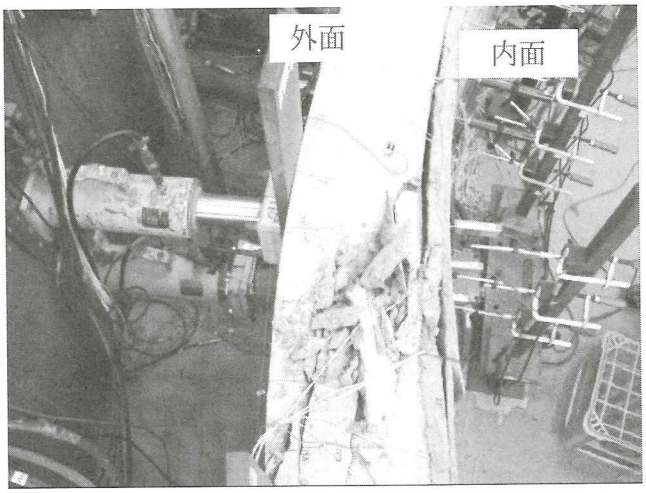

写真－２．４．９　圧縮破壊開始時の覆工内面（肩部）




写真－２．４．１０　圧縮破壊開始時の界面（肩部上面）




写真－２．４．１１　既設覆工圧壊時（肩部）




写真－２．４．１２　既設覆工圧壊時（肩部上面）

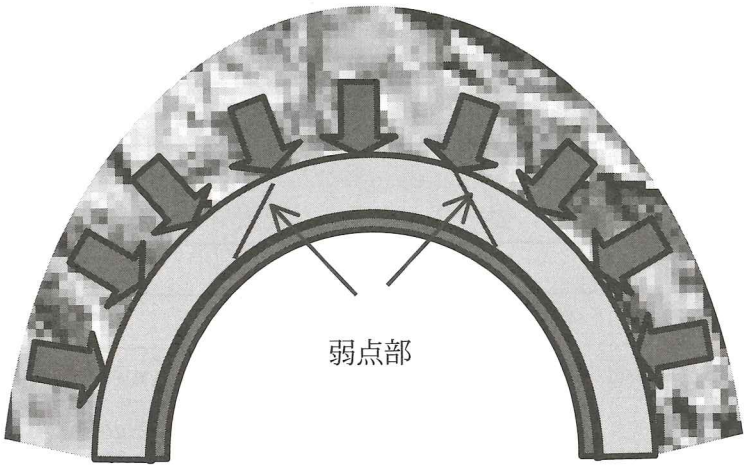
6）載荷形式Ⅰまとめ

緩み圧をモデル化したAパターン載荷実験では，本工法の補強効果，ECC のひび割れ抑制効果，覆工の剥離・剥落抑制効果が確認された。ECC 吹付け厚さ 5cm で，無垢の覆工（圧縮強度 18N/mm$^2$，覆工厚さ 30cm）以上の耐荷力が得られることが確認され，緩み圧などによる曲げ卓越型の変状に対する本工法の有効性を示すことができた。

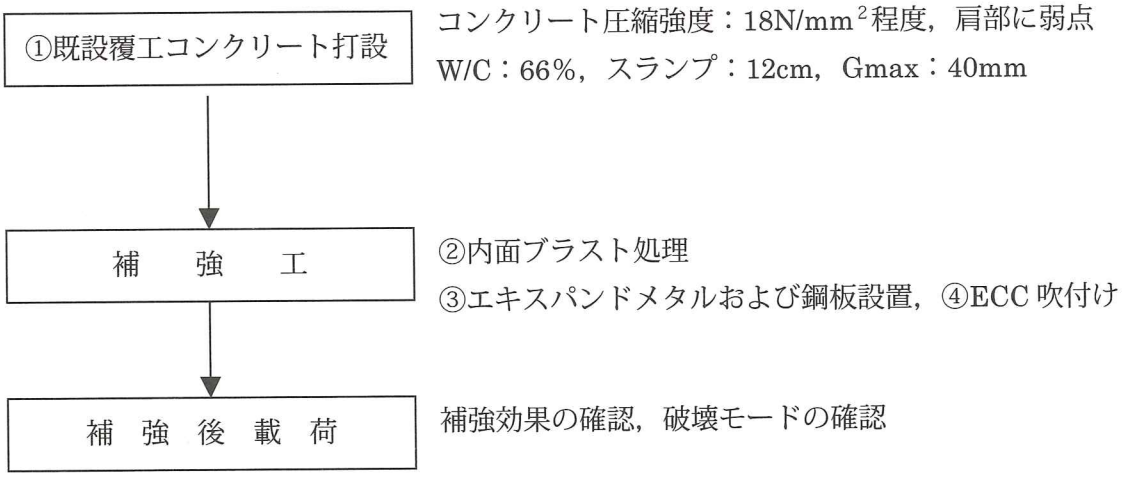
（2）載荷形式Ⅱ試験概要および結果

1）目的

せん断ひび割れや目違いが生じた覆工に，等方から荷重が作用する状態を対象として，本工法の補強効果の確認を目的に実大規模の載荷実験を実施した。せん断ひび割れや目違いなどの弱点部は，ステンレス板とテフロン板によりモデル化した。図－2.4.16 に試験対象のイメージを，図－2.4.17 に試験の流れを示す。




図－２．４．１６　試験対象のイメージ




図－２．４．１７　試験の流れ

2）試験体製作

図－2.4.17 に示す①～④の試験体製作項目について，それぞれの詳細を示す。

①既設覆工打設

表－2.4.7～表－2.4.9 に既設覆工の配合，使用材料，品質管理試験結果を示す。

表－２．４．７　既設覆工の配合

| W/C (%) | s/a (%) | 単位量(kg/m³) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | W | C | S1 | S2 | G1 | G2 | AE |
| 66.0 | 42.6 | 157 | 238 | 563 | 241 | 728 | 392 | 2.52 |

表－２．４．８　使用材料

| 使用材料 | 記号 | 名称 | 摘要 |
|---|---|---|---|
| 水 | W | 新治村水道水 | — |
| セメント | C | 普通ポルトランドセメント | 密度：3.16g/cm³，比表面積：3280cm²/g |
| 細骨材 | S1 | 行方産中目砂 | 表乾密度：2.59g/cm³，粗粒率：2.60 |
| | S2 | 新治産砕砂 | 表乾密度：2.65g/cm³，粗粒率：2.80 |
| 粗骨材 | G1 | 新治産砕石 | 骨材最大寸法：20mm<br>表乾密度：2.69g/cm³，実績率：60.0 |
| | G2 | 新治産砕石 | 骨材最大寸法：40mm<br>表乾密度：2.70g/cm³，実績率：58.0 |
| AE 減水剤 | AE | ポゾリス No.70 | リグニンスルホン酸系 |

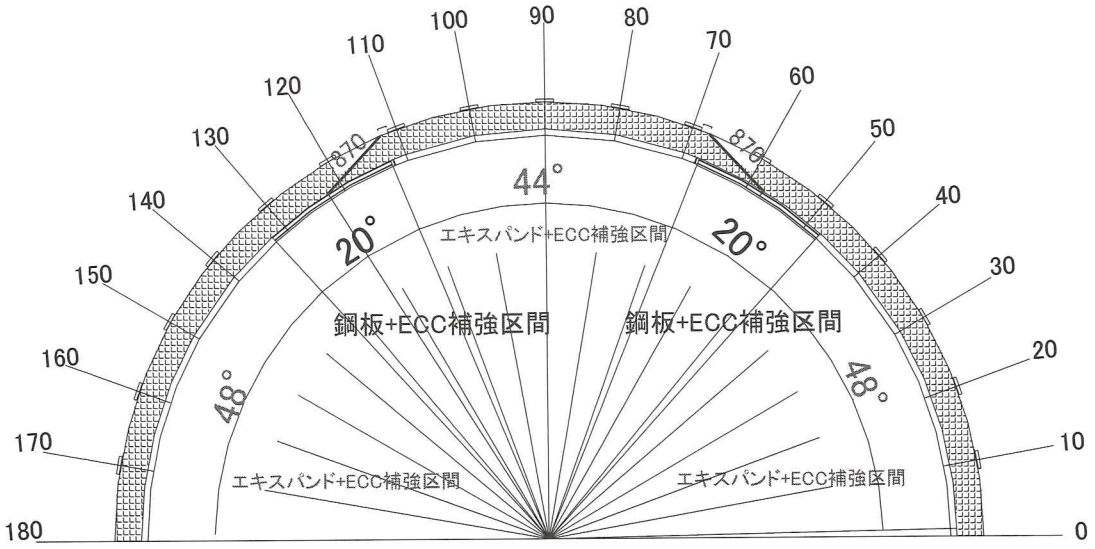
表－２．４．９　既設覆工品質管理試験結果

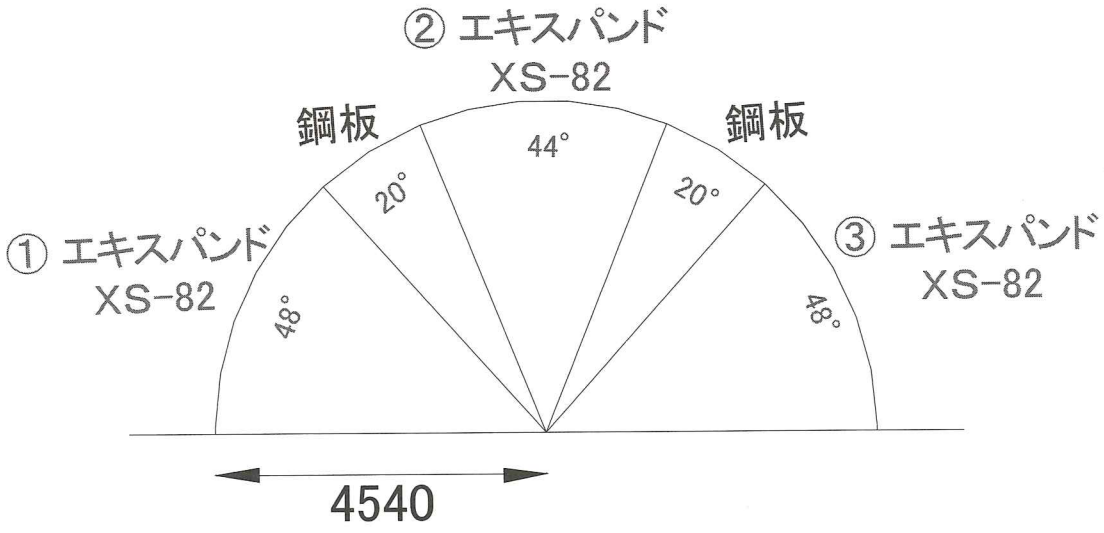
| 試験項目 | | 目標値 | 試験値 | | 摘要 |
|---|---|---|---|---|---|
| フレッシュ性状 | スランプ | 12±2.5cm | 11.5cm | | JIS A 1101 |
| | 空気量 | 4.5±1.5% | 4.3% | | JIS A 1128 |
| 硬化性状 | 圧縮強度 | 18N/mm²以上 | 材齢28日<br>水中養生 | 19.1N/mm² | JIS A 1108 |
| | | | 試験時（材齢56日）<br>現場封緘 | 17.9N/mm² | |

②既設覆工表面処理

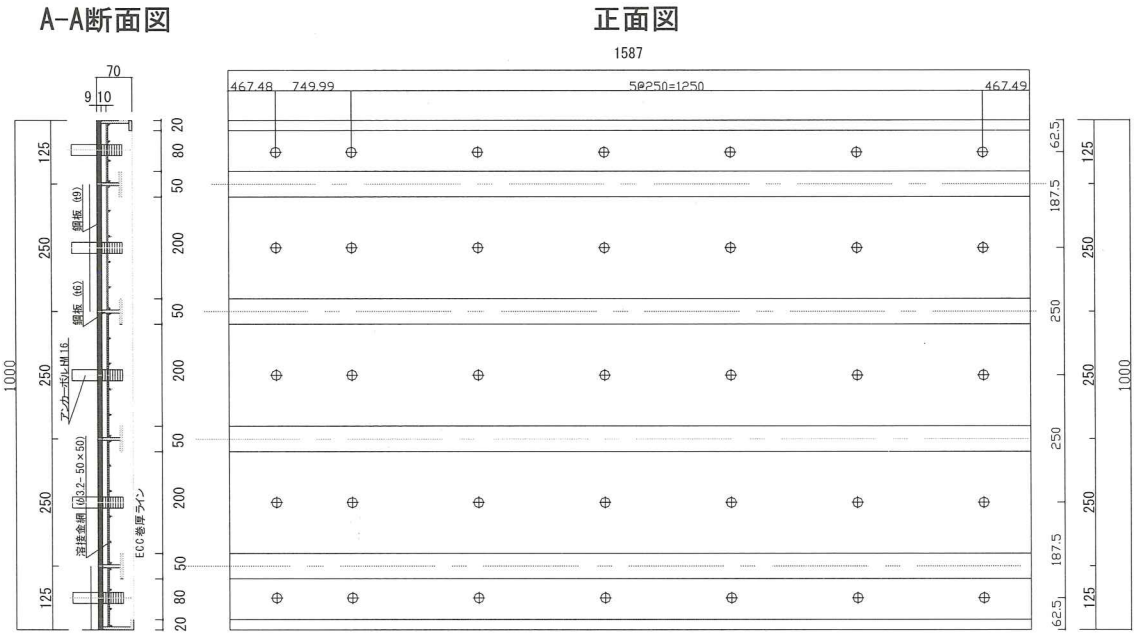
基盤コンクリート内面全体（縦 1m×横約 14m＝約 14m²）をサンドブラストによる表面処理を行った。サンドブラストの仕様は，2.2 仕様の（3）と同様である。

③鋼板・エキスパンドメタル設置

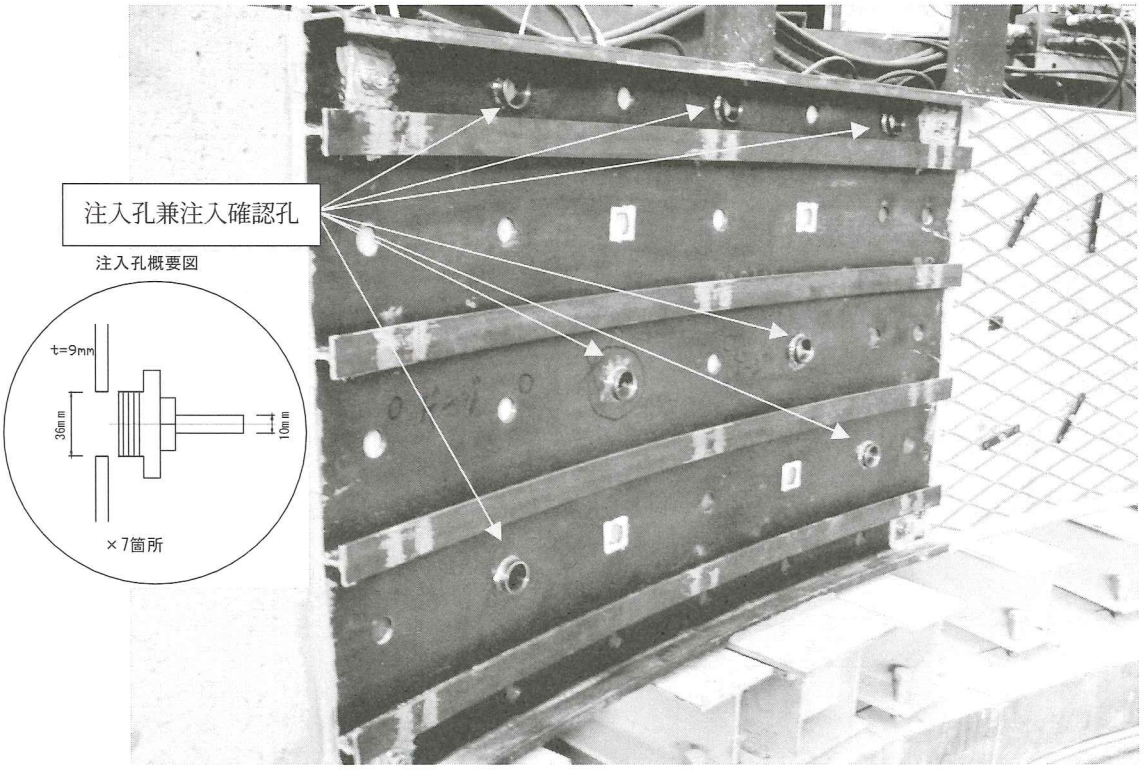



図－２．４．１８　鋼板・エキスパンドメタル設置位置




図－２．４．１９　鋼板概要



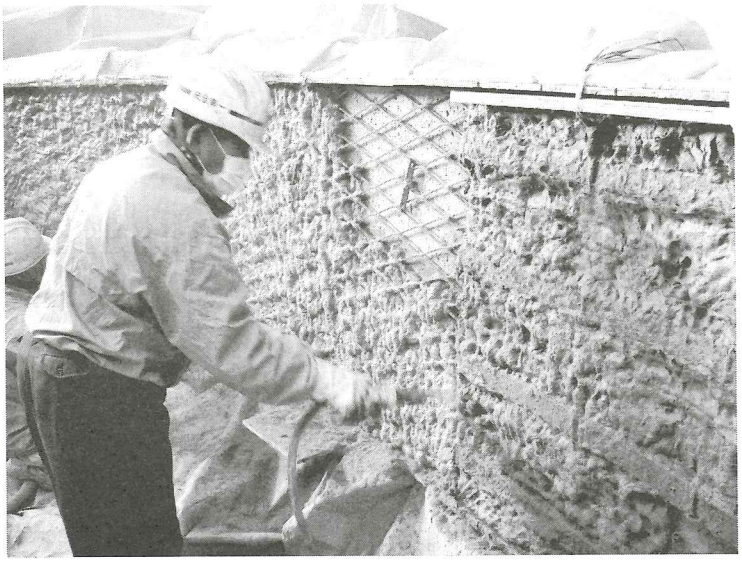

写真－２．４．１３　鋼板

④ECC 吹付け

ECC の吹付け厚さは 70mm とし，3 層に分けて吹付けを行った。ECC の品質管理試験結果を表－2.4.10 に示す。吹付け状況を写真－2.4.14 に示す。引張降伏強度，引張強度，引張終局ひずみの測定は載荷形式Ⅰと同様にダンベル型一軸引張試験によって行った。

表－２．４．１０　ECC の品質管理試験結果

| 試験項目 | | 目標値 | 試験値 | | | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 1 層目 | 2 層目 | 3 層目 | |
| ﾌﾚｯｼｭ性状 | ｽﾗﾝﾌﾟﾌﾛｰ | 325mm± | 335× | 295× | 295× | － |
| | 単位容積質量 | － | 1,457kg/m$^3$ | 1,550kg/m | 1,562kg/m | － |
| | 空気量 | － | 20%over | 20%over | 20%over | － |
| | 練上り温度 | － | 21.5℃ | 24.0℃ | 24.4℃ | － |
| | 吹付け性状 | － | 良好 | 良好 | 良好 | － |
| 硬化性状 | 圧縮強度 | － | 51.0 | － | － | 材齢39日<br>封緘養生 |
| | 引張降伏強度 | － | 3.8 N/mm$^2$ | － | － | |
| | 引張強度 | | 5.7 N/mm$^2$ | | | |
| | 引張終局ひずみ | － | 2.2 % | － | － | |

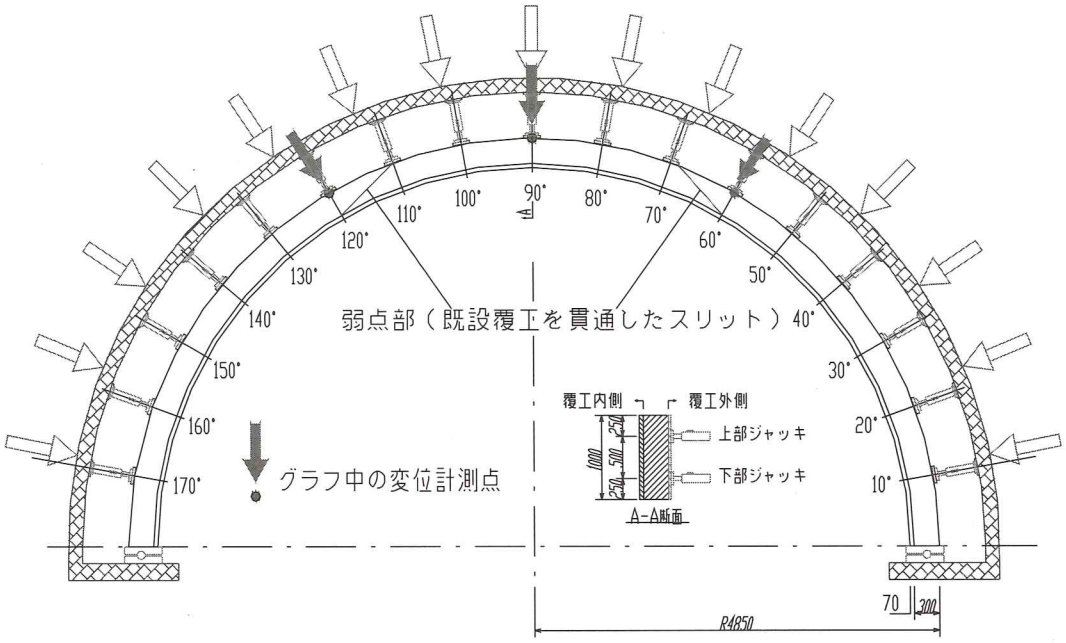


写真－２．４．１４　ECC 吹付け状況

3）載荷概要

図－2.4.20 に載荷概要図を示す。

載荷ステップは、ジャッキ 1 本当りの荷重が 37kN までは 2.4kN ピッチで載荷、それ以降の載荷は終了まで 4.8kN ピッチで載荷した。



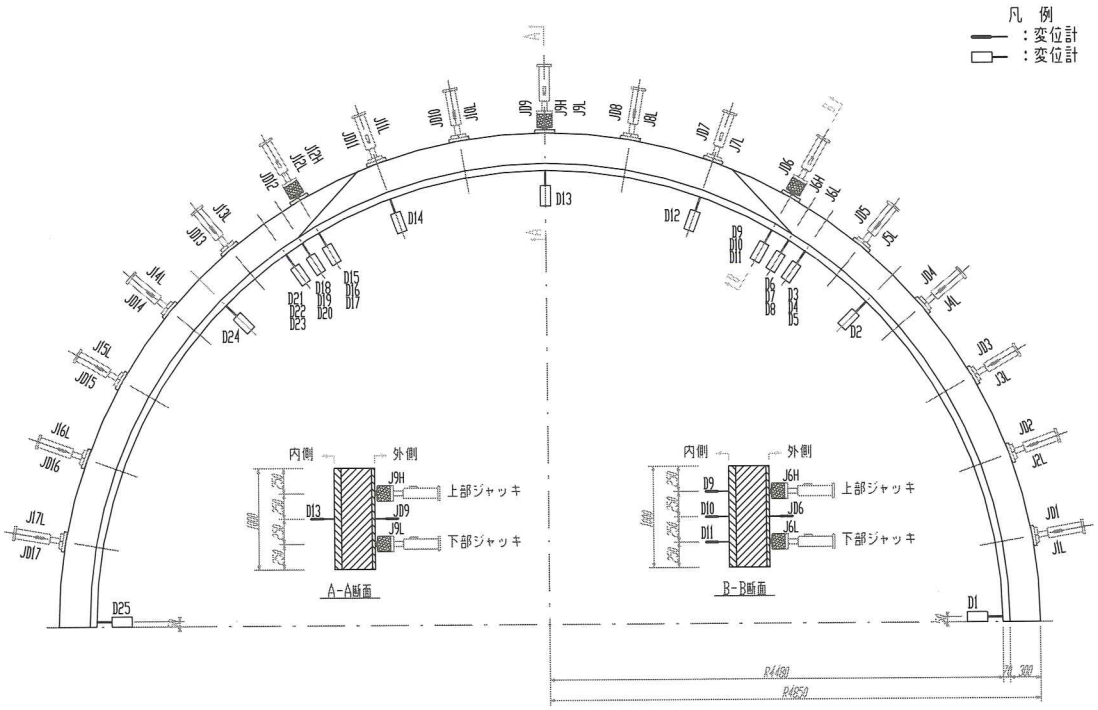

図－２．４．２０　載荷概要図

4）計測要領

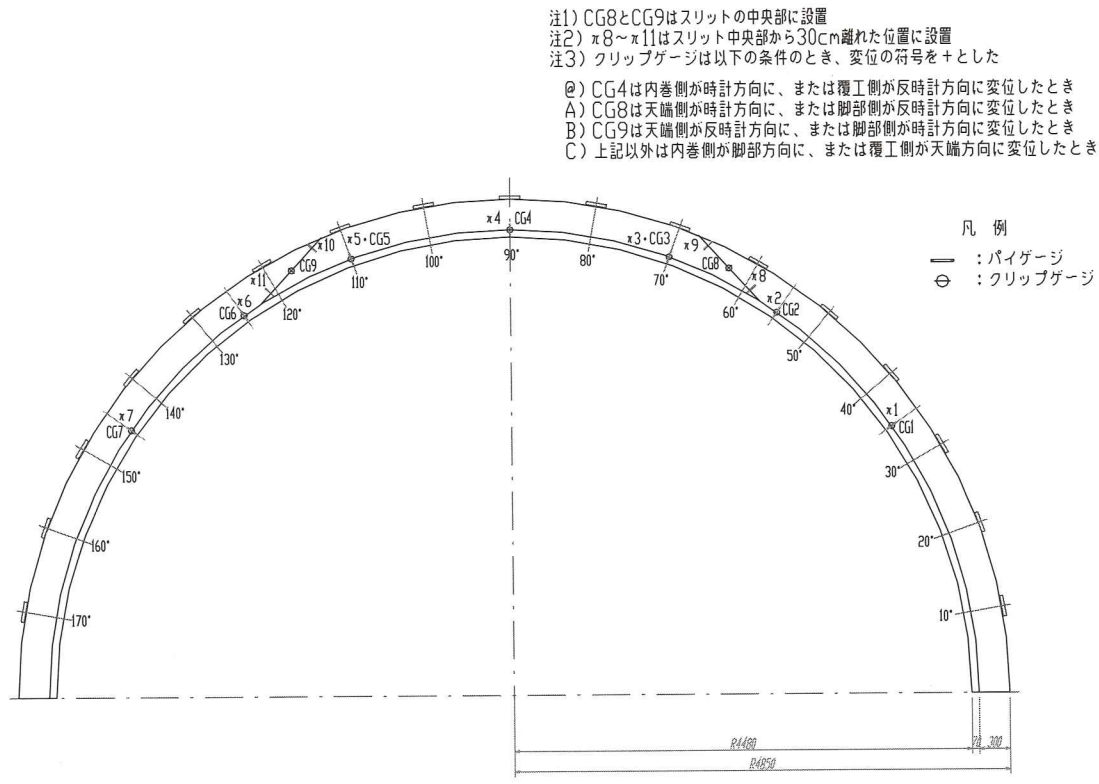
表－2.4.11 に計測要領を示す。図－2.4.21～図－2.4.25 に計測位置図を示す。

表－２．４．１１　計測項目および計測点数

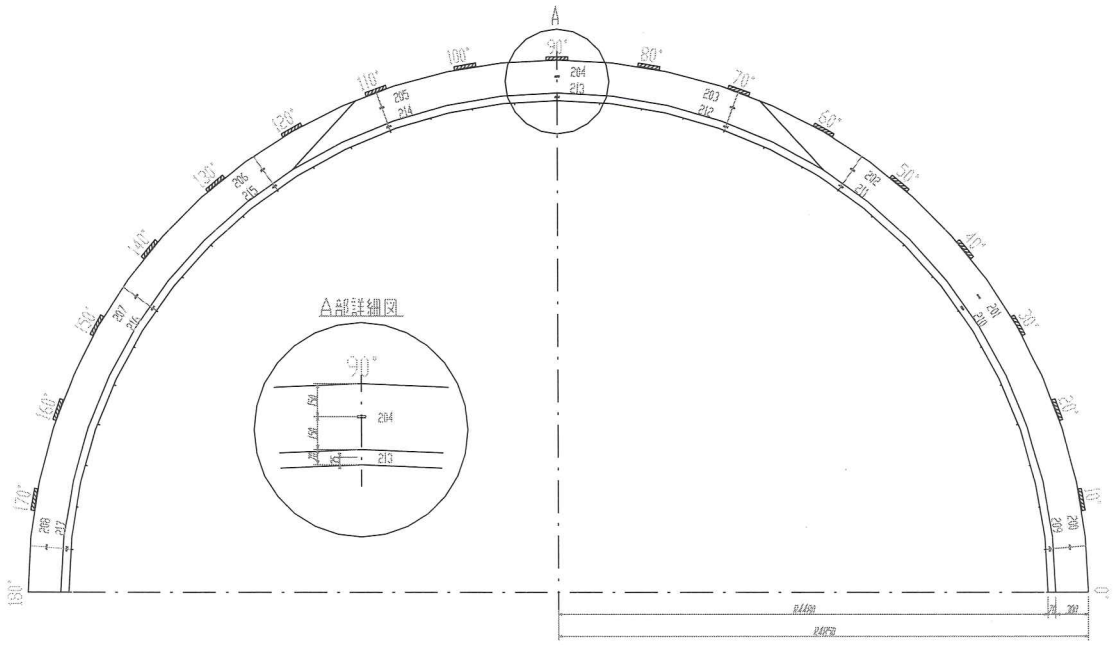
| 測定項目 | 測定機器 | 数量 | 備　　考 |
|---|---|---|---|
| 試験体開口幅 | 変位計(π型) | 11 | |
| 試験体ひずみ | ひずみゲージ | 134 | |
| ｼﾞｬｯｷｽﾄﾛｰｸ | 変位計(ひずみ型) | 17 | 1段×17ヶ所 |
| 試験体変位 | 変位計(ひずみ型) | 19 | 3段×　4ヶ所　＋1段×7ヶ所 |
| 載荷荷重 | ﾛｰﾄﾞｾﾙ, | 17 | ﾛｰﾄﾞｾﾙ：下段×17ヶ所 |
| ジャッキ反力 | ﾛｰﾄﾞｾﾙ | 14 | ﾛｰﾄﾞｾﾙ：下段×17ヶ所 |



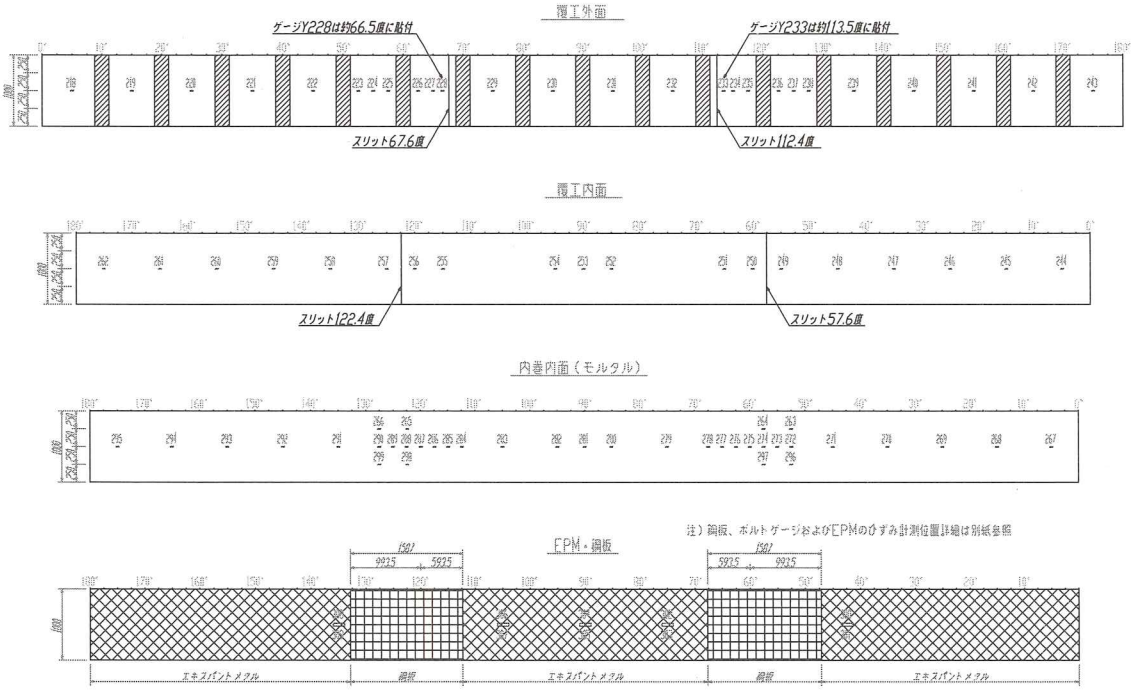

図－２．４．２１　荷重計・変位計設置位置図



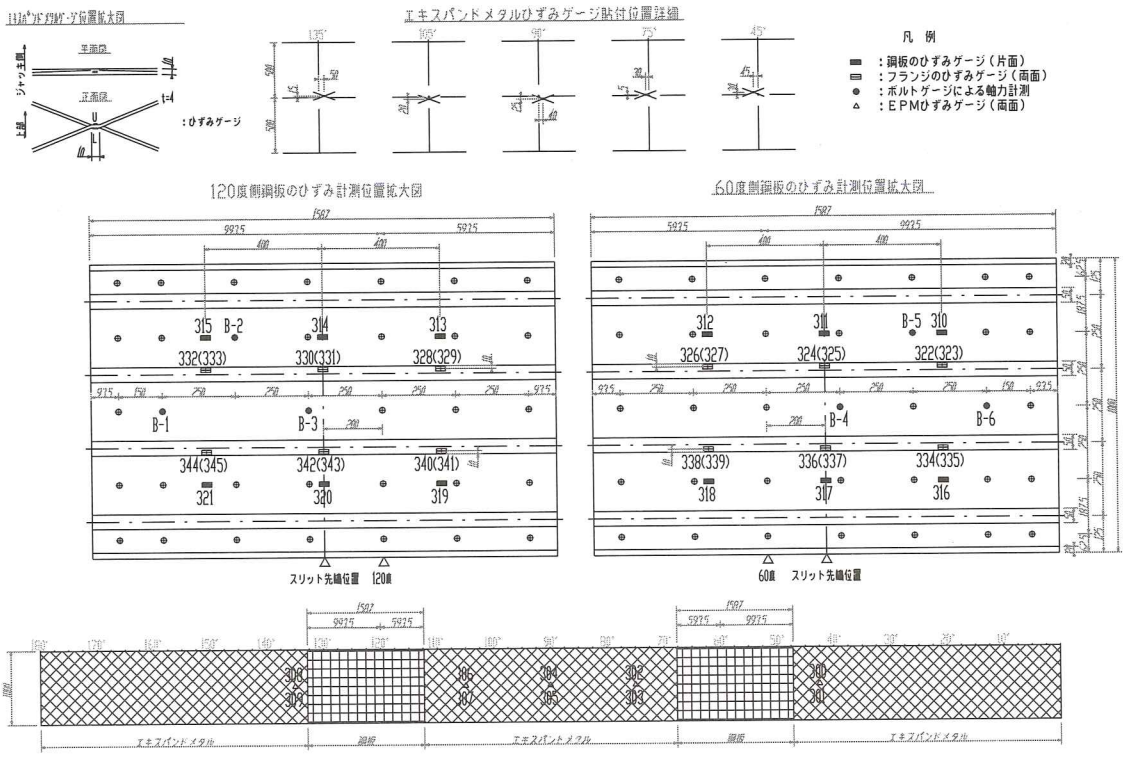

図－２．４．２２　π型変位計・クリップゲージ設置位置図




図－２．４．２３　上面ひずみゲージ設置位置図




図－２．４．２４　ひずみゲージ設置位置図




KA2：EPMと鋼板のひずみ計測位置図

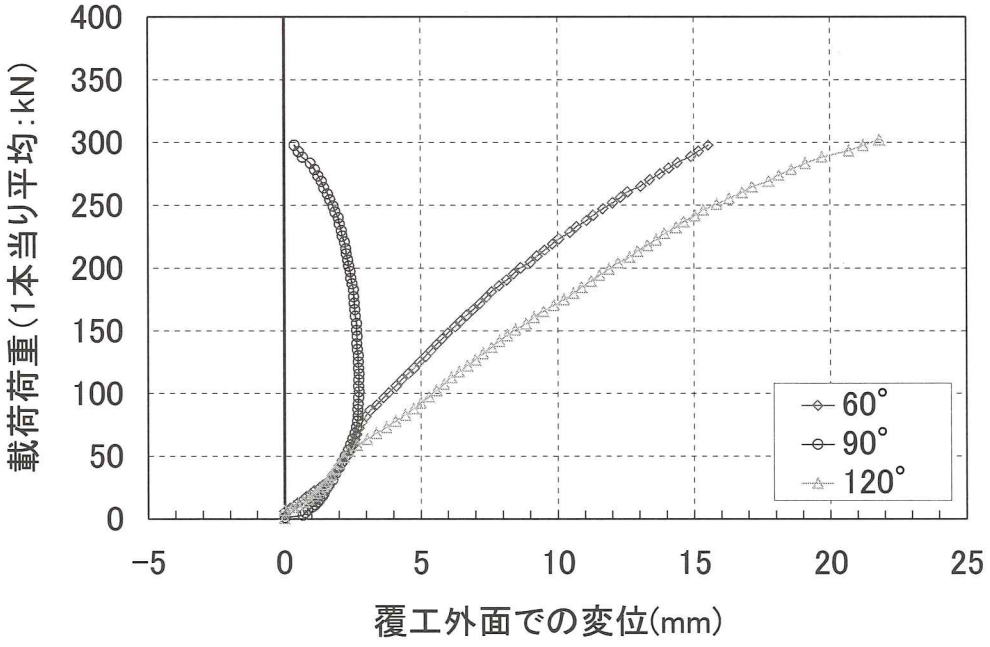
図－２．４．２５　エキスパンドメタル・鋼板のひずみゲージ設置位置図

5）試験結果

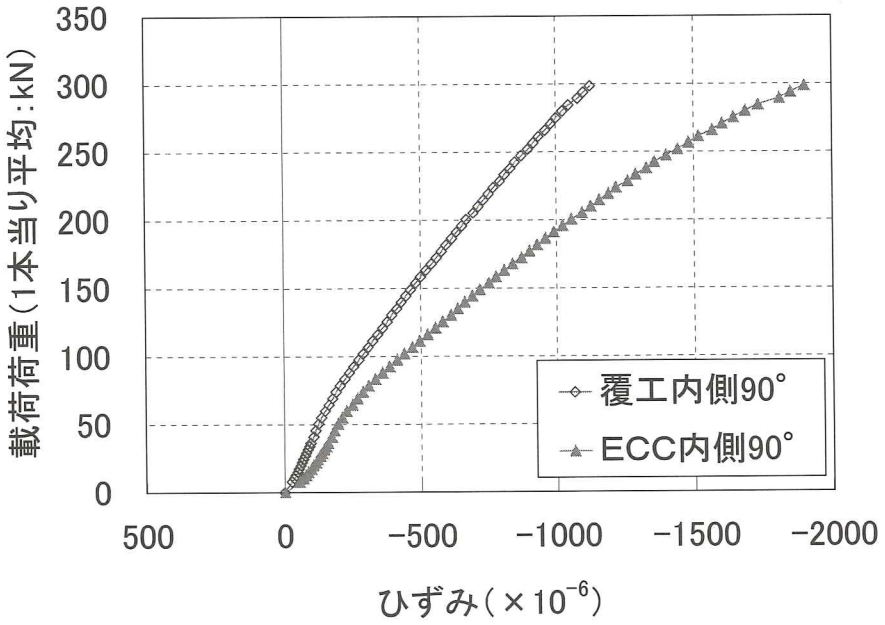
図－2.4.26 に荷重（全ジャッキの平均）と天端部覆工内側および肩部（弱点部）での変位の関係を示す。図－2.4.27～図－2.4.29 に荷重と天端部および肩部のコンクリートひずみの関係を示す。図－2.4.30 に覆工外面の周方向のひずみ分布を，図－2.4.31 および図－2.4.32 に内巻内面のひずみ分布を示す。図－2.4.33 に終局時のひび割れ状況を示す。写真－2.4.15 および写真－2.4.16 に実験終了時の状況を示す。

載荷初期は，弱点部のずれが小さいため，弱点部とそれ以外（グラフでは 90°）の変位に差がなく，全断面一様に内空側に変位した。ジャッキ 1 本あたりの載荷荷重が 60kN の時点で，弱点部に比較的大きなずれが生じたため，その箇所の変位（120°）の勾配が小さくなるとともに，90° の変位が反転した。この時点から，スリット先端の局所的な曲げが大きくなり，90° では，覆工外面が引張になる曲げモーメントが作用する状態になった。

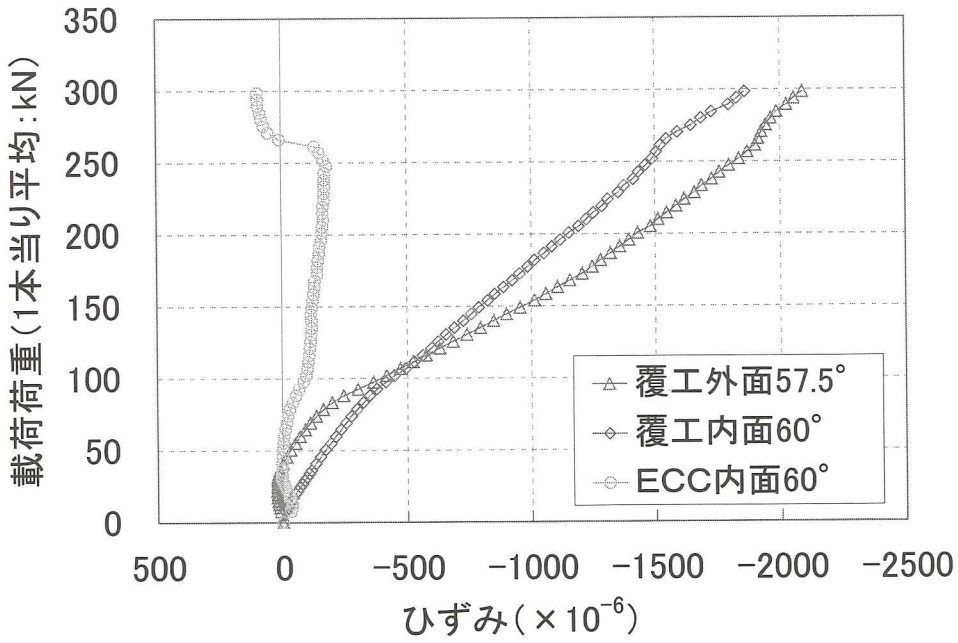
最終的には，300kN でスリット先端の覆工内面でコンクリートひずみが $2000\times10^{-6}$ 以上になった後，鋼板を覆工に固定していたアンカーの引抜きと既設覆工と鋼板の付着切れが生じたため，スリットを境に覆工で大きなずれが生じて，スリット先端部の覆工が圧壊し，鋼板先端で ECC がせん断引張破壊した。



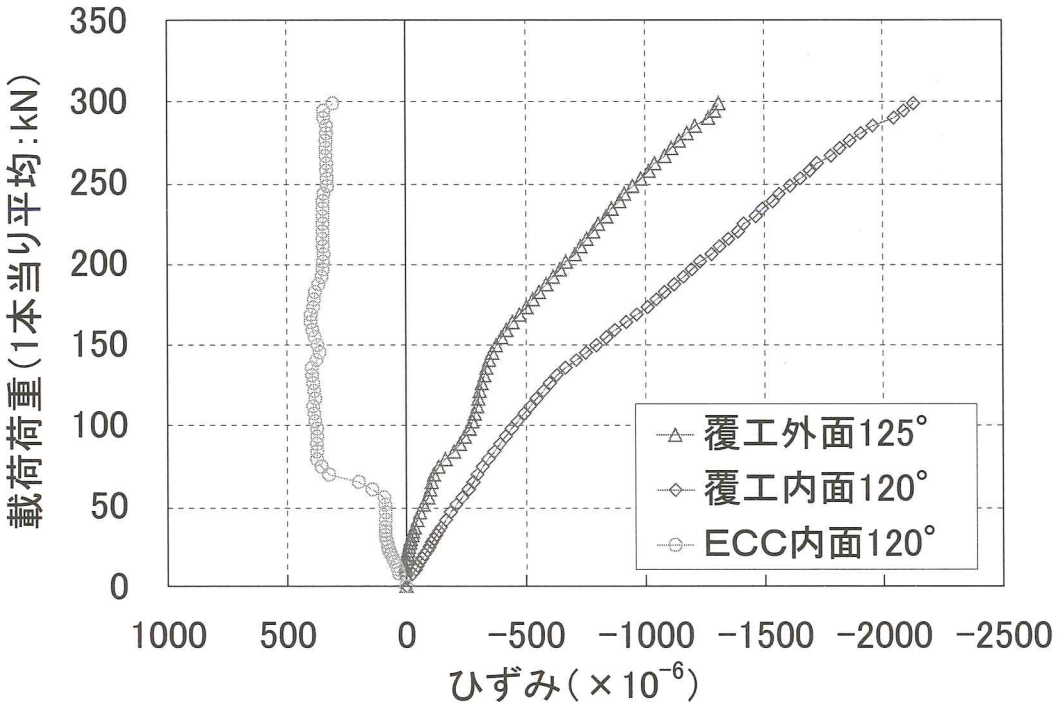

図－２．４．２６　荷重－変位関係



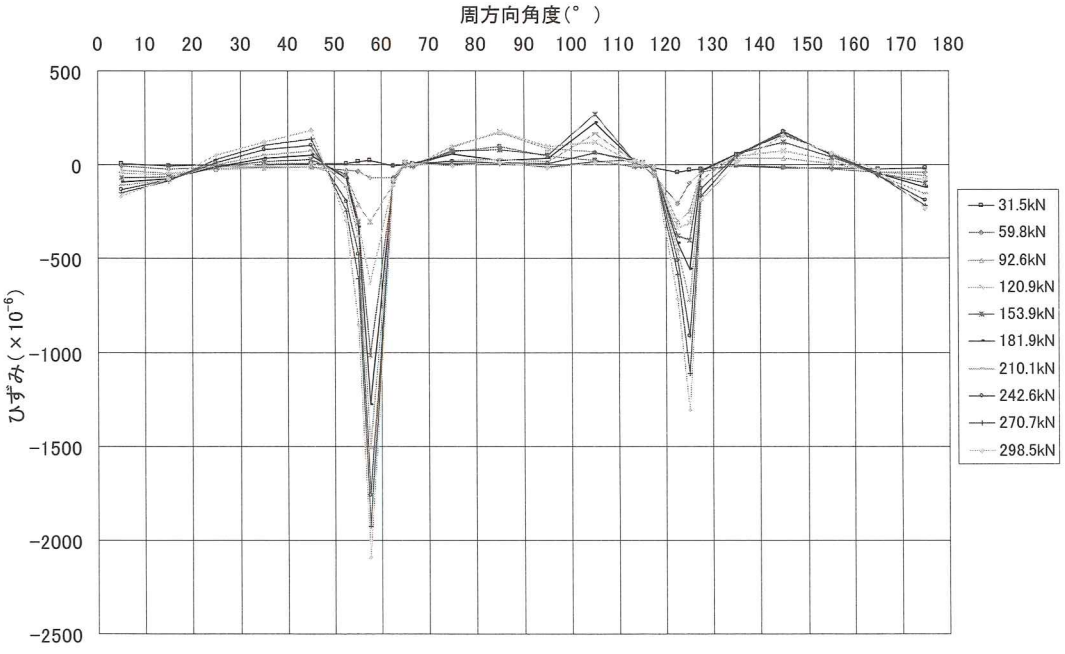

図－２．４．２７　荷重－ひずみ関係（天端部）



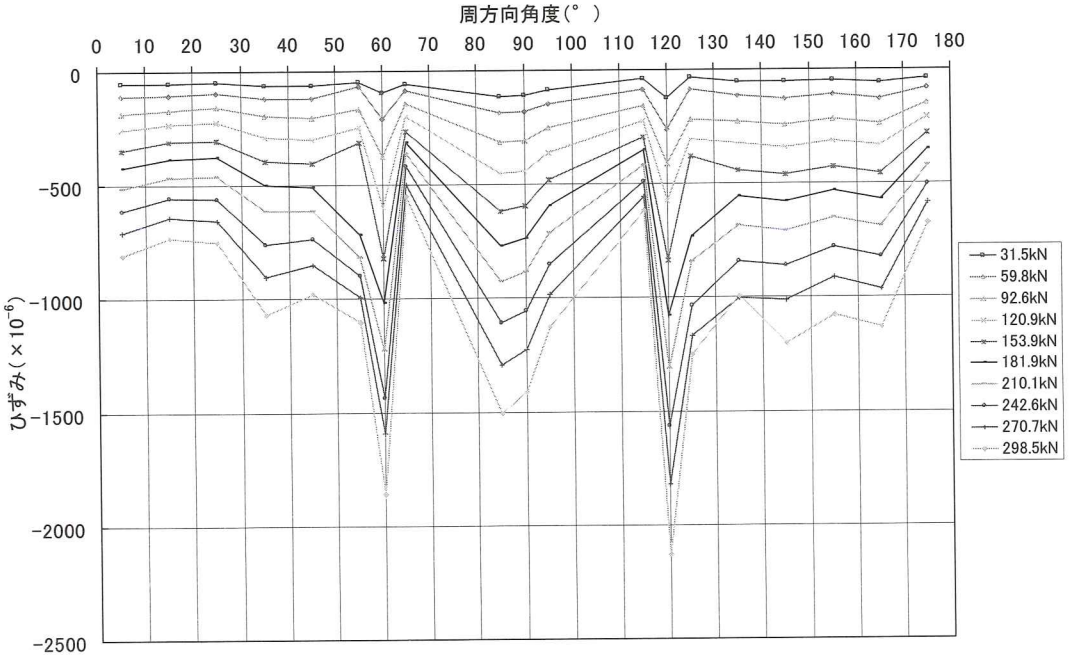

図－２．４．２８　荷重－ひずみ関係（肩部 60° 近傍）



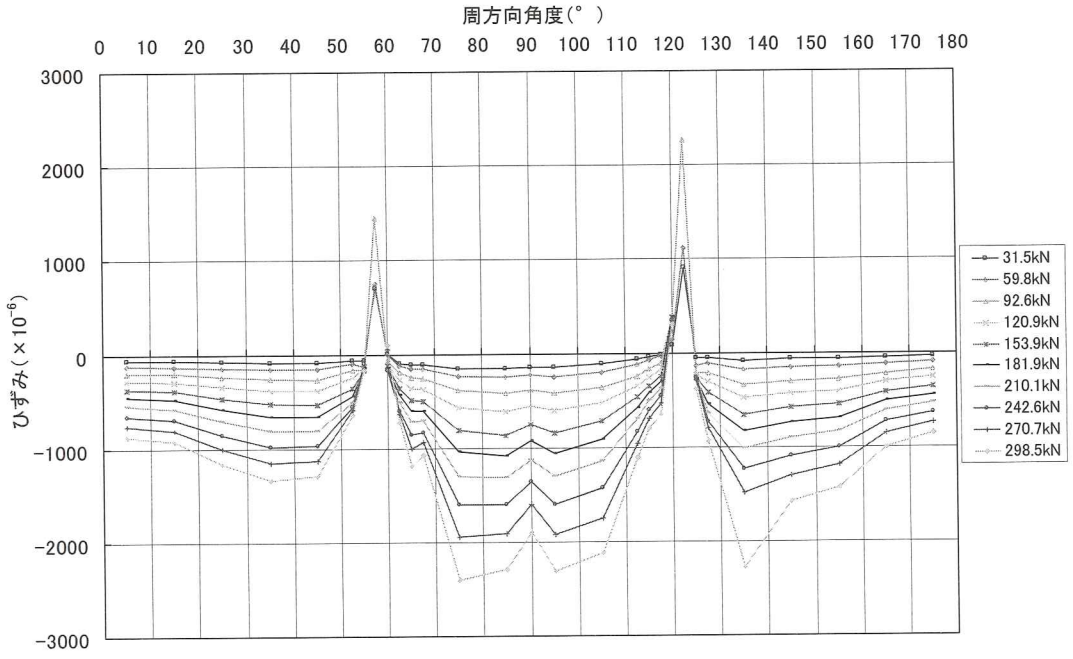

図－２．４．２９　荷重－ひずみ関係（肩部 120° 近傍）



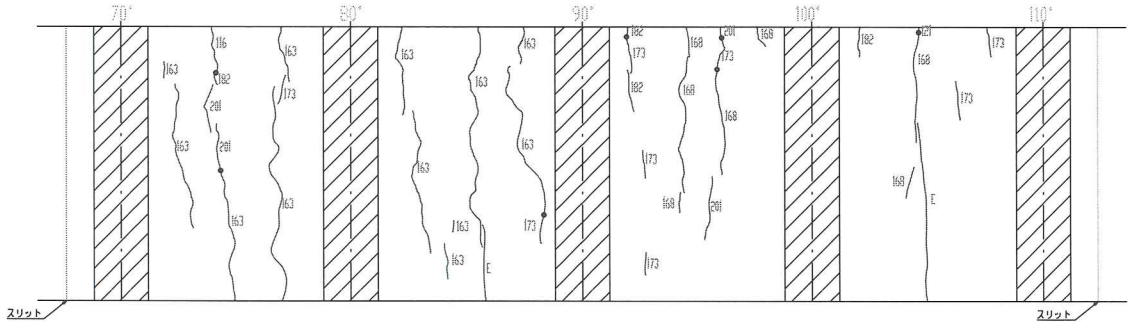

図－２．４．３０　周方向コンクリートひずみ分布（覆工外面）



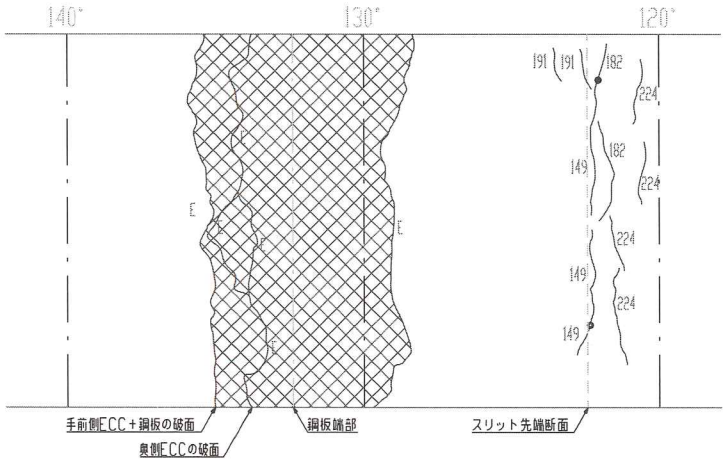

図－２．４．３１　周方向コンクリートひずみ分布（覆工内面）



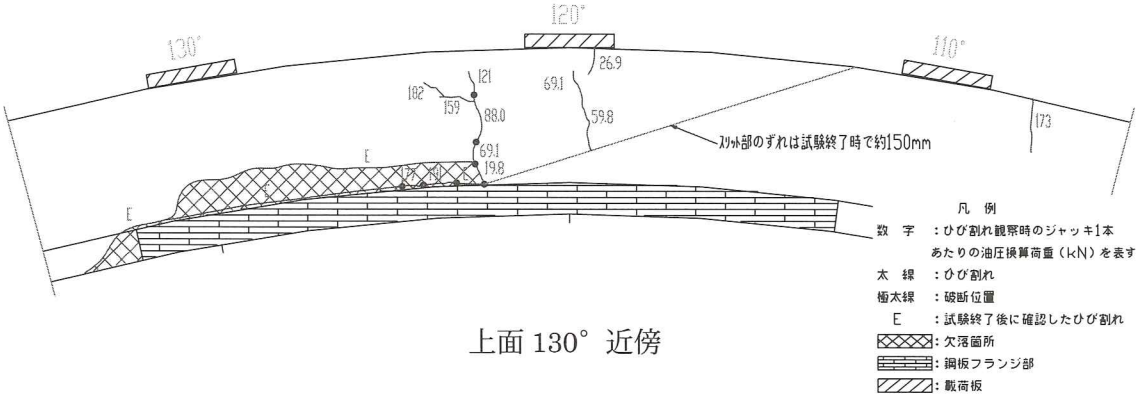

図－２．４．３２　周方向コンクリートひずみ分布（ECC 内面）




外面

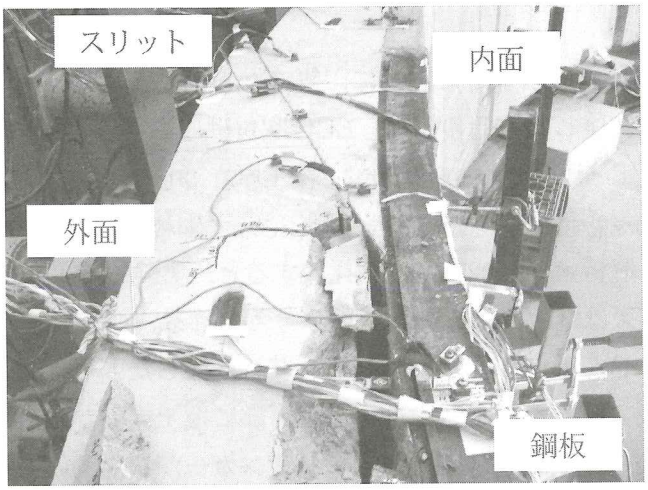



内面 130° 近傍

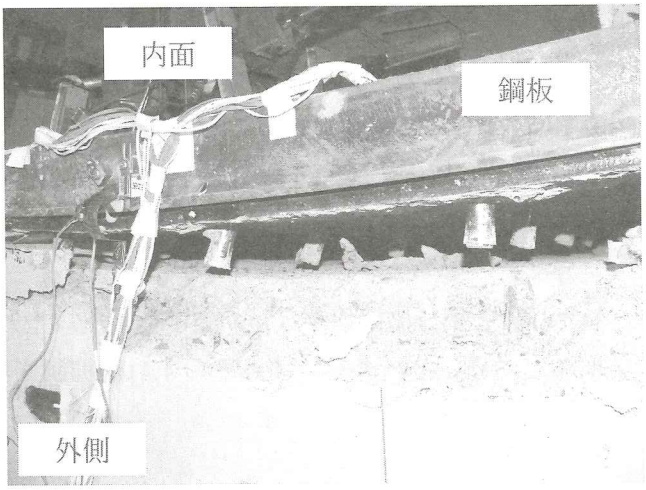



上面 130° 近傍

図－２．４．３３　ひび割れ状況（終局時）




写真－２．４．１５　スリット部




写真－２．４．１６　アンカー抜け出し

6）載荷形式Ⅱまとめ

せん断ひび割れや目違いが生じた覆工に，等方から荷重が作用する状態を対象として実大規模の載荷試験を実施した。その結果，ECC 吹付け厚さ 7cm での最大荷重は 300kN 程度であり，無垢の覆工（圧縮強度 18N/mm$^2$，覆工厚さ 30cm）の最大荷重計算値（360kN）(注) と比較すると 80％程度であった。また，3 章に示す鋼板による補強無しでスリットを考慮した２次元ＦＥＭ解析値（＝220kN）と比較すると，実験値による最大荷重の方が 35%程度大きく，この結果は鋼板による補強効果と考えられる。

今回の試験では，せん断ひび割れや目違いなどを模擬した弱点部として，テフロン板を２枚のステンレス板で挟みこんだものを，左右肩部に覆工内面から外面に貫通するように斜め面状に配置した．ここで，鋼板を固定するアンカーが弱面箇所を縫付けると，純粋に補強効果が評価できないとの判断から，アンカー長は施工時の鋼板設置に最低限必要なものとした。そのため，載荷初期の段階からアンカーの引き抜きが生じており，鋼板と既設覆工は，背面に注入した接着樹脂の付着力で剥離を抑制していたが，付着が切れると同時にアンカーが抜け出し，スリットを境に覆工で大きなずれが生じて，スリット先端部の覆工が圧壊し，鋼板先端で ECC がせん断引張破壊した。これは，スリット先端の覆工内面でコンクリートひずみが 2000×10$^{-6}$ 以上に達していたことから，アンカーを定着している部分の覆工コンクリートの組織が緩み，アンカーの定着力が低下したことも一因だと考えられる．

以上の結果から，アンカー長を十分に確保し（径の 20 倍程度以上），かつアンカー径を太くすることや本数を増加させることにより，弱点部のずれが抑制され，耐荷力が向上する可能性がある。

（注）計算値

無垢（スリットなし）の覆工 30cm（圧縮強度 18N/mm$^2$）の想定耐荷力

＝無垢（スリットなし）の覆工 30cm（14.5N/mm$^2$）の耐荷力（実験値）×

$$\frac{\text{覆工の設計基準強度（18N/mm}^2\text{）}}{\text{実験時のコンクリート強度（14.5N/mm}^2\text{）}}$$

＝290kN×18N/mm$^2$/14.5N/mm$^2$

＝360kN

※）国土交通省土木研究所・日本道路公団：トンネル覆工の薄肉化に関する共同研究報告書，平成 13 年 3 月より

## ２．４．２　耐久性

### （１）はじめに

本節では，本工法で補強した補強層の耐久性について考察する。補強後の覆工が良好に機能し続けるためには，既設覆工と補強層との一体性が維持される必要がある。

本工法においては，補強層中にエキスパンドメタルや鋼板等の鋼材が設置されており，これらが腐食によって膨張すると，補強層の一体性が損なわれる可能性が懸念される。一般に，セメント硬化体中の鋼材には，セメント硬化体が有する高いアルカリ性により，不動態皮膜と称される保護膜が形成されており，鋼材の腐食の進行は極めて遅い。しかし，空気中の二酸化炭素などの炭酸ガスにより，周辺のセメント硬化体のアルカリ性が低下すると，不動体皮膜は破壊され，鋼材の腐食が進行する。また，補強層にひび割れが発生し，それが鋼材まで達すると，同様に不動体比膜は破壊され，鋼材の腐食が進行する。

また，本工法においては，既設覆工と補強層は吹付けECCによって付着しており，その付着力が補強後の覆工全体の一体性に大きく影響を及ぼすと考えられる。

なお，一般的な吹付けコンクリート補修では，将来的な剥離・剥落が懸念される。本工法は，相当数のアンカーとエキスパンドメタルによって補強層が既設覆工に設置されているため，同様の懸念は非常に小さいと考えられるが，ECCの付着力は補強層の剥離・剥落にもある程度の影響をおよぼすと考えられる。

ここでは，ECCの耐久性として中性化および耐久性指数について検討し，この他，補強層の付着耐久性についても検討する。

（2）ECC の耐久性

1）中性化

①試験方法

表－2.4.12 に試験方法および試験体数を示す。試験方法は，建築学会による高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）・同解説の付 1 に記される方法に原則として従い，20℃，RH60%，二酸化炭素濃度 5 %の条件での促進試験とした。

供試体は，打設面および型枠底面にシールをした後，20℃，RH60%，二酸化炭素濃度 5 %の促進中性化環境に曝露し，促進試験開始後 1，4，8，13，26 週の材齢で中性化深さを測定した。中性化深さの計測は，図－2.4.34 に示すとおり，供試体を材軸に垂直にカットした面に 1 %フェノールフタレイン溶液を噴霧し，コンクリート表面から赤色に変色した部分までの距離を，各面 10mm 間隔で計 22 カ所測定した。

表－２．４．１２　試験方法および試験体数

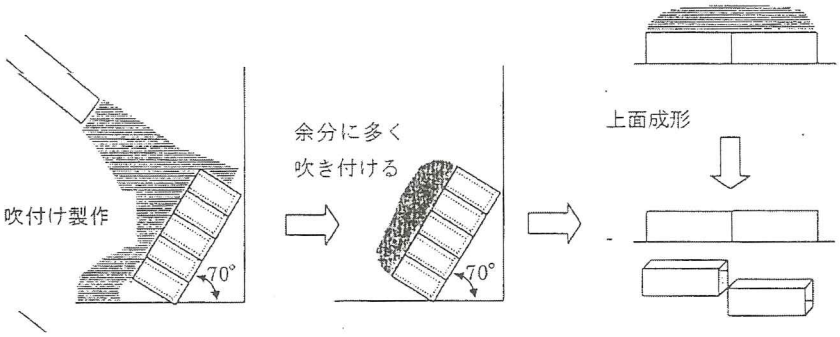
| 試験項目 | 試験方法 | 試験体数 | 試験体寸法 |
|---|---|---|---|
| 中性化試験 | 高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針(案)・同解説の付1 | 3体 | 100×100×400mm |




図－２．４．３４　中性化深さ計測方法

②試験体作製方法

試験体の作製は，図－2.4.35 に示すとおり型枠を 70° 程度に立てかけて，試験体の上部より下部へ順次吹き付けて試験体を作製した。




図－２．４．３５　試験体作製方法

③養生方法

図－2.4.36 に試験開始までの養生方法を示す。

ステップ１　　試験体採取　成形後

↓

ステップ２　温度 20±2℃，湿度 80％以上で 48 時間経過養生後　脱型

↓

ステップ３　　温度 20±2℃の水中で５日間養生

↓

ステップ４　　温度 20±2℃，湿度 90％封緘状態にて養生

(実験上の都合により，154 日間)

↓

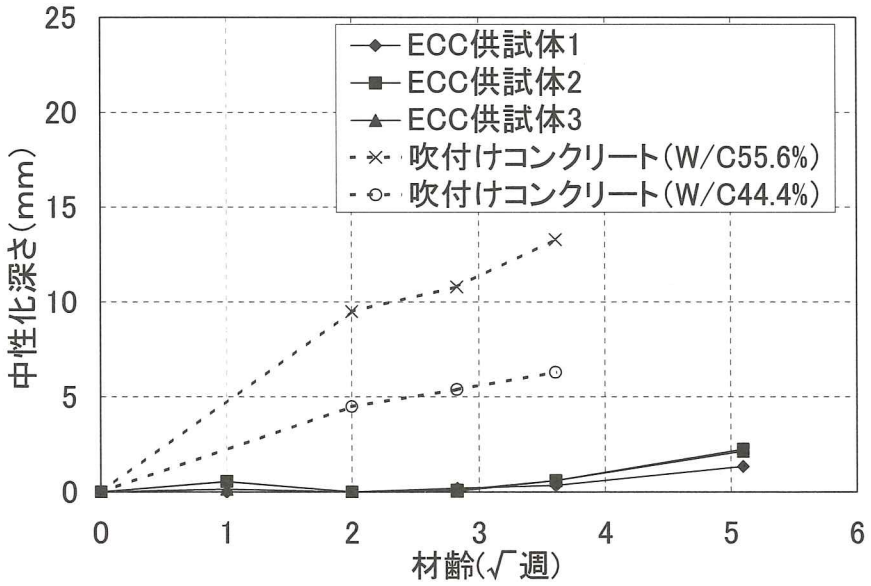
ステップ５　　促進中性化試験開始

(実験上の都合により，材齢 161 日)

図－２．４．３６　養生方法

④試験結果

中性化試験結果を図－2.4.37 に示す。図中には，一般的な吹付けコンクリートの中性化試験結果[1)]を併記したが，ECC の中性化速度は，一般的な吹付けコンクリートの中性化速度よりも極めて遅いことが確認された。




図－２．４．３７　中性化促進試験結果

2）凍結融解抵抗性

①試験方法

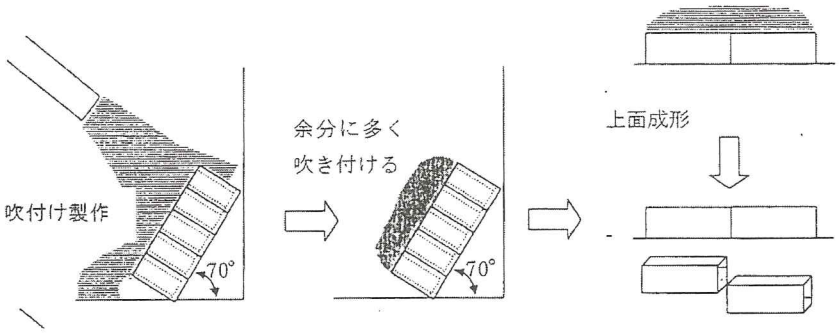
表－2.4.13 に試験方法および試験体数を示す。試験体を凍結融解環境に供し，動弾性係数を測定した。凍結融解条件は，JIS A 6204 附属書 2 に従い，試験体の中心温度＋5℃→－18℃→＋5℃（3～4時間）を1サイクルとする凍結融解工程とした。

表－２．４．１３　試験方法および試験体数

| 試験項目 | 試験方法 | 試験体数 | 試験体寸法 |
|---|---|---|---|
| 凍結融解試験 | JIS A 6204附属書2 | 3体 | 100×100×400mm |

②試験体作製方法

試験体の作製は，図－2.4.38 に示すとおり型枠を 70° 程度に立てかけて，試験体の上部より下部へ順次吹き付けて試験体を作製した。




図－２．４．３８　試験体作製方法

③養生方法

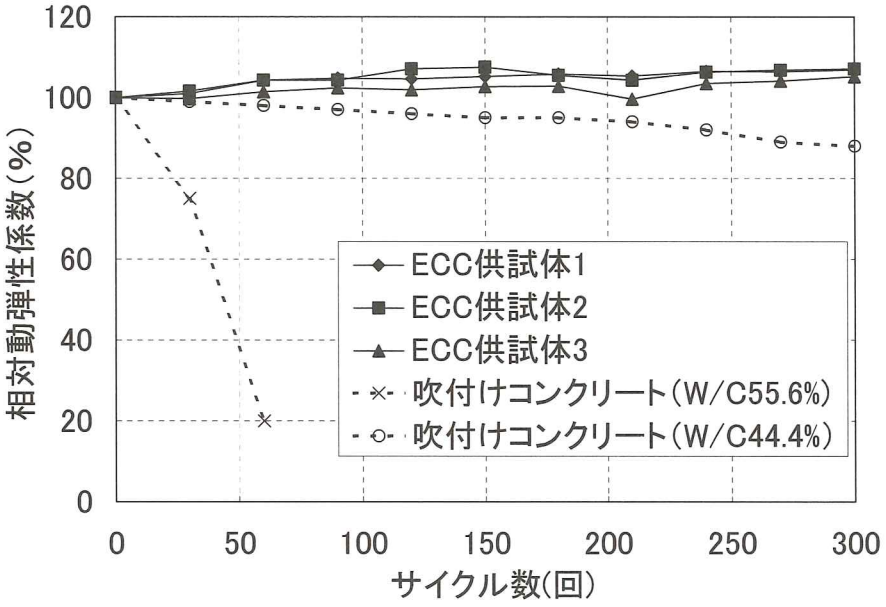
図－2.4.39 に試験開始までの補修試験体の養生方法を示す。

ステップ1　　補修材料の打設後，
温度 20±2℃，湿度 80％以上で 48 時間経過養生した後　脱型
↓
ステップ2　　温度 20±2℃の水中で 5 日間養生後，
温度 20±2℃，封かん状態で 28 日以上養生
（実験上の都合により，33 日間）
↓
ステップ3　　試験開始

図－２．４．３９　養生方法

④試験結果

凍結融解試験結果を図－2.4.40 に示す。図中には，一般的な吹付けコンクリートの凍結融解試験結果[1)]を併記した。凍結融解試験とは，コンクリートが様々な要因で劣化する現象を模擬する試験であり，本試験における相対動弾性係数から耐久性指数が導かれるが，耐久性指数は，300 サイクル後の相対動弾性係数が大きいほど大きい。この指標は，コンクリートの耐久性を相対的に比較する指標として使用されている。図－2.4.40 より，一般的な吹付けコンクリートは，配合によって相対動弾性係数が低くなる場合があるのに対し，ECC の凍結融解抵抗性は優れており，一般に，厳しい環境下で使用されるコンクリートに必要とされる相対動弾性係数 85%以上を満足する結果となった。したがって，吹付け ECC は一般の吹付けコンクリートよりも高耐久であるといえる。

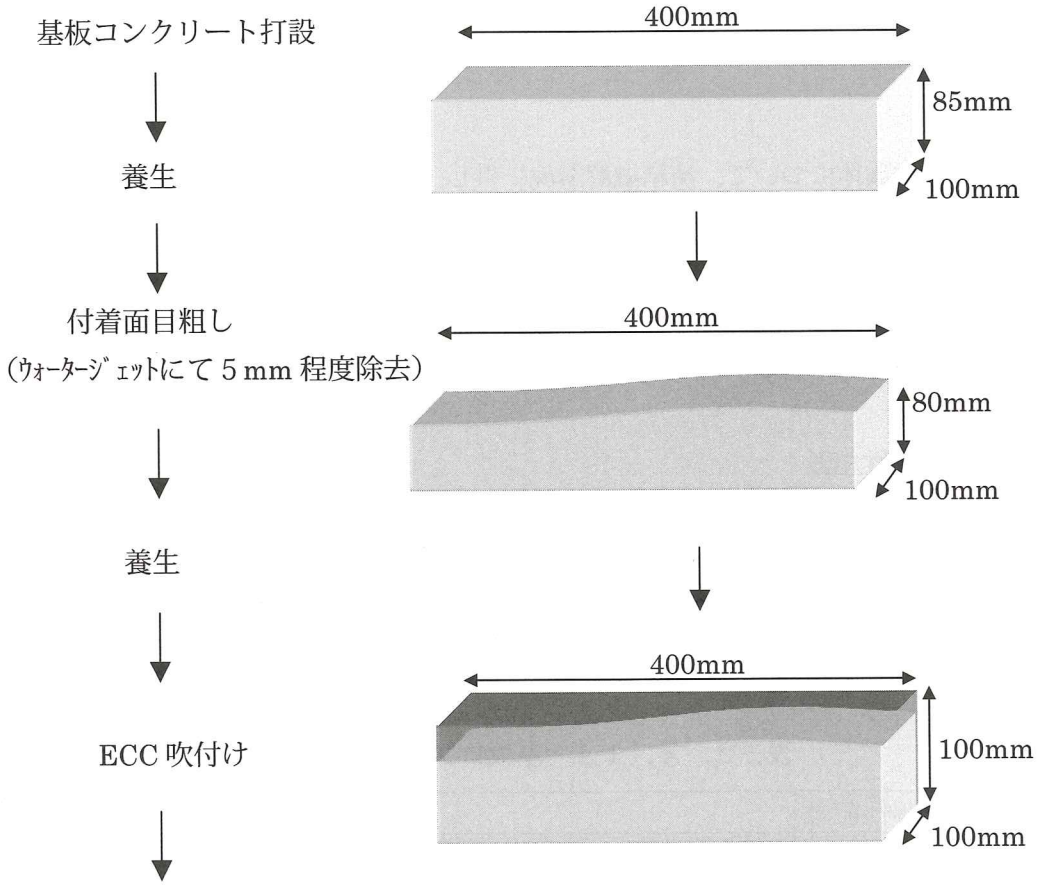



図－２．４．４０　凍結融解試験結果

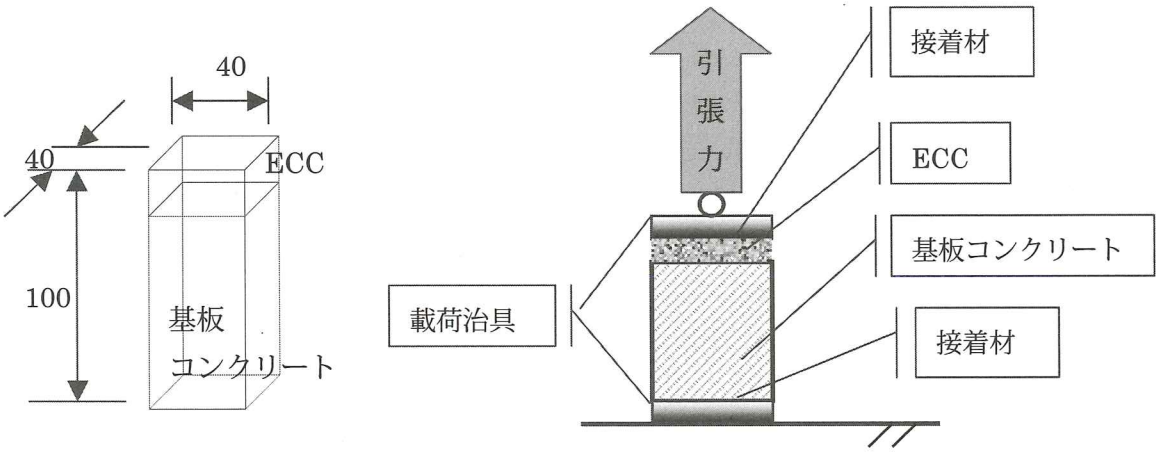
（3）補強層の付着耐久性

1）試験概要

図－2.4.41 に示すように，ウォータージェットにて目粗しを行った基板コンクリートに ECC を打ち継いだ試験体を用いて，図－2.4.42 に示す直接引張試験を実施した。また，付着耐久性を明らかにするために，図－2.4.41 で作製した試験体を JIS A 6204 附属書 2 に従い凍結融解条件に供したものについても，同様に図－2.4.42 で示す付着試験を実施した。




図－２．４．４１　試験体作製手順




図―２．４．４２　付着試験方法

これらの試験体について，凍結融解環境に供し，０サイクル，30 サイクル，および 300 サイクルで付着試験を実施した。

凍結融解条件は，JIS A 6204 附属書２に従い，試験体の中心温度＋５℃→－18℃→＋５℃（３～４時間）を１サイクルとする凍結融解工程としたが，界面への水の浸透を防止するため，凍結融解サイクル中の試験体はビニールにて封かん状態とした。

２）試験体作製方法

①基板コンクリートの使用材料および配合

基板コンクリートは，JIS 規格品のレディミクストコンクリートとし，普通－24－12－20－H とした。表－2.4.14 に基板コンクリートの使用材料を，表－2.4.15 にコンクリート配合表を示す。

表－２．４．１４　基板コンクリートの使用材料

| 使用材料 | 記号 | 摘要 | | |
|---|---|---|---|---|
| セメント | C | 早強ポルトランドセメント | | 密度:3.14g/cm$^3$ |
| 細骨材 | S1 | 50% | 八王子産砕砂 | 表乾密度:2.62g/cm$^3$　吸水率:1.85% |
| | S2 | 25% | 香取郡産山砂 | 表乾密度:2.56g/cm$^3$　吸水率:2.07% |
| | S3 | 25% | 上野原産山砂 | 表乾密度:2.61g/cm$^3$　吸水率:1.94% |
| 粗骨材 | G1 | 60% | 八王子産砕石 | 表乾密度:2.65g/cm$^3$　吸水率:0.95% |
| | G2 | 40% | 秩父産砕石 | 表乾密度:2.70g/cm$^3$　吸水率:0.32% |
| 混和剤 | AD | AE減水剤 | | リグニンスルホン酸系 |

表－２．４．１５　コンクリート配合

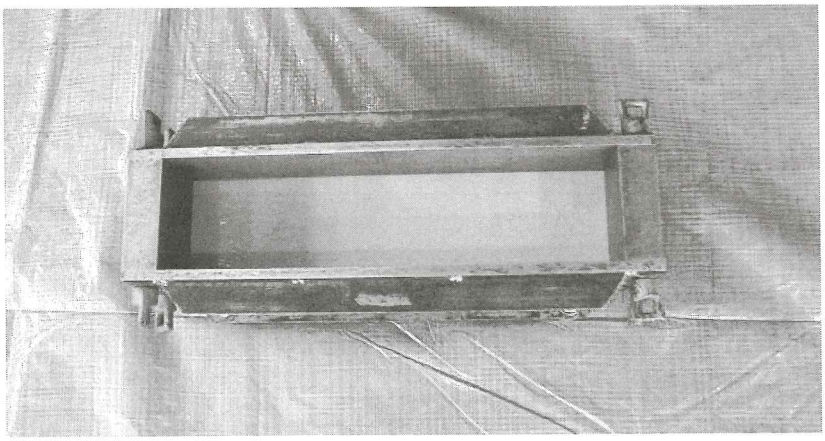
| コンクリート強度 ($N/mm^2$) | スランプ (cm) | 空気量 (%) | 水セメント比 (%) | 骨材の最大寸法 (mm) | 細骨材率 (%) | 化学混和剤の使用量 ($ml/m^3$) または (C×%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 29.6 | 12 | 4.5 | 55 | 20 | 44.4 | 0.45 |

| 単位水量 ($kg/m^3$) | 絶対容積 ($l/m^3$) | | | | | | | 質量 ($kg/m^3$) | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | セメント | 細骨材 | | | 粗骨材 | | 混和剤 | セメント | 細骨材 | | | 粗骨材 | | 混和剤 |
| | | S1 | S2 | S3 | G1 | G2 | | | S1 | S2 | S3 | G1 | G2 | |
| 172 | 100 | 150 | 77 | 75 | 230 | 150 | － | 313 | 394 | 197 | 197 | 609 | 406 | 1.408 |

②基板コンクリートの作製および養生

JIS A 1138，JIS A 1115 および JIS A 1132 によって作製した。

試験体の寸法は 85×100×400mm とし，写真－2.4.17 に示すように 100×100×400mm の型枠底面をコンパネにて嵩上げして作製した。



写真－２．４．１７　型枠施工状況

③基板コンクリートのはつり作業

実施工での既設コンクリートの処理状況を想定して，硬化後の基板コンクリートは，補修材料を打ち継ぐ前にウォータージェットにて 5 mm 程度の目粗しを行った。なお，目粗し面は基板コンクリートの型枠底面とした。

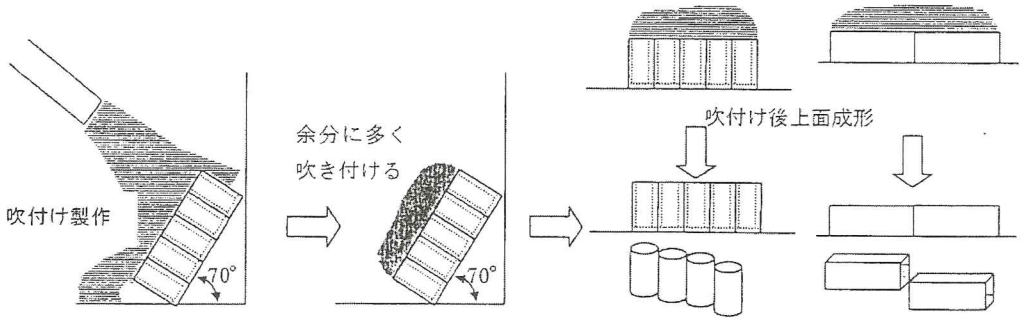
使用したウォータージェットの仕様を表−2.4.16 に示す。目粗し時の圧力は 150MP とした。

表−２．４．１６　ウォータージェットの仕様

| 項目 | 摘要 |
|---|---|
| ノズル方式 | 旋回 |
| 処理回数 | 1 |
| 噴射圧力（Mpa） | 150 |
| ノズル径（mm） | 0.9 |
| ノズル本数（本） | 1 |
| 推定投入エネルギー（kwh/m²） | 0.93 |
| 横行速度（m/min） | 5 |
| 処理幅（mm） | 170 |
| 振動数，回転数（回／分） | 2000 |
| 最大軌道間隔（cm） | 0.25 |
| アタック角度　右／左（度） | 0 |

④吹付け方法

ECC の吹付けは，図−2.4.43 に示すとおり型枠を 70° 程度に立てかけて，試験体の上部より下部へ順次吹き付けて試験体を作製した。




図−２．４．４３　試験体作製方法

3）養生方法

図－2.4.44 に試験開始までの補修試験体の養生方法を示す。基板コンクリートの養生方法は，JIS A 1171(7.3 節，接着強さ試験)の基板モルタルの養生条件に準じて行った。ただし，本試験ではステップ３の段階で目粗し作業を実施した。

ステップ１　基板コンクリート打設
↓
ステップ２　温度 20±2℃，湿度 90％以上で 24 時間経過養生後　脱型
↓
ステップ３　温度 20±2℃，水中で５日間養生後，
ウォータージェットにて目粗し実施
↓
ステップ４　温度 20±2℃，湿度 60±10%で７日間以上養生
↓
ステップ５　ECC の打設後，
温度 20±2℃，湿度 80％以上で 48 時間経過養生した後　脱型
↓
ステップ６　温度 20±2℃の水中で５日間養生後，
温度 20±2℃，封かん状態で 33 日間養生
↓
ステップ７　試験開始

図－２．４．４４　養生方法

基板コンクリートのみを試験体とするケースでは，試験開始まで（材齢 64 日まで）ステップ５を除く図－2.4.44 の養生方法と同じ方法で養生を行った。

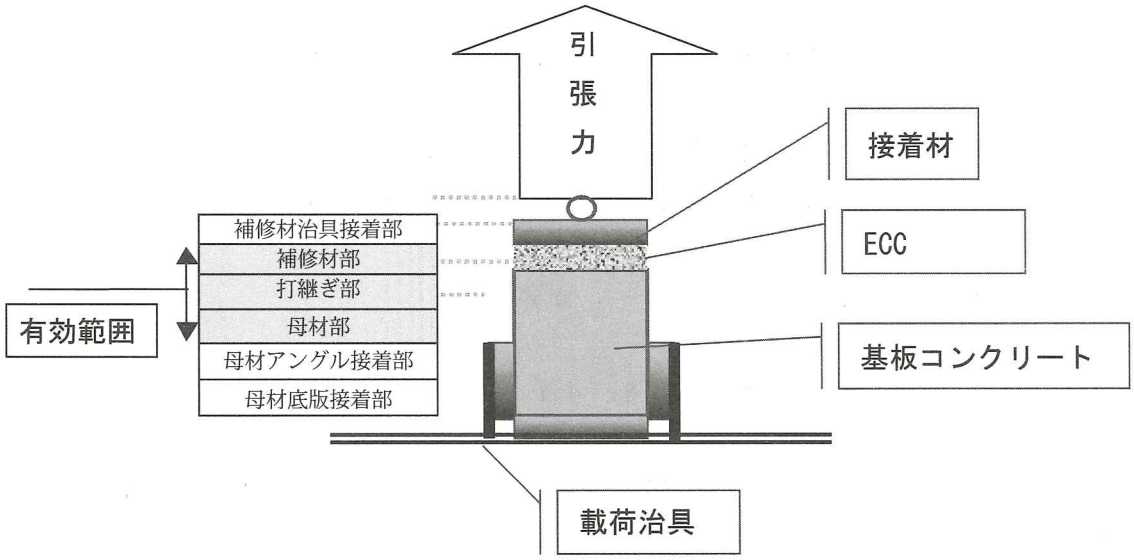
4）試験結果

付着試験では，試験を実施した試験体の破壊モードにより，測定値を付着強度として評価できるかどうかを判定し，付着強度として有効であると判断されたデータを基に評価を行った。図－2.4.45 に付着試験における破壊モードを示す。ここで，有効なデータとは，補修材破壊，打継ぎ部破壊，母材破壊であり，治具と試験体の接着部分などで破壊したものは，有効範囲外のデータとして評価には用いなかった。

0サイクルおよび30サイクルで実施した試験数は，各材料7体を基本とした。また，300サイクル終了時では，各材料14体について付着試験を実施した。

各試験体の付着強度を表－2.4.17 に示す。なお，表－2.4.17 では実施した実験の全データを示しているが，図－2.4.45 に示す色分けにより，破壊モードを区別し，灰色に着色した有効範囲のデータから平均値を算出した。有効範囲のデータは表－2.4.17 中の灰色部分とする。

表－2.4.17 に示すように，ECC と基盤コンクリートとの付着強度は 2.5N/mm² 程度であり，凍結融解作用による付着強度の低下も確認されなかった。




図－２．４．４５　試験体破壊モード

表－２．４．１７　付着試験結果（単位：N/mm²）

| 凍結融解サイクル | | 供試体No. | | | | | | | 有効範囲平均 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| 0 | | 2.69 | 2.39 | 4.01 | 2.17 | 1.61 | 2.74 | 2.18 | 2.50 |
| 30 | | 2.77 | 3.56 | 2.70 | 2.94 | 3.23 | 2.80 | 3.50 | 2.99 |
| 300 | 1回目 | 2.21 | 2.77 | 2.44 | 2.50 | 2.71 | 2.10 | 2.89 | 2.47 |
| | 2回目 | 2.46 | 2.38 | 2.29 | 1.78 | 2.04 | 2.85 | 2.53 | |

（4）まとめ

中性化促進試験および凍結融解試験により，吹付け ECC は一般の吹付けコンクリートと比較して，優れた耐久性を有することが示された。したがって，一般の吹付けコンクリートによる補修に比べ，補強層内部に設置された鋼材が腐食する可能性は低く，鋼材腐食に起因する補強層の劣化は進行しにくいと考えられる。

また，ECC は既設コンクリートとの付着性能に優れた材料であり，材自身の耐久性から考慮すると，環境条件や経時変化によりこの付着力が極端に低下することは考えにくい。特に，凍結融解作用後の付着強度が低下しないことは実験により確認されている。

以上より，一般の吹付けコンクリートによる補強に対し，本工法は耐久性の面でも優れていると考えられる。

また，将来的な剥落に対しては，仮に，既設覆工と ECC との付着が切れたとしても，ECC はひび割れ分散性に優れた材料であるため，見かけ上大きなひずみを生じるため破断せず，材料が部分的に剥落することは考えられない。また，今回提案した工法では，ECC がエキスパンドメタルを挟み込んでいるほか，そのエキスパンドメタルが既設覆工に相当数のアンカーで固定されているため，補強層全体が剥落することはないと考えられる。

## 3．ECC 補強工法の耐荷力評価方法

### 3．1　耐荷力の算定方法

（1）前提条件

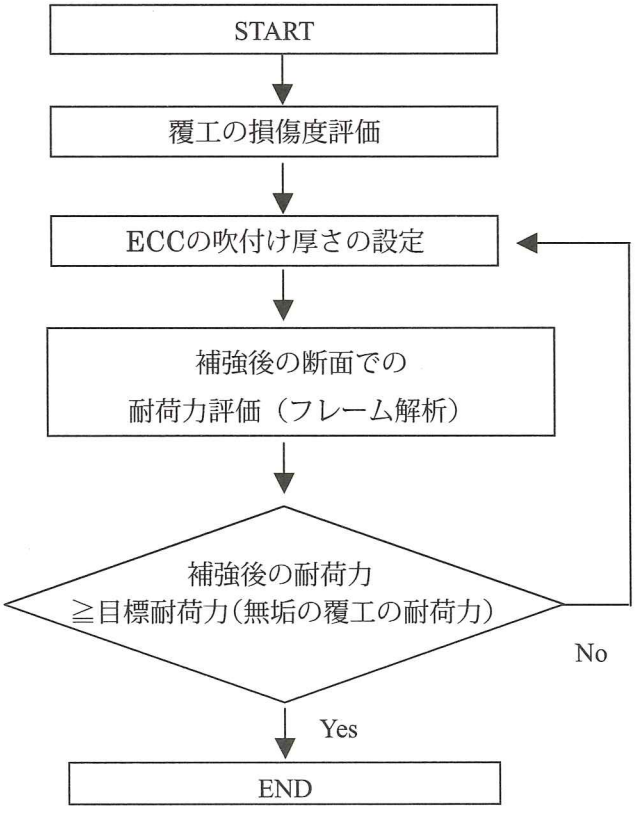
① 覆工と補強部材が一体化したものとする。
したがって，覆工に過大なひび割れが生じている場合は，ひび割れ注入や断面修復，ロックボルトなどによる対策工を併用する。

② 平面保持が確保されるものとする。

（2）目標耐荷力の設定

本工法で補強した場合のトンネル構造全体の耐荷力は，無垢の覆工（コンクリート圧縮強度 18N/mm², 厚さ 30cm）と同等以上を目標値とする。耐荷力算定方法の手順を図－3.1.1 に示す。

対象となる覆工の損傷度を評価した上で，ECC の吹付け厚さを設定する。次に，補強後の耐荷力評価を，材料非線形を考慮したフレーム解析などによって行い，目標耐荷力（無垢の覆工耐荷力）と比較する。補強後の耐荷力が目標耐荷力を下回るのであれば，吹付け厚さを変更して，補強後の耐荷力が目標耐荷力を上回るまで繰り返す。

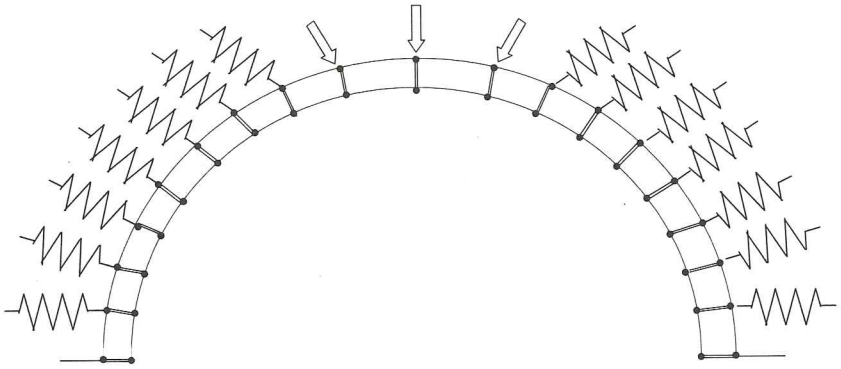



図－３．１．１　耐荷力算定方法の手順

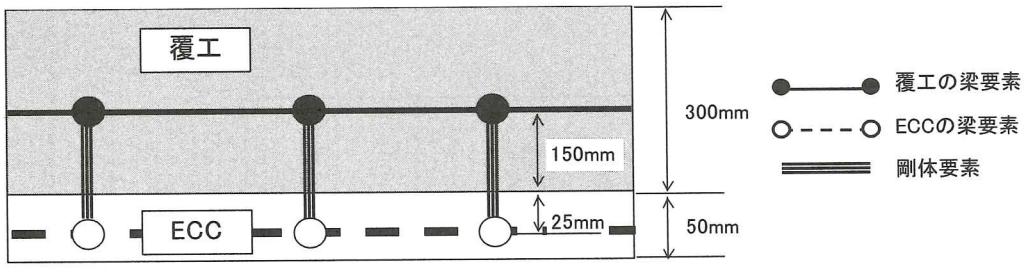
3．2　フレーム解析による耐荷力の算定

（1）解析モデル

汎用的な解析手法であるフレーム解析を用いて，載荷形式Ⅰのシミュレーション解析を行った。フレーム解析では覆工および ECC の材料非線形を考慮した。図－3.2.1 に解析モデルを示す。覆工と ECC は，別々の梁要素でモデル化した。境界条件は，両端の曲げモーメントの拘束無し，荷重の載荷は，実験時の載荷ジャッキ３箇所（80°，90°，100°）の強制変位で入力した。反力ジャッキ（10°～70°，110°～170°）は法線方向のノーテンションバネ（引張を負担しないバネ）でモデル化した。図－3.2.2 に覆工と ECC 間のモデルを示す．覆工と ECC 間は剛体要素で接合した。



図－３．２．１　フレーム解析のモデル図




図－３．２．２　覆工と ECC 間の接合部のモデル

（2）解析ステップ

解析ステップは，実験の載荷要領に合わせて以下のステップで実施した。

1：初期導入力

2：ジャッキ固定用バネ設定　＋　強制変位　30mm

3：強制変位5mm

4：除荷（強制変位－25mm）

5：ジャッキ固定用バネをはずす，初期導入力95%除荷

6：ECCと剛体要素間を剛バネ　初期導入力95%

7：強制変位35mm

（3）材料特性

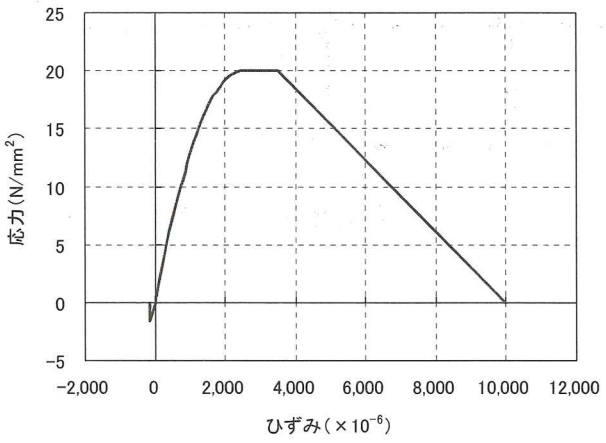
各材料の物性値は，実験時の強度試験結果を用いた．エキスパンドメタルは，構造部材として必要な定着等を確保していないため，解析ではモデル化していない。

①覆工

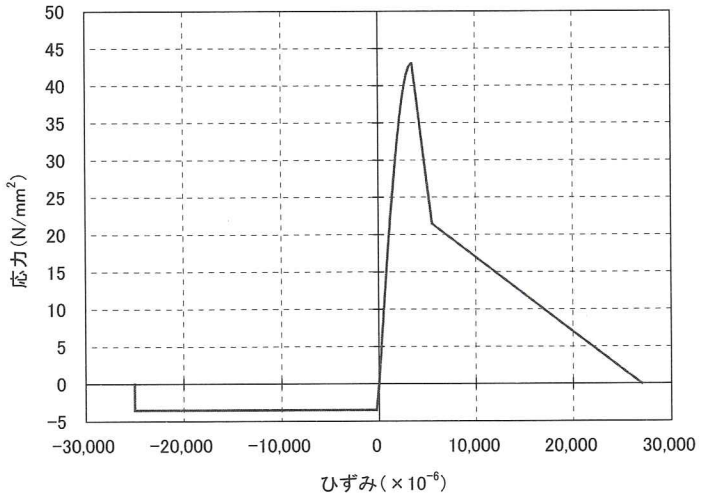
覆工の応力－ひずみ曲線を図－3.2.3に示す．引張側は，圧縮強度から算出した引張強度（1.6N/mm$^2$）に達した後は0になり，圧縮側は履歴モデルを設定した。損傷載荷をモデル化するため，圧縮ひずみが3500×10$^{-6}$に達した後も圧縮応力は0とならずに，10,000×10$^{-6}$まで線形に低下するモデルとした。

②ECC

ECCの応力－ひずみ曲線を図－3.2.4に示す。引張側は図－2.4.4に示すダンベル型一軸引張試験，圧縮側はJSCE G 502の圧縮試験から得られた応力－ひずみ曲線を設定した。




図－3．2．3　覆工の応力－ひずみ曲線（圧縮を＋）




図－３．２．４　ECC の応力－ひずみ曲線（圧縮を＋）

③バネ値の設定

反力ジャッキは，法線方向のノーテンションバネ（引張を負担しないバネ）でモデル化し，各載荷実験時（損傷載荷と補強後載荷）におけるジャッキ荷重とジャッキ変位の割線勾配から算出した。但し，解析の安定性を考慮して，各位置でのバネ値は左右対称となるように，対象２箇所（10°と 170°，20°と 160°，以下同様）のバネ定数を平均した。

表－３．２．１　実験から算出した反力ジャッキのバネ定数一覧

| 載荷 | 位置 | バネ定数（kN/m） |
|---|---|---|
| 損傷載荷 | 10°，170° | $3.4\times10^5$ |
| | 20°，160° | $4.9\times10^5$ |
| | 30°，150° | $1.7\times10^5$ |
| | 40°，140° | $3.1\times10^5$ |
| | 50°，130° | $2.8\times10^5$ |
| | 60°，120° | $3.1\times10^5$ |
| | 70°，110° | $2.0\times10^4$ |
| 補強後載荷 | 10°，170° | $4.5\times10^5$ |
| | 20°，160° | $5.1\times10^5$ |
| | 30°，150° | $3.6\times10^5$ |
| | 40°，140° | $3.8\times10^5$ |
| | 50°，130° | $3.6\times10^5$ |
| | 60°，120° | $1.7\times10^4$ |
| | 70°，110° | $1.7\times10^4$ |

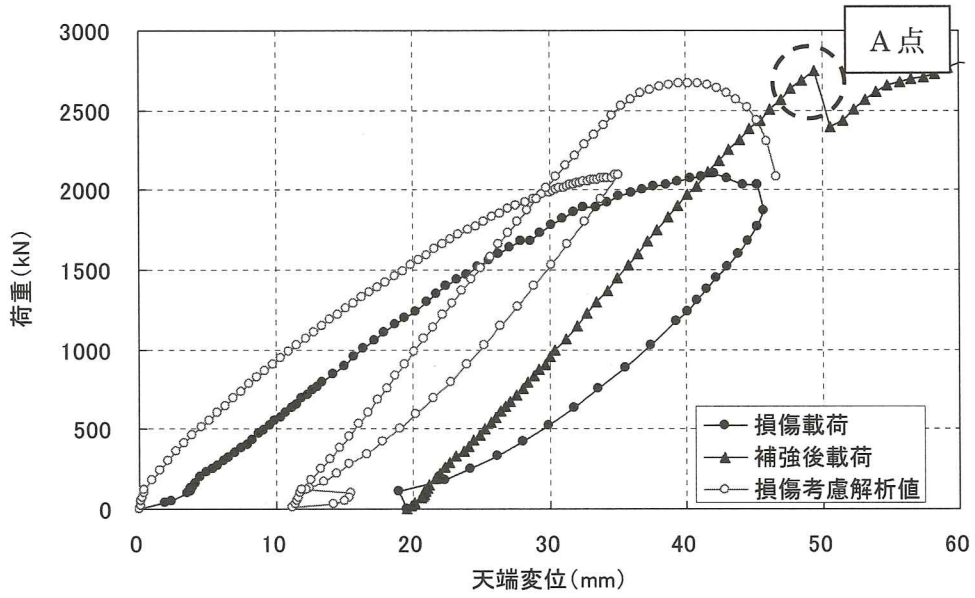
（4）解析結果

図－3.2.5 および図－3.2.6 に，解析結果として，載荷荷重 6 本の合計（以下，荷重）と天端変位の関係および覆工外面におけるコンクリートの応力－ひずみ関係を示す。損傷載荷において，実験と同じ強制変位を与えると解析が安定しないため，最終的な強制変位は 35mm までとした。

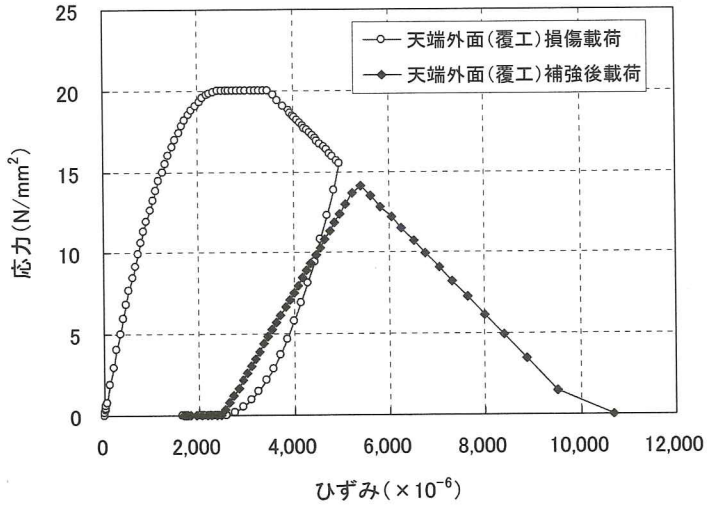
実験では，図－3.2.5 に示す A 点で覆工と ECC 界面のずれが発生したため，その後は実験値と解析値は乖離したが，解析における最大荷重は，覆工外面の圧縮破壊が支配要因となった。

図－3.2.7～図－3.2.9 に損傷載荷および補強後載荷での覆工および ECC の荷重－ひずみ関係を示す。いずれも概ね実験値と解析値は一致している。なお，図－3.2.8 に示す覆工内面のひずみは，補強後載荷開始時点をゼロとした。図－3.2.8 および図－3.2.9 より，補強後載荷の肩部において，覆工，ECC ともに圧壊ひずみ近傍まで達していることから，組織の緩み等で付着力が小さくなり，覆工と ECC 界面でずれが生じたと思われる。

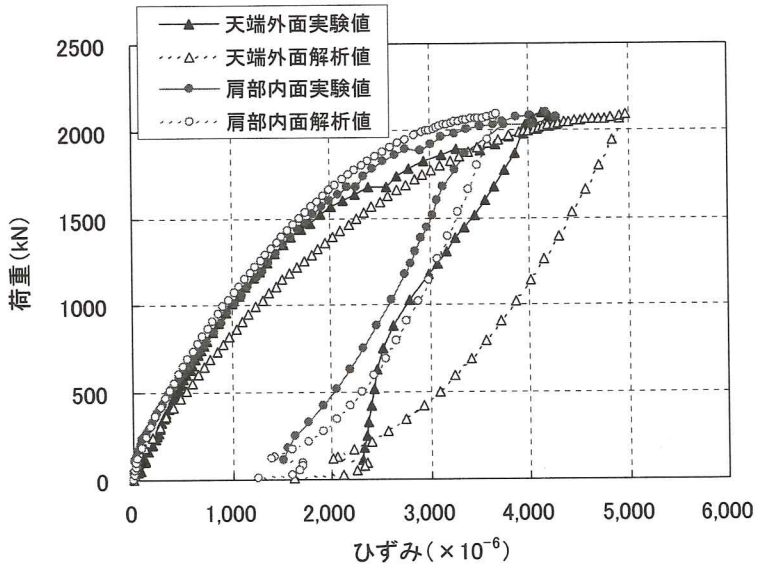
以上より，変位の絶対値までは再現できていないが，本解析は，覆工と ECC 界面の一体性が確保されている図中 A 点付近までは，全体の挙動を比較的精度良くシミュレーションできている。



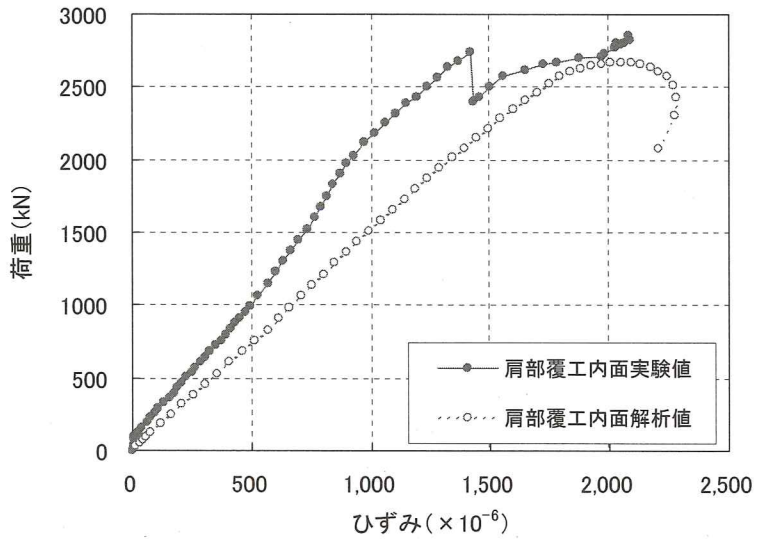

図－３．２．５　載荷荷重 6 本と天端変位の関係の比較



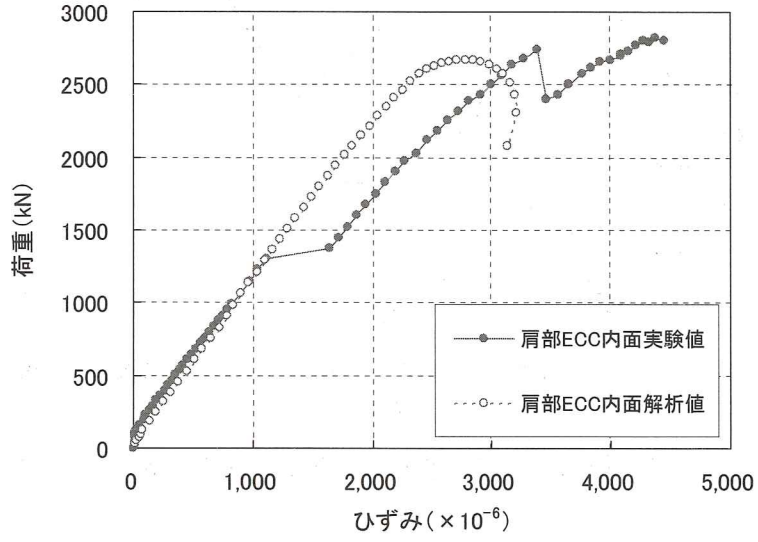

図－３．２．６　覆工コンクリートの応力－ひずみ関係（解析値）




図－３．２．７　損傷載荷での覆工コンクリートの荷重－ひずみ関係の比較




図－３．２．８　補強後載荷での覆工コンクリートの荷重－ひずみ関係の比較




図－３．２．９　補強後載荷での ECC の荷重－ひずみ関係の比較

## ３．３　まとめ

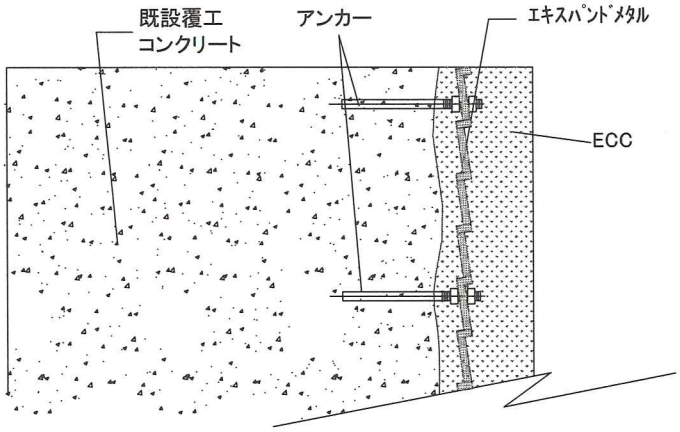
本工法で補強した覆工の耐荷力は，覆工およびECCの材料非線形を考慮したフレーム解析で評価可能である。

ただし，本方法を適用する場合には，圧縮損傷を適切に評価する必要がある。コンクリートは圧壊後もその損傷状態に応じた強度を保持しているため，今後，検討を重ねていく上で，適切に損傷状況を把握し，その損傷状態に応じた適切な材料モデルが設定されたならば，その知見を反映した設計を行うこととする。

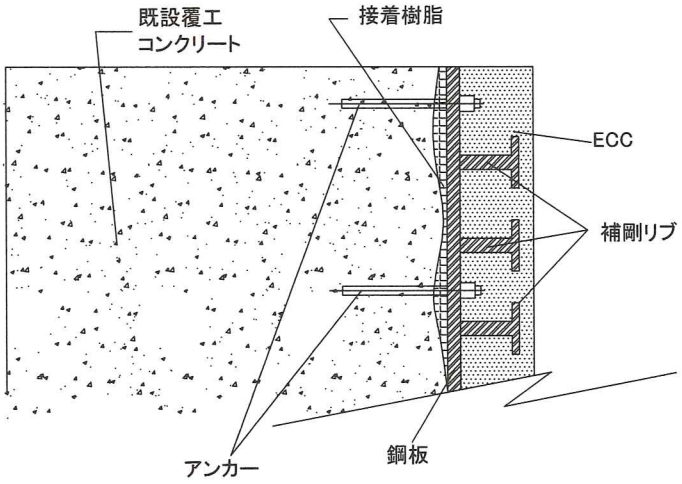
## 4．施工法

補強モデル１：エキスパンドメタルをアンカーで既設覆工に設置してECCの吹付けを行う。エキスパンドメタルは，吹付け施工性の向上と，長期的な剥落防止を目的として設置している。

補強モデル２：既設覆工にひび割れ等の弱面が存在する場合には当該箇所に局所的な併用補強工として鋼板接着工を行った後にECC吹付けを行うことも可能である。




図－４．１　補強モデル１

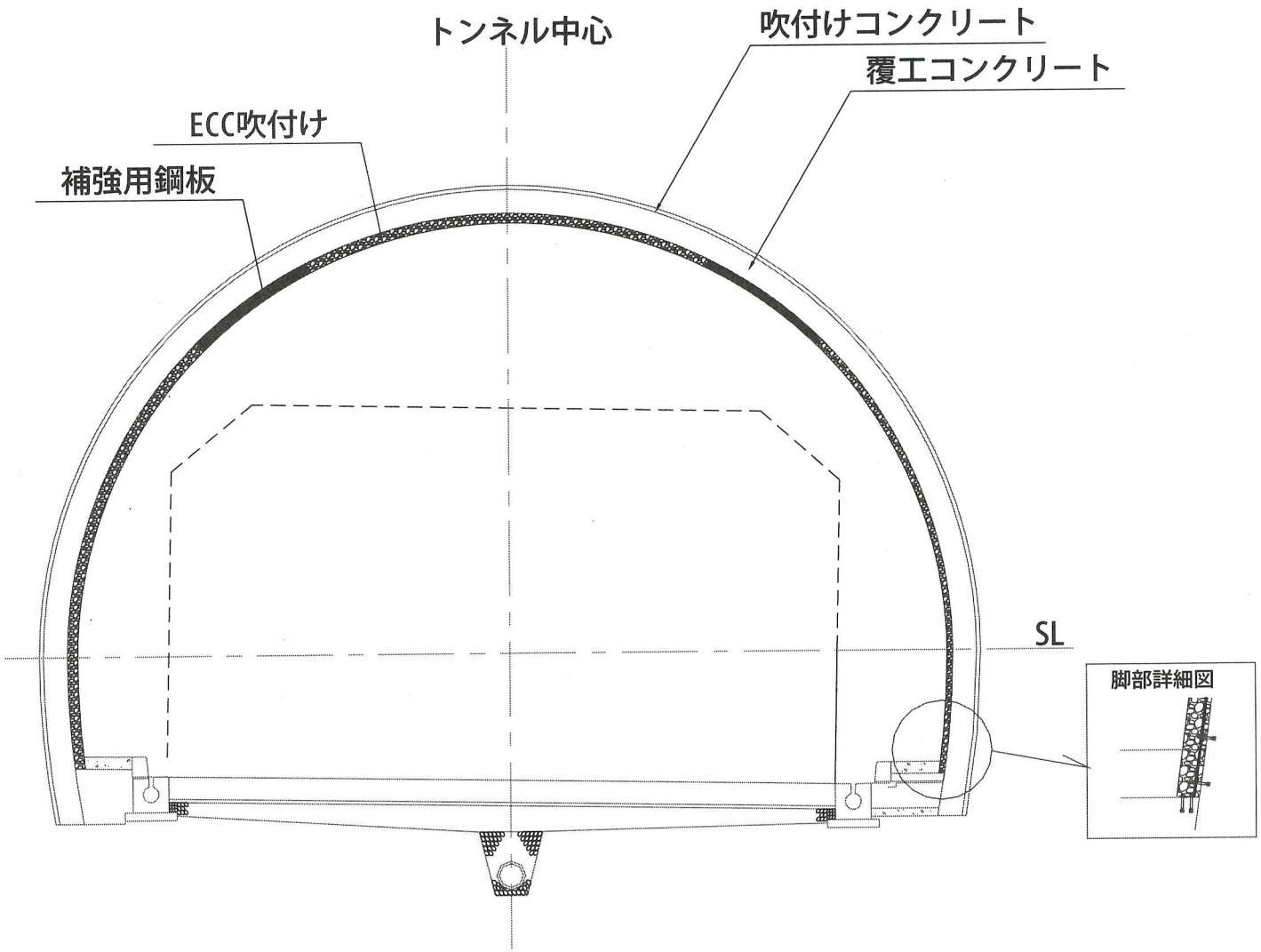



図－４．２　補強モデル２（鋼板使用）

標準断面図を図－4.3に示す。また，主要な使用機材および材料について以下に示す。

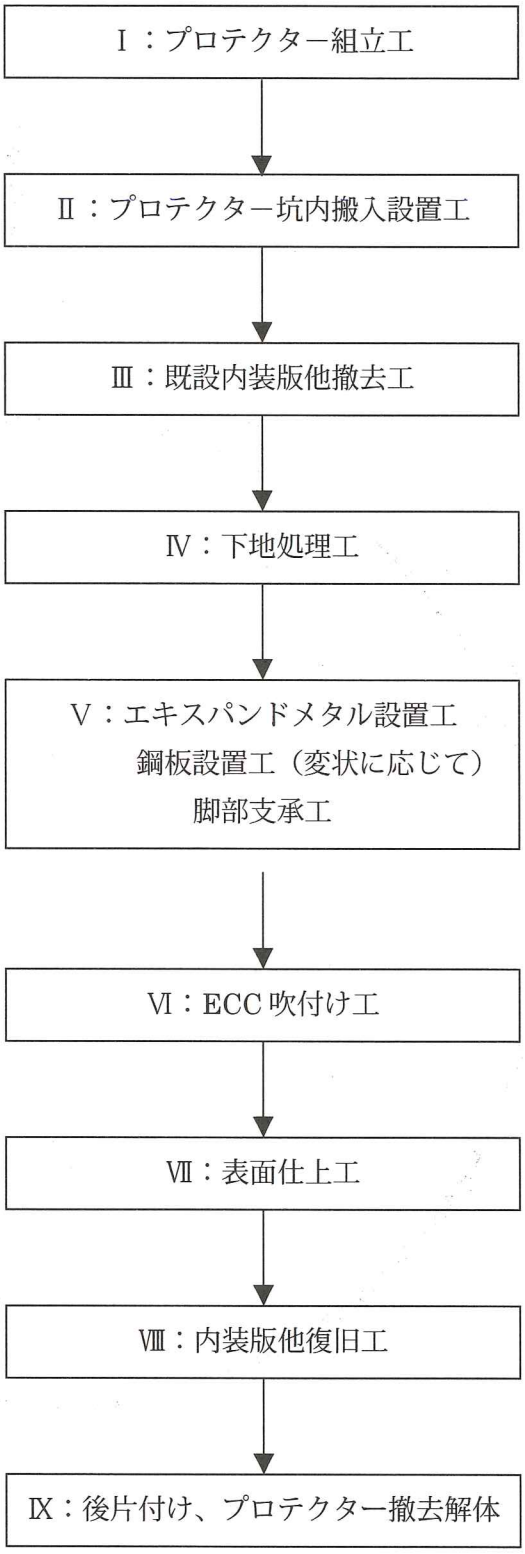
使用機械：リングブラシ，ダストコレクター，吹付け用コンプレッサー（1MPａ），
吹付け用ポンプ（スクイーズ式　6m³/ｈ）　他

使用材料：エキスパンドメタル，鋼板，固定用アンカー，
高靭性セメント複合材料（ECC）→フロー：325mm±75mm




図－４．３　標準断面図

施工フローを図－4.4 に示す。




図－４．４　施工フロー

Ⅰ．プロテクター組立～Ⅱ．坑内搬入設置

本工事で使用する車両防護用プロテクタについての基本的な考え方を以下に示す

・プロテクタは簡易な構造とする（上部には作業員、吹付け用ﾎﾟﾝﾌﾟ、材料等のみが載る）

・プロテクタ構造は固定式として全線設置する。（TD1513～TD1579　6m×11 基）

・構造は基本的に通行車両の目隠し程度の簡易なもの（粉じん、漏水、金物等の落下物から守れるもの）を考える。　上載荷重、車両の衝撃に関しては考慮しない。

（1）設置方法　　以下にプロテクタ設置の概略手順を示す。（６０ｔクレーン使用）

①仮設ヤードで下部フレームの仮組

柱を建て、繋ぎ材を掛け、倒れ防止を図り固定する。

②仮設ヤードで上部フレームの仮組

地組みし、起こす。

③下部フレームと上部フレームの連結

上部と下部をボルトで連結し、天端には床版、側部にはデッキプレートを溶接で固定する。

④敷桁（H 鋼）の設置

脚部を固定する敷桁をアンカーで固定する

⑤運搬

プロテクタを移動架台付トレーラにて 1 ブロックごとに坑内へ運搬する。積み込みはクレーンを用い、移動架台に装着したジャッキにて微調整する。なお運搬中は一次的に坑内一般車両の通行を禁止する。

⑥設置

坑内に運搬したプロテクタを先行敷設した敷桁上面に結合する。各ブロックについて順次繰返し行い、全線設置する。　設置完了後は一般車両の通行止めを解除する。

Ⅲ．既設内装版他撤去工（省略）

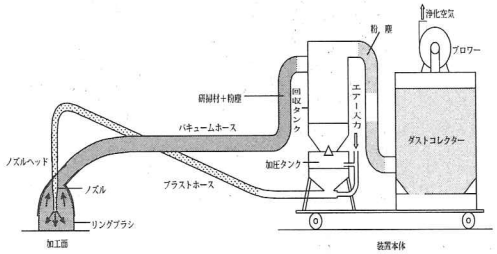
Ⅳ．下地処理工

ECC の付着をよくするため、既設トンネルの表面を清掃した後、目粗しする。

①サンドブラスティング

・目粗しはリングブラシと研掃材を用いて、人力で行う。

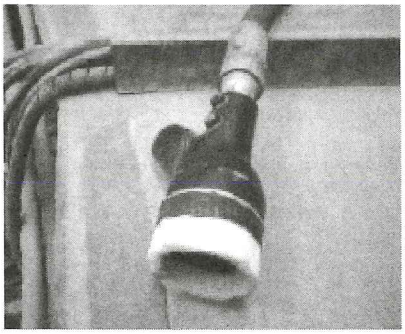
・サンドブラスト施工システム及び研掃材の仕様を以下に示す。



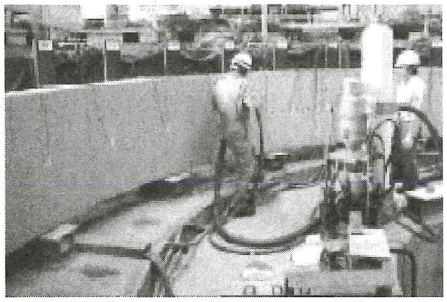

サンドブラスト施工システム

研掃材仕様

| 項目 | 摘要 |
|---|---|
| 品名 | フジランダムA-36 |
| 材質 | アルミナ |
| 粒度 | 500～595μm |
| 比重 | 3.94g/cm$^3$以上 |



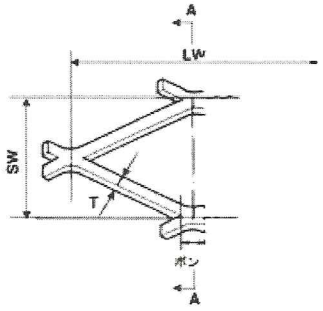
リングブラシ



施工状況

V．エキスパンドメタル設置工、鋼板設置工、脚部支承工

下地処理をほどこした後、エキスパンドメタル固定用アンカーを約３.３ 個/㎡設置する。エキスパンドメタルはアンカーに結束線を用いてトンネル表面から１０mmの位置に固定する。また、変状に応じて部分的に鋼板を設置することも可能で、鋼板の設置面積および重量に応じた数の固定用アンカーを設置する。鋼板上には溶接金網を設置する。また脚部は、エキスパンドメタルの浮き上がり防止および付着面のせん断補強を目的として、アンカーをトンネル延長方向に 4 個/m 程度設置する。それぞれの仕様と設置状況を以下に示す。

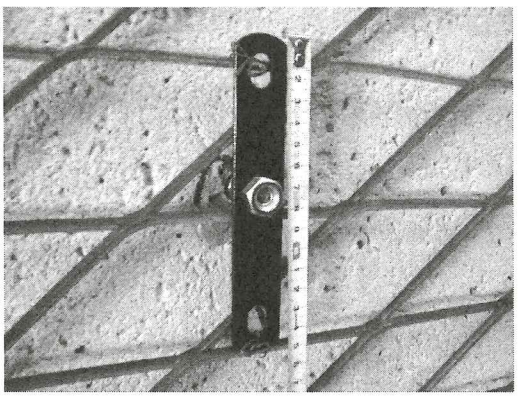


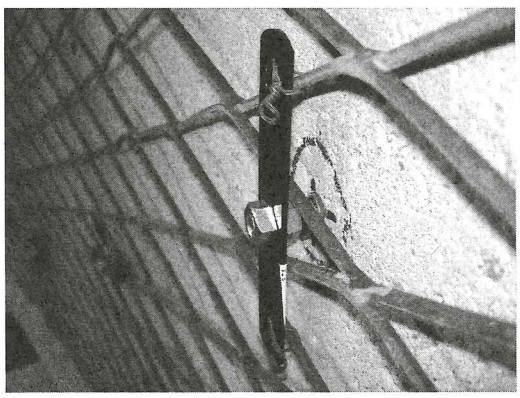

エキスパンドメタル仕様

| 項目 | | | 摘要 |
|---|---|---|---|
| メッシュ | 寸法 (mm) | SW | 75.0 |
| | | LW | 203.2 |
| ストランド | 寸法 (mm) | T | 4.5 |
| | | W | 5.0 |
| 単位面積重量 (kg/m²) | | | 4.71 |

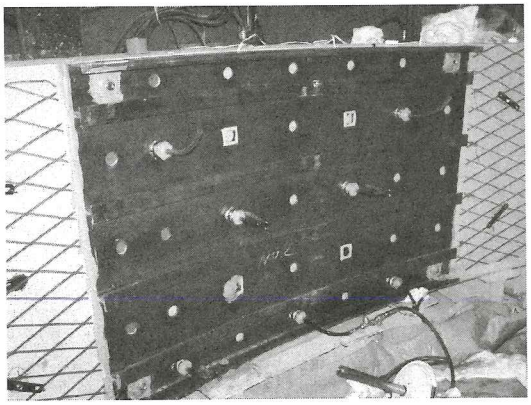
アンカー仕様

| 項目 | 仕様 |
|---|---|
| 外径 | 14.0mm |
| 全長 | 70mm |
| スリーブ長さ | 40mm |
| 基準ドリル径 | 14.5mm |





エキスパンドメタル設置状況



鋼板固定状況

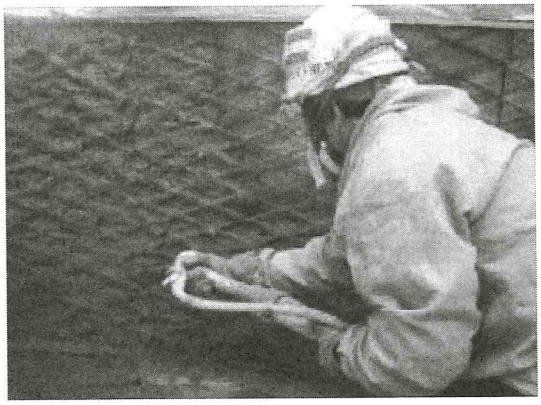


ECC との一体化処置方法

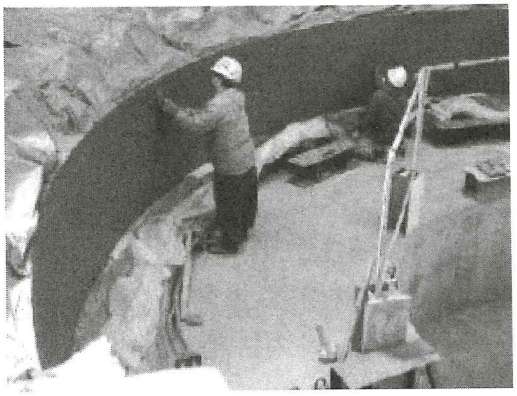
Ⅵ. ECC 吹付け工～Ⅶ. 表面仕上工

吹付け材料は現地にてミキサー練りする。練りあがった材料は所定のフロー値が確保されていることを確認した後、スクイーズ式ポンプを用いて吹付ける。吹付けは３層（２０mm、２０mm、１０mm）に分け、慎重に行う。オペレータは保護具（メガネ、マスク、手袋等）を着使用し、コンプレッサーの圧力を調整しながら、できるだけリバウンドが少なくなるように行う。３層目が完了したら表面をコテ仕上し、平滑にする。

なお吹付け材料は湿気等により品質低下しないよう保管管理を徹底する。また冬季での施工の際は強度発現を促進するように、施工範囲をシート等で養生し、場合によってはヒーター等を設置する。



吹付け状況



表面仕上状況

Ⅷ. 内装版他復旧工（省略）

Ⅸ. 後片付け、プロテクタ撤去解体

作業終了後は作業エリア全体の清掃、片付けを行う。一般車両の通行止めをした後、プロテクタの撤去搬出を行う。搬入時と同様に各ブロックごとに順次トレーラで搬出し、仮設ヤードで解体する。

## 5．まとめと今後の課題

### 5．1　まとめ

（1）耐荷力

地圧等の外力作用により変状が生じたトンネル覆工を対象に，鋼材と吹付け施工の高靭性セメント複合材料（ECC）を用いたトンネル補強工法を開発し，実大載荷試験により耐荷力を確認した。

天端の緩み土圧をモデル化した載荷形式Ⅰの実験では，ECC 吹付け厚さ 5cm で，無垢の覆工（圧縮強度 18N/mm$^2$，覆工厚さ 30cm）の 1.3 倍以上の耐荷力が得られ，また，ECC のひび割れ抑制効果，覆工の剥離・剥落抑制効果が確認された。

せん断ひび割れや目違いが生じた覆工に，等方から荷重が作用する状態を対象とした載荷形式Ⅱの実験では，ECC 吹付け厚さ 7cm で弱点部に鋼板を設置した場合の最大耐荷力は，無垢の覆工（圧縮強度 18N/mm$^2$，覆工厚さ 30cm）の最大耐荷力の計算値と比較すると 0.8 倍程度であった。アンカーの引抜けにより，弱点部のずれが急激に進行して破壊に至ったことから，アンカー長を十分に確保し（径の 20 倍程度以上），かつアンカー径を太くすることや本数を増加させることにより，弱点部のずれを抑制し，耐荷力が向上する可能性がある。

（2）耐久性

ECC は，一般のコンクリートと比較して中性化速度が非常に遅いこと，凍結融解負荷後の弾性係数やコンクリートとの付着力の低下が非常に小さいことを，各促進試験により確認した。この結果から，ECC 内部に設置された鋼材が腐食する可能性は低く，かつ覆工との付着力が極端に低下することは少ないと考えられる。また，ECC の繊維架橋効果が長期的に期待できるため，ECC 補強部の将来における剥落懸念に対して，部分的な剥落塊となって剥落する可能性は非常に小さい。

（3）経済性

標準的な施工法を検討した結果，その施工法は従来の覆工打替え工法に比較して工期短縮が可能で，その結果，工費低減も期待できる。

### 5．2　今後の課題

（1）設計

①覆工の損傷度評価

補強後の耐荷力を評価するには，覆工の損傷度を適切に評価する必要がある。実大実験Ⅰのフレーム解析では，覆工の応力－ひずみ曲線を圧縮ひずみが $3500\times10^{-6}$ に達した後も圧縮応力が 0 とならずに，$10{,}000\times10^{-6}$ まで線形に低下するモデルを用いて概ね整合した。しかしながら，実構造物の損傷度を適切に評価することは難しいため，今後，覆工の損傷

を適切にモデル化する方法の確立が望まれる。

②エキスパンドメタルの耐荷力

本工法では，将来における剥落防止を目的にエキスパンドメタルを設置する構造とした。そのため，今回の実大実験では，エキスパンドメタルの耐荷力が実験結果に影響しないように，各ピースを突き合せた状態で連結していない。

しかし，従来における道路橋床版等を対象とした下面増厚の実験などでは，補強材の定着を確保することで，補強材による曲げ耐力の向上が確認されている。そのため，本工法においても，適切な方法によりエキスパンドメタルの定着を確保することで，エキスパンドメタルによる耐荷力の向上が見込まれる。

③アンカー（鋼板設置用）

今回の実大試験では，載荷形式Ⅱの実験時，載荷初期の段階からアンカーの引抜けが生じ，その後は鋼板と覆工間の樹脂による付着力とアンカーのダボ効果によって水平せん断力に抵抗していたと思われる。今回のアンカーの根入長は，鋼板補強部分において模擬ひび割れを考慮し，根入長さを十分に確保できていない。そのため，根入長さが十分であれば，試験体全体の耐荷力はさらに向上したと考えられる。また，アンカーの太さや本数を増加させることによっても同様に耐荷力の向上が期待できると思われる。

しかしながら，実際の変状トンネルでの施工を考慮すると，覆工の損傷程度によっては，アンカーの定着力が無垢の覆工に比べ低下することも考えられる。この場合は，十分な定着力が得られるようアンカー根入長さを検討するほか，ひび割れ注入の併用や，さらにはロックボルト等で補強部材・既設コンクリートと岩盤とを一体化させるなどの対策を検討する必要がある。

（2）材料

①吹付け ECC

現状では，吹付け ECC のフレッシュ性状や凝結性状が環境温度に左右され，工程に大きく影響を及ぼしている。このため，工程短期によるコスト低減を図るためには，1層の吹付け厚さを厚くすることや，次層の吹付けまでの待機時間を短くする等の材料の改良が望まれる。

また，吹付け ECC の引張性状の品質管理は特殊な形状（ダンベル型）の供試体によって実施しているが，この試験はその特殊性から，汎用的ではなく，所定の引張機器を有した試験機関でしか実施できない。このため，これに代わる汎用的な試験方法を考案することが望まれる。

②鋼材

変状トンネルにおいては，内空形状が当初の設計と異なり，変形しているケースが多い。そのため，覆工の断面形状に合わせて，エキスパンドメタルや鋼板を設置するのが困難になることが想定される。したがって，どのような断面形状にも迅速に対応できるような鋼材の加工方法と設置方法について検討する余地がある。

（3）施工（施工システム）

ECC の吹付け施工システムは，当初，コンクリート構造物の断面修復工法などの比較的小断面の施工を対象に開発されたため，汎用的で小型の機械で構成されている。

今後，トンネル覆工などの大断面を対象として展開するためには，大断面を対象とした新しい吹付け施工システムの開発が望まれる。

## 6．おわりに

今後益々,変状トンネルの補強・補修工事が増大するものと予想される。現在，補修・補強工事が必要なトンネルの殆どが旧規格建築限界のもので，現状よりも内空を侵すような工法の適用は難しい。また社会的な損失を最小限に抑えるため，工事は少なくとも片車線共用可能な工法選定が必須である。今回開発した高靭性セメント複合材料と鋼材を用いた補強工法は，補強断面が５～７ｃｍと非常に薄肉で,吹付け工法による施工であることから，大型重機や型枠支保（セントル）も使用の必要がない。また，使用材料の ECC もプレミックス材を用いていることから現場で容易に混練が可能で，設備も汎用的かつ小型なことから，トンネル内の狭い空間内（片車線）で十分施工が可能である。

本工法は 2004 年 10 月 23 日に発生した新潟中越地震により被災したＪＲ上越線天王トンネルの災害応急工事に適用された。天王トンネルは，1965 年に完成した延長 285m の単線鉄道トンネルで，建設当時の標準工法であった導坑先進上部半断面工法により施工されたものである。地震の影響で，覆工コンクリートにひび割れが発生し，延長 285mのうち 37mの区間で，コンクリート片の剥落やクラックなど大きな損傷が生じていた。補強対策工法の選定に際し，既設覆工コンクリートの耐力向上は当然のことながら,工期短縮と恒久的な剥落防止性能も要求され，各種対策工法を比較検討した結果，本工法が採用された。工事数量は，延長 37m,施工面積約 500㎡，ECC 吹付け約 25㎥（施工厚さ 50㎜）で，昼夜連続作業により実働 10 日間（本工法適用部分のみ）で完了し,本工法の現場適用性を実証することができた。

今後も，さらなるコストダウンと急速施工に対応できるように技術開発を進め，供用トンネル補強工事への適用をはじめとして，幅広い分野で展開していく所存である。

参考資料１

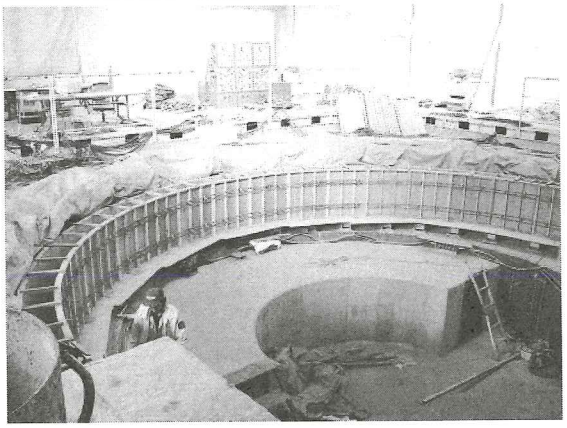
# 開発工法に関する写真

参考資料 1-1　試験体製作状況

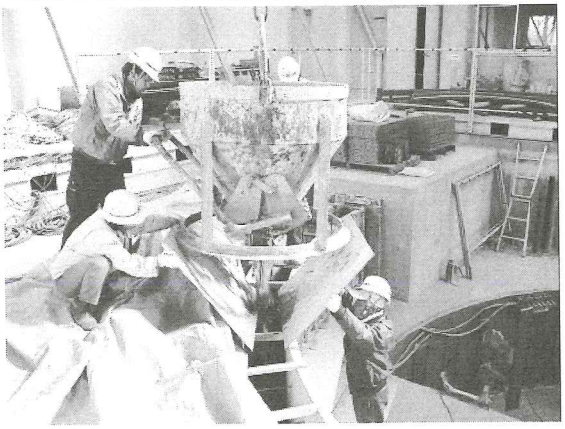
参考資料 1-2　載荷形式Ⅰ試験状況

参考資料 1-3　載荷形式Ⅱ試験状況

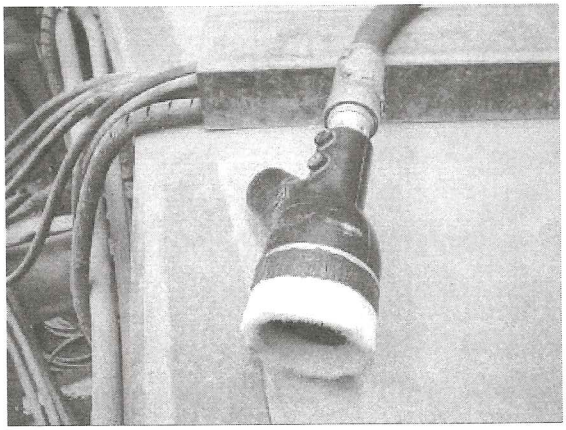
# 参考資料 1-1　開発工法に関する写真　試験体製作状況



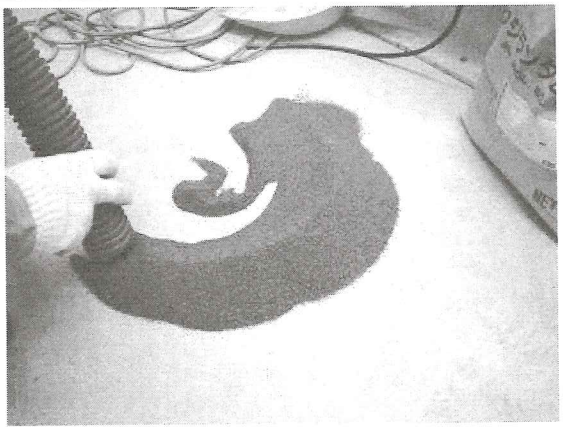
型枠設置状況



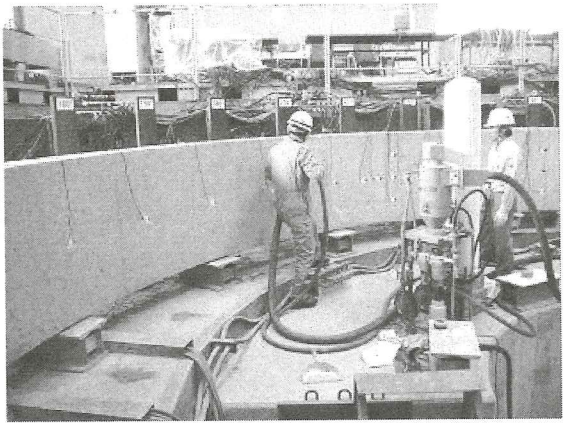
コンクリート打設状況



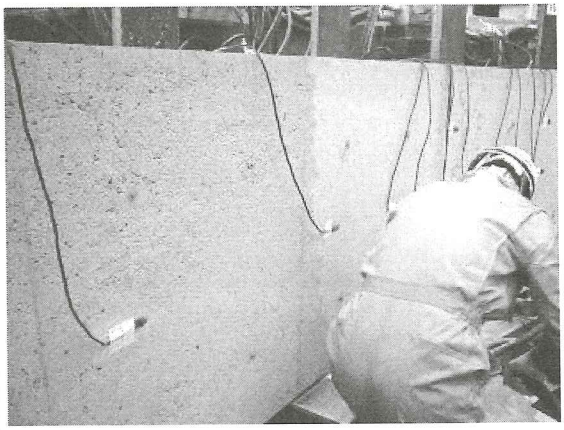
リングブラシ



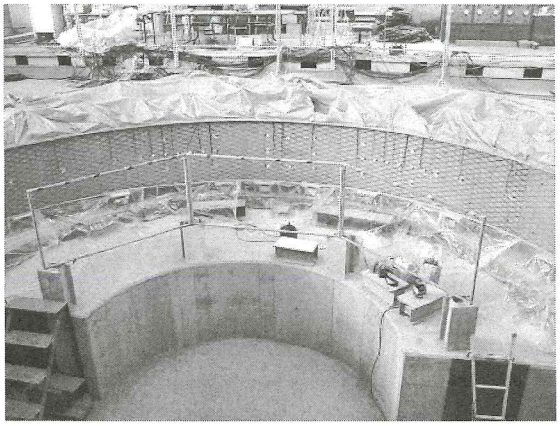
研掃材



施工状況①



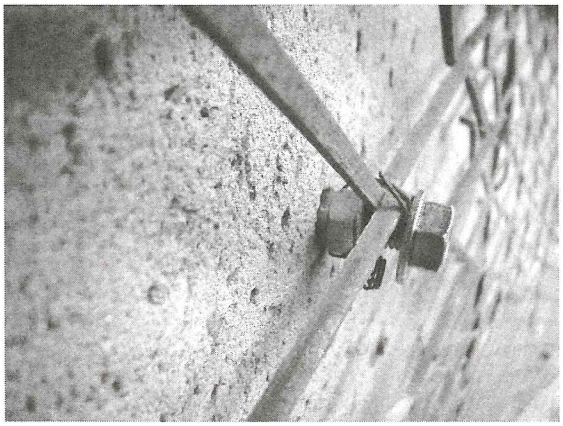
施工状況②



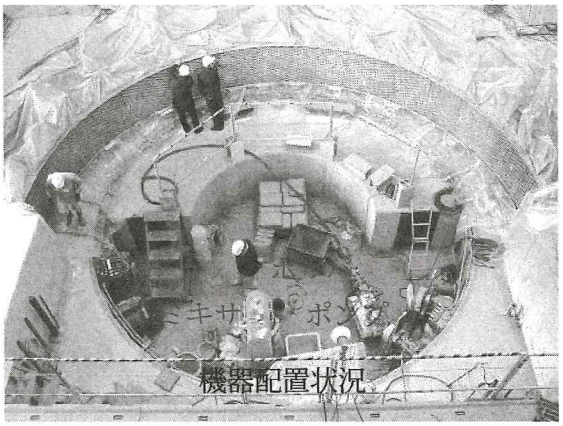
エキスパンドメタル設置
設置状況①



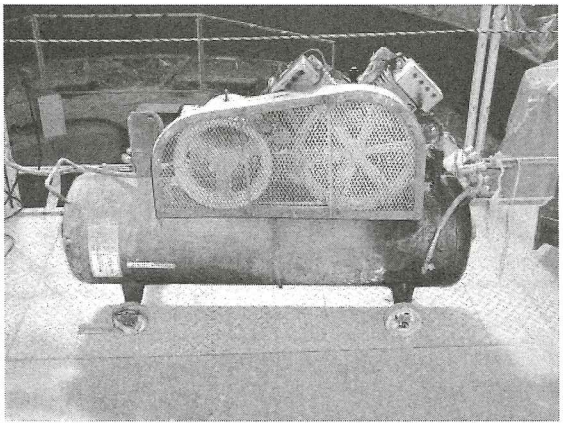

エキスパンドメタル設置
設置状況②



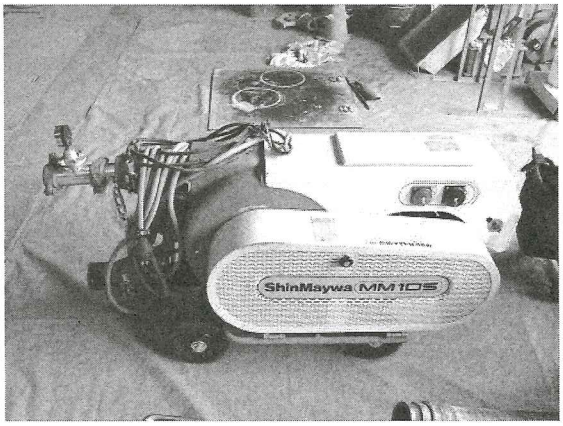
施工状況③



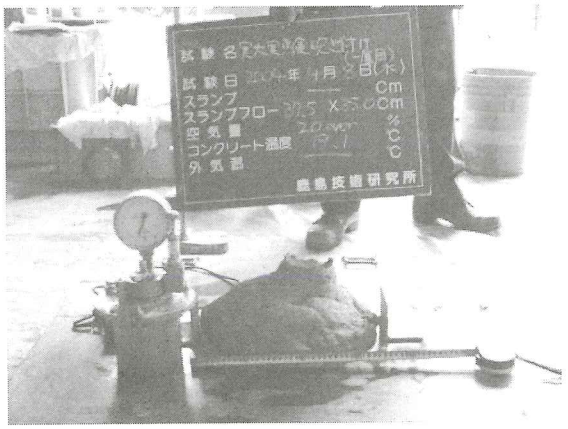

施工状況④



コンプレッサ




ポンプ




ECC フレッシュ試験状況（１層目）



吹付け状況①



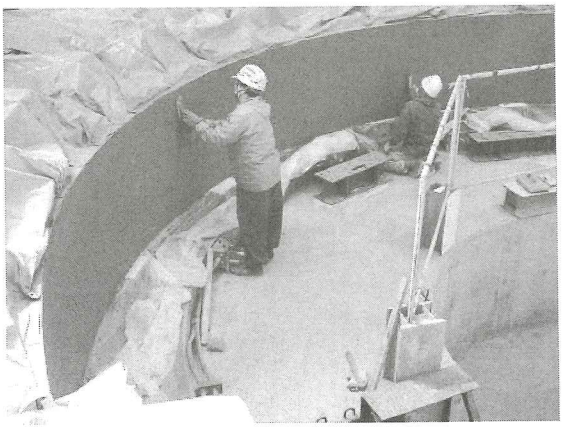
吹付け状況②



１層目終了(20mm)

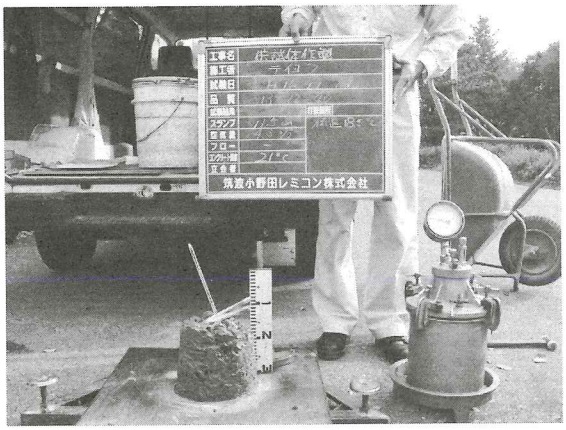


２層目終了(20mm)

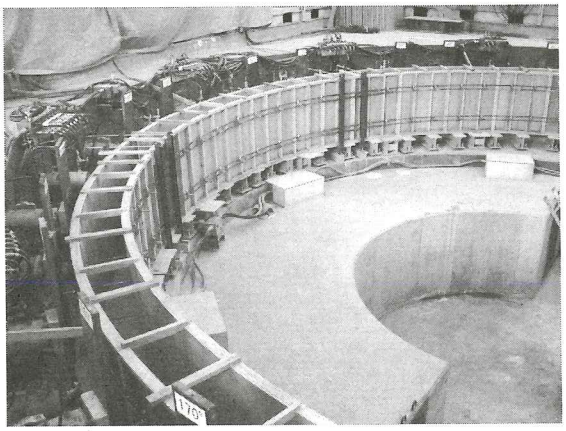


３層目終了(10mm)

| | |
|---|---|
|  <br>仕上げ状況 | |
| | |
| | |



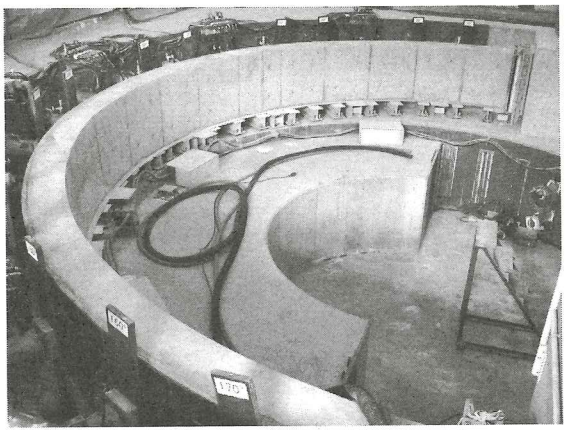

コンクリート性状



型枠設置状況



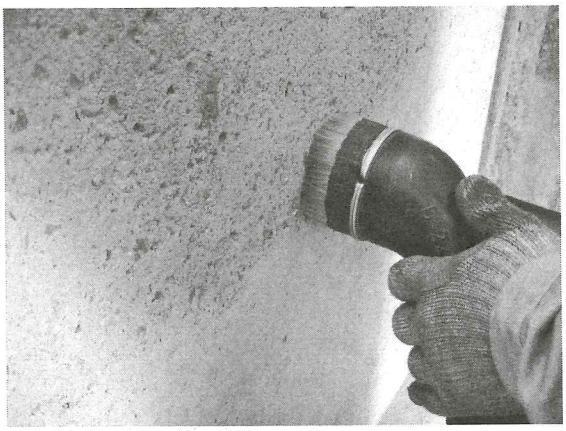
コンクリート打設状況



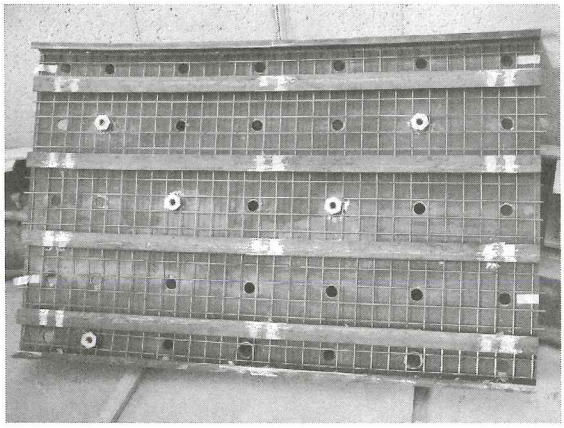
試験体型枠脱型後状況



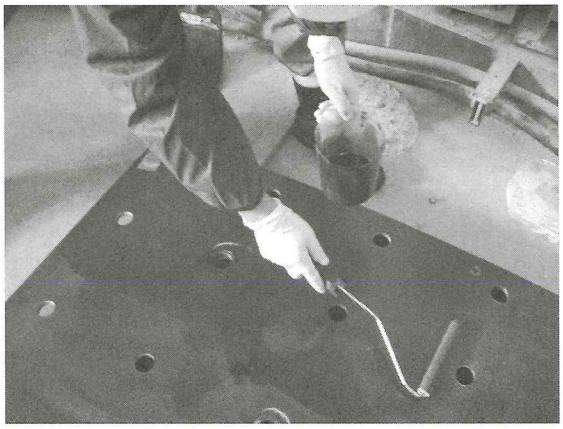
接着試験状況



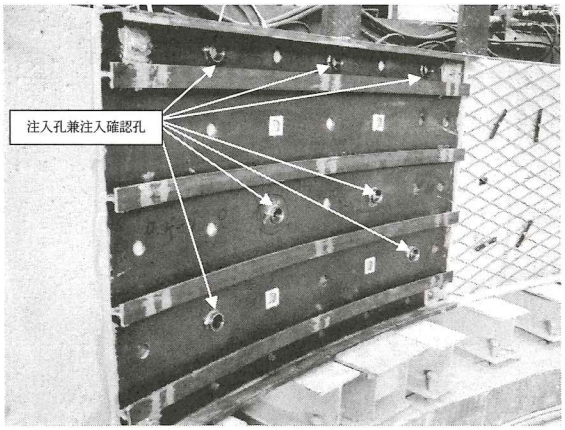
施工状況



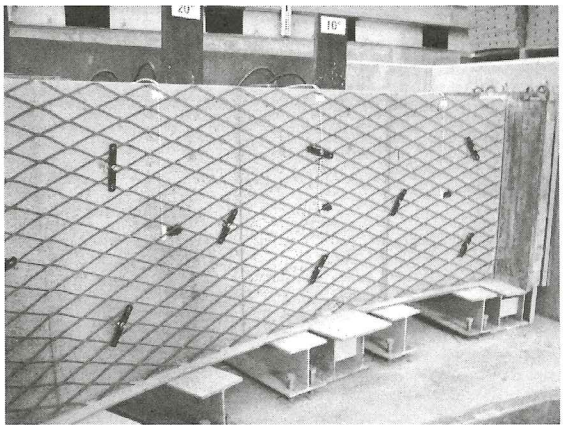
補強用鋼板



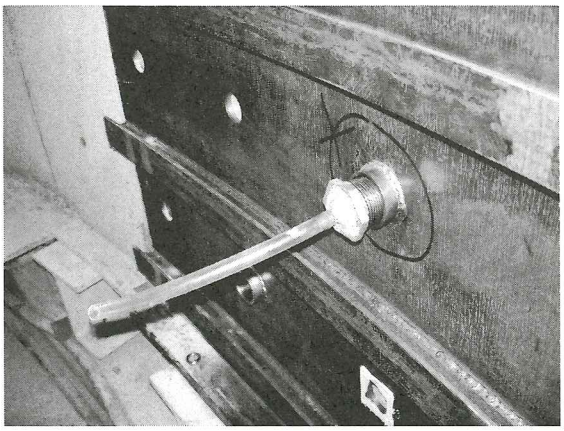
施工状況



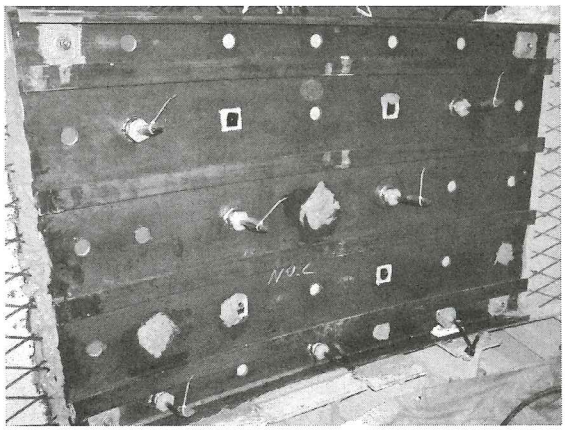

鋼板設置状況



エキスパンドメタル
設置状況



鋼板背面注入孔設置　→　樹脂注入



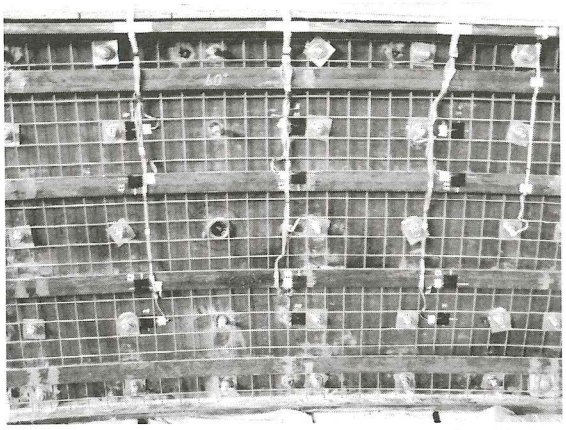
鋼板樹脂注入後状況



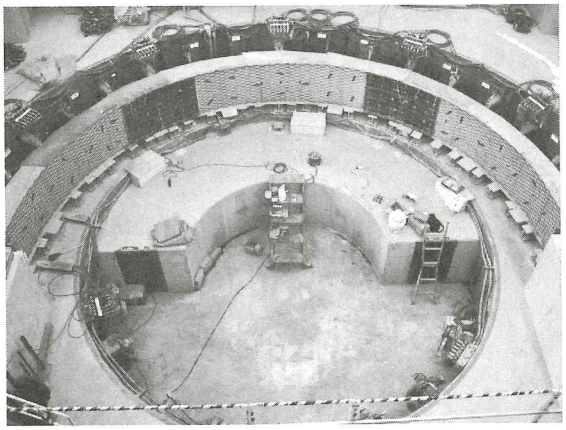
金網溶接状況



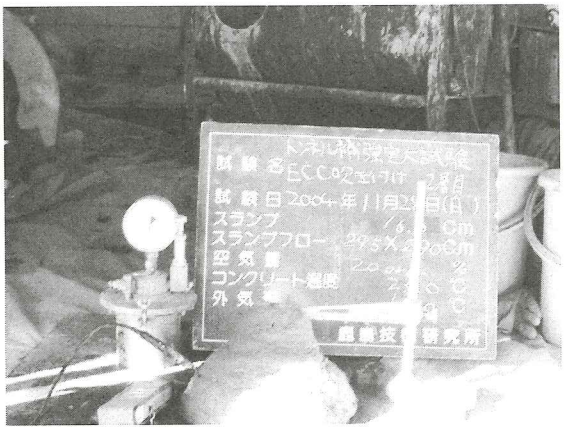
アンカー設置状況



鋼板に溶接金網（φ3.2mm50×50）設置



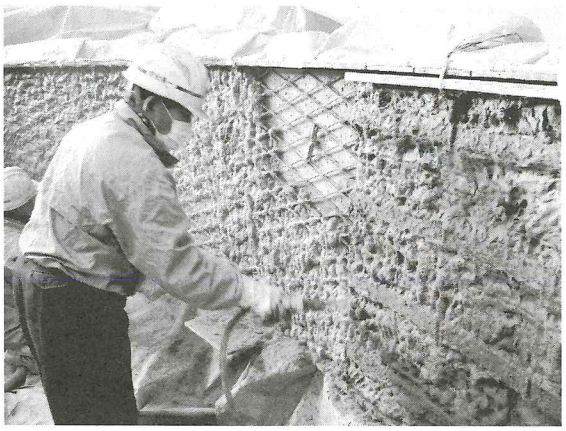
試験体 ECC 吹付け前状況



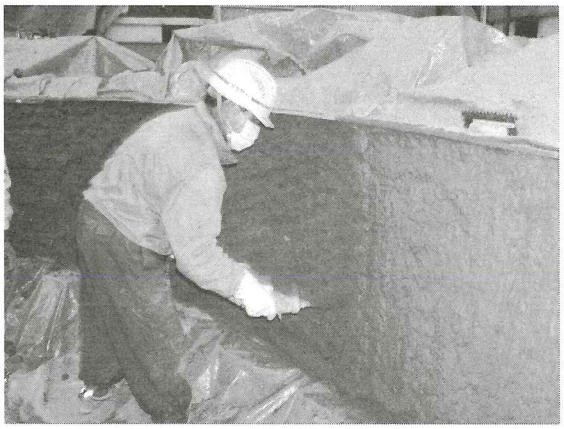

ECC 性状



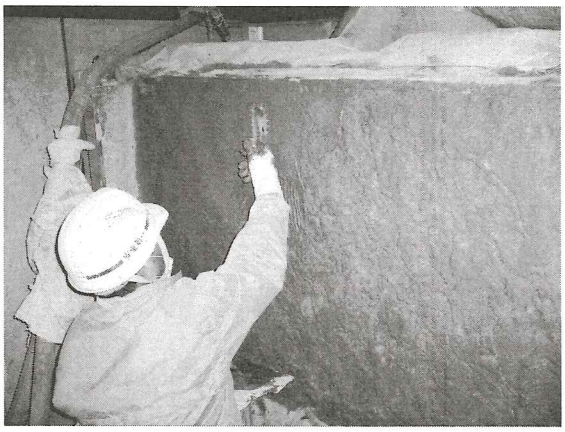
ECC 施工状況



ECC 施工状況

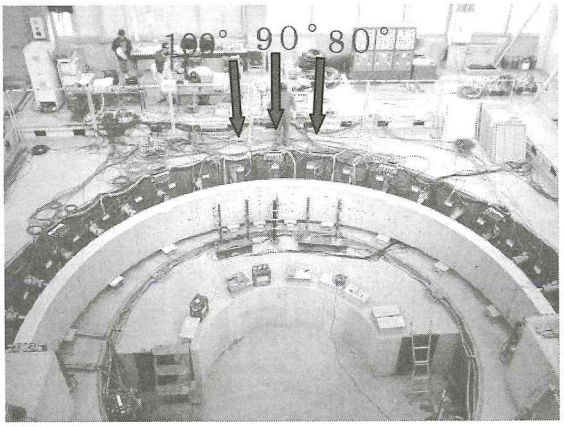


ECC 施工状況

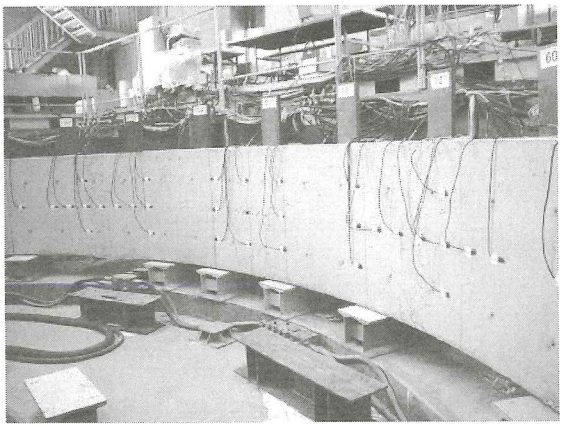


ECC 仕上げ状況

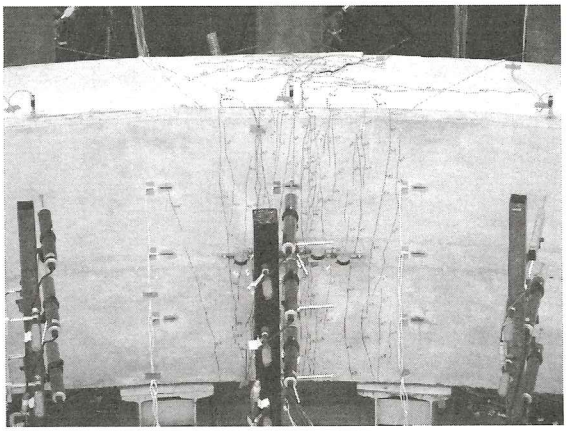
# 参考資料 1-2　開発工法に関する写真　載荷形式Ⅰ試験状況




覆工試験体

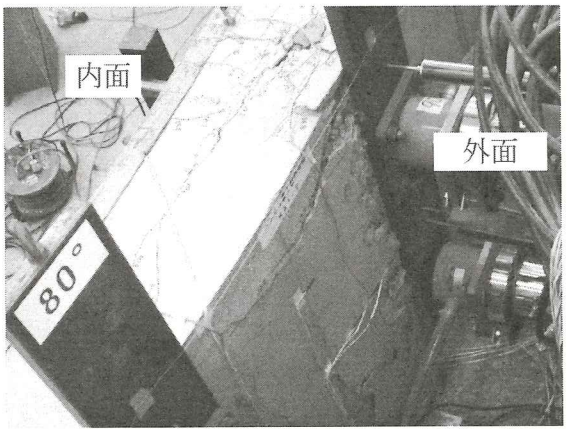


ひずみゲージ設置状況



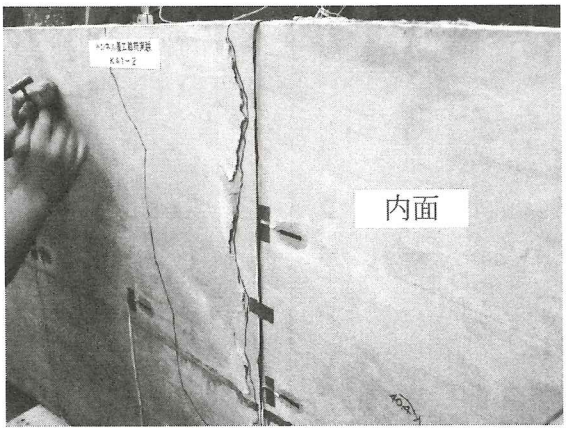
天端部（90 度）

天端部内面のＥＣＣでひび割れが無数に分散し，ひび割れ幅が抑制されている。

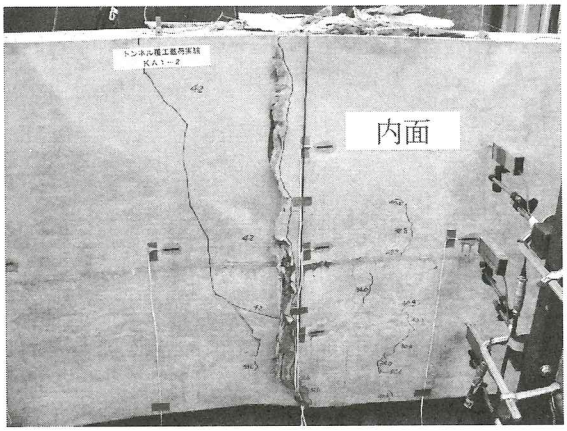



天端部（90 度）

天端部外面は，一次載荷時の圧縮損傷が大きい。

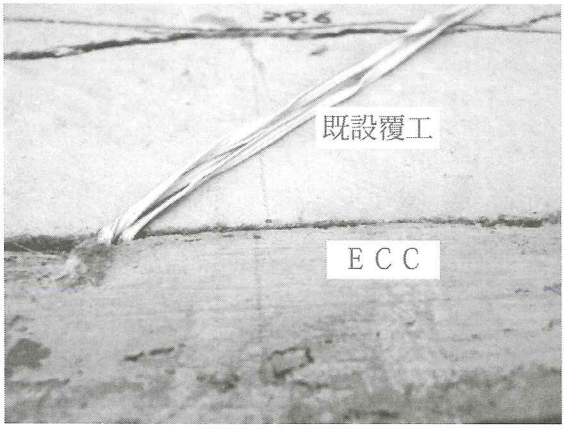



肩部圧壊開始時の 115 度内面の状況

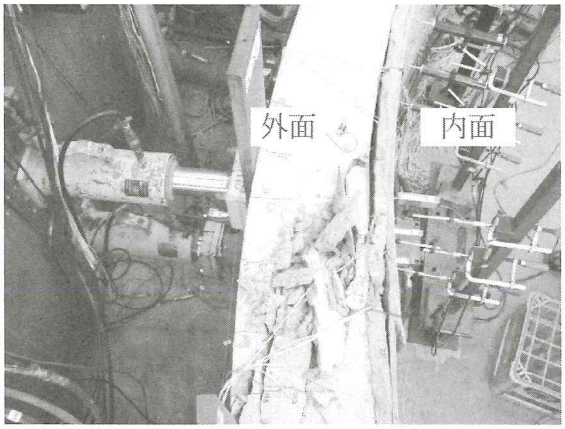



肩部（115 度）

実験終了時の肩部内面




肩部（115 度）
界面が剥離した状態



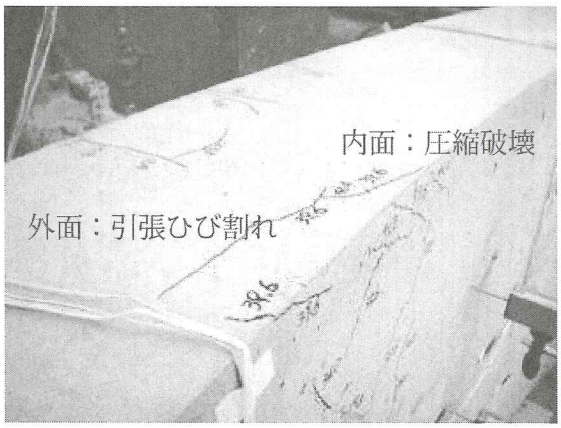

肩部（115 度）
実験終了時の肩部




実験終了時



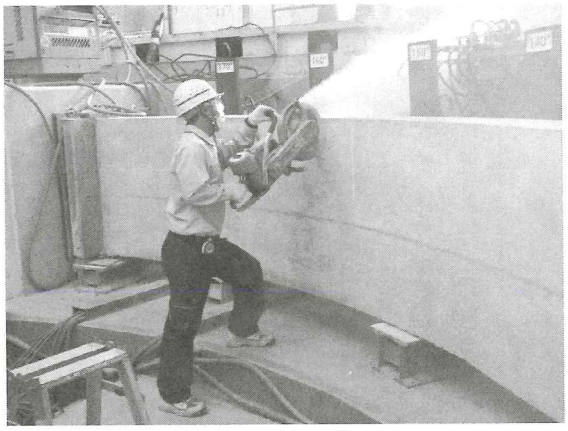

実験終了時



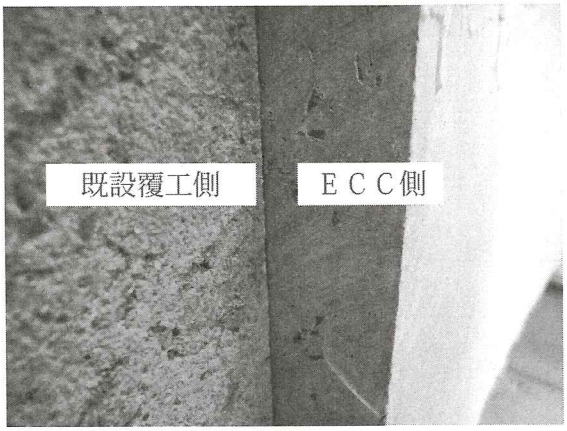

実験終了時



解体状況①



解体状況②




ＥＣＣ充填状況



エキスパンドメタル降伏状況

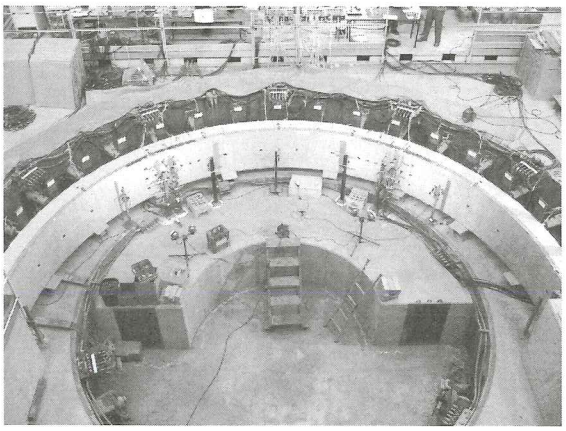



アンカー部周辺（覆工側引抜け）

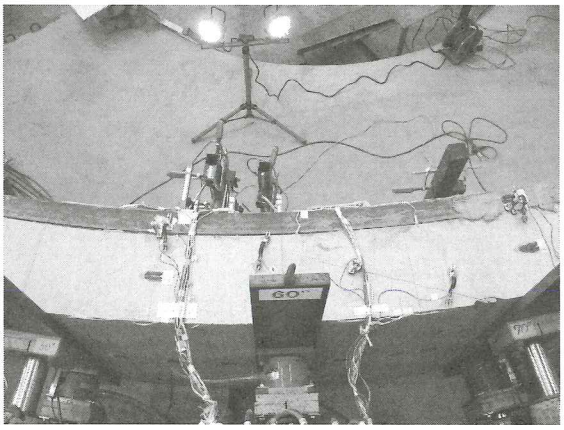



アンカー部周辺（ＥＣＣ側引抜け）

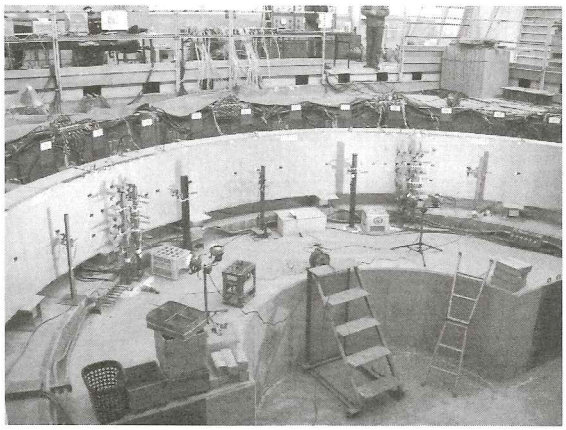
# 参考資料 1-3　開発工法に関する写真　載荷形式Ⅱ試験状況



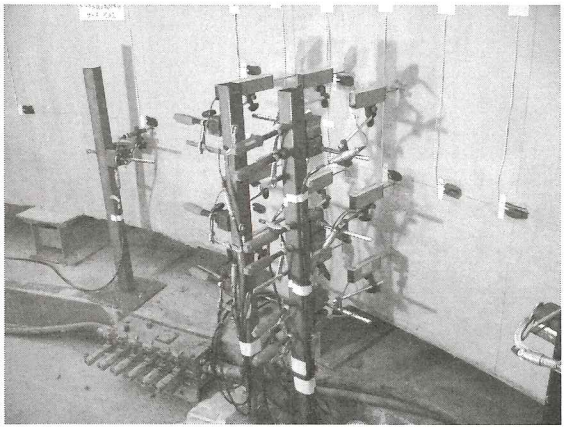
覆工試験体



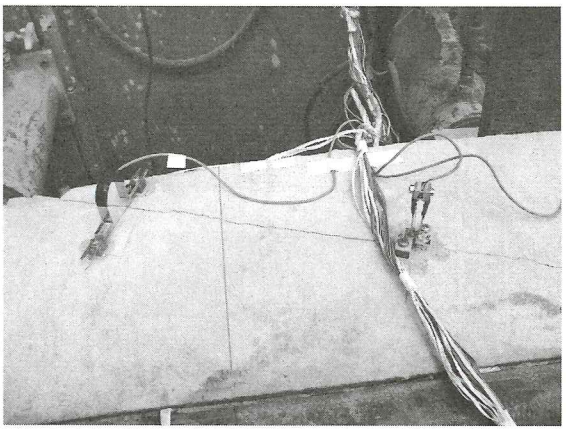
スリット部



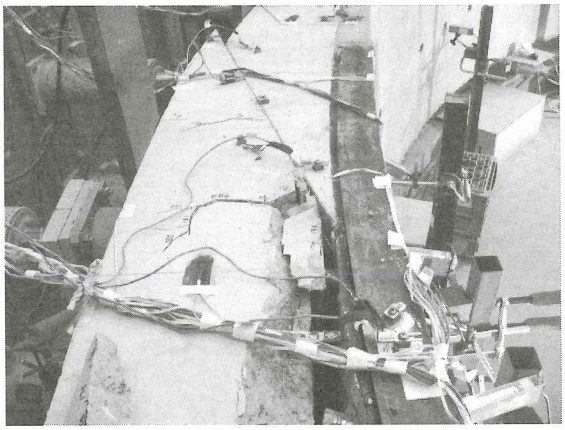
ひずみゲージ・変位計設置状況



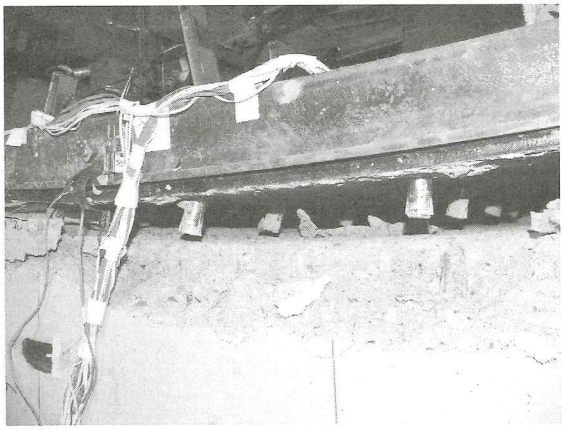
ひずみゲージ・変位計設置状況



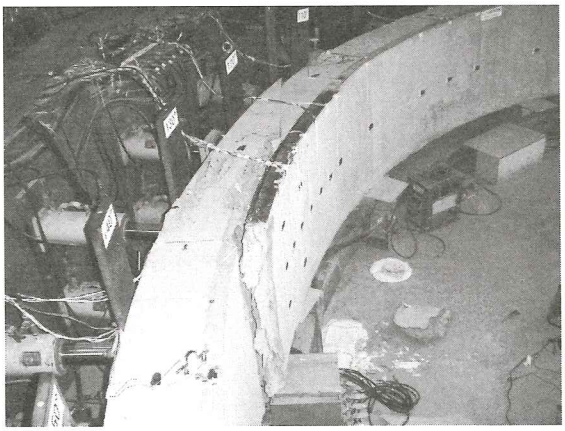
スリット部πゲージ設置状況



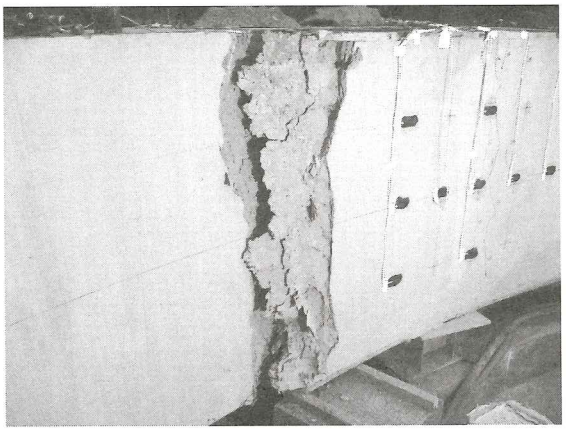
スリット部　破壊状況



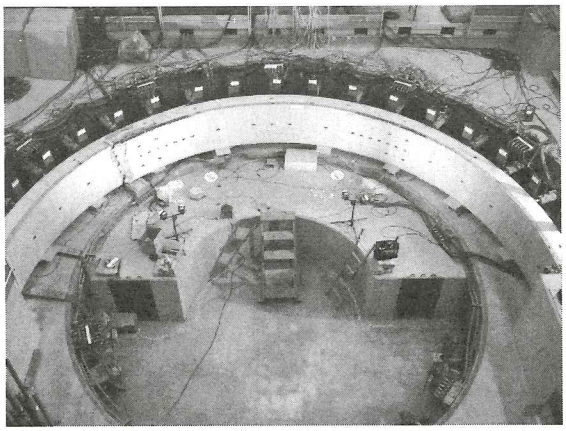
アンカー抜け出し状況



スリット部　破壊状況



スリット部　破壊状況



実験終了後

参考資料 2

# 載荷形式 I 試験結果

## 載荷形式Ⅰ　損傷載荷(実験ケース名称:KA1-1)　図表目次

実験結果をとりまとめて図表を作成した。作成した図表を以下の順に示す。

1) 計測位置
- 供試体概要図
- ジャッキ配置図
- 荷重計・変位計位置図
- パイ型変位計位置図
- ひずみ計測位置図
- 計測位置・計測点数一覧表

2) 載荷実験進行表

3) 荷重と変位の関係図
- 荷重-外側変位図(90度・h=50cm)
- 変位分布図(ジャッキストローク　h=50cm)
- 変位分布図(内側変位　h=75cm/h=50cm/h=25cm)
- 荷重-ジャッキストローク図(載荷部　80度・90度・100度)
- 荷重-ジャッキストローク図(反力部)
- 荷重-内側変位図(80度・90度・100度)
- 荷重-内側変位図(0度・70度・110度・180度)
- 荷重ーパイゲージ変位図

4) 荷重と各部荷重の関係図
- 荷重ー荷重(載荷部ジャッキ1本の荷重計の値)
- 荷重ー荷重(反力部ジャッキ1本の荷重計の値)

5) 荷重とコンクリートひずみの関係図
- ひずみ分布図(覆工外面周方向分布　h=75cm/h=50cm/h=25cm)
- ひずみ分布図(覆工内面周方向分布　h=75cm/h=50cm/h=25cm)
- 荷重ー覆工外面ひずみ図(75cm/50cm/25cm)
- 荷重ー覆工内面ひずみ図(75cm/50cm/25cm)

6) ひび割れ図
- 上面ひび割れ状況図
- 外面ひび割れ状況図
- 内面ひび割れ状況図

特記事項:上記図表においての注意点を記す。

・図の荷重は載荷点ロードセル6本の合計値である。

・ひずみは引張が+、圧縮がーである。

## 載荷形式Ⅰ　補強後載荷(実験ケース名称:KA1-2)　図表目次

実験結果をとりまとめて図表を作成した。作成した図表を以下の順に示す。

1) 計測位置
- 供試体概要図
- ジャッキ配置図
- 荷重計・変位計位置図
- パイ型変位計・クリップゲージ位置図
- ひずみ計測位置図
- 計測位置・計測点数一覧表

2) 載荷実験進行表

3) 荷重と変位の関係図
- 荷重-内側変位図(90度・h=50cm)
- 変位分布図(ジャッキストローク　h=50cm)
- 変位分布図(内側変位　h=75cm/h=50cm/h=25cm)
- 荷重-ジャッキストローク図(載荷部　80度・90度・100度)
- 荷重-ジャッキストローク図(反力部)
- 荷重-内側変位図(80度・90度・100度)
- 荷重-内側変位図(0度・70度・110度・180度)
- 荷重ーパイゲージ変位図
- 荷重ークリップゲージ変位図

4) 荷重と各部荷重の関係図
- 荷重ー荷重(載荷部ジャッキ1本の荷重計の値)
- 荷重ー荷重(反力部ジャッキ1本の荷重計の値)

5) 荷重とコンクリートひずみの関係図
- ひずみ分布図(覆工外面周方向分布　h=75cm/h=50cm/h=25cm)
- ひずみ分布図(覆工内面周方向分布　h=75cm/h=50cm/h=25cm)
- ひずみ分布図(内巻内面周方向分布　h=75cm/h=50cm/h=25cm)
- 荷重ー覆工外面ひずみ図(75cm/50cm/25cm)
- 荷重ー覆工内面ひずみ図(75cm/50cm/25cm)
- 荷重ー内巻内面ひずみ図(75cm/50cm/25cm)

6) 荷重とエキスパンドメタルひずみの関係図
- ひずみ分布図(周方向分布　h=50cm)
- 荷重ーエキスパンドメタルひずみ図(50cm)

7) ひび割れ図
- 上面ひび割れ状況図
- 外面ひび割れ状況図
- 内面ひび割れ状況図

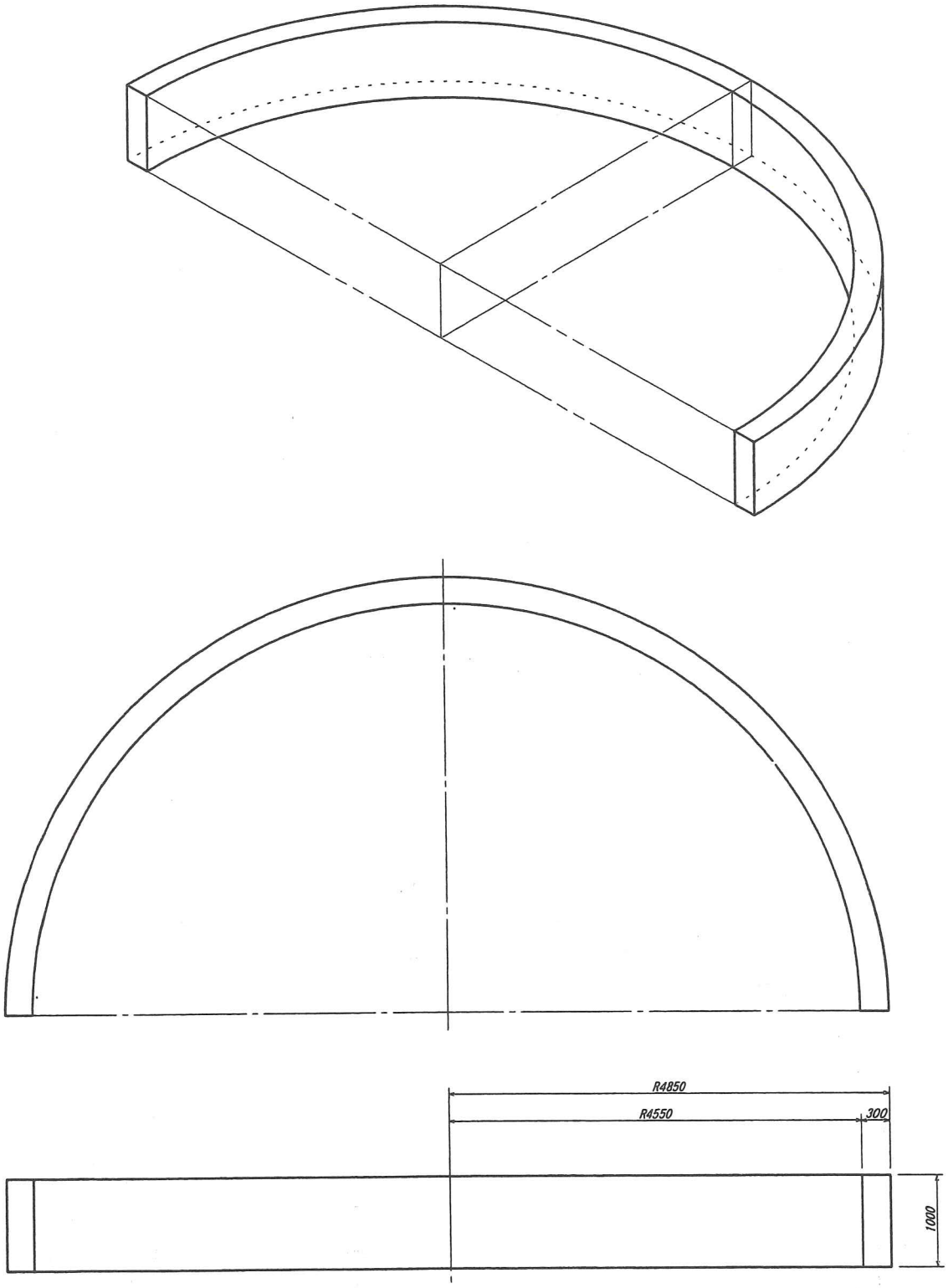
8) ひび割れ幅測定結果

特記事項:上記図表においての注意点を記す。

・図の荷重は載荷点ロードセル6本の合計値である。

・補強後載荷においては全チャンネルのイニシャルを取り直した後、載荷を開始した。

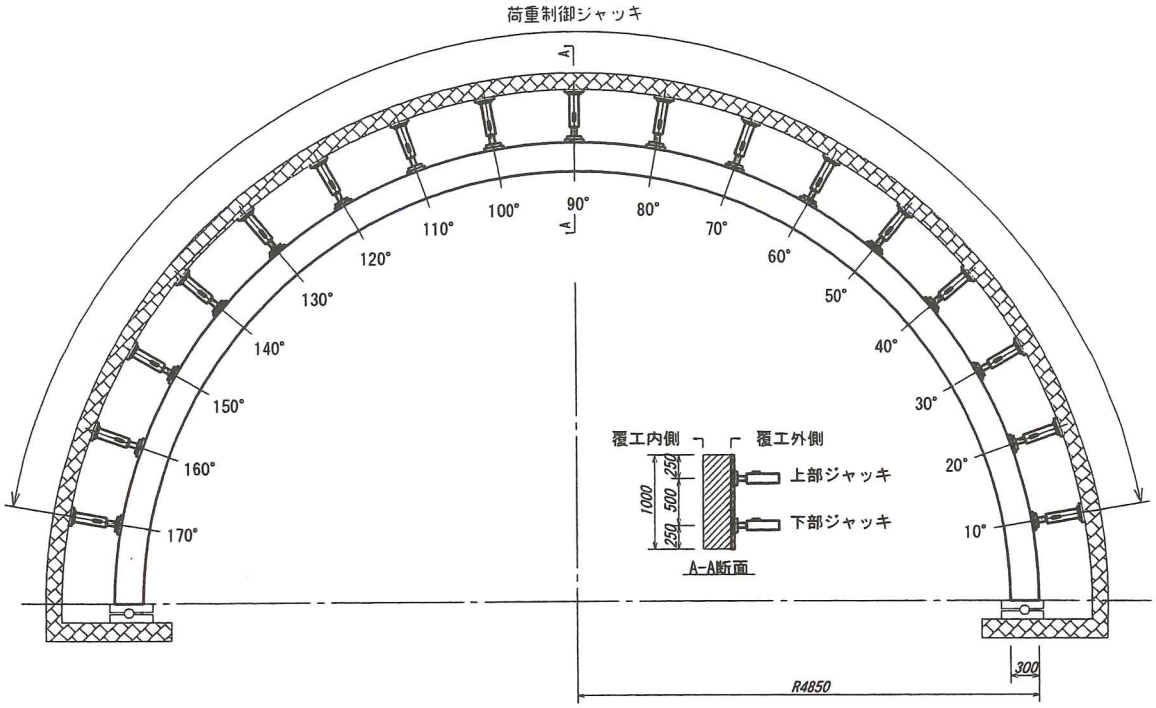
・ひずみは引張が+、圧縮がーである。



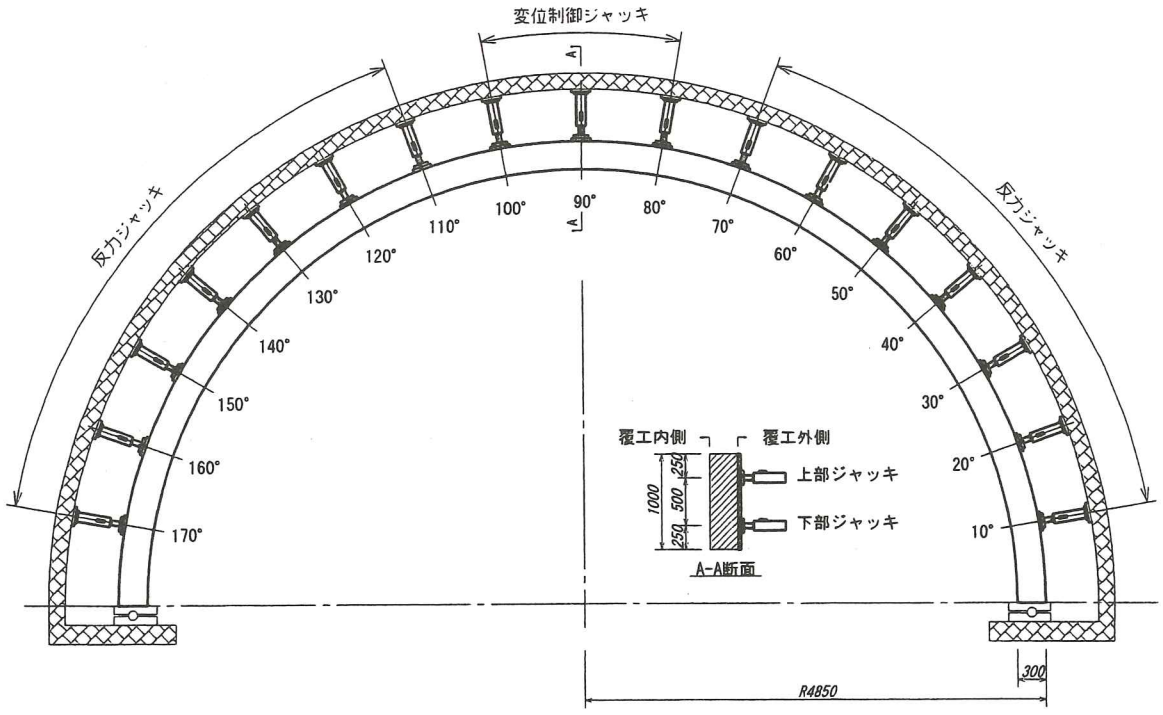

KA1-1：プレーン供試体概要図

注1) 80° 90° 100° の載荷点は1MNジャッキを、反力部は50tfジャッキを用いた。

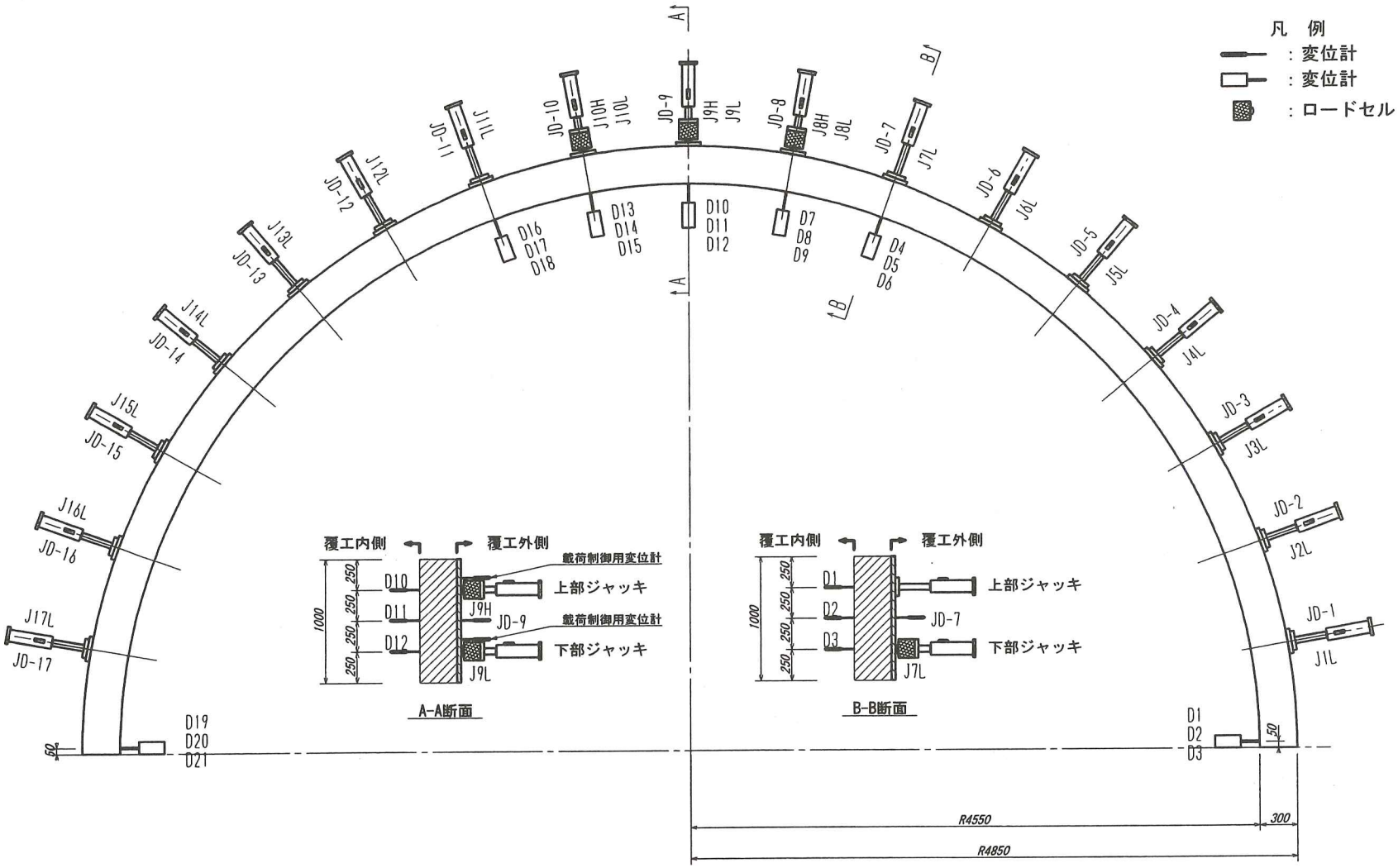
注2) 荷重制御時においては80° 90° 100° のジャッキは減圧装置を用いて圧力を調整した。




KA1-1：初期荷重20kN導入時の載荷ジャッキ配置図




KA1-1：変位制御載荷時の載荷ジャッキ配置図

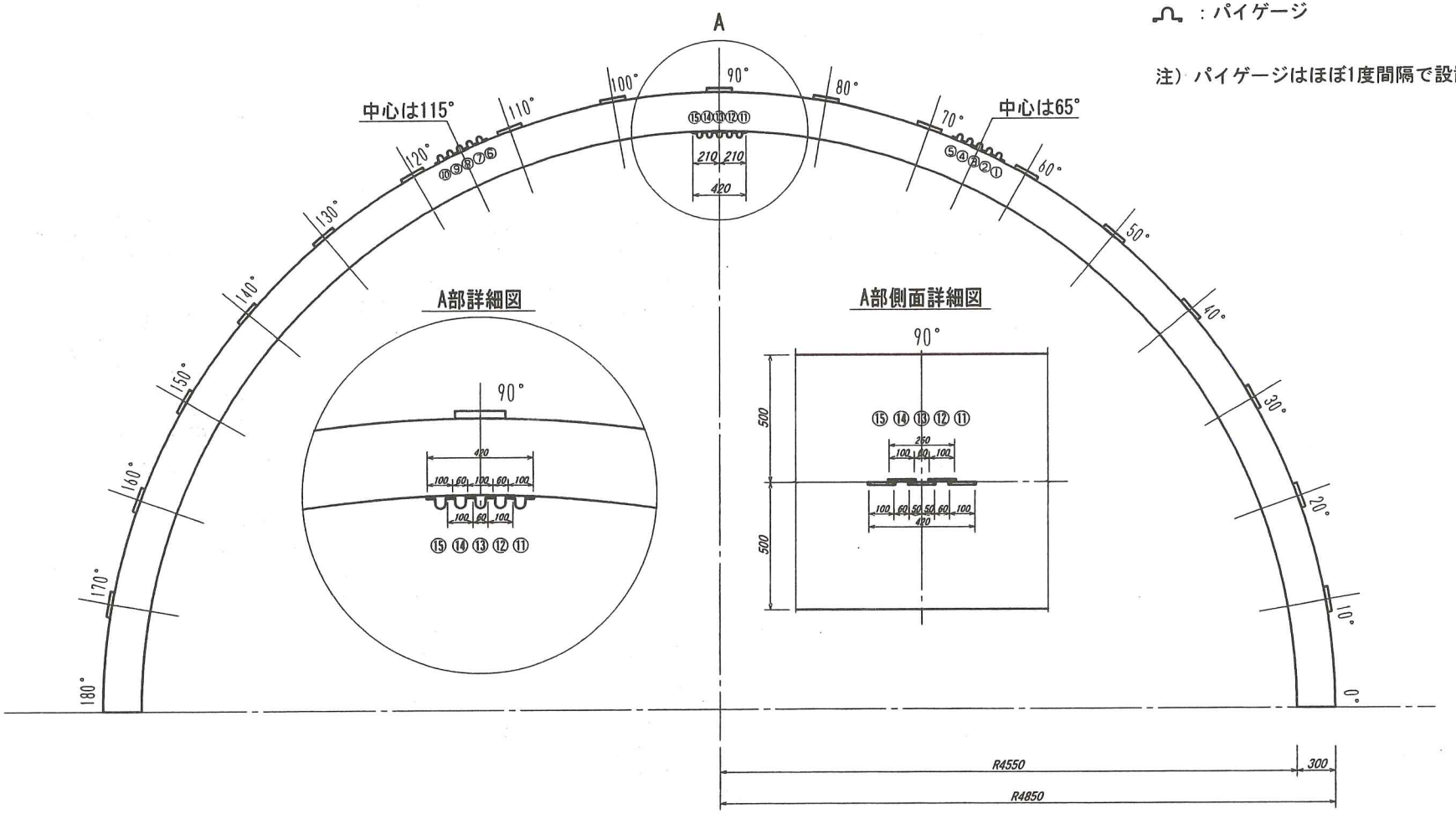



KA1-1：荷重計・変位計設置位置図

凡　例

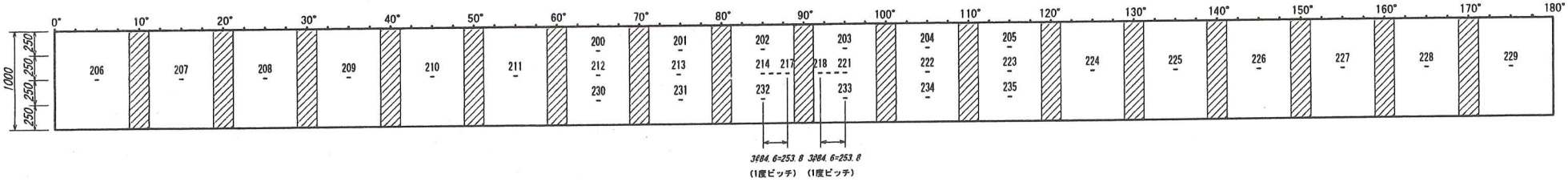
：パイゲージ

注）パイゲージはほぼ1度間隔で設置

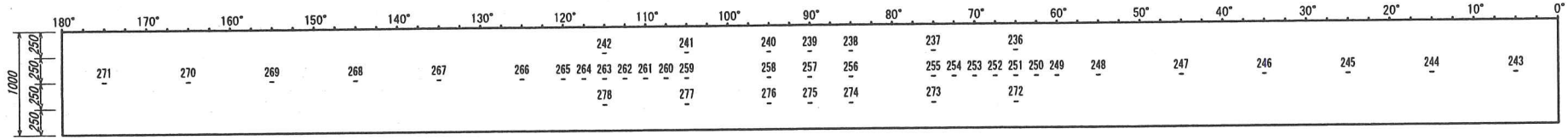



KA1-1：パイ型変位計設置位置図

覆工外面




覆工内面




KA1-1：内外面ひずみ計測位置図

# KA1-1 載荷形式Ⅰ 損傷載荷計測位置

**載荷制御位置**

| 載荷ジャッキ(変位制御) | 位置 | 100 | 90 | 80 |
|---|---|---|---|---|
| ・変位制御用変位計 | 上 | ○ | ○ | ○ |
| | 下 | ○ | ○ | ○ |

(備考)制御用の変位計はジャッキストローク変位計とは別途計測。

**計測位置**

| 1)荷重・反力 ・ロードセル | 位置 | 100 | 90 | 80 | 70 | 60 | 50 | 40 | 30 | 20 | 10 | 0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 上 | □ | □ | □ | | | | | | | | |
| | 下 | □ | □ | □ | □ | □ | □ | □ | □ | □ | □ | |
| ・荷重計 | 小計 | 2 | 2 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |
| 2)ジャッキストローク ・変位計 | 中 | □ | □ | □ | □ | □ | □ | □ | □ | □ | □ | |
| ・変位計 | 小計 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | |

| 3)覆工変位(内側) | 位置 | 100 | 90 | 80 | 70 | 0 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ・半径方向変位 | 75 | □ | □ | □ | □ | □ |
| | 50 | □ | □ | □ | □ | □ |
| | 25 | □ | □ | □ | □ | □ |
| ・変位計 | 小計 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |

4)ひずみゲージ他
(凡例)
■(円周方向)。
π:πゲージ(ひび割れ幅測定)。

・πゲージはひび割れ発生が予想される範囲に等間隔に5個ずつ取り付ける。

| 壇面 | 位置 | 120 | 115 | 112.5 | 90 | 85 | 82.5 | 70 | 67.5 | 65 | 62.5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (外面)t=30cm | | | | | | | | | | | |
| 外側 | 30 | π | π | π | | | | | π | π | π |
| | 25 | | | | | | | | | | |
| | 20 | | | | | | | | | | |
| | 15 | | | | | | | | | | |
| | 10 | | | | | | | | | | |
| | 5 | | | | π | π | π | | | | |
| 内側 | 0 | | | | | | | | | | |
| (内面)t=0cm | | | | | | | | | | | |
| ・ひずみゲージ | 小計 | | | | | | | | | | |
| ・πゲージ | 小計 | | 5 | | | 5 | | | | 5 | |

| 外面 (覆工外側/ジャッキ側) | 位置 | 100 | 95 | 90 | 85 | 82.5 | 80 | 77.5 | 75 | 72.5 | 70 | 67.5 | 65 | 62.5 | 60 | 57.5 | 55 | 52.5 | 50 | 47.5 | 45 | 42.5 | 40 | 37.5 | 35 | 32.5 | 30 | 27.5 | 25 | 22.5 | 20 | 17.5 | 15 | 12.5 | 10 | 7.5 | 5 | 2.5 | 0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 距離 | 9942 | 9442 | 8918 | 8401 | 8195 | 8008 | 7849 | 7644 | 7439 | 7114 | 6905 | 6691 | 6493 | 6137 | 5925 | 5757 | 5558 | 5360 | 5162 | 4963 | 4763 | 4565 | 4365 | 4165 | 3971 | 3772 | 3574 | 3375 | 3176 | 2978 | 2779 | 2581 | 2382 | 2184 | 1985 | 1787 | 1588 | 1390 | 1191 | 993 | 794 | 596 | 397 | 199 | 0 |
| | 75 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | 50 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | 25 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| ・ひずみゲージ | 小計 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 |

| 内面 (覆工内側) | 位置 | 100 | 95 | 90 | 85 | 82.5 | 80 | 77.5 | 75 | 72.5 | 70 | 67.5 | 65 | 62.5 | 60 | 57.5 | 55 | 52.5 | 50 | 47.5 | 45 | 42.5 | 40 | 37.5 | 35 | 32.5 | 30 | 27.5 | 25 | 22.5 | 20 | 17.5 | 15 | 12.5 | 10 | 7.5 | 5 | 2.5 | 0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 距離 | 7941 | 7343 | 7044 | 6948 | 6750 | 6555 | 6353 | 6154 | 5958 | 5757 | 5559 | 5362 | 5163 | 4963 | 4765 | 4565 | 4365 | 4165 | 3971 | 3772 | 3574 | 3375 | 3176 | 2978 | 2779 | 2581 | 2382 | 2184 | 1985 | 1787 | 1588 | 1390 | 1191 | 993 | 794 | 596 | 397 | 199 | 0 |
| | 75 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | 50 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| | 25 | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| ・ひずみゲージ | 小計 | 3 | 3 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 | 1 | 3 | 1 | 1 |

| 合計 | 158 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 6 制御荷重 | 6 制御変位 | 79 ひずみ | | |
| | | 14 反力荷重 | 38 変位 | 15 他 | | |
| | | 20 小計 | 44 小計 | 94 小計 | | |

# 載荷実験進行表

## 載荷形式Ⅰ　KA1-1：プレーン供試体の損傷載荷

| Step | 載荷点の荷重と変位 | | | | | | | | | | | | 載荷点ジャッキ（6本） | | 制御変位 | | 計測時刻 | 備　考 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 80度 | | | | 90度 | | | | 100度 | | | | | | | | | |
| | 荷重 | | | 変位 | 荷重 | | | 変位 | 荷重 | | | 変位 | 合計荷重 | 平均荷重 | 90度 | 80度<br>100度 | | A載荷：80度、90度、100度を変位制御で載荷 |
| | J8H<br>(kN) | J8L<br>(kN) | 合計<br>(kN) | JD8<br>(mm) | J9H<br>(kN) | J9L<br>(kN) | 合計<br>(kN) | JD9<br>(mm) | J10H<br>(kN) | J10L<br>(kN) | 合計<br>(kN) | JD10<br>(mm) | (kN) | (kN) | (mm) | (mm) | | |
| 1 | 0.0 | 0.4 | 0.4 | 0.00 | 0.0 | −0.4 | −0.4 | 0.00 | 0.8 | −0.4 | 0.4 | 0.02 | 0.4 | 0.1 | | | 9:15:09 | 全点イニシャル計測 |
| 2 | 5.6 | 7.6 | 13.2 | −0.02 | 6.0 | 7.6 | 13.6 | 0.04 | 7.6 | 5.6 | 13.2 | −0.02 | 40.0 | 6.7 | | | 10:01:02 | ﾊﾞﾙﾌﾞ全開。荷重制御で加圧。概ね5kNピッチで載荷。JD1～JD17イニシャル計測。 |
| 3 | 7.6 | 8.8 | 16.4 | 0.40 | 10.3 | 9.2 | 19.5 | 0.40 | 10.1 | 7.5 | 17.6 | 0.38 | 53.5 | 8.9 | | | 10:03:32 | |
| 4 | 16.9 | 18.0 | 34.9 | 1.72 | 17.9 | 17.6 | 35.5 | 1.70 | 18.1 | 15.9 | 34.0 | 1.60 | 104.4 | 17.4 | | | 10:06:19 | |
| 5 | 17.7 | 20.0 | 37.7 | 1.94 | 18.7 | 20.4 | 39.1 | 1.94 | 19.7 | 17.9 | 37.6 | 1.84 | 114.4 | 19.1 | | | 10:08:40 | |
| 6 | 22.1 | 22.8 | 44.9 | 1.96 | 21.9 | 23.2 | 45.1 | 2.00 | 22.5 | 20.6 | 43.1 | 1.92 | 133.1 | 22.2 | | | 10:12:13 | 20kN計測終了後に反力ジャッキのﾊﾞﾙﾌﾞを閉じる。 |
| 7 | 18.1 | 23.2 | 41.3 | 1.98 | 24.3 | 21.6 | 45.9 | 2.02 | 21.7 | 22.6 | 44.3 | 2.00 | 131.5 | 21.9 | 0.00 | 0.00 | 10:34:22 | 制御用変位計のゼロバランスをとり、変位制御に切り替える。 |
| 8 | 34.2 | 8.8 | 43.0 | 1.80 | 23.9 | 23.2 | 47.1 | 1.86 | 26.9 | 9.1 | 36.0 | 1.84 | 126.1 | 21.0 | 0.40 | 0.25 | 12:02:56 | 載荷開始。載荷速度は90度が毎分1.0㎜、80度と100度が毎分0.6㎜。 |
| 9 | 40.2 | 12.0 | 52.2 | 2.08 | 32.6 | 36.0 | 68.6 | 2.22 | 31.8 | 12.3 | 44.1 | 2.12 | 164.9 | 27.5 | 0.80 | 0.50 | 12:05:25 | |
| 10 | 46.6 | 12.8 | 59.4 | 2.38 | 41.0 | 50.4 | 91.4 | 2.58 | 35.8 | 12.7 | 48.5 | 2.32 | 199.3 | 33.2 | 1.20 | 0.75 | 12:07:36 | |
| 11 | 51.5 | 13.6 | 65.1 | 2.68 | 49.4 | 62.0 | 111.4 | 3.04 | 39.4 | 15.1 | 54.5 | 2.64 | 231.0 | 38.5 | 1.60 | 1.00 | 12:08:40 | |
| 12 | 55.5 | 17.6 | 73.1 | 3.00 | 57.3 | 58.8 | 116.1 | 3.58 | 42.6 | 20.6 | 63.2 | 2.92 | 252.4 | 42.1 | 2.00 | 1.25 | 12:10:16 | 90度内面にひび割れ発生 |
| 13 | 57.5 | 20.0 | 77.5 | 3.20 | 57.3 | 68.0 | 125.3 | 3.88 | 44.6 | 23.0 | 67.6 | 3.12 | 270.4 | 45.1 | 2.40 | 1.50 | 12:15:13 | |
| 14 | 61.9 | 23.2 | 85.1 | 3.50 | 64.1 | 72.8 | 136.9 | 4.32 | 49.0 | 27.0 | 76.0 | 3.40 | 298.0 | 49.7 | 2.80 | 1.75 | 12:17:16 | |
| 15 | 64.3 | 26.4 | 90.7 | 3.76 | 73.2 | 79.2 | 152.4 | 4.82 | 51.1 | 30.2 | 81.3 | 3.64 | 324.4 | 54.1 | 3.20 | 2.00 | 12:19:44 | |
| 16 | 67.9 | 29.6 | 97.5 | 4.06 | 83.2 | 82.8 | 166.0 | 5.24 | 53.5 | 35.3 | 88.8 | 3.92 | 352.3 | 58.7 | 3.60 | 2.25 | 12:21:07 | |
| 17 | 70.8 | 32.8 | 103.6 | 4.32 | 94.3 | 86.8 | 181.1 | 5.70 | 56.3 | 40.1 | 96.4 | 4.24 | 381.1 | 63.5 | 4.00 | 2.50 | 12:22:32 | |
| 18 | 73.6 | 35.2 | 108.8 | 4.58 | 107.1 | 88.4 | 195.5 | 6.12 | 57.5 | 45.7 | 103.2 | 4.48 | 407.5 | 67.9 | 4.40 | 2.75 | 12:24:35 | |
| 19 | 78.4 | 37.2 | 115.6 | 4.88 | 115.8 | 94.8 | 210.6 | 6.56 | 59.1 | 49.6 | 108.7 | 4.78 | 434.9 | 72.5 | 4.80 | 3.00 | 12:26:50 | |
| 20 | 85.2 | 41.2 | 126.4 | 5.20 | 123.4 | 101.2 | 224.6 | 7.00 | 63.5 | 55.6 | 119.1 | 5.06 | 470.1 | 78.4 | 5.20 | 3.25 | 12:28:18 | |
| 21 | 88.4 | 43.6 | 132.0 | 5.44 | 129.7 | 107.6 | 237.3 | 7.36 | 65.9 | 59.9 | 125.8 | 5.32 | 495.1 | 82.5 | 5.60 | 3.50 | 12:30:15 | |
| 22 | 92.9 | 46.0 | 138.9 | 5.72 | 137.7 | 114.4 | 252.1 | 7.76 | 68.3 | 63.9 | 132.2 | 5.58 | 523.2 | 87.2 | 6.00 | 3.75 | 12:31:49 | |
| 23 | 94.5 | 48.8 | 143.3 | 5.98 | 150.8 | 116.0 | 266.8 | 8.24 | 69.1 | 69.9 | 139.0 | 5.88 | 549.1 | 91.5 | 6.40 | 4.00 | 12:33:59 | |
| 24 | 99.3 | 50.8 | 150.1 | 6.24 | 159.2 | 121.6 | 280.8 | 8.62 | 71.2 | 75.8 | 147.0 | 6.14 | 577.9 | 96.3 | 6.80 | 4.25 | 12:36:06 | 114度外面（PI7）にひび割れ発生 |
| 25 | 102.9 | 53.6 | 156.5 | 6.52 | 170.3 | 122.8 | 293.1 | 9.04 | 73.2 | 81.4 | 154.6 | 6.40 | 604.2 | 100.7 | 7.20 | 4.50 | 12:39:18 | 67度外面（PI5）にひび割れ発生 |
| 26 | 104.5 | 56.4 | 160.9 | 6.78 | 180.3 | 130.8 | 311.1 | 9.48 | 74.4 | 85.8 | 160.2 | 6.66 | 632.2 | 105.4 | 7.60 | 4.75 | 12:41:50 | |
| 27 | 107.7 | 60.8 | 168.5 | 7.02 | 182.3 | 139.2 | 321.5 | 9.88 | 77.2 | 89.7 | 166.9 | 6.92 | 656.9 | 109.5 | 8.00 | 5.00 | 12:44:45 | |
| 28 | 116.2 | 66.0 | 182.2 | 7.28 | 182.7 | 146.4 | 329.1 | 10.24 | 84.0 | 95.3 | 179.3 | 7.14 | 690.6 | 115.1 | 8.40 | 5.25 | 12:46:45 | |
| 29 | 120.2 | 68.8 | 189.0 | 7.50 | 186.3 | 153.6 | 339.9 | 10.64 | 87.2 | 99.3 | 186.5 | 7.42 | 715.4 | 119.2 | 8.80 | 5.50 | 12:49:11 | |
| 30 | 123.4 | 72.8 | 196.2 | 7.80 | 188.3 | 163.6 | 351.9 | 11.00 | 91.7 | 102.0 | 193.7 | 7.68 | 741.8 | 123.6 | 9.20 | 5.75 | 12:51:32 | |
| 31 | 126.6 | 74.4 | 201.0 | 7.98 | 191.4 | 176.4 | 367.8 | 11.38 | 94.1 | 104.8 | 198.9 | 7.94 | 767.7 | 128.0 | 9.60 | 6.00 | 12:53:58 | |
| 32 | 131.5 | 77.6 | 209.1 | 8.26 | 196.2 | 182.4 | 378.6 | 11.78 | 98.1 | 108.4 | 206.5 | 8.16 | 794.2 | 132.4 | 10.00 | 6.25 | 12:56:16 | これより、計測並びにひび割れ観察を90度が0.8㎜、80度と100度が0.5㎜ピッチで行う。 |
| 33 | 140.7 | 84.0 | 224.7 | 8.76 | 200.2 | 200.4 | 400.6 | 12.52 | 106.5 | 115.1 | 221.6 | 8.60 | 846.9 | 141.2 | 10.80 | 6.75 | 13:02:26 | |
| 34 | 146.3 | 88.8 | 235.1 | 9.24 | 211.3 | 216.0 | 427.3 | 13.32 | 112.6 | 121.1 | 233.7 | 9.10 | 896.1 | 149.4 | 11.60 | 7.25 | 13:05:45 | |
| 35 | 160.4 | 98.8 | 259.2 | 9.74 | 212.1 | 232.8 | 444.9 | 14.06 | 125.0 | 131.4 | 256.4 | 9.62 | 960.5 | 160.1 | 12.40 | 7.75 | 13:08:57 | |
| 36 | 168.8 | 106.0 | 274.8 | 10.20 | 217.7 | 247.2 | 464.9 | 14.82 | 133.5 | 136.2 | 269.7 | 10.10 | 1009.4 | 168.2 | 13.20 | 8.25 | 13:12:53 | |
| 37 | 174.9 | 110.8 | 285.7 | 10.68 | 224.9 | 265.2 | 490.1 | 15.60 | 140.7 | 142.1 | 282.8 | 10.56 | 1058.6 | 176.4 | 14.00 | 8.75 | 13:16:58 | |

## 載荷実験進行表

## 載荷形式Ⅰ　KA1-1:プレーン供試体の損傷載荷

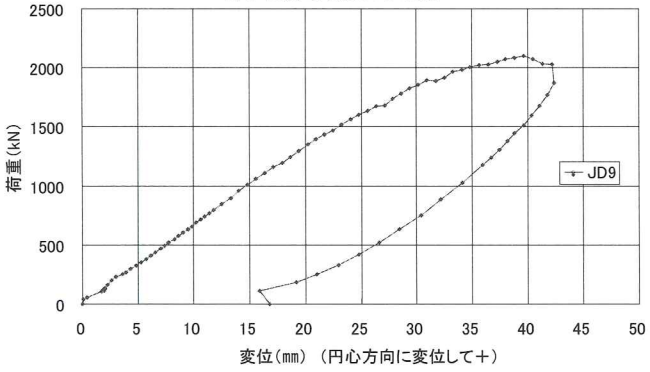
| Step | 載荷点の荷重と変位 | | | | | | | | | | | | 載荷点ジャッキ（6本） | | 制御変位 | | 計測時刻 | 備　考 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 80度 | | | | 90度 | | | | 100度 | | | | | | | | | A載荷:80度、90度、100度を変位制御で載荷 |
| | 荷重 | | | 変位 | 荷重 | | | 変位 | 荷重 | | | 変位 | | | | | | |
| | J8H (kN) | J8L (kN) | 合計 (kN) | JD8 (mm) | J9H (kN) | J9L (kN) | 合計 (kN) | JD9 (mm) | J10H (kN) | J10L (kN) | 合計 (kN) | JD10 (mm) | 合計荷重 (kN) | 平均荷重 (kN) | 90度 (mm) | 80度 100度 (mm) | | |
| 38 | 184.5 | 117.2 | 301.7 | 11.18 | 226.9 | 282.4 | 509.3 | 16.34 | 149.1 | 149.7 | 298.8 | 11.02 | 1109.8 | 185.0 | 14.80 | 9.25 | 13:20:09 | |
| 39 | 193.8 | 125.6 | 319.4 | 11.68 | 235.6 | 291.2 | 526.8 | 17.14 | 158.0 | 157.2 | 315.2 | 11.54 | 1161.4 | 193.6 | 15.60 | 9.75 | 13:25:57 | |
| 40 | 203.4 | 130.0 | 333.4 | 12.18 | 235.6 | 302.8 | 538.4 | 17.92 | 163.6 | 159.6 | 323.2 | 12.14 | 1195.0 | 199.2 | 16.40 | 10.25 | 13:28:58 | |
| 41 | 207.4 | 137.2 | 344.6 | 12.70 | 247.2 | 312.0 | 559.2 | 18.66 | 171.3 | 167.9 | 339.2 | 12.56 | 1243.0 | 207.2 | 17.20 | 10.75 | 13:35:10 | |
| 42 | 215.9 | 141.2 | 357.1 | 13.14 | 250.3 | 334.4 | 584.7 | 19.44 | 179.7 | 173.5 | 353.2 | 13.02 | 1295.0 | 215.8 | 18.00 | 11.25 | 13:39:33 | |
| 43 | 227.9 | 151.6 | 379.5 | 13.66 | 253.9 | 343.2 | 597.1 | 20.22 | 192.6 | 181.0 | 373.6 | 13.46 | 1350.2 | 225.0 | 18.80 | 11.75 | 13:43:11 | |
| 44 | 234.4 | 159.6 | 394.0 | 14.14 | 263.9 | 349.6 | 613.5 | 20.96 | 200.2 | 187.0 | 387.2 | 13.96 | 1394.7 | 232.5 | 19.60 | 12.25 | 13:46:51 | |
| 45 | 239.6 | 163.2 | 402.8 | 14.60 | 269.4 | 367.6 | 637.0 | 21.72 | 205.8 | 191.4 | 397.2 | 14.44 | 1437.0 | 239.5 | 20.40 | 12.75 | 13:50:58 | |
| 46 | 245.2 | 168.0 | 413.2 | 15.08 | 272.6 | 374.8 | 647.4 | 22.50 | 213.1 | 195.3 | 408.4 | 14.90 | 1469.0 | 244.8 | 21.20 | 13.25 | 13:57:47 | |
| 47 | 257.3 | 172.8 | 430.1 | 15.62 | 275.0 | 390.0 | 665.0 | 23.28 | 223.9 | 202.5 | 426.4 | 15.40 | 1521.5 | 253.6 | 22.00 | 13.75 | 14:01:17 | |
| 48 | 264.9 | 178.4 | 443.3 | 16.06 | 279.4 | 403.2 | 682.6 | 24.06 | 231.6 | 206.8 | 438.4 | 15.86 | 1564.3 | 260.7 | 22.80 | 14.25 | 14:04:34 | 90度上面載荷板正面でコンクリートの圧壊が始まる。 |
| 49 | 270.1 | 184.8 | 454.9 | 16.54 | 286.2 | 409.6 | 695.8 | 24.82 | 239.2 | 212.8 | 452.0 | 16.32 | 1602.7 | 267.1 | 23.60 | 14.75 | 14:08:20 | |
| 50 | 276.2 | 187.6 | 463.8 | 17.00 | 287.4 | 427.2 | 714.6 | 25.60 | 245.2 | 214.4 | 459.6 | 16.84 | 1638.0 | 273.0 | 24.40 | 15.25 | 14:12:32 | 92度内面にひび割れ発生 |
| 51 | 286.2 | 197.6 | 483.8 | 17.54 | 293.7 | 420.8 | 714.5 | 26.36 | 254.5 | 223.9 | 478.4 | 17.34 | 1676.7 | 279.5 | 25.20 | 15.75 | 14:17:11 | 88度の外面コンクリートひずみが−3000μεを超える。計測終了後、D11とPI13を盛り替える。 |
| 52 | 285.8 | 197.2 | 483.0 | 18.02 | 291.3 | 426.4 | 717.7 | 27.16 | 256.5 | 222.3 | 478.8 | 17.80 | 1679.5 | 279.9 | 26.00 | 16.25 | 14:34:18 | |
| 53 | 296.3 | 204.0 | 500.3 | 18.48 | 294.5 | 446.0 | 740.5 | 27.86 | 269.3 | 225.5 | 494.8 | 18.26 | 1735.6 | 289.3 | 26.80 | 16.75 | 14:38:25 | |
| 54 | 305.5 | 210.4 | 515.9 | 18.96 | 302.1 | 455.6 | 757.7 | 28.62 | 279.0 | 232.6 | 511.6 | 18.74 | 1785.2 | 297.5 | 27.60 | 17.25 | 14:41:08 | |
| 55 | 315.6 | 216.4 | 532.0 | 19.44 | 302.1 | 464.4 | 766.5 | 29.42 | 288.6 | 239.0 | 527.6 | 19.24 | 1826.1 | 304.4 | 28.40 | 17.75 | 14:44:43 | 90度外面載荷板周りでコンクリートの圧壊が始まる。 |
| 56 | 320.4 | 223.2 | 543.6 | 19.92 | 306.1 | 468.0 | 774.1 | 30.18 | 294.7 | 245.3 | 540.0 | 19.72 | 1857.7 | 309.6 | 29.20 | 18.25 | 14:48:40 | |
| 57 | 329.6 | 227.2 | 556.8 | 20.40 | 308.5 | 477.2 | 785.7 | 30.94 | 301.9 | 248.9 | 550.8 | 20.18 | 1893.3 | 315.6 | 30.00 | 18.75 | 14:51:17 | 112.5度の内面コンクリートひずみが−3000μεを超える。外面のひび割れ観察はここまで。 |
| 58 | 327.6 | 228.0 | 555.6 | 20.86 | 310.4 | 473.6 | 784.0 | 31.78 | 299.1 | 251.3 | 550.4 | 20.66 | 1890.0 | 315.0 | 30.80 | 19.25 | 14:59:58 | |
| 59 | 334.1 | 232.4 | 566.5 | 21.36 | 309.2 | 483.2 | 792.4 | 32.52 | 307.5 | 252.1 | 559.6 | 21.12 | 1918.5 | 319.8 | 31.60 | 19.75 | 15:06:57 | |
| 60 | 344.1 | 240.0 | 584.1 | 21.88 | 312.4 | 492.8 | 805.2 | 33.32 | 318.4 | 258.4 | 576.8 | 21.64 | 1966.1 | 327.7 | 32.40 | 20.25 | 15:10:43 | 115度内面でコンクリートの圧壊が始まる。 |
| 61 | 346.5 | 244.0 | 590.5 | 22.34 | 316.8 | 492.4 | 809.2 | 34.10 | 322.4 | 261.2 | 583.6 | 22.14 | 1983.3 | 330.6 | 33.20 | 20.75 | 15:15:49 | |
| 62 | 353.0 | 248.4 | 601.4 | 22.86 | 316.0 | 497.6 | 813.6 | 34.84 | 329.2 | 264.0 | 593.2 | 22.60 | 2008.2 | 334.7 | 34.00 | 21.25 | 15:20:26 | |
| 63 | 353.0 | 251.2 | 604.2 | 23.32 | 320.0 | 499.2 | 819.2 | 35.66 | 330.4 | 269.6 | 600.0 | 23.08 | 2023.4 | 337.2 | 34.80 | 21.75 | 15:25:50 | 65度の内面コンクリートひずみが−3000μεを超える。同位置でコンクリートの圧壊が始まる。 |
| 64 | 356.6 | 257.2 | 613.8 | 23.82 | 316.4 | 489.2 | 805.6 | 36.48 | 336.9 | 273.5 | 610.4 | 23.60 | 2029.8 | 338.3 | 35.60 | 22.25 | 15:35:01 | |
| 65 | 358.6 | 258.8 | 617.4 | 24.28 | 316.0 | 502.8 | 818.8 | 37.28 | 343.3 | 273.9 | 617.2 | 24.10 | 2053.4 | 342.2 | 36.40 | 22.75 | 15:41:11 | |
| 66 | 360.6 | 264.8 | 625.4 | 24.78 | 318.0 | 501.2 | 819.2 | 38.04 | 349.3 | 278.3 | 627.6 | 24.56 | 2072.2 | 345.4 | 37.20 | 23.25 | 15:46:32 | |
| 67 | 361.4 | 268.8 | 630.2 | 25.26 | 317.2 | 501.6 | 818.8 | 38.82 | 356.2 | 282.3 | 638.5 | 25.02 | 2087.5 | 347.9 | 38.00 | 23.75 | 15:50:58 | |
| 68 | 359.0 | 275.2 | 634.2 | 25.76 | 321.6 | 493.6 | 815.2 | 39.68 | 363.0 | 287.8 | 650.8 | 25.54 | 2100.2 | 350.0 | 38.80 | 24.25 | 15:54:36 | 載荷点ジャッキ6本の荷重計の合計が最大値を示す。86度から82度にかけて内面に周方向のひび割れ発生。 |
| 69 | 340.1 | 281.2 | 621.3 | 26.28 | 316.4 | 482.4 | 798.8 | 40.50 | 364.6 | 291.4 | 656.0 | 26.04 | 2076.1 | 346.0 | 39.60 | 24.75 | 15:58:54 | |
| 70 | 316.8 | 284.8 | 601.6 | 26.74 | 307.7 | 466.0 | 773.7 | 41.36 | 361.8 | 298.1 | 659.9 | 26.52 | 2035.2 | 339.2 | 40.40 | 25.25 | 16:04:39 | |
| 71 | 307.1 | 289.2 | 596.3 | 27.22 | 306.5 | 460.4 | 766.9 | 42.20 | 365.8 | 302.1 | 667.9 | 27.02 | 2031.1 | 338.5 | 41.20 | 25.75 | 16:08:27 | |
| 72 | 279.0 | 278.4 | 557.4 | 27.24 | 288.5 | 382.4 | 670.9 | 42.36 | 343.3 | 299.3 | 642.6 | 27.08 | 1870.9 | 311.8 | 41.20 | 25.75 | 16:21:12 | 載荷終了。 |

## 載荷実験進行表

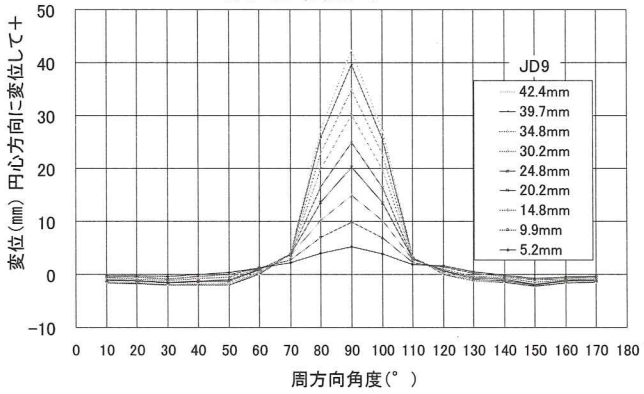
## 載荷形式Ⅰ　KA1-1:プレーン供試体の損傷載荷

| Step | 載荷点の荷重と変位 | | | | | | | | | | | | 載荷点ジャッキ（6本） | | 制御変位 | | 計測時刻 | 備　考 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 80度 | | | | 90度 | | | | 100度 | | | | | | | | | |
| | 荷重 | | | 変位 | 荷重 | | | 変位 | 荷重 | | | 変位 | | | | | | A載荷:80度、90度、100度を変位制御で載荷 |
| | J8H | J8L | 合計 | JD8 | J9H | J9L | 合計 | JD9 | J10H | J10L | 合計 | JD10 | 合計荷重 | 平均荷重 | 90度 | 80度<br>100度 | | |
| | (kN) | (kN) | (kN) | (mm) | (kN) | (kN) | (kN) | (mm) | (kN) | (kN) | (kN) | (mm) | (kN) | (kN) | (mm) | (mm) | | |
| 73 | 266.9 | 276.8 | 543.7 | 26.86 | 282.2 | 316.4 | 598.6 | 41.80 | 324.8 | 306.5 | 631.3 | 26.70 | 1773.6 | 295.6 | 40.40 | 25.25 | 16:26:15 | これより除荷。除荷速度は90度が毎分2.0mm、80度と100度が毎分1.3mm。 |
| 74 | 252.5 | 266.0 | 518.5 | 26.36 | 276.2 | 276.8 | 553.0 | 41.08 | 307.1 | 298.9 | 606.0 | 26.26 | 1677.5 | 279.6 | 39.60 | 24.75 | 16:34:19 | |
| 75 | 240.4 | 258.8 | 499.2 | 25.90 | 270.2 | 243.6 | 513.8 | 40.38 | 292.3 | 292.2 | 584.5 | 25.82 | 1597.5 | 266.3 | 38.80 | 24.25 | 16:35:33 | |
| 76 | 227.1 | 252.0 | 479.1 | 25.38 | 264.7 | 210.4 | 475.1 | 39.68 | 275.4 | 286.6 | 562.0 | 25.32 | 1516.2 | 252.7 | 38.00 | 23.75 | 16:36:26 | |
| 77 | 219.9 | 242.0 | 461.9 | 24.86 | 242.0 | 201.2 | 443.2 | 38.86 | 265.3 | 275.1 | 540.4 | 24.88 | 1445.5 | 240.9 | 37.20 | 23.25 | 16:38:02 | |
| 78 | 209.4 | 240.8 | 450.2 | 24.40 | 243.6 | 157.2 | 400.8 | 38.18 | 252.9 | 275.9 | 528.8 | 24.46 | 1379.8 | 230.0 | 36.40 | 22.75 | 16:39:22 | |
| 79 | 198.6 | 233.6 | 432.2 | 23.94 | 234.4 | 137.6 | 372.0 | 37.48 | 237.2 | 267.2 | 504.4 | 23.98 | 1308.6 | 218.1 | 35.60 | 22.25 | 16:40:20 | |
| 80 | 185.3 | 224.8 | 410.1 | 23.40 | 229.6 | 120.0 | 349.6 | 36.72 | 220.7 | 258.1 | 478.8 | 23.48 | 1238.5 | 206.4 | 34.80 | 21.75 | 16:41:24 | |
| 81 | 178.5 | 219.6 | 398.1 | 22.90 | 216.1 | 97.6 | 313.7 | 35.96 | 213.5 | 250.5 | 464.0 | 23.00 | 1175.8 | 196.0 | 34.00 | 21.25 | 16:42:21 | |
| 82 | 158.0 | 201.6 | 359.6 | 21.66 | 196.2 | 50.8 | 247.0 | 34.12 | 186.9 | 233.4 | 420.3 | 21.82 | 1026.9 | 171.2 | 32.00 | 20.00 | 16:43:59 | |
| 83 | 137.9 | 180.4 | 318.3 | 20.46 | 173.5 | 20.8 | 194.3 | 32.20 | 160.0 | 211.2 | 371.2 | 20.66 | 883.8 | 147.3 | 30.00 | 18.75 | 16:45:35 | |
| 84 | 115.8 | 157.6 | 273.4 | 19.20 | 154.4 | 2.8 | 157.2 | 30.38 | 133.9 | 186.6 | 320.5 | 19.40 | 751.1 | 125.2 | 28.00 | 17.50 | 16:47:50 | |
| 85 | 96.9 | 135.2 | 232.1 | 18.06 | 129.4 | −2.0 | 127.4 | 28.48 | 112.6 | 162.4 | 275.0 | 18.28 | 634.5 | 105.8 | 26.00 | 16.25 | 16:49:24 | |
| 86 | 78.4 | 110.4 | 188.8 | 16.84 | 109.8 | −3.2 | 106.6 | 26.62 | 90.0 | 136.2 | 226.2 | 17.08 | 521.6 | 86.9 | 24.00 | 15.00 | 16:50:52 | |
| 87 | 62.3 | 88.0 | 150.3 | 15.70 | 90.7 | −2.8 | 87.9 | 24.78 | 70.8 | 113.5 | 184.3 | 15.94 | 422.5 | 70.4 | 22.00 | 13.75 | 16:52:22 | |
| 88 | 47.0 | 65.2 | 112.2 | 14.44 | 76.8 | −2.8 | 74.0 | 22.96 | 53.5 | 91.3 | 144.8 | 14.72 | 331.0 | 55.2 | 20.00 | 12.50 | 16:53:52 | |
| 89 | 34.2 | 43.6 | 77.8 | 13.24 | 65.3 | −2.8 | 62.5 | 21.04 | 39.0 | 70.7 | 109.7 | 13.50 | 250.0 | 41.7 | 18.00 | 11.25 | 16:55:26 | |
| 90 | 24.9 | 26.8 | 51.7 | 12.08 | 55.3 | −2.8 | 52.5 | 19.18 | 28.5 | 52.0 | 80.5 | 12.34 | 184.7 | 30.8 | 16.00 | 10.00 | 16:58:10 | |
| 91 | 20.5 | 18.8 | 39.3 | 10.32 | 24.3 | −2.4 | 21.9 | 15.88 | 27.7 | 20.6 | 48.3 | 10.42 | 109.5 | 18.3 | 14.00 | 8.75 | 17:02:12 | 荷重制御に切り替える。載荷点荷重を20kNに合わせた後に反力ジャッキのバルブを全て開く。 |
| 92 | −0.8 | −0.4 | −1.2 | 10.24 | 0.4 | −1.2 | −0.8 | 16.78 | 1.2 | −0.4 | 0.8 | 10.16 | −1.2 | −0.2 | | | 17:33:06 | 油圧を落としてポンプを停止する。実験終了。 |

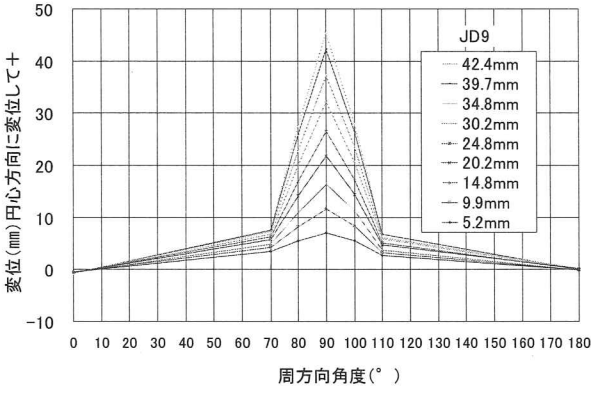
荷重－変位
KA1-1：覆工内側90° h=50cm



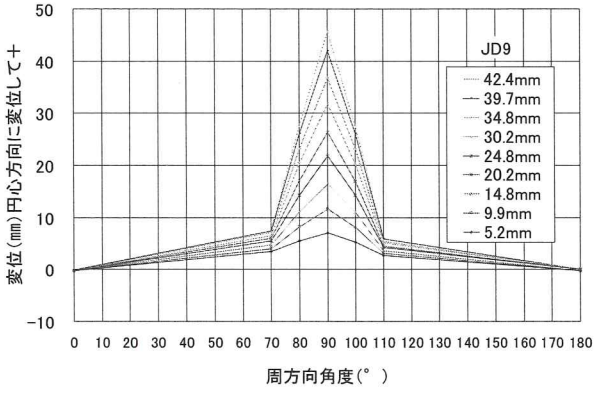

変位分布図
KA1-1：ｼﾞｬｯｷｽﾄﾛｰｸ



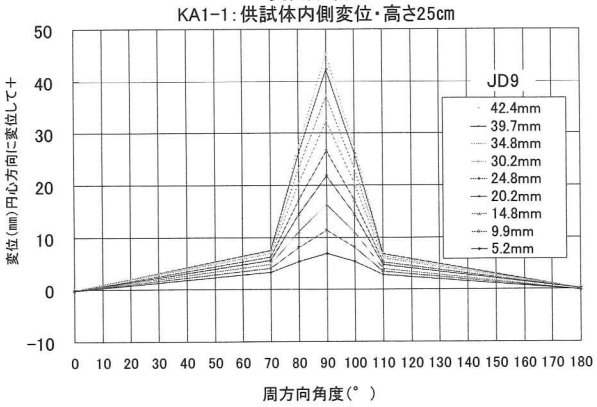

変位分布図
KA1-1：供試体内側変位・高さ75cm



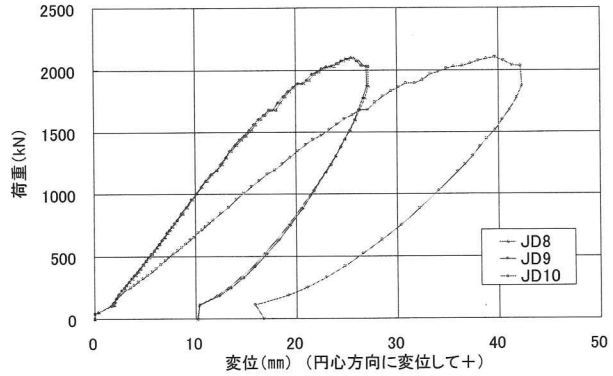

変位分布図
KA1-1：供試体内側変位・高さ50cm



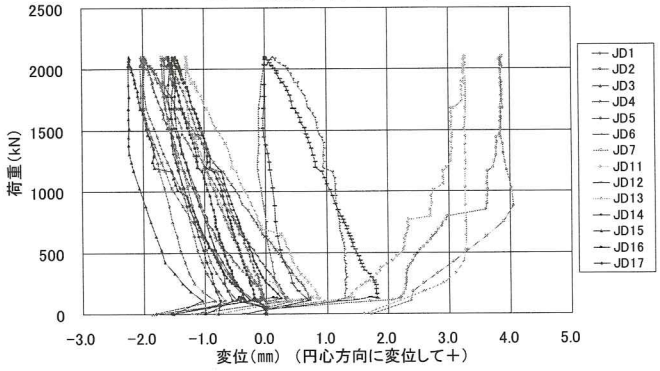
変位分布図
KA1-1：供試体内側変位・高さ25cm



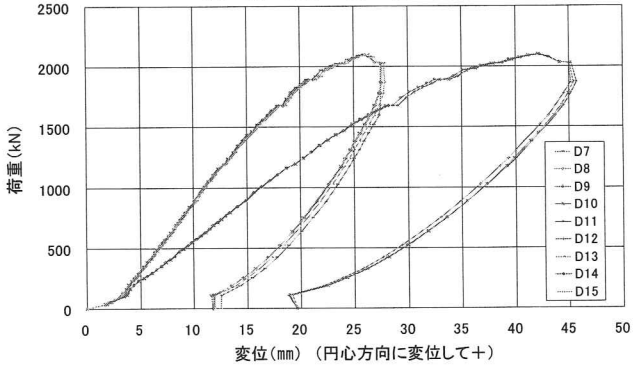

荷重－変位
KA1-1:載荷部ジャッキストローク

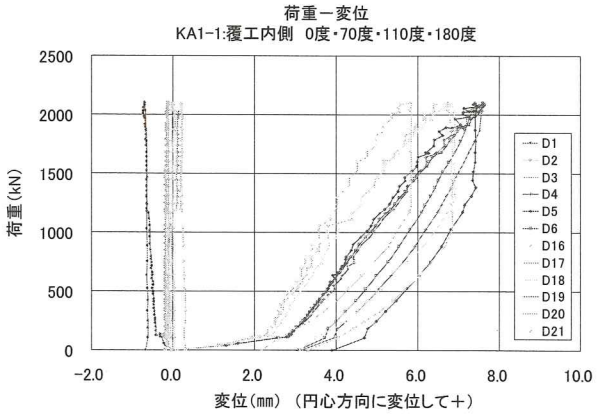


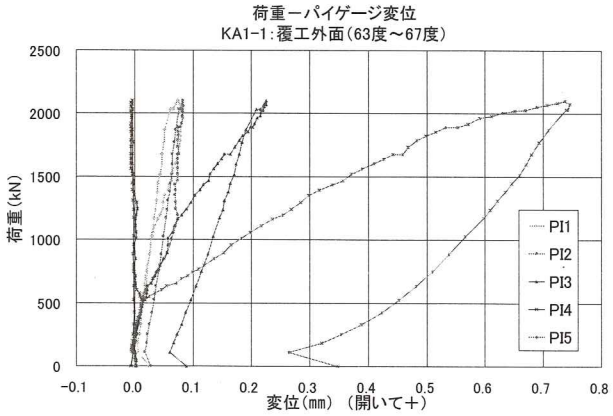

荷重－変位
KA1-1：反力部ジャッキストローク

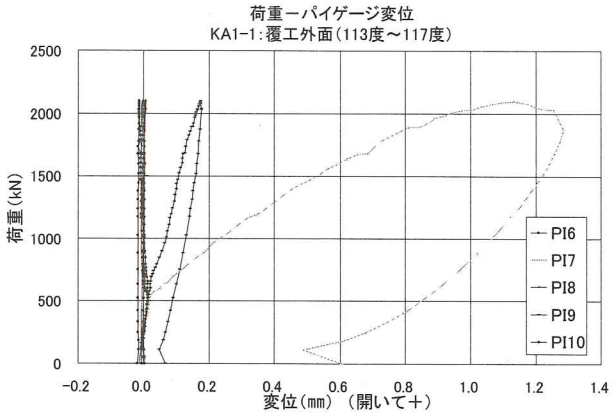


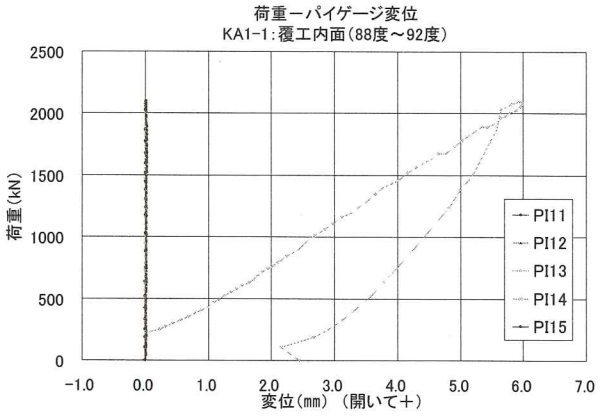

荷重－変位
KA1-1:覆工内側　80度・90度・100度

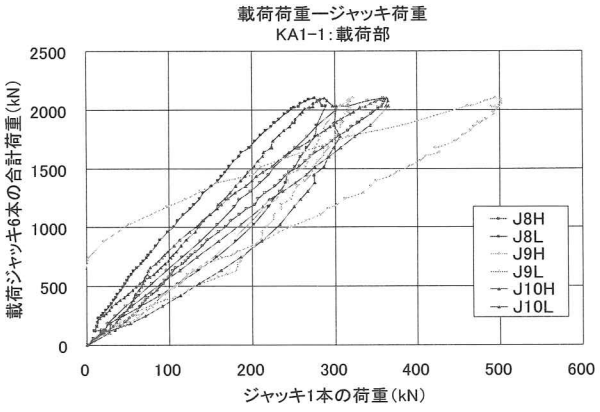


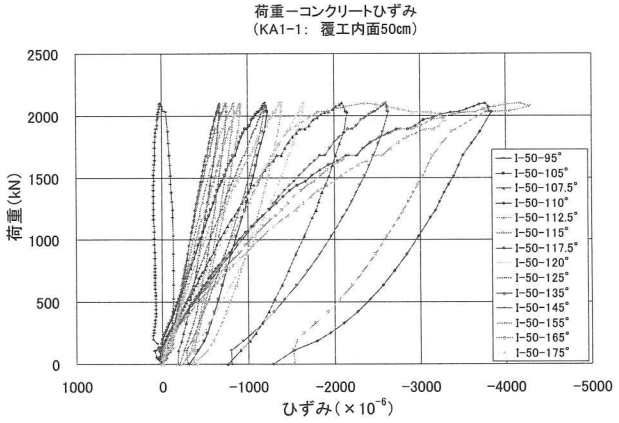

荷重－変位
KA1-1:覆工内側　0度・70度・110度・180度
荷重(kN)
2500
2000
1500
1000
500
0
-2.0
0.0
2.0
4.0
6.0
8.0
10.0
変位(mm)（円心方向に変位して＋）
D1
D2
D3
D4
D5
D6
D16
D17
D18
D19
D20
D21

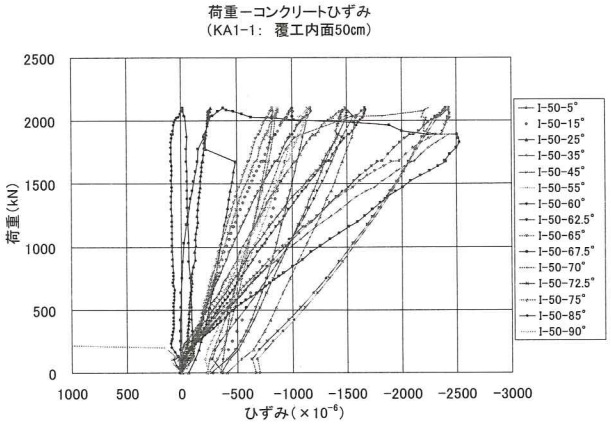

荷重－パイゲージ変位
KA1-1:覆工外面(63度～67度)
荷重(kN)
2500
2000
1500
1000
500
0
-0.1
0.0
0.1
0.2
0.3
0.4
0.5
0.6
0.7
0.8
変位(mm)（開いて＋）
PI1
PI2
PI3
PI4
PI5

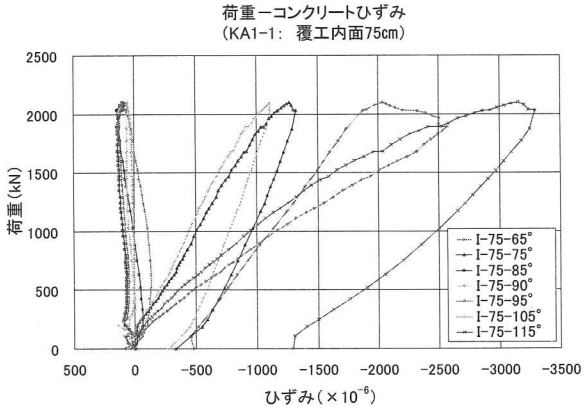

荷重－パイゲージ変位
KA1-1:覆工外面(113度～117度)
荷重(kN)
2500
2000
1500
1000
500
0
-0.2
0.0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
1.2
1.4
変位(mm)（開いて＋）
PI6
PI7
PI8
PI9
PI10


荷重－パイゲージ変位
KA1-1:覆工内面(88度～92度)
荷重(kN)
2500
2000
1500
1000
500
0
-1.0
0.0
1.0
2.0
3.0
4.0
5.0
6.0
7.0
変位(mm)（開いて＋）
PI11
PI12
PI13
PI14
PI15

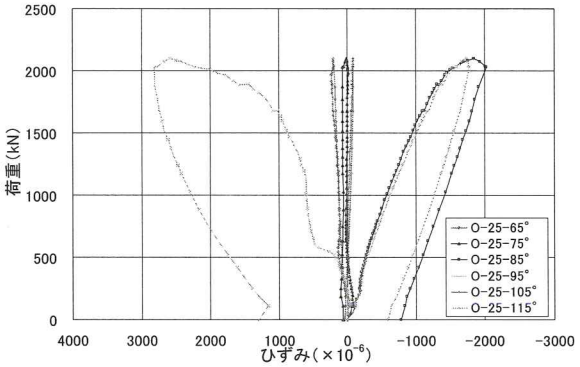

載荷荷重ージャッキ荷重
KA1-1：載荷部
載荷ジャッキ6本の合計荷重(kN)
2500
2000
1500
1000
500
0
0
100
200
300
400
500
600
ジャッキ1本の荷重(kN)
J8H
J8L
J9H
J9L
J10H
J10L


荷重ーコンクリートひずみ
(KA1-1： 覆工内面50cm)
荷重(kN)
2500
2000
1500
1000
500
0
1000
0
-1000
-2000
-3000
-4000
-5000
ひずみ(×10⁻⁶)
I-50-95°
I-50-105°
I-50-107.5°
I-50-110°
I-50-112.5°
I-50-115°
I-50-117.5°
I-50-120°
I-50-125°
I-50-135°
I-50-145°
I-50-155°
I-50-165°
I-50-175°

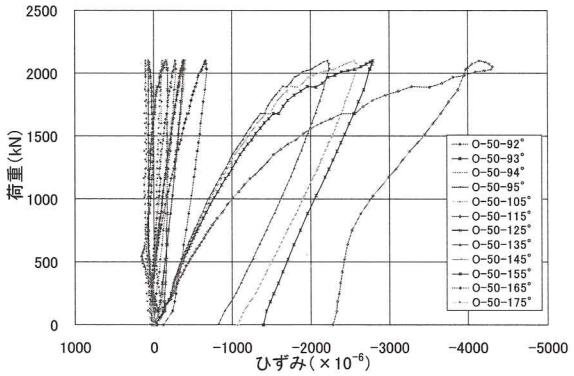

荷重ーコンクリートひずみ
(KA1-1： 覆工内面50cm)
荷重(kN)
2500
2000
1500
1000
500
0
1000
500
0
-500
-1000
-1500
-2000
-2500
-3000
ひずみ(×10⁻⁶)
I-50-5°
I-50-15°
I-50-25°
I-50-35°
I-50-45°
I-50-55°
I-50-60°
I-50-62.5°
I-50-65°
I-50-67.5°
I-50-70°
I-50-72.5°
I-50-75°
I-50-85°
I-50-90°


荷重ーコンクリートひずみ
(KA1-1： 覆工内面75cm)
荷重(kN)
2500
2000
1500
1000
500
0
500
0
-500
-1000
-1500
-2000
-2500
-3000
-3500
ひずみ(×10⁻⁶)
I-75-65°
I-75-75°
I-75-85°
I-75-90°
I-75-95°
I-75-105°
I-75-115°

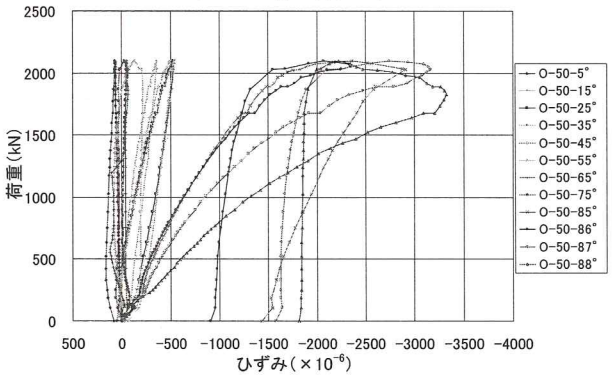
荷重ーコンクリートひずみ
（KA1-1： 覆工外面25cm）



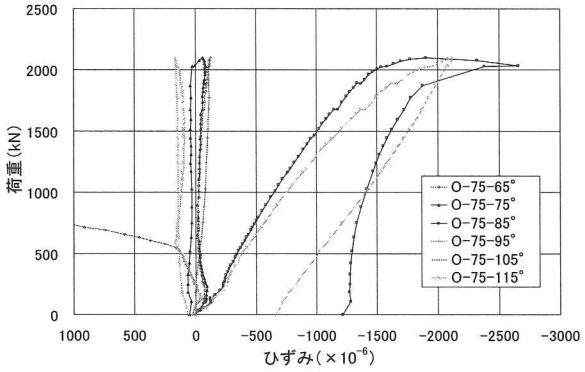

荷重ーコンクリートひずみ
（KA1-1： 覆工外面50cm）



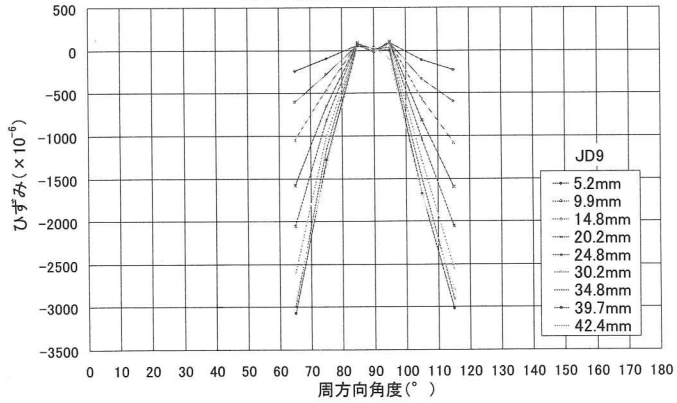

荷重ーコンクリートひずみ
（KA1-1： 覆工外面50cm）



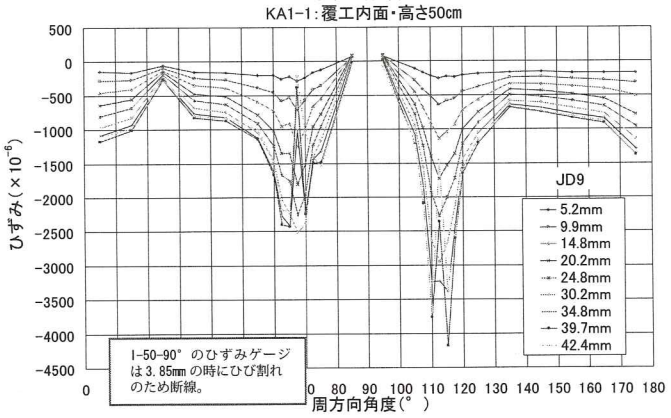

荷重ーコンクリートひずみ
（KA1-1： 覆工外面75cm）



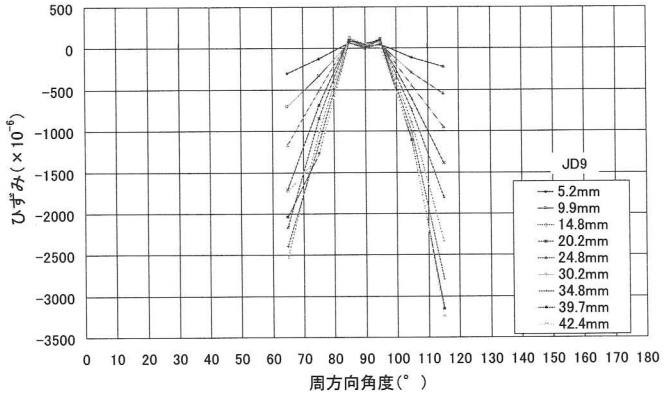
ひずみ分布図
KA1-1：覆工内面・高さ25cm



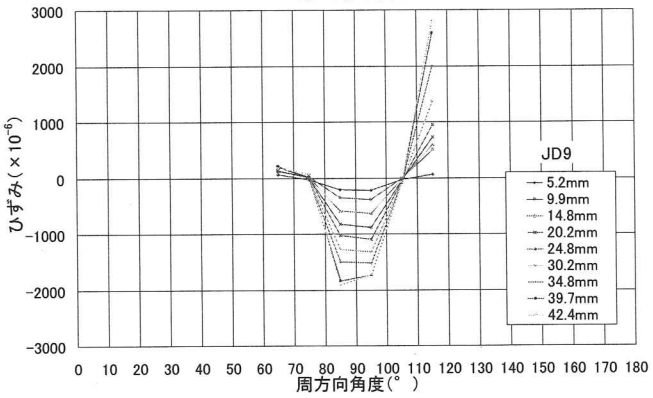

ひずみ分布図
KA1-1：覆工内面・高さ50cm



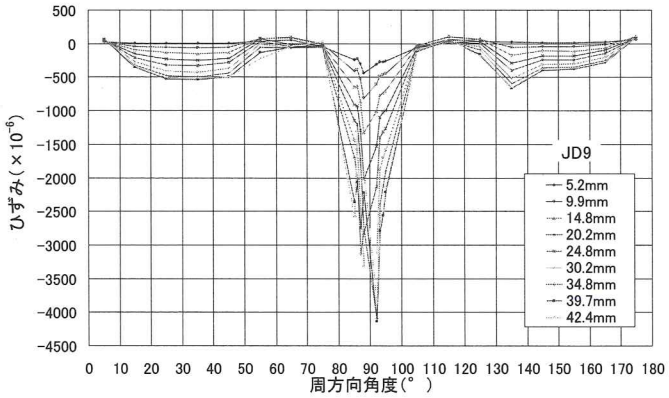

ひずみ分布図
KA1-1：覆工内面・高さ75cm



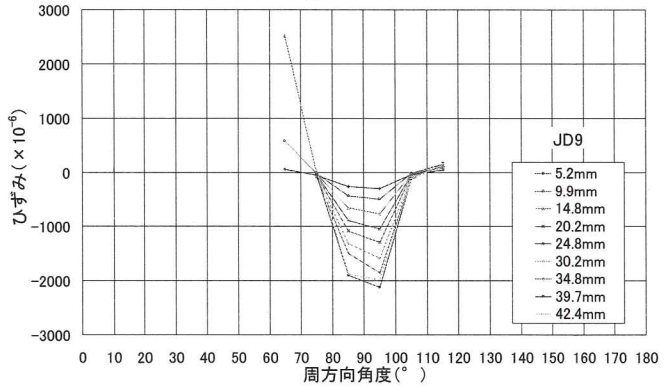

ひずみ分布図
KA1-1：覆工外面・高さ25cm



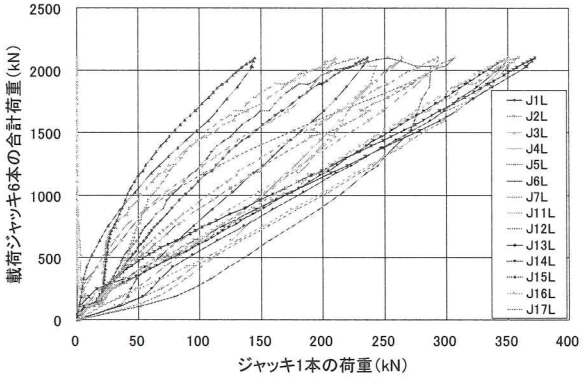
ひずみ分布図
KA1-1：覆工外面・高さ50cm



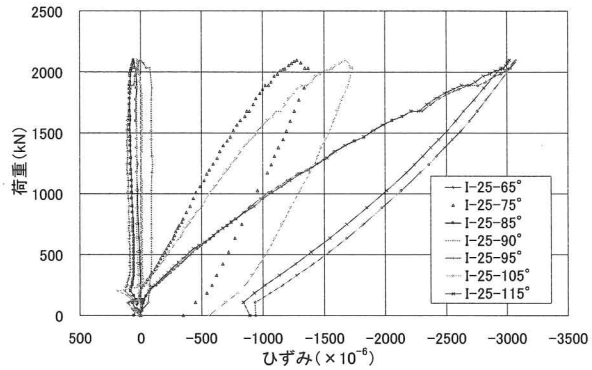

ひずみ分布図
KA1-1：覆工外面・高さ75cm

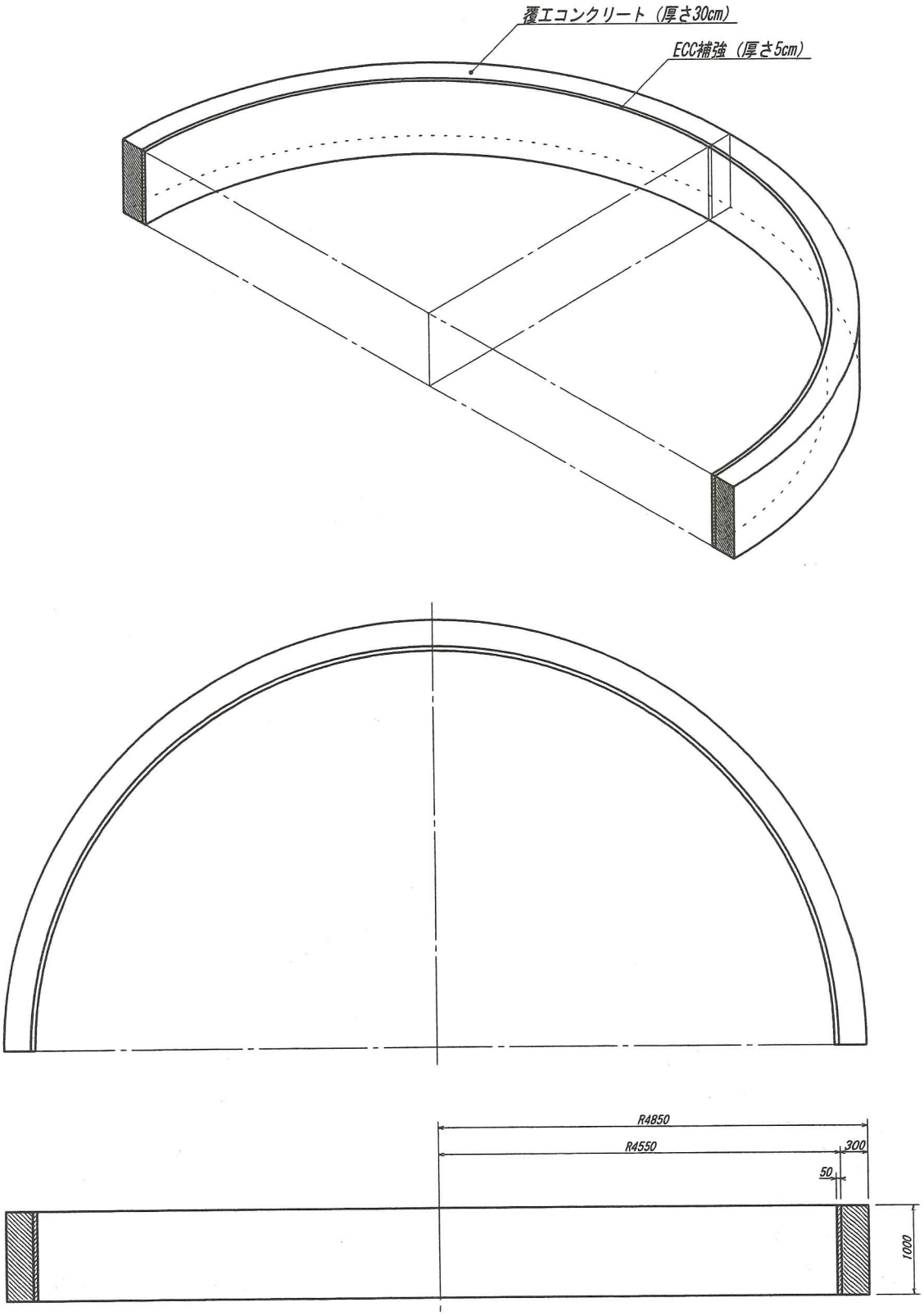



載荷荷重ージャッキ荷重
KA1-1：反力部



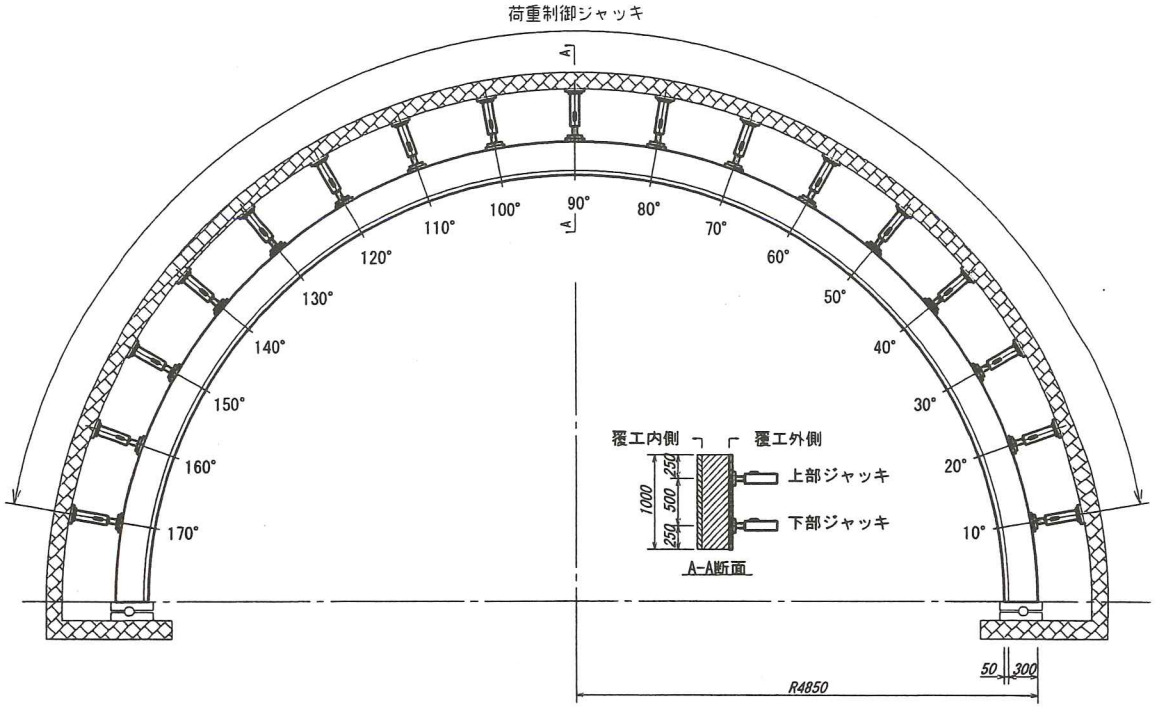

荷重ーコンクリートひずみ
(KA1-1： 覆工内面25cm)



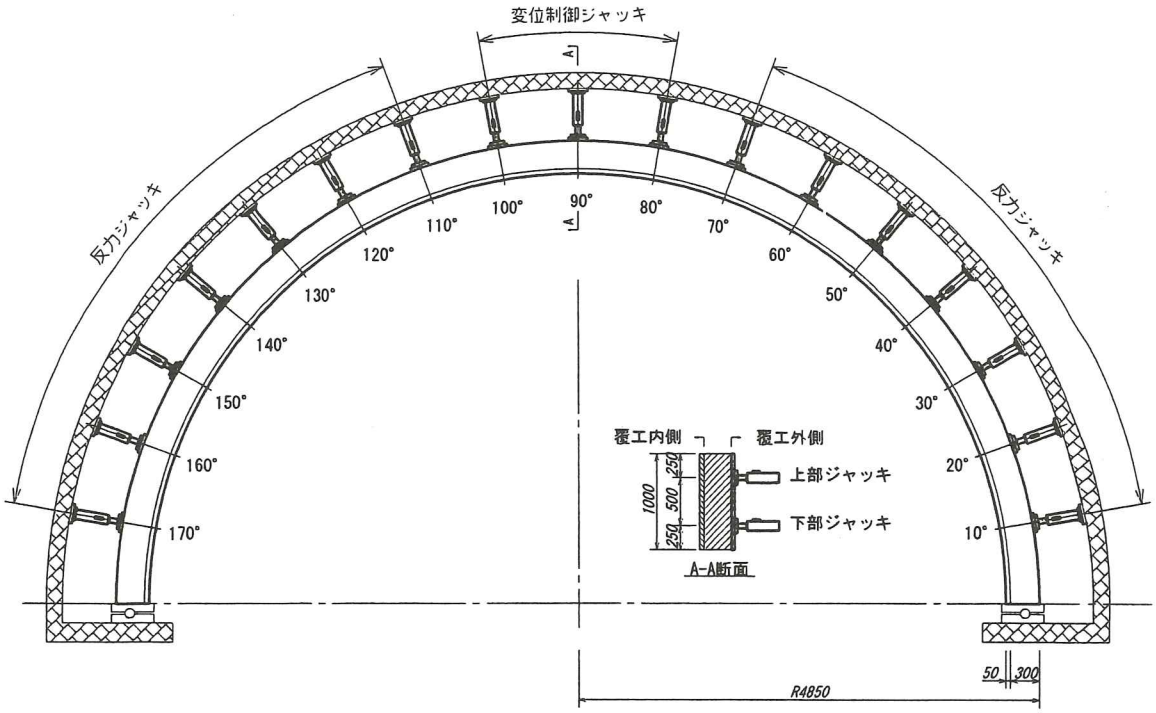



KA1-2：補強供試体概要図

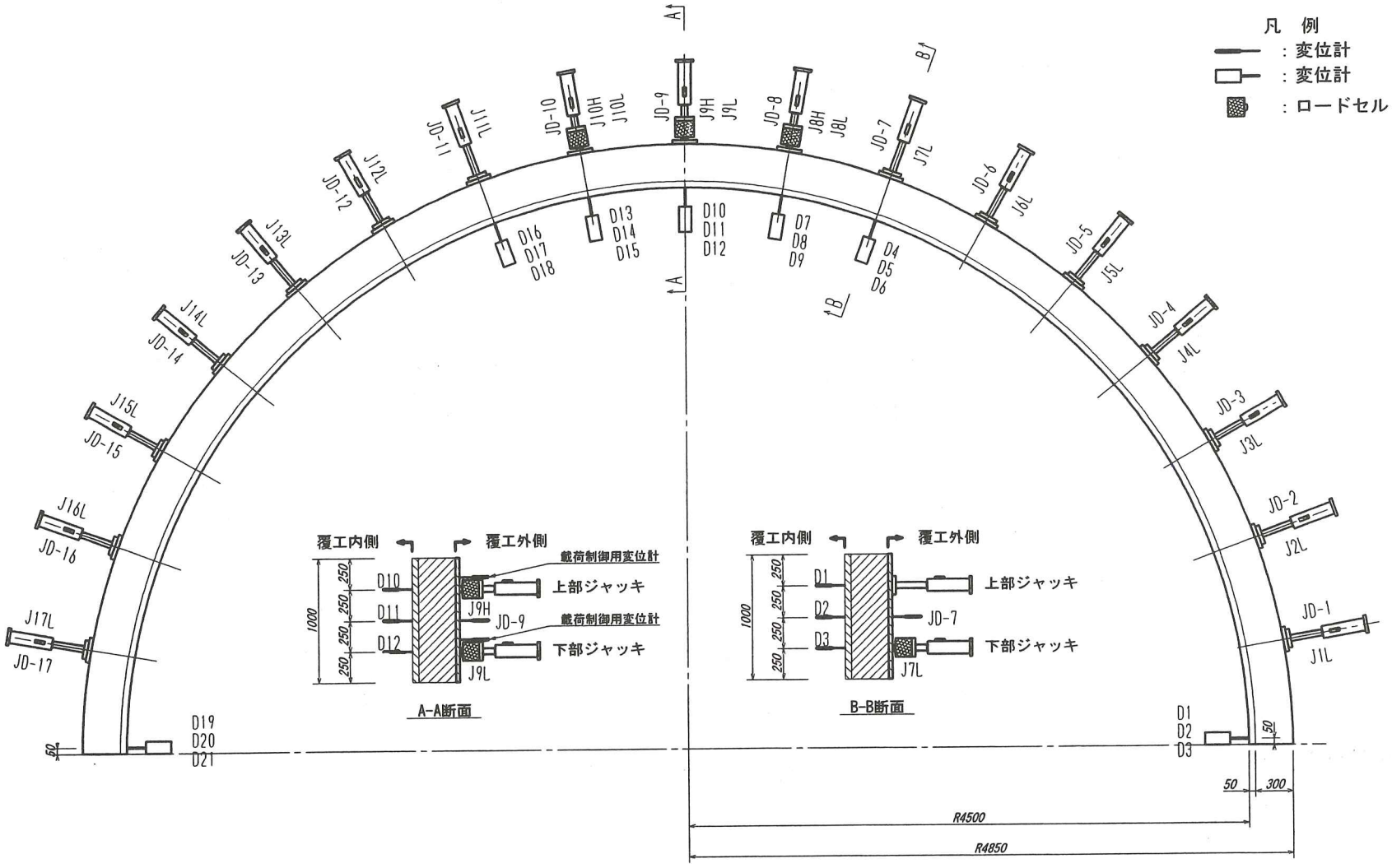
注1）80° 90° 100° の載荷点は1MNジャッキを、反力部は50tfジャッキを用いた。
注2）荷重制御時においては80° 90° 100° のジャッキは減圧装置を用いて圧力を調整した。



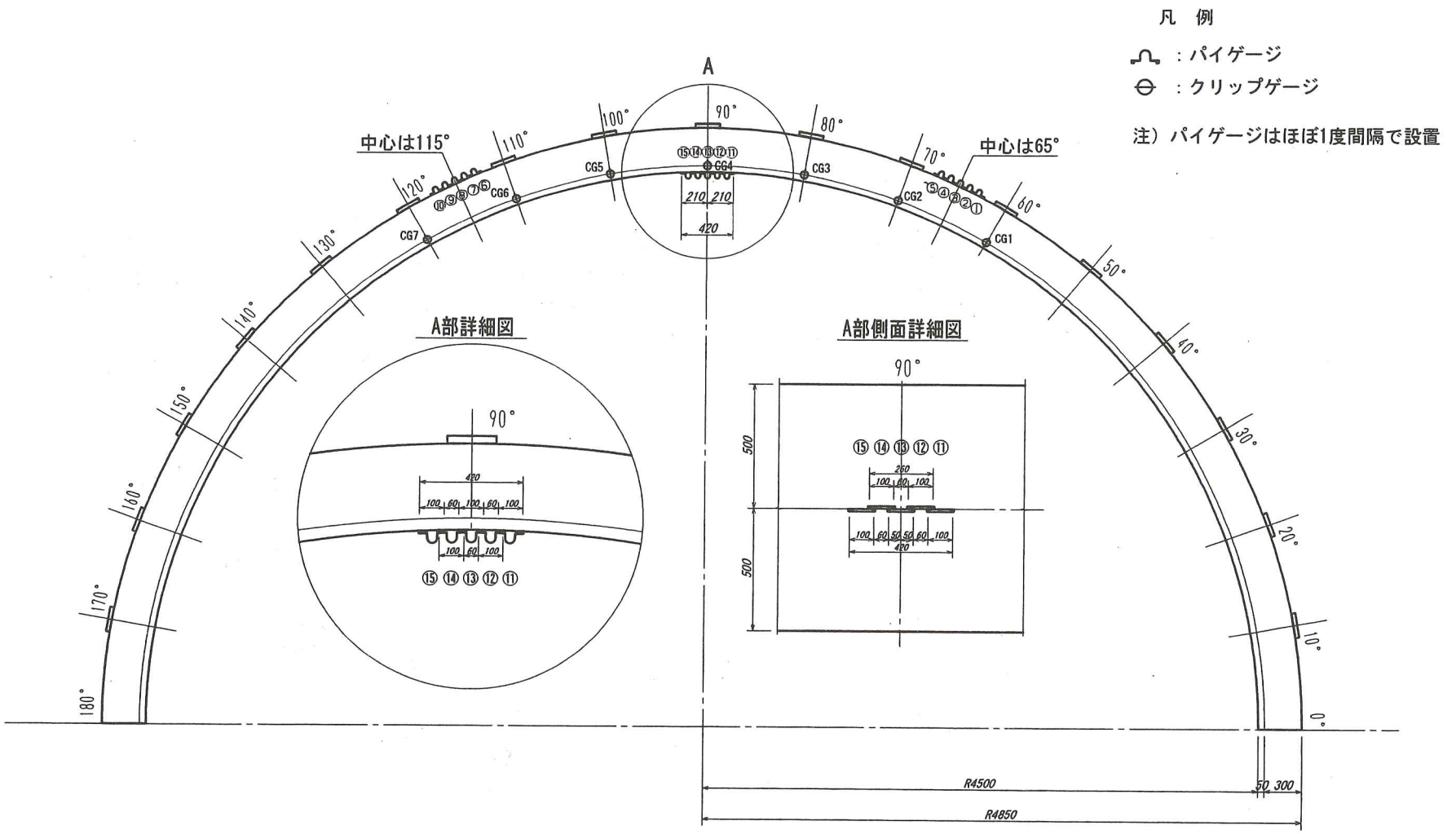

KA1-2：初期荷重20kN導入時の載荷ジャッキ配置図



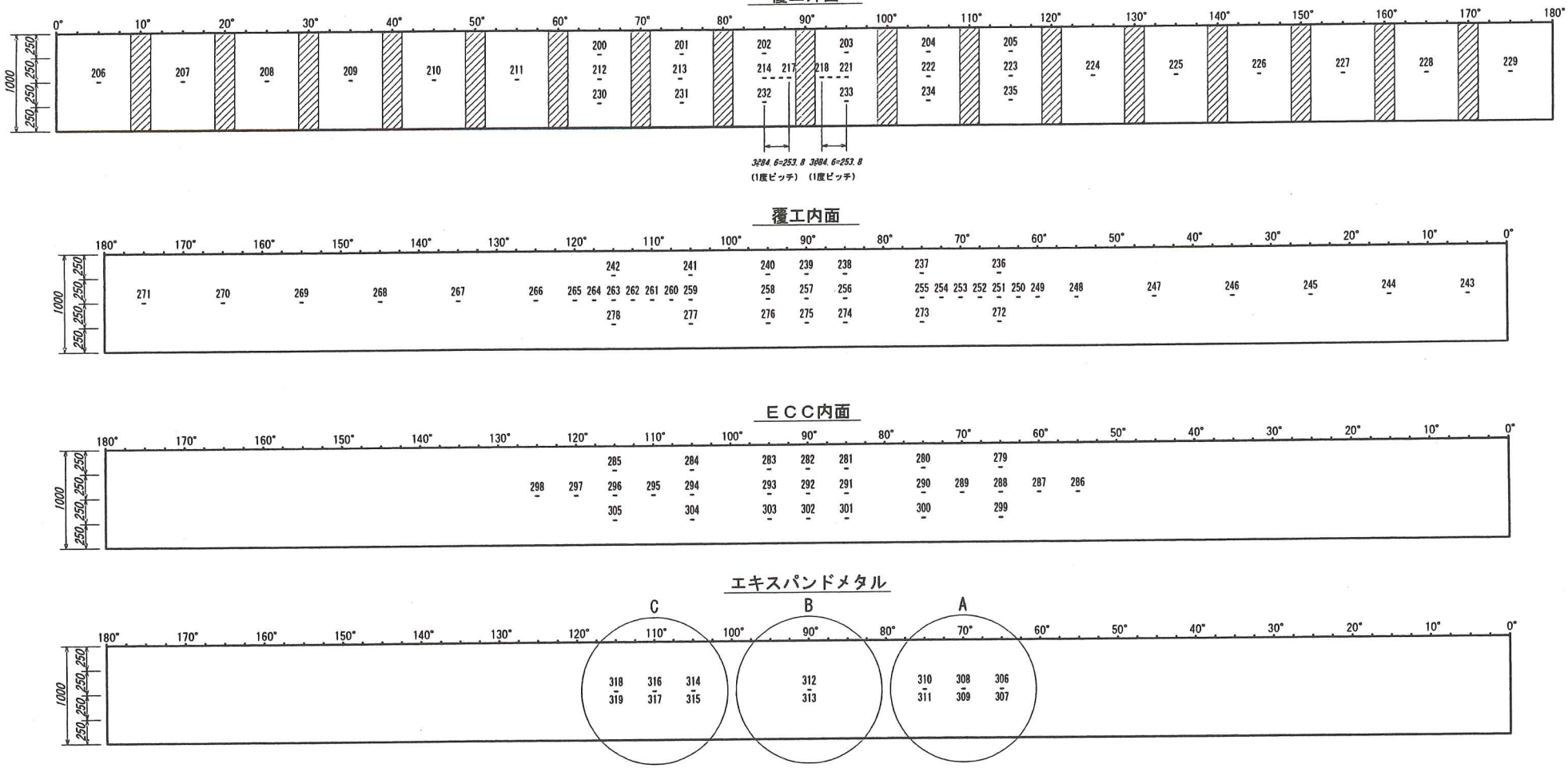

KA1-2：変位制御載荷時の載荷ジャッキ配置図




KA1-2：荷重計・変位計設置位置図




KA1-2：パイ型変位計およびクリップゲージ設置位置図




KA1-2：ひずみ計測位置図

# KA1-2 載荷形式Ⅰ 補強後載荷計測位置

載荷制御位置

| 載荷ジャッキ(変位制 | 位置 | 180 | 177.5 | 175 | 172.5 | 170 | 167.5 | 165 | 162.5 | 160 | 157.5 | 155 | 152.5 | 150 | 147.5 | 145 | 142.5 | 140 | 137.5 | 135 | 132.5 | 130 | 127.5 | 125 | 122.5 | 120 | 117.5 | 115 | 112.5 | 110 | 107.5 | 105 | 102.5 | 100 | 97.5 | 95 | 94 | 93 | 92.5 | 92 | 90 | 88 | 87.5 | 87 | 86 | 85 | 82.5 | 80 | 77.5 | 75 | 72.5 | 70 | 67.5 | 65 | 62.5 | 60 | 57.5 | 55 | 52.5 | 50 | 47.5 | 45 | 42.5 | 40 | 37.5 | 35 | 32.5 | 30 | 27.5 | 25 | 22.5 | 20 | 17.5 | 15 | 12.5 | 10 | 7.5 | 5 | 2.5 | 0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ・変位制御用変位計 | 上 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ○ | | | | | | | | ○ | | | | | | ○ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 下 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | ○ | | | | | | | | ○ | | | | | | ○ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

(備考)制御用の変位計はジャッキストローク変位計とは別途計測。

計測位置

| 1)荷重・反力<br>・ロードセル | 位置 | 180 | 177.5 | 175 | 172.5 | 170 | 167.5 | 165 | 162.5 | 160 | 157.5 | 155 | 152.5 | 150 | 147.5 | 145 | 142.5 | 140 | 137.5 | 135 | 132.5 | 130 | 127.5 | 125 | 122.5 | 120 | 117.5 | 115 | 112.5 | 110 | 107.5 | 105 | 102.5 | 100 | 97.5 | 95 | 94 | 93 | 92.5 | 92 | 90 | 88 | 87.5 | 87 | 86 | 85 | 82.5 | 80 | 77.5 | 75 | 72.5 | 70 | 67.5 | 65 | 62.5 | 60 | 57.5 | 55 | 52.5 | 50 | 47.5 | 45 | 42.5 | 40 | 37.5 | 35 | 32.5 | 30 | 27.5 | 25 | 22.5 | 20 | 17.5 | 15 | 12.5 | 10 | 7.5 | 5 | 2.5 | 0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 上 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | □ | | | | | | | | □ | | | | | | □ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 下 | | | | | □ | | | | □ | | | | □ | | | | □ | | | | □ | | | | □ | | | | □ | | | | □ | | | | | | | | □ | | | | | | □ | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| ・荷重計 | 小計 | 20 | | | | 1 | | | | 1 | | | | 1 | | | | 1 | | | | 1 | | | | 1 | | | | 1 | | | | 2 | | | | | | | | 2 | | | | | | 2 | | | | 1 | | | | 1 | | | | 1 | | | | 1 | | | | 1 | | | | 1 | | | | 1

# 載荷実験進行表

## 載荷形式Ⅰ　KA1-2:補強後載荷

| Step | 載荷点の荷重と変位 | | | | | | | | | | | | 載荷点ジャッキ（6本） | | 制御変位 | | 計測時刻 | 備　考 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 80度 | | | | 90度 | | | | 100度 | | | | | | | | | |
| | 荷重 | | | 変位 | 荷重 | | | 変位 | 荷重 | | | 変位 | 合計荷重 | 平均荷重 | 90度 | 80度<br>100度 | | A載荷:80度、90度、100度を変位制御で載荷 |
| | J8H<br>(kN) | J8L<br>(kN) | 合計<br>(kN) | JD-8<br>(mm) | J9H<br>(kN) | J9L<br>(kN) | 合計<br>(kN) | JD-9<br>(mm) | J10H<br>(kN) | J10L<br>(kN) | 合計<br>(kN) | JD-10<br>(mm) | (kN) | (kN) | (mm) | (mm) | | |
| 1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.00 | 0.0 | 0.0 | | | 8:43:18 | 全点イニシャル計測 |
| 2 | 3.6 | 5.6 | 9.2 | 0.00 | 2.0 | 5.2 | 7.2 | 0.00 | 3.2 | 3.2 | 6.4 | 0.00 | 22.8 | 3.8 | | | 8:53:46 | ﾊﾞﾙﾌﾞ全開。荷重制御で加圧。概ね5kNピッチで載荷。JD1～JD17イニシャル計測。 |
| 3 | 4.4 | 4.4 | 8.8 | 0.00 | 2.8 | 5.6 | 8.4 | −0.02 | 3.2 | 3.2 | 6.4 | 0.00 | 23.6 | 3.9 | | | 8:57:13 | |
| 4 | 7.2 | 8.4 | 15.6 | 0.30 | 3.6 | 8.0 | 11.6 | 0.26 | 6.4 | 6.0 | 12.4 | 0.22 | 39.6 | 6.6 | | | 8:59:13 | |
| 5 | 12.1 | 13.6 | 25.7 | 0.68 | 7.6 | 13.2 | 20.8 | 0.72 | 10.5 | 9.1 | 19.6 | 0.60 | 66.1 | 11.0 | | | 9:01:34 | |
| 6 | 14.9 | 15.6 | 30.5 | 0.84 | 9.2 | 15.6 | 24.8 | 0.84 | 14.1 | 11.1 | 25.2 | 0.82 | 80.5 | 13.4 | | | 9:03:57 | |
| 7 | 16.9 | 18.4 | 35.3 | 0.90 | 9.9 | 17.6 | 27.5 | 0.92 | 16.5 | 12.3 | 28.8 | 0.90 | 91.6 | 15.3 | | | 9:06:58 | |
| 8 | 18.1 | 19.6 | 37.7 | 0.94 | 15.9 | 20.0 | 35.9 | 0.98 | 17.3 | 16.3 | 33.6 | 0.96 | 107.2 | 17.9 | | | 9:10:12 | |
| 9 | 20.5 | 23.2 | 43.7 | 1.14 | 19.1 | 24.4 | 43.5 | 1.18 | 19.7 | 20.2 | 39.9 | 1.12 | 127.1 | 21.2 | | | 9:35:12 | 20kN計測終了後に反力ジャッキのﾊﾞﾙﾌﾞを閉じる。 |
| 10 | 21.7 | 8.0 | 29.7 | 0.90 | 13.9 | 13.6 | 27.5 | 0.96 | 35.0 | 0.4 | 35.4 | 1.04 | 92.6 | 15.4 | | | 9:39:49 | 制御用変位計のゼロバランスをとり、変位制御に切り替える。 |
| 11 | 20.5 | 6.0 | 26.5 | 0.92 | 16.7 | 12.4 | 29.1 | 0.98 | 37.8 | 0.0 | 37.8 | 1.06 | 93.4 | 15.6 | 0.00 | 0.00 | 11:03:56 | 載荷開始。載荷速度は90度が毎分1.0mm、80度と100度が毎分0.6mm。 |
| 12 | 24.5 | 7.6 | 32.1 | 0.96 | 14.7 | 24.8 | 39.5 | 1.06 | 39.8 | −0.8 | 39.0 | 0.96 | 110.6 | 18.4 | 0.40 | 0.25 | 11:06:39 | 計測ピッチは90度が0.4mm、80度と100度が0.25mm。 |
| 13 | 31.0 | 13.2 | 44.2 | 1.22 | 19.9 | 38.0 | 57.9 | 1.38 | 51.9 | −1.2 | 50.7 | 1.18 | 152.8 | 25.5 | 0.80 | 0.50 | 11:08:12 | |
| 14 | 35.8 | 16.0 | 51.8 | 1.48 | 25.5 | 53.2 | 78.7 | 1.82 | 62.7 | −0.8 | 61.9 | 1.46 | 192.4 | 32.1 | 1.20 | 0.75 | 11:10:20 | |
| 15 | 33.0 | 13.6 | 46.6 | 1.58 | 27.5 | 46.4 | 73.9 | 1.92 | 57.1 | 19.9 | 77.0 | 1.80 | 197.5 | 32.9 | 1.20 | 0.75 | 11:16:48 | 100度の載荷板と覆工下部の間に隙間があるため、100度の下段ジャッキのみ0.75mm押して荷重を調整する。 |
| 16 | 38.2 | 17.6 | 55.8 | 1.78 | 28.3 | 56.4 | 84.7 | 2.20 | 61.5 | 22.2 | 83.7 | 1.94 | 224.2 | 37.4 | 1.60 | 1.00 | 11:19:38 | 90度内面内巻モルタルに1本目のひび割れ発生。 |
| 17 | 43.0 | 21.6 | 64.6 | 2.06 | 31.8 | 69.6 | 101.4 | 2.60 | 69.9 | 24.2 | 94.1 | 2.26 | 260.1 | 43.4 | 2.00 | 1.25 | 11:27:06 | |
| 18 | 45.4 | 25.2 | 70.6 | 2.30 | 36.6 | 80.4 | 117.0 | 2.92 | 73.6 | 27.0 | 100.6 | 2.46 | 288.2 | 48.0 | 2.40 | 1.50 | 11:33:50 | |
| 19 | 49.0 | 28.4 | 77.4 | 2.62 | 45.4 | 92.8 | 138.2 | 3.38 | 82.0 | 30.2 | 112.2 | 2.78 | 327.8 | 54.6 | 2.80 | 1.75 | 11:35:42 | 90度内面内巻モルタルに2本目のひび割れ発生。 |
| 20 | 50.3 | 31.2 | 81.5 | 2.94 | 56.9 | 105.2 | 162.1 | 3.92 | 86.8 | 33.3 | 120.1 | 3.12 | 363.7 | 60.6 | 3.20 | 2.00 | 11:41:40 | 115度外面覆工下側に新規のひび割れ発生。 |
| 21 | 53.1 | 34.8 | 87.9 | 3.22 | 62.9 | 116.0 | 178.9 | 4.30 | 91.7 | 38.5 | 130.2 | 3.40 | 397.0 | 66.2 | 3.60 | 2.25 | 11:51:48 | 90度内面内巻モルタルに3本目のひび割れ発生。 |
| 22 | 55.9 | 38.4 | 94.3 | 3.46 | 69.3 | 127.6 | 196.9 | 4.68 | 95.3 | 45.3 | 140.6 | 3.66 | 431.8 | 72.0 | 4.00 | 2.50 | 11:58:34 | 62.5度外面覆工上側に新規のひび割れ発生。 |
| 23 | 59.1 | 42.0 | 101.1 | 3.72 | 78.4 | 136.4 | 214.8 | 5.10 | 98.9 | 50.8 | 149.7 | 3.92 | 465.6 | 77.6 | 4.40 | 2.75 | 12:05:04 | |
| 24 | 61.9 | 46.8 | 108.7 | 4.02 | 86.0 | 148.0 | 234.0 | 5.50 | 104.5 | 54.8 | 159.3 | 4.20 | 502.0 | 83.7 | 4.80 | 3.00 | 12:10:54 | |
| 25 | 67.5 | 52.8 | 120.3 | 4.30 | 91.5 | 159.2 | 250.7 | 5.92 | 112.2 | 57.2 | 169.4 | 4.46 | 540.4 | 90.1 | 5.20 | 3.25 | 12:18:13 | |
| 26 | 70.0 | 56.8 | 126.8 | 4.56 | 95.1 | 170.4 | 265.5 | 6.28 | 116.2 | 61.1 | 177.3 | 4.70 | 569.6 | 94.9 | 5.60 | 3.50 | 12:27:08 | |
| 27 | 74.8 | 61.2 | 136.0 | 4.82 | 104.3 | 181.2 | 285.5 | 6.68 | 122.2 | 65.5 | 187.7 | 4.94 | 609.2 | 101.5 | 6.00 | 3.75 | 12:33:36 | |
| 28 | 78.4 | 65.2 | 143.6 | 5.10 | 111.0 | 191.6 | 302.6 | 7.10 | 125.8 | 71.9 | 197.7 | 5.20 | 643.9 | 107.3 | 6.40 | 4.00 | 12:40:57 | |
| 29 | 82.8 | 69.2 | 152.0 | 5.32 | 115.0 | 204.4 | 319.4 | 7.42 | 132.3 | 74.6 | 206.9 | 5.42 | 678.3 | 113.1 | 6.80 | 4.25 | 12:44:56 | |
| 30 | 86.4 | 72.0 | 158.4 | 5.58 | 129.0 | 212.4 | 341.4 | 7.84 | 134.7 | 84.6 | 219.3 | 5.72 | 719.1 | 119.9 | 7.20 | 4.50 | 12:49:00 | |
| 31 | 90.1 | 73.6 | 163.7 | 5.86 | 139.7 | 229.2 | 368.9 | 8.32 | 139.9 | 86.9 | 226.8 | 6.02 | 759.4 | 126.6 | 7.60 | 4.75 | 12:53:39 | |
| 32 | 92.1 | 77.2 | 169.3 | 6.14 | 153.2 | 240.8 | 394.0 | 8.76 | 143.5 | 93.3 | 236.8 | 6.34 | 800.1 | 133.4 | 8.00 | 5.00 | 12:58:36 | |
| 33 | 100.1 | 86.0 | 186.1 | 6.40 | 156.0 | 247.2 | 403.2 | 9.12 | 156.4 | 94.1 | 250.5 | 6.58 | 839.8 | 140.0 | 8.40 | 5.25 | 13:03:26 | |
| 34 | 101.7 | 90.0 | 191.7 | 6.66 | 166.0 | 259.6 | 425.6 | 9.52 | 160.8 | 98.5 | 259.3 | 6.82 | 876.6 | 146.1 | 8.80 | 5.50 | 13:09:37 | |

# 載荷実験進行表

## 載荷形式Ⅰ　KA1-2：補強後載荷

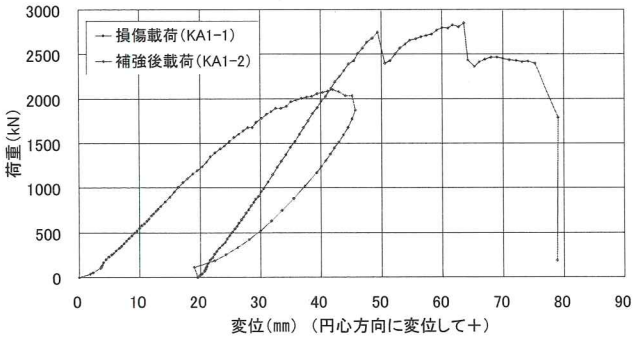
| Step | 載荷点の荷重と変位 | | | | | | | | | | | | 載荷点ジャッキ（6本） | | 制御変位 | | 計測時刻 | 備　考 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 80度 | | | | 90度 | | | | 100度 | | | | | | | | | |
| | 荷重 | | | 変位 | 荷重 | | | 変位 | 荷重 | | | 変位 | 合計荷重 | 平均荷重 | 90度 | 80度<br>100度 | | A載荷：80度、90度、100度を変位制御で載荷 |
| | J8H<br>(kN) | J8L<br>(kN) | 合計<br>(kN) | JD-8<br>(mm) | J9H<br>(kN) | J9L<br>(kN) | 合計<br>(kN) | JD-9<br>(mm) | J10H<br>(kN) | J10L<br>(kN) | 合計<br>(kN) | JD-10<br>(mm) | (kN) | (kN) | (mm) | (mm) | | |
| 35 | 103.3 | 93.2 | 196.5 | 6.96 | 177.9 | 264.0 | 441.9 | 9.98 | 165.2 | 104.8 | 270.0 | 7.14 | 908.4 | 151.4 | 9.20 | 5.75 | 13:14:37 | |
| 36 | 107.3 | 94.4 | 201.7 | 7.18 | 185.1 | 292.8 | 477.9 | 10.34 | 170.5 | 106.0 | 276.5 | 7.36 | 956.1 | 159.4 | 9.60 | 6.00 | 13:16:32 | |
| 37 | 110.6 | 98.0 | 208.6 | 7.46 | 197.0 | 301.6 | 498.6 | 10.80 | 174.5 | 113.5 | 288.0 | 7.66 | 995.2 | 165.9 | 10.00 | 6.25 | 13:19:16 | これより載荷ピッチは90度が0.8㎜、80度と100度が0.5㎜。 |
| 38 | 115.4 | 104.8 | 220.2 | 8.00 | 219.7 | 320.8 | 540.5 | 11.58 | 180.5 | 129.0 | 309.5 | 8.24 | 1070.2 | 178.4 | 10.80 | 6.75 | 13:29:57 | |
| 39 | 123.4 | 110.8 | 234.2 | 8.44 | 226.9 | 360.8 | 587.7 | 12.34 | 194.2 | 131.8 | 326.0 | 8.68 | 1147.9 | 191.3 | 11.60 | 7.25 | 13:33:14 | |
| 40 | 139.5 | 124.0 | 263.5 | 8.98 | 234.4 | 381.6 | 616.0 | 13.06 | 214.7 | 135.8 | 350.5 | 9.16 | 1230.0 | 205.0 | 12.40 | 7.75 | 13:37:43 | |
| 41 | 148.3 | 132.8 | 281.1 | 9.44 | 243.6 | 406.4 | 650.0 | 13.80 | 227.9 | 142.1 | 370.0 | 9.64 | 1301.1 | 216.9 | 13.20 | 8.25 | 13:43:20 | |
| 42 | 156.0 | 135.2 | 291.2 | 9.94 | 252.3 | 440.0 | 692.3 | 14.54 | 236.8 | 151.7 | 388.5 | 10.16 | 1372.0 | 228.7 | 14.00 | 8.75 | 13:52:13 | |
| 43 | 168.0 | 144.4 | 312.4 | 10.42 | 261.1 | 468.0 | 729.1 | 15.28 | 252.5 | 158.4 | 410.9 | 10.64 | 1452.4 | 242.1 | 14.80 | 9.25 | 13:56:02 | |
| 44 | 180.5 | 152.8 | 333.3 | 10.92 | 271.4 | 493.2 | 764.6 | 16.04 | 269.3 | 158.4 | 427.7 | 11.14 | 1525.6 | 254.3 | 15.60 | 9.75 | 14:03:47 | |
| 45 | 190.2 | 160.0 | 350.2 | 11.40 | 283.8 | 519.2 | 803.0 | 16.76 | 282.6 | 165.9 | 448.5 | 11.60 | 1601.7 | 267.0 | 16.40 | 10.25 | 14:08:52 | |
| 46 | 201.4 | 167.2 | 368.6 | 11.88 | 292.1 | 544.8 | 836.9 | 17.48 | 294.7 | 177.5 | 472.2 | 12.10 | 1677.7 | 279.6 | 17.20 | 10.75 | 14:13:12 | |
| 47 | 210.7 | 173.2 | 383.9 | 12.36 | 302.1 | 574.4 | 876.5 | 18.20 | 307.1 | 182.2 | 489.3 | 12.54 | 1749.7 | 291.6 | 18.00 | 11.25 | 14:18:58 | |
| 48 | 225.9 | 184.8 | 410.7 | 12.82 | 312.0 | 592.0 | 904.0 | 18.92 | 328.0 | 188.2 | 516.2 | 13.04 | 1830.9 | 305.2 | 18.80 | 11.75 | 14:23:13 | |
| 49 | 236.0 | 192.4 | 428.4 | 13.34 | 323.2 | 614.0 | 937.2 | 19.62 | 340.9 | 194.9 | 535.8 | 13.54 | 1901.4 | 316.9 | 19.60 | 12.25 | 14:26:53 | |
| 50 | 244.4 | 197.6 | 442.0 | 13.78 | 332.3 | 642.8 | 975.1 | 20.34 | 353.0 | 201.7 | 554.7 | 14.02 | 1971.8 | 328.6 | 20.40 | 12.75 | 14:31:13 | |
| 51 | 254.1 | 203.2 | 457.3 | 14.30 | 339.9 | 655.6 | 995.5 | 21.06 | 360.6 | 214.0 | 574.6 | 14.50 | 2027.4 | 337.9 | 21.20 | 13.25 | 14:41:42 | |
| 52 | 267.7 | 211.6 | 479.3 | 14.84 | 353.8 | 686.8 | 1040.6 | 21.88 | 381.1 | 218.0 | 599.1 | 15.00 | 2119.0 | 353.2 | 22.00 | 13.75 | 14:45:36 | |
| 53 | 278.2 | 222.0 | 500.2 | 15.30 | 363.8 | 704.0 | 1067.8 | 22.60 | 394.4 | 225.5 | 619.9 | 15.44 | 2187.9 | 364.7 | 22.80 | 14.25 | 14:49:35 | |
| 54 | 287.0 | 230.4 | 517.4 | 15.72 | 372.1 | 720.4 | 1092.5 | 23.28 | 408.0 | 233.4 | 641.4 | 15.92 | 2251.3 | 375.2 | 23.60 | 14.75 | 14:54:14 | |
| 55 | 295.5 | 236.0 | 531.5 | 16.22 | 383.3 | 739.6 | 1122.9 | 23.98 | 417.3 | 244.2 | 661.5 | 16.42 | 2315.9 | 386.0 | 24.40 | 15.25 | 14:58:29 | |
| 56 | 310.8 | 250.8 | 561.6 | 16.74 | 388.8 | 750.0 | 1138.8 | 24.74 | 436.6 | 252.5 | 689.1 | 16.90 | 2389.5 | 398.3 | 25.20 | 15.75 | 15:02:20 | |
| 57 | 314.8 | 256.4 | 571.2 | 17.20 | 396.0 | 764.4 | 1160.4 | 25.48 | 445.4 | 254.5 | 699.9 | 17.38 | 2431.5 | 405.3 | 26.00 | 16.25 | 15:10:53 | |
| 58 | 328.0 | 268.8 | 596.8 | 17.68 | 407.6 | 777.2 | 1184.8 | 26.18 | 459.5 | 266.0 | 725.5 | 17.82 | 2507.1 | 417.9 | 26.80 | 16.75 | 15:13:56 | |
| 59 | 338.9 | 275.6 | 614.5 | 18.16 | 417.1 | 786.0 | 1203.1 | 26.88 | 471.1 | 278.3 | 749.4 | 18.30 | 2567.0 | 427.8 | 27.60 | 17.25 | 15:17:24 | 115度内巻内面の最大ひずみが-3000μεを超える。外面のひび割れ観察はここまで。 |
| 60 | 351.4 | 292.0 | 643.4 | 18.64 | 421.1 | 796.8 | 1217.9 | 27.60 | 487.6 | 286.6 | 774.2 | 18.78 | 2635.5 | 439.3 | 28.40 | 17.75 | 15:20:54 | |
| 61 | 359.4 | 300.4 | 659.8 | 19.12 | 428.6 | 801.6 | 1230.2 | 28.32 | 498.9 | 294.6 | 793.5 | 19.26 | 2683.5 | 447.3 | 29.20 | 18.25 | 15:25:33 | |
| 62 | 368.2 | 303.6 | 671.8 | 19.64 | 439.4 | 823.2 | 1262.6 | 29.16 | 507.7 | 303.3 | 811.0 | 19.78 | 2745.4 | 457.6 | 30.00 | 18.75 | 15:28:34 | 計測終了後、変位ホールド中に大音を発して荷重が落ちる。 |
| 63 | 377.9 | 337.2 | 715.1 | 19.96 | 322.0 | 639.6 | 961.6 | 30.44 | 439.0 | 284.3 | 723.3 | 20.24 | 2400.0 | 400.0 | 30.00 | 18.75 | 15:33:23 | 荷重低下直後に計測。65度から90度の範囲で内巻モルタルの付着が切れる。内巻モルタルが60度から90度の方向に向かって最大3ミリのせん断ズレを起こす。 |
| 64 | 371.5 | 363.2 | 734.7 | 20.52 | 342.3 | 618.0 | 960.3 | 31.30 | 450.6 | 286.2 | 736.8 | 20.74 | 2431.8 | 405.3 | 30.80 | 19.25 | 15:45:44 | |
| 65 | 387.1 | 374.4 | 761.5 | 21.00 | 347.9 | 627.2 | 975.1 | 32.10 | 467.5 | 299.3 | 766.8 | 21.18 | 2503.4 | 417.2 | 31.60 | 19.75 | 15:51:27 | 115度内面で内巻モルタルの圧壊が始まる。内巻内面の最大ひずみは-3650με |
| 66 | 405.2 | 387.6 | 792.8 | 21.50 | 343.1 | 638.8 | 981.9 | 32.88 | 492.5 | 304.5 | 797.0 | 21.68 | 2571.7 | 428.6 | 32.40 | 20.25 | 15:57:04 | |
| 67 | 416.5 | 394.8 | 811.3 | 21.96 | 345.5 | 637.6 | 983.1 | 33.66 | 506.1 | 314.4 | 820.5 | 22.14 | 2614.9 | 435.8 | 33.20 | 20.75 | 16:01:06 | |
| 68 | 428.9 | 400.8 | 829.7 | 22.44 | 346.3 | 636.4 | 982.7 | 34.44 | 517.0 | 329.1 | 846.1 | 22.60 | 2658.5 | 443.1 | 34.00 | 21.25 | 16:04:20 | |

## 載荷実験進行表

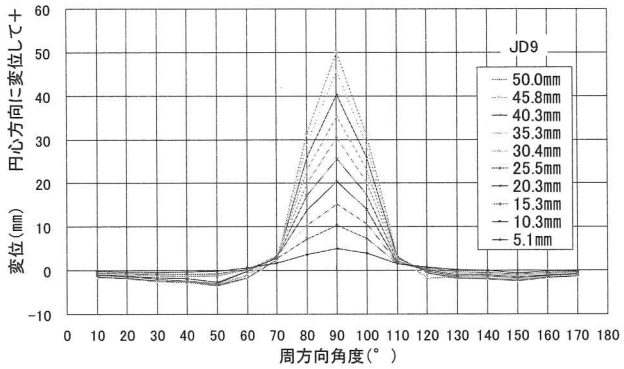
## 載荷形式Ⅰ　KA1-2:補強後載荷

| Step | 載荷点の荷重と変位 | | | | | | | | | | | | 載荷点ジャッキ（6本） | | 制御変位 | | 計測時刻 | 備　考 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 80度 | | | | 90度 | | | | 100度 | | | | | | | | | |
| | 荷重 | | | 変位 | 荷重 | | | 変位 | 荷重 | | | 変位 | 合計荷重 | 平均荷重 | 90度 | 80度<br>100度 | | A載荷:80度、90度、100度を変位制御で載荷 |
| | J8H<br>(kN) | J8L<br>(kN) | 合計<br>(kN) | JD-8<br>(mm) | J9H<br>(kN) | J9L<br>(kN) | 合計<br>(kN) | JD-9<br>(mm) | J10H<br>(kN) | J10L<br>(kN) | 合計<br>(kN) | JD-10<br>(mm) | (kN) | (kN) | (mm) | (mm) | | |
| 69 | 433.0 | 402.4 | 835.4 | 22.92 | 346.7 | 632.4 | 979.1 | 35.32 | 525.4 | 333.1 | 858.5 | 23.08 | 2673.0 | 445.5 | 34.80 | 21.75 | 16:11:19 | |
| 70 | 444.2 | 413.2 | 857.4 | 23.44 | 340.7 | 617.6 | 958.3 | 36.14 | 541.5 | 339.4 | 880.9 | 23.56 | 2696.6 | 449.4 | 35.60 | 22.25 | 16:19:17 | ステップ70から71に向かう途中で2度小さな音を発する。 |
| 71 | 446.2 | 416.4 | 862.6 | 23.90 | 342.7 | 619.2 | 961.9 | 37.00 | 540.7 | 344.2 | 884.9 | 24.04 | 2709.4 | 451.6 | 36.40 | 22.75 | 16:20:43 | |
| 72 | 453.9 | 421.6 | 875.5 | 24.38 | 337.1 | 612.8 | 949.9 | 37.80 | 546.7 | 354.1 | 900.8 | 24.48 | 2726.2 | 454.4 | 37.20 | 23.25 | 16:26:01 | |
| 73 | 464.3 | 433.2 | 897.5 | 24.86 | 338.3 | 614.8 | 953.1 | 38.54 | 559.2 | 363.3 | 922.5 | 24.94 | 2773.1 | 462.2 | 38.00 | 23.75 | 16:27:19 | |
| 74 | 472.8 | 443.2 | 916.0 | 25.36 | 336.3 | 608.8 | 945.1 | 39.44 | 573.3 | 367.2 | 940.5 | 25.38 | 2801.6 | 466.9 | 38.80 | 24.25 | 16:28:47 | |
| 75 | 473.2 | 444.0 | 917.2 | 25.84 | 331.5 | 593.6 | 925.1 | 40.26 | 580.5 | 370.0 | 950.5 | 25.90 | 2792.8 | 465.5 | 39.60 | 24.75 | 16:32:59 | |
| 76 | 481.6 | 453.2 | 934.8 | 26.34 | 333.5 | 590.8 | 924.3 | 41.04 | 591.7 | 377.2 | 968.9 | 26.34 | 2828.0 | 471.3 | 40.40 | 25.25 | 16:34:19 | |
| 77 | 473.6 | 449.6 | 923.2 | 26.82 | 325.6 | 579.6 | 905.2 | 41.92 | 593.0 | 382.7 | 975.7 | 26.84 | 2804.1 | 467.4 | 41.20 | 25.75 | 16:41:48 | 115度内面内巻モルタルの圧縮ひずみが最大値を示す。-4449 $\mu\varepsilon$ |
| 78 | 486.8 | 464.4 | 951.2 | 27.34 | 324.4 | 576.8 | 901.2 | 42.72 | 611.0 | 391.0 | 1002.0 | 27.30 | 2854.4 | 475.7 | 42.00 | 26.25 | 16:43:05 | 計測終了後、変位ホールド中に大音を発して再度荷重が落ちる。 |
| 79 | 410.0 | 402.0 | 812.0 | 27.46 | 262.7 | 375.2 | 637.9 | 43.26 | 580.5 | 401.8 | 982.3 | 27.30 | 2432.2 | 405.4 | 42.00 | 26.25 | 16:43:45 | 荷重低下直後に計測。115度内面内巻モルタルが圧壊する。90度から115度の範囲で内巻モルタルの付着が切れる。内巻モルタルが115度から90度の方向に向かって最大1.5ミリのせん断ズレを起こす。 |
| 80 | 405.6 | 396.4 | 802.0 | 27.98 | 238.4 | 341.2 | 579.6 | 44.14 | 582.1 | 397.0 | 979.1 | 27.70 | 2360.7 | 393.5 | 42.80 | 26.75 | 17:06:40 | |
| 81 | 417.7 | 408.0 | 825.7 | 28.40 | 238.0 | 346.4 | 584.4 | 44.92 | 598.6 | 406.5 | 1005.1 | 28.16 | 2415.2 | 402.5 | 43.60 | 27.25 | 17:08:05 | |
| 82 | 426.9 | 416.8 | 843.7 | 28.88 | 235.6 | 338.8 | 574.4 | 45.76 | 608.2 | 420.4 | 1028.6 | 28.60 | 2446.7 | 407.8 | 44.40 | 27.75 | 17:09:30 | |
| 83 | 439.0 | 426.0 | 865.0 | 29.42 | 228.5 | 326.0 | 554.5 | 46.64 | 621.1 | 422.4 | 1043.5 | 29.12 | 2463.0 | 410.5 | 45.20 | 28.25 | 17:10:50 | |
| 84 | 443.8 | 433.6 | 877.4 | 29.90 | 219.7 | 310.8 | 530.5 | 47.46 | 627.9 | 426.4 | 1054.3 | 29.56 | 2462.2 | 410.4 | 46.00 | 28.75 | 17:12:07 | |
| 85 | 447.8 | 437.2 | 885.0 | 30.34 | 212.9 | 290.4 | 503.3 | 48.30 | 631.1 | 430.0 | 1061.1 | 30.06 | 2449.4 | 408.2 | 46.80 | 29.25 | 17:13:35 | |
| 86 | 449.0 | 439.2 | 888.2 | 30.82 | 207.4 | 275.6 | 483.0 | 49.16 | 631.9 | 435.1 | 1067.0 | 30.58 | 2438.2 | 406.4 | 47.60 | 29.75 | 17:14:52 | |
| 87 | 457.1 | 446.0 | 903.1 | 31.36 | 197.8 | 255.2 | 453.0 | 50.00 | 640.4 | 435.1 | 1075.5 | 31.06 | 2431.6 | 405.3 | 48.40 | 30.25 | 17:16:17 | |
| 88 | 456.3 | 446.0 | 902.3 | 31.82 | 193.8 | 243.6 | 437.4 | 50.82 | 640.4 | 435.1 | 1075.5 | 31.60 | 2415.2 | 402.5 | 49.20 | 30.75 | 17:17:47 | |
| 89 | 460.7 | 449.6 | 910.3 | 32.38 | 187.1 | 238.0 | 425.1 | 51.74 | 645.2 | 438.3 | 1083.5 | 32.12 | 2418.9 | 403.2 | 50.00 | 31.25 | 17:19:02 | |
| 90 | 459.5 | 451.6 | 911.1 | 32.88 | 182.7 | 218.8 | 401.5 | 52.54 | 646.0 | 443.1 | 1089.1 | 32.62 | 2401.7 | 400.3 | 50.80 | 31.75 | 17:20:30 | 計測終了直後に大音を発して荷重が落ちる。 |
| 91 | 357.8 | 355.6 | 713.4 | 33.54 | 109.0 | 59.6 | 168.6 | 53.80 | 529.4 | 376.8 | 906.2 | 33.50 | 1788.2 | 298.0 | 50.80 | 31.75 | 17:21:49 | 荷重低下直後に計測。計測途中で再度荷重が急激に落ちる。 |
| 92 | 69.1 | 48.0 | 117.1 | 35.48 | 7.6 | -0.4 | 7.2 | 54.56 | 7.6 | 56.8 | 64.4 | 34.10 | 188.7 | 31.5 | 50.80 | 31.75 | 17:22:11 | 荷重低下後に計測。115度の覆工並びに内巻補強全体が圧壊し、覆工下部のコンクリートが剥落する。実験終了。 |

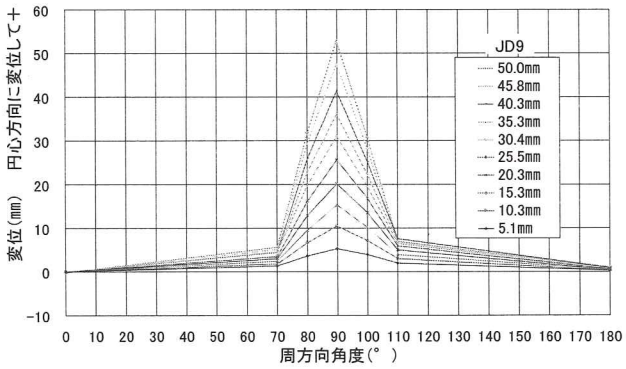
荷重－内側変位
KA1-1/KA1-2：内側90° h=50cm



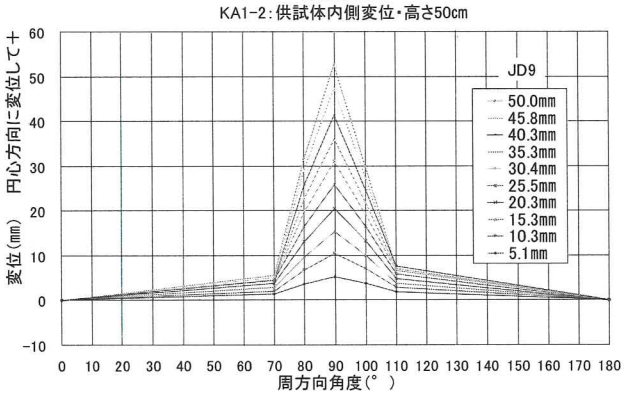

変位分布図
KA1-2：ジャッキストローク



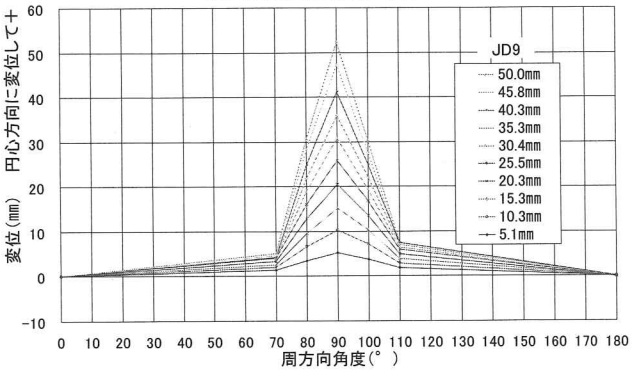

変位分布図
KA1-2：供試体内側変位・高さ75cm



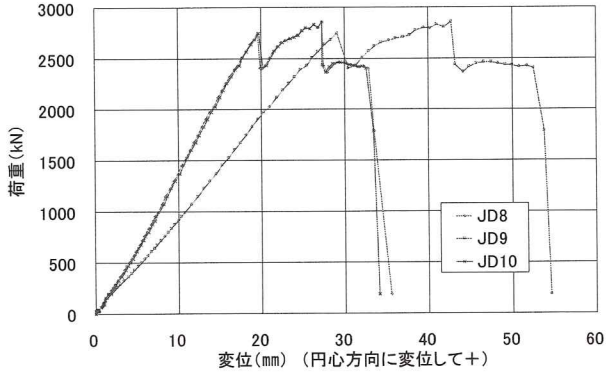

変位分布図
KA1-2：供試体内側変位・高さ50cm



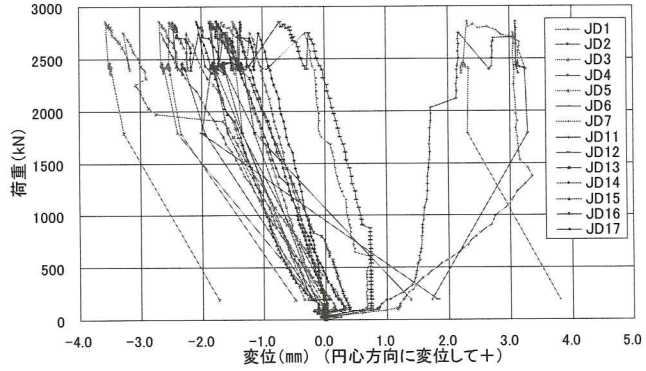
変位分布図
KA1-2：供試体内側変位・高さ25cm



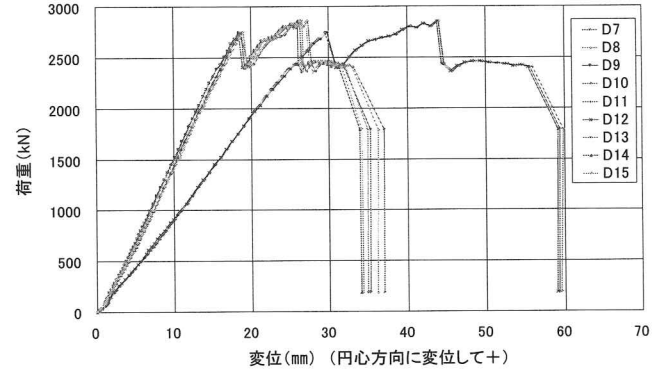

荷重ージャッキストローク
KA1-2：載荷部

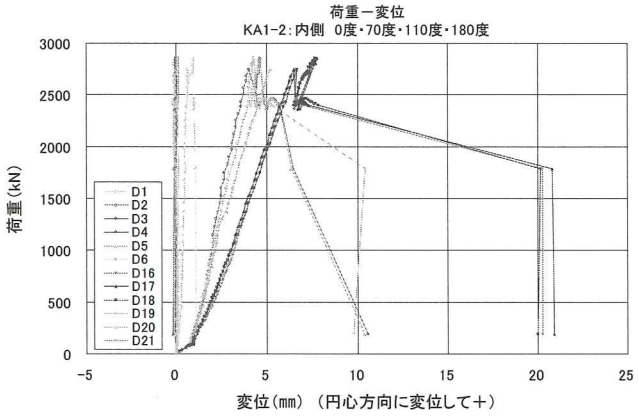


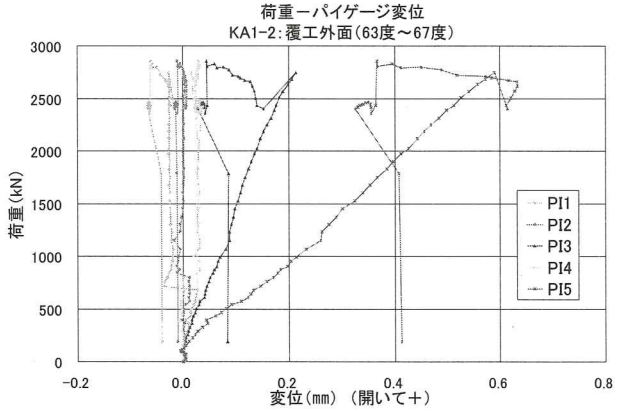

荷重ージャッキストローク
KA1-2：反力部

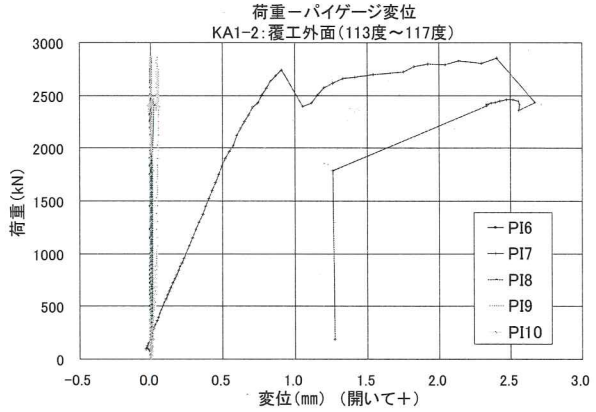


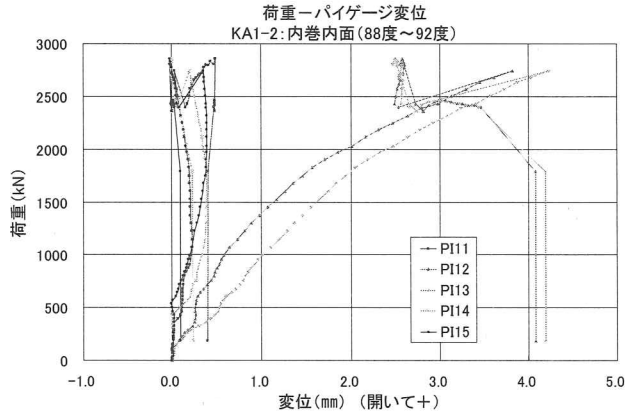

荷重ー変位
KA1-2：内側　80度・90度・100度



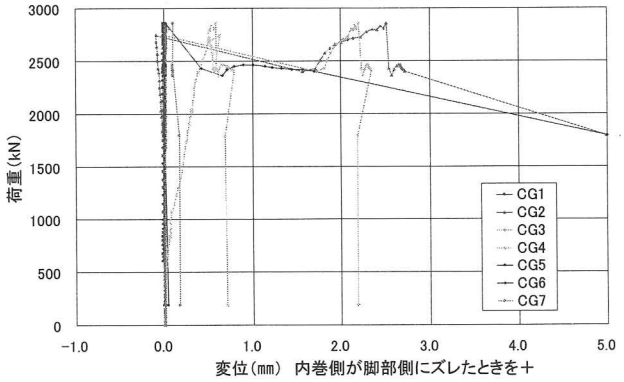

荷重－変位
KA1-2：内側 0度・70度・110度・180度
荷重(kN)
変位(mm) （円心方向に変位して＋）
D1
D2
D3
D4
D5
D6
D16
D17
D18
D19
D20
D21


荷重－パイゲージ変位
KA1-2：覆工外面（63度～67度）
荷重(kN)
変位(mm) （開いて＋）
PI1
PI2
PI3
PI4
PI5

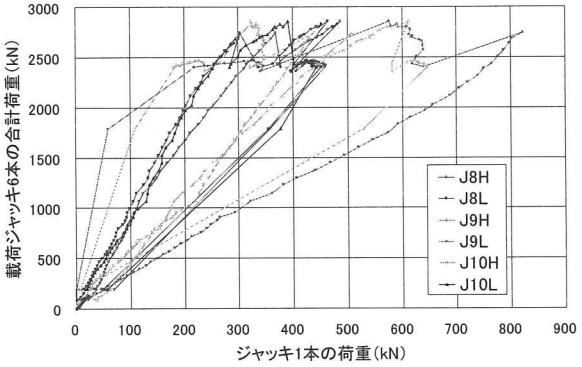

荷重－パイゲージ変位
KA1-2：覆工外面（113度～117度）
荷重(kN)
変位(mm) （開いて＋）
PI6
PI7
PI8
PI9
PI10


荷重－パイゲージ変位
KA1-2：内巻内面（88度～92度）
荷重(kN)
変位(mm) （開いて＋）
PI11
PI12
PI13
PI14
PI15

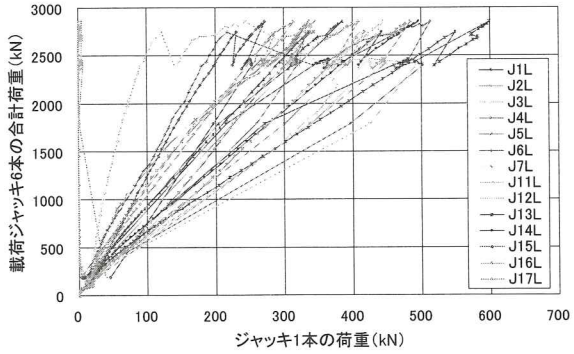
荷重－クリップゲージ変位
KA1-2：上面（60度～120度）



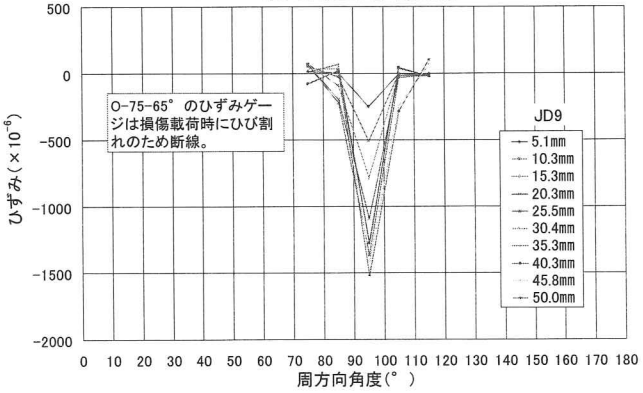

載荷荷重－ジャッキ荷重
KA1-2：載荷部



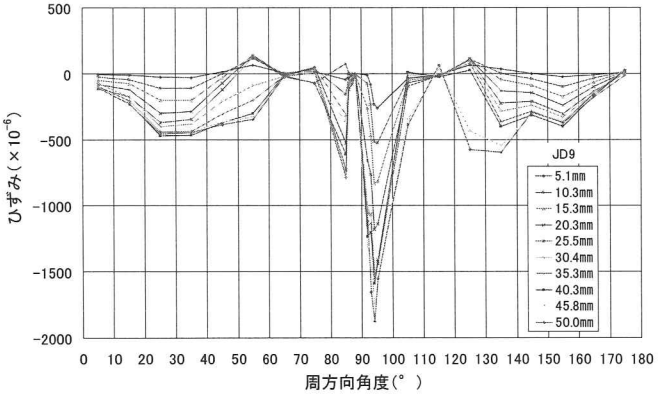

載荷荷重－ジャッキ荷重
KA1-2：反力部



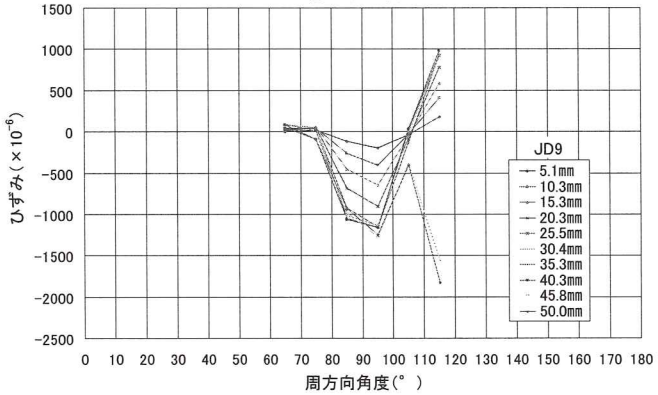

ひずみ分布図
KA1-2：覆工外面・高さ75cm



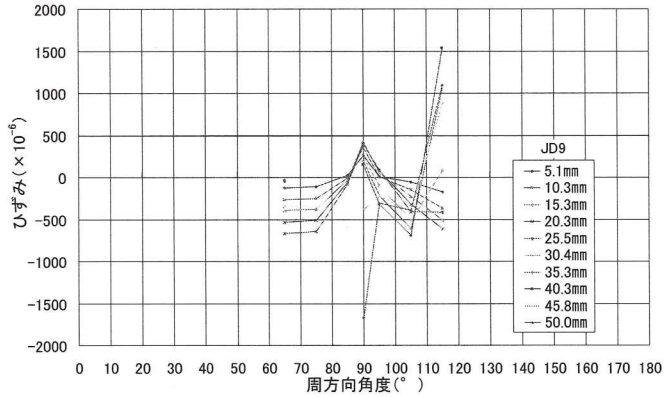
ひずみ分布図
KA1-2:覆工外面・高さ50cm



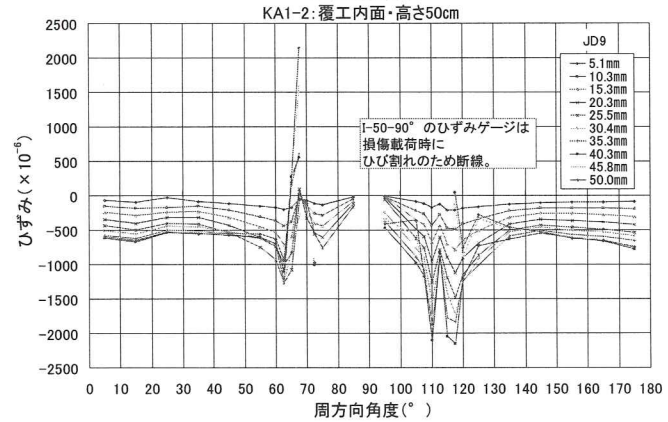

ひずみ分布図
KA1-2:覆工外面・高さ25cm



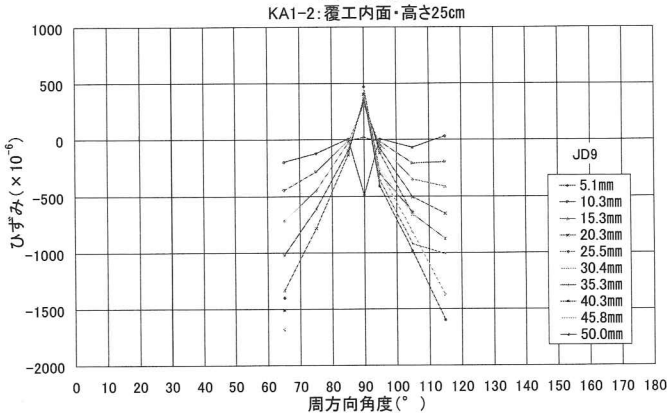

ひずみ分布図
KA1-2:覆工内面・高さ75cm



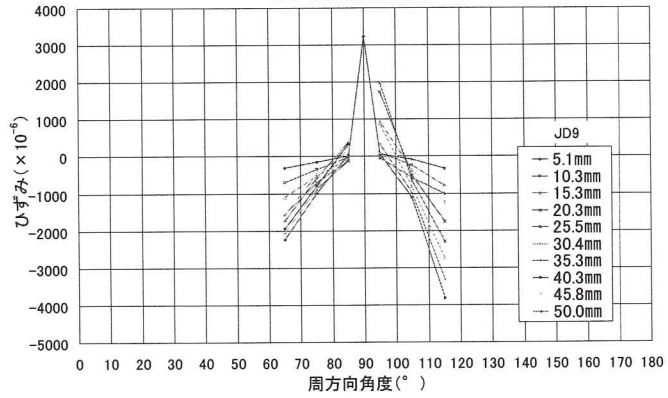

ひずみ分布図
KA1-2:覆工内面・高さ50cm



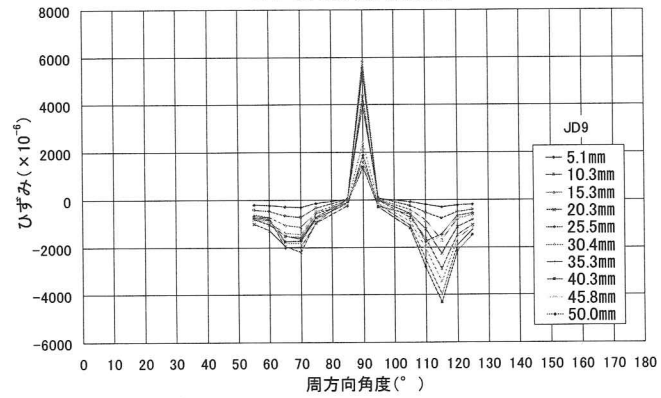
ひずみ分布図
KA1-2：覆工内面・高さ25cm



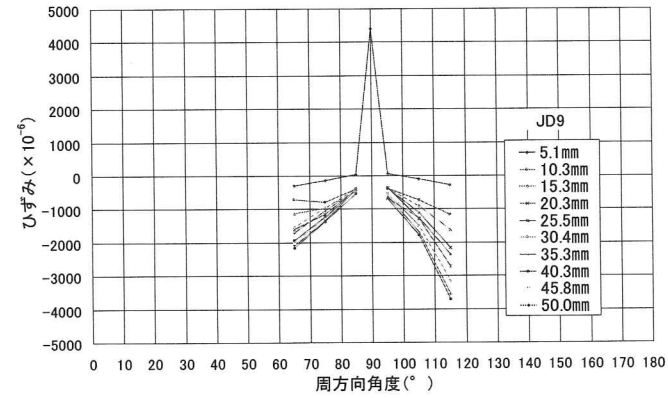

ひずみ分布図
KA1-2：内巻内面・高さ75cm



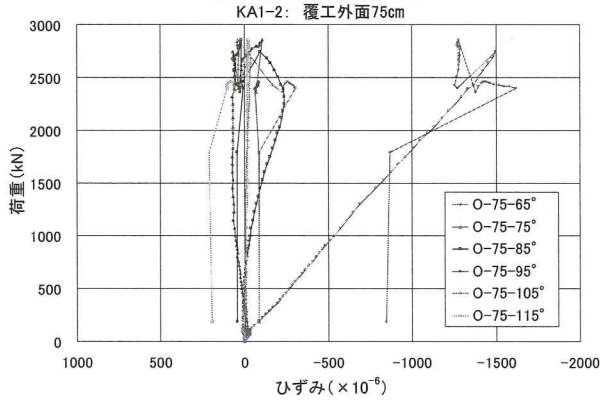

ひずみ分布図
KA1-2：内巻内面・高さ50cm



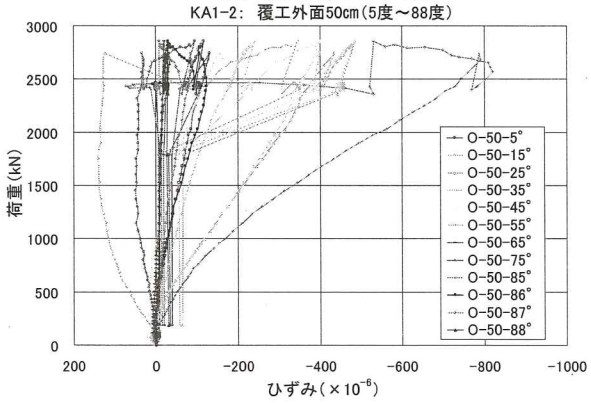

ひずみ分布図
KA1-2：内巻内面・高さ25cm



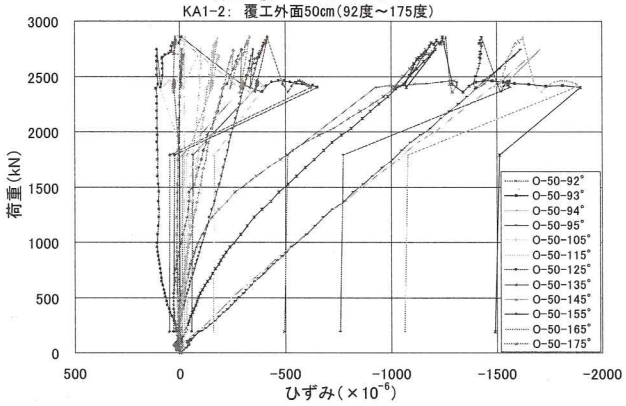
荷重－覆工コンクリートひずみ
KA1-2： 覆工外面75cm



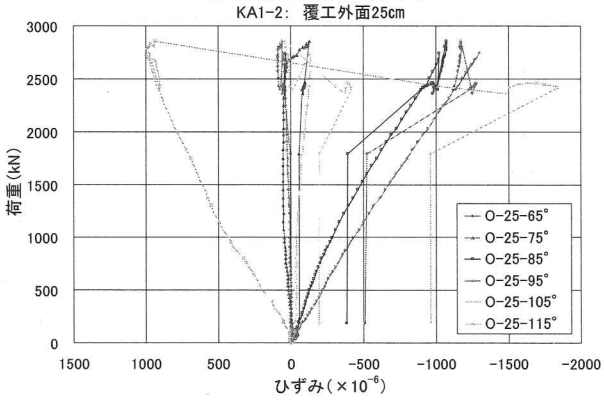

荷重－覆工コンクリートひずみ
KA1-2： 覆工外面50cm(5度～88度)



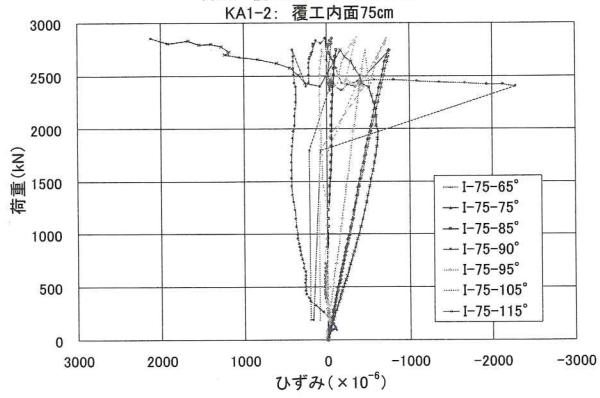

荷重－覆工コンクリートひずみ
KA1-2： 覆工外面50cm(92度～175度)



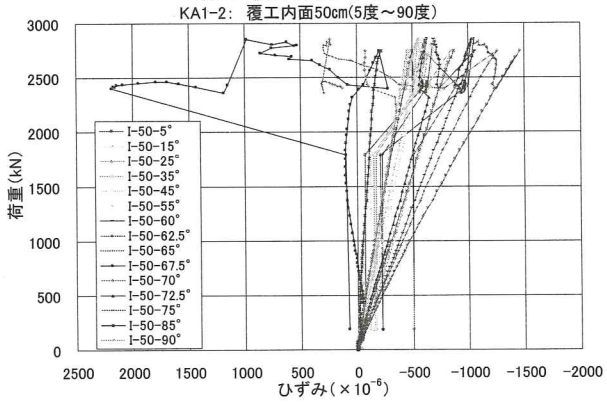

荷重－覆工コンクリートひずみ
KA1-2： 覆工外面25cm



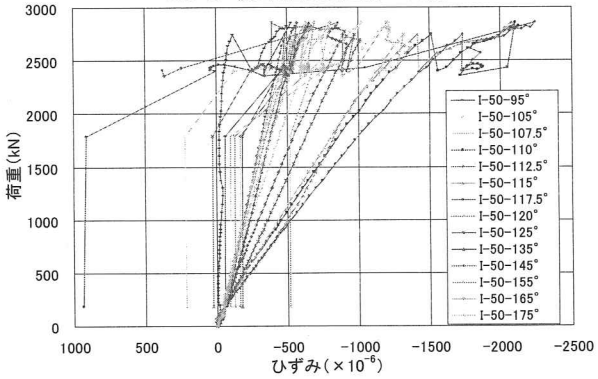
荷重－覆工コンクリートひずみ
KA1-2： 覆工内面75cm



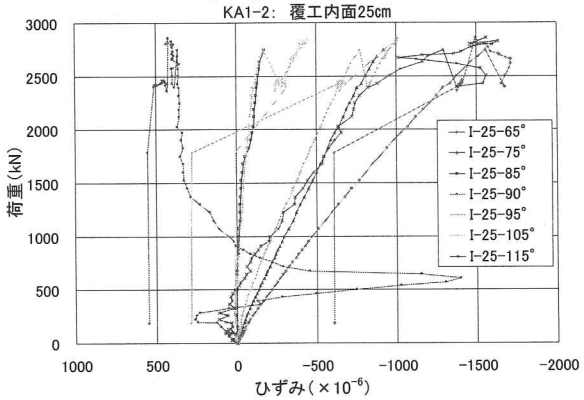

荷重－覆工コンクリートひずみ
KA1-2： 覆工内面50cm(5度～90度)



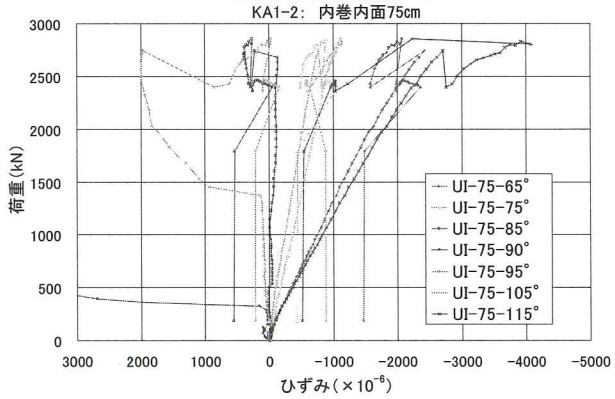

荷重－覆工コンクリートひずみ
KA1-2： 覆工内面50cm(95度～175度)



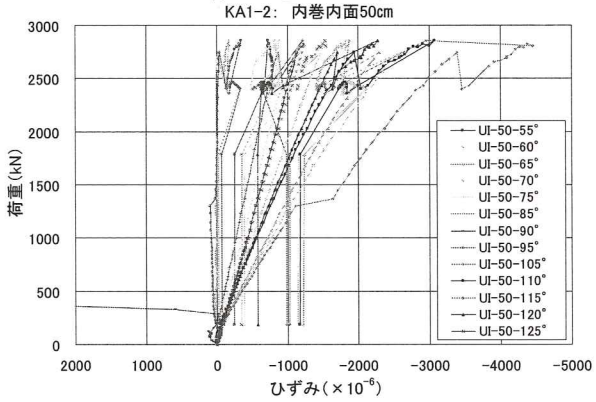

荷重－覆工コンクリートひずみ
KA1-2： 覆工内面25cm



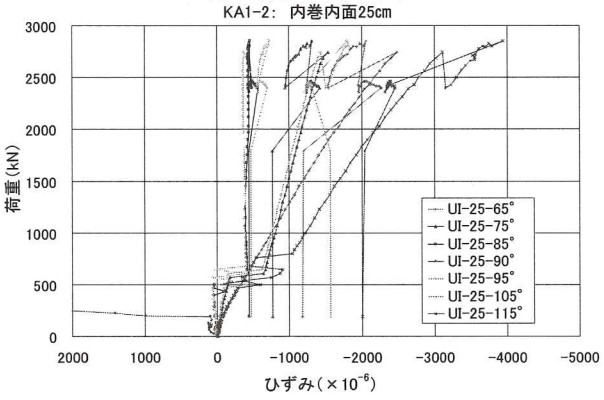
荷重－内巻モルタルひずみ
KA1-2: 内巻内面75cm



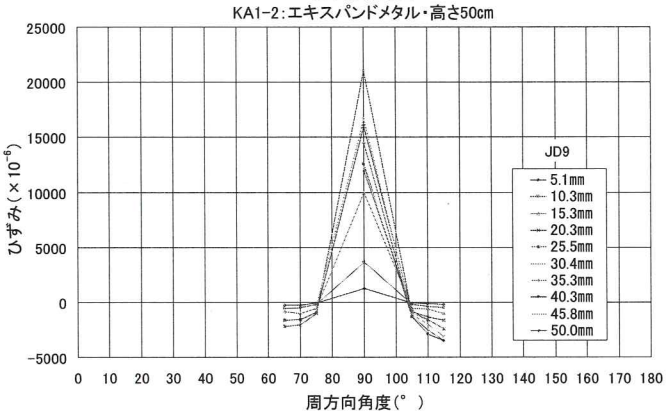

荷重－内巻モルタルひずみ
KA1-2: 内巻内面50cm

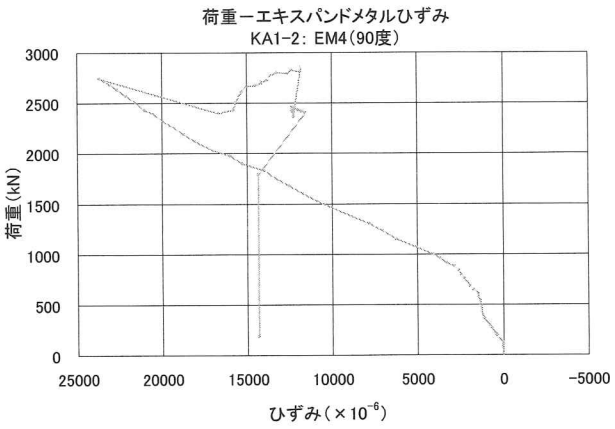



荷重－内巻モルタルひずみ
KA1-2: 内巻内面25cm




ひずみ分布図
KA1-2:エキスパンドメタル・高さ50cm




荷重ーエキスパンドメタルひずみ
KA1-2: EM4(90度)
荷重(kN)
3000
2500
2000
1500
1000
500
0
25000
20000
15000
10000
5000
0
-5000
ひずみ(×10⁻⁶)

参考資料 3

# 載荷形式Ⅱ試験結果

## 載荷形式Ⅱ（実験ケース名称：KA2） 図表目次

実験結果をとりまとめて図表を作成した。作成した図表を以下の順に示す。

1) 計測位置
- 供試体概要図
- ジャッキ配置図
- 荷重計・変位計位置図
- パイ型変位計・クリップゲージ位置図
- 上面ひずみ計測位置図
- 内外面ひずみ計測位置図
- EPMと鋼板のひずみ計測位置・ボルトゲージ位置図
- 計測位置・計測点数一覧表

2) 載荷実験進行表

3) 荷重と変位の関係図
- 荷重-ジャッキストローク図(60度・90度・120度　h=50cm)
- 変位分布図（ジャッキストローク　h=50cm）
- 変位分布図（内側変位　h=50cm）
- 荷重-ジャッキストローク図(全17点 h=50cm)
- 荷重-内側変位図(h=50cm)
- 変位分布図（全25点　h=75cm/h=50cm/h=25cm）
- 荷重－パイゲージ変位図（打継ぎ部）
- 荷重－パイゲージ変位図（弱点部）
- 荷重－クリップゲージ変位図（打継ぎ部）
- 荷重－クリップゲージ変位図（弱点部）

4) 荷重と各部荷重の関係図
- 荷重－上段ロードセル荷重図
- 荷重－下段ロードセル荷重図
- 荷重－ロードセルの平均荷重図
- 荷重－ホース内圧力図

5) 荷重とコンクリートひずみの関係図
- ひずみ分布図（上面周方向分布　15cm/3.5cm）
- ひずみ分布図（覆工内面周方向分布　h=50cm）
- ひずみ分布図（内巻内面周方向分布　h=50cm）
- ひずみ分布図（内巻ECC内面周方向分布　h=50cm）
- 荷重－上面ひずみ図（15cm/3.5cm）
- 荷重－覆工外面ひずみ図（50cm　5度～85度）
- 荷重－覆工外面ひずみ図（50cm　95度～175度）
- 荷重－覆工内面ひずみ図（50cm　5度～90度）
- 荷重－内巻ECC内面ひずみ図（75cm）
- 荷重－内巻ECC内面ひずみ図（50cm　5度～90度）
- 荷重－内巻ECC内面ひずみ図（50cm　95度～175度）
- 荷重－内巻ECC内面ひずみ図（25cm）

6) 荷重と鋼板ひずみ・荷重とエキスパンドメタルひずみの関係図
- 荷重－鋼板ひずみ図（h=75cm/h=25cm）
- 荷重－鋼板フランジひずみ図（h=64cm/h=36cm）
- 荷重－エキスパンドメタルひずみ図（h=50cm）

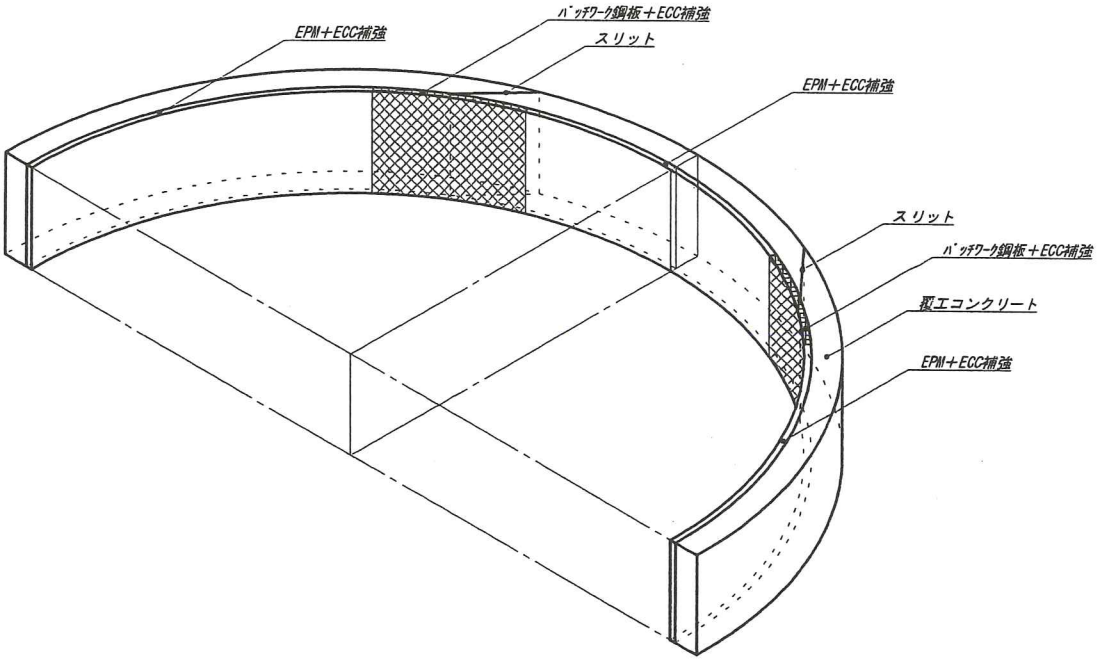
7) 荷重とボルトゲージ軸力の関係図

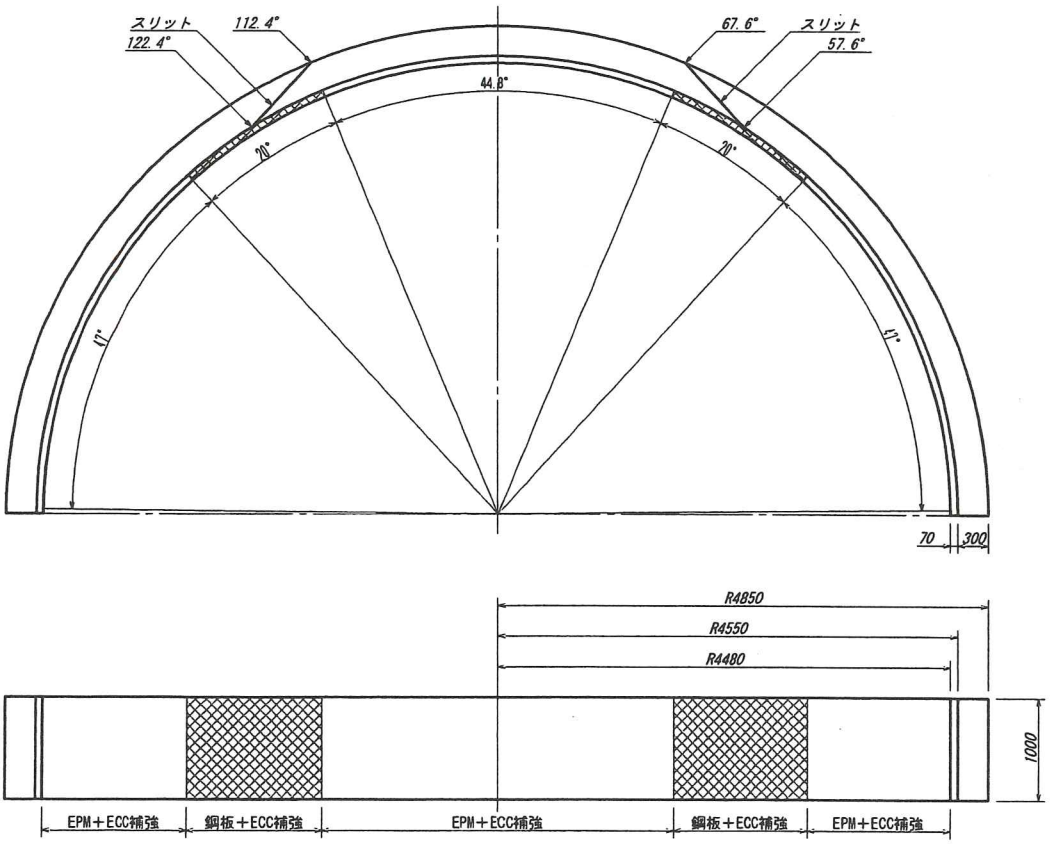
8) ひび割れ図
- ひび割れ概況図
- 上面ひび割れ状況詳細図
- 内外面ひび割れ状況詳細図

特記事項：上記図表においての注意点を記す。

・図の荷重はホース内圧力から換算したジャッキ1本あたりの荷重値である。

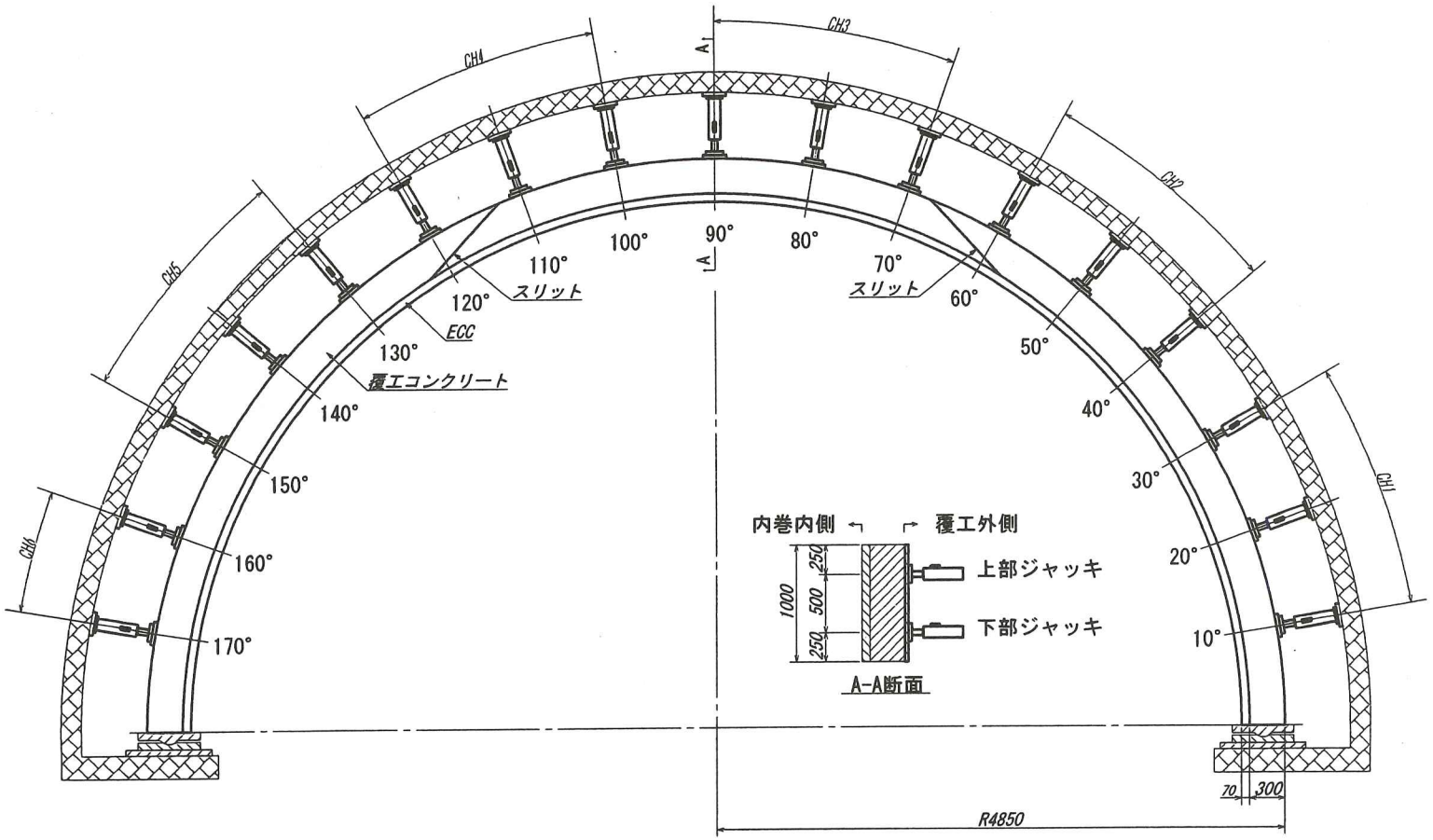
・ひずみは引張が+、圧縮がーである。


EPM＋ECC補強
ﾊﾟｯﾁﾜｰｸ鋼板＋ECC補強
スリット
EPM＋ECC補強
スリット
ﾊﾟｯﾁﾜｰｸ鋼板＋ECC補強
覆工コンクリート
EPM＋ECC補強

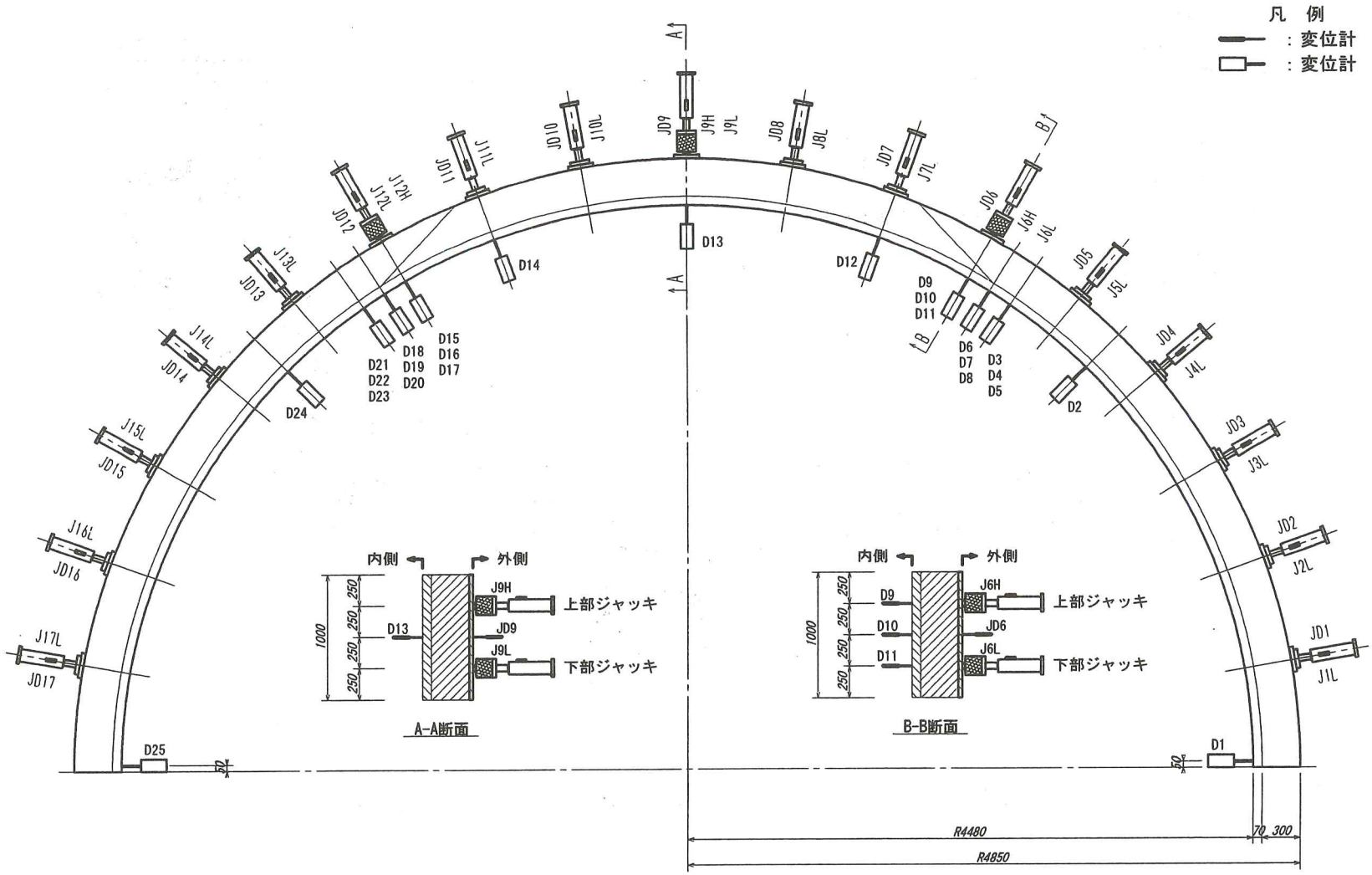

スリット
122.4°
112.4°
67.6°
スリット
57.6°
44.8°
70°
70°
47°
47°
70
300
R4850
R4550
R4480
1000
EPM＋ECC補強
鋼板＋ECC補強
EPM＋ECC補強
鋼板＋ECC補強
EPM＋ECC補強

KA2：供試体概要図

載荷方式：C載荷（17断面各2台、合計34台のジャッキを用い、荷重制御で載荷）



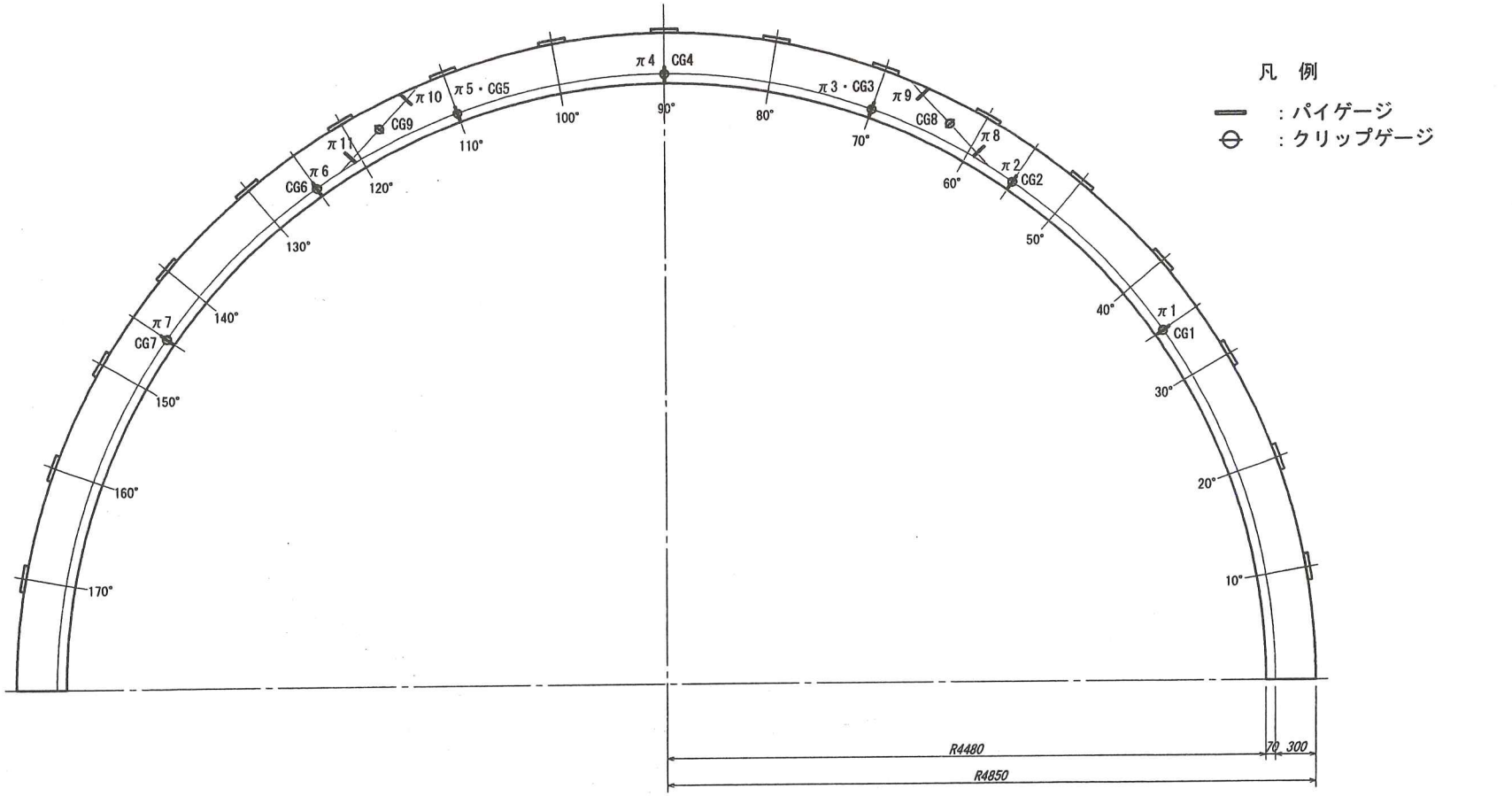

KA2：ジャッキ配置図



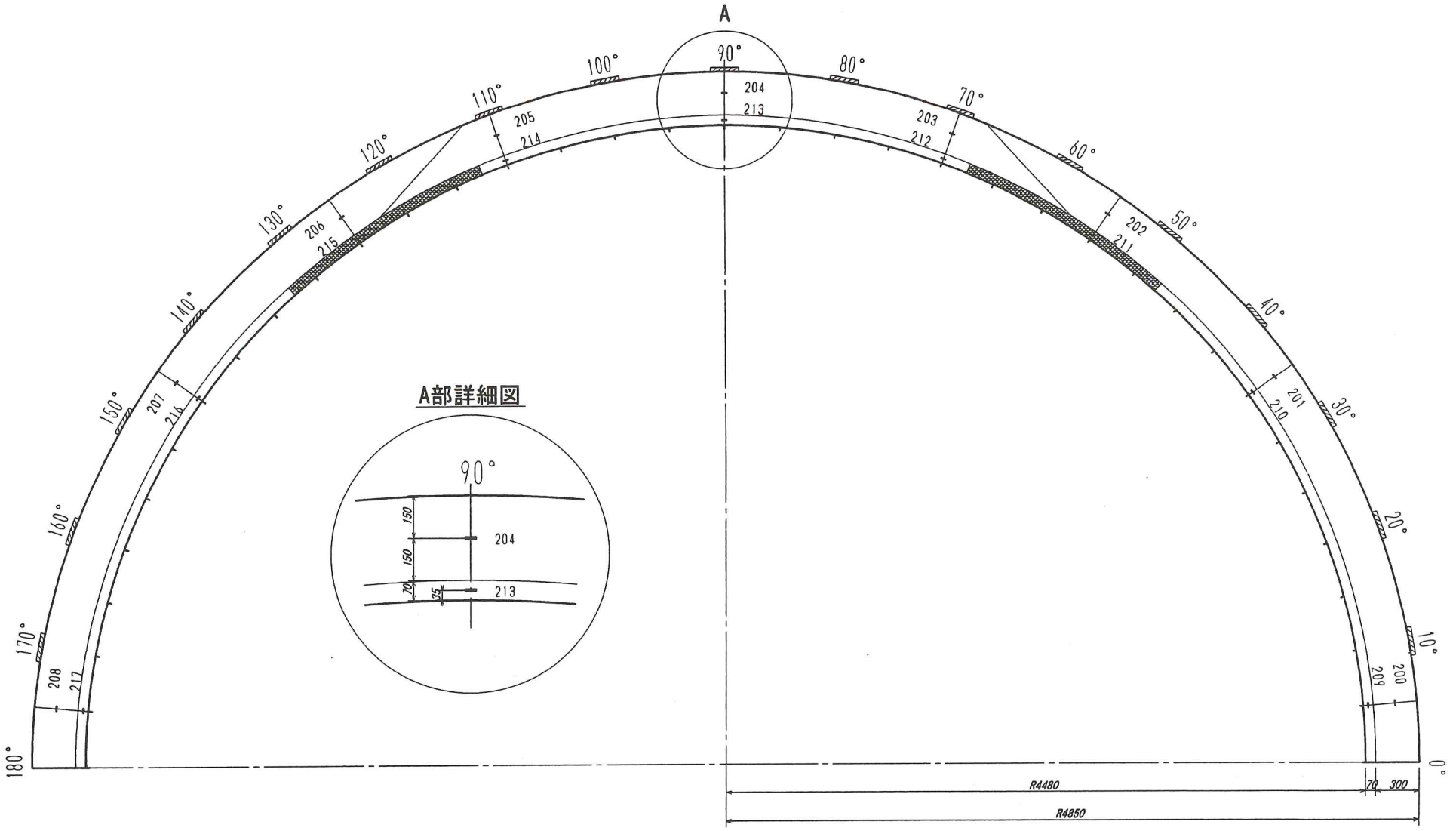

KA2：荷重計・変位計設置位置図

注1）CG8とCG9はスリットの中央部に設置
注2）π8～π11はスリット中央部から30cm離れた位置に設置
注3）クリップゲージは以下の条件のとき、変位の符号を＋とした

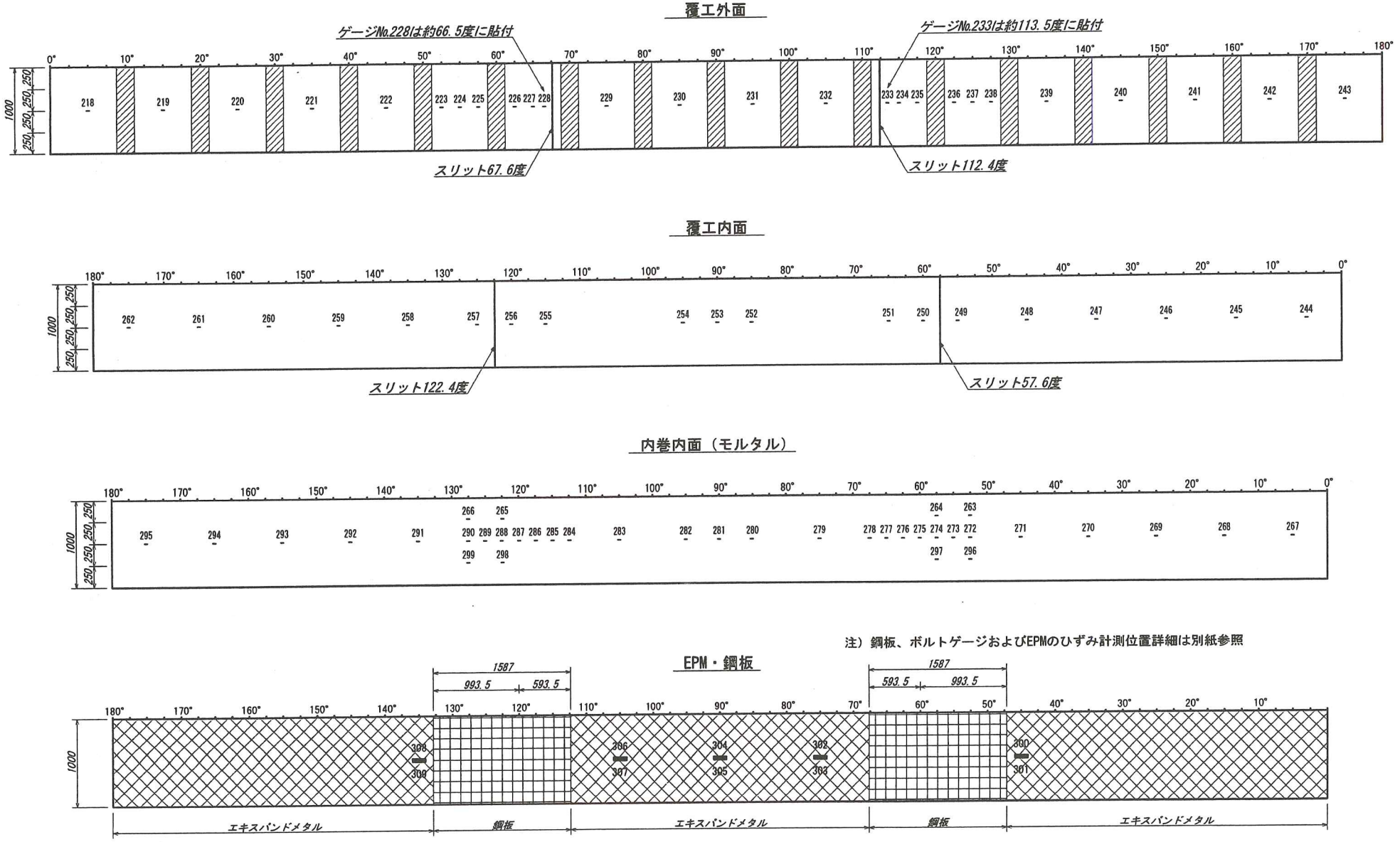
ⅰ）CG4は内巻側が時計方向に、または覆工側が反時計方向に変位したとき
ⅱ）CG8は天端側が時計方向に、または脚部側が反時計方向に変位したとき
ⅲ）CG9は天端側が反時計方向に、または脚部側が時計方向に変位したとき
ⅳ）上記以外は内巻側が脚部方向に、または覆工側が天端方向に変位したとき




KA2：パイゲージ・クリップゲージ設置位置図

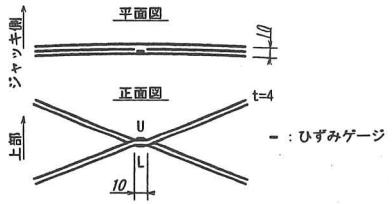



KA2：上面ひずみ計測位置図

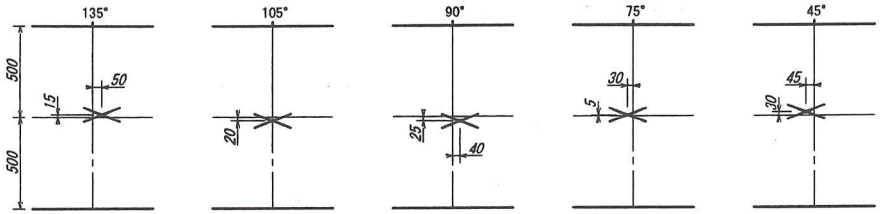



KA2：内外面ひずみ計測位置図

エｷｽﾊﾟﾝﾄﾞﾒﾀﾙｹﾞｰｼﾞ位置拡大図



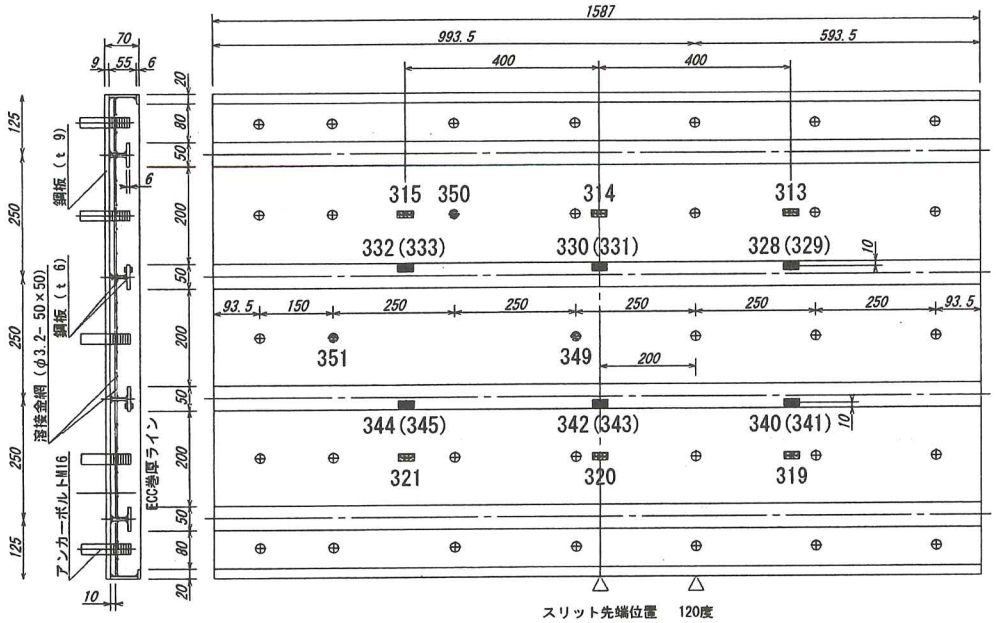

エキスパンドメタルひずみゲージ貼付位置詳細



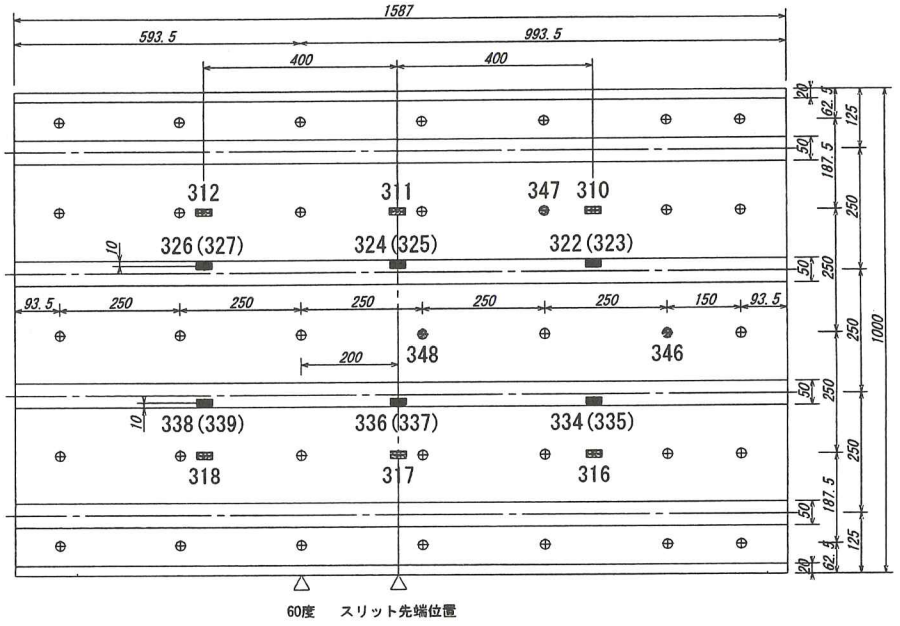

凡　例

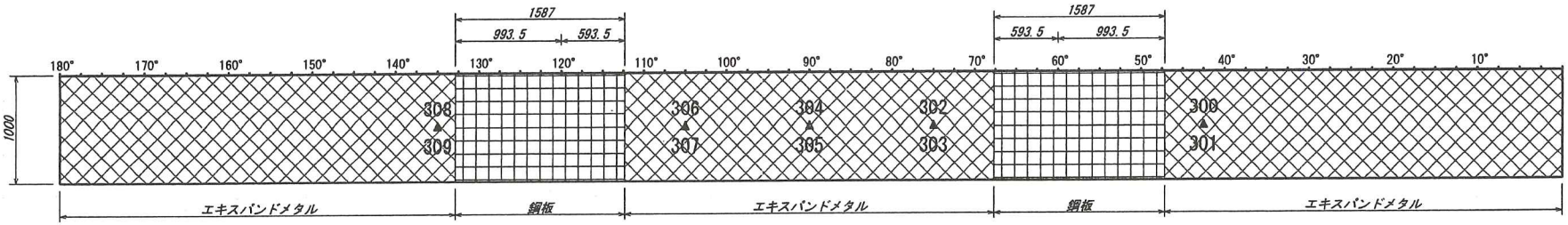
- ：鋼板のひずみゲージ（片面）
- ：フランジのひずみゲージ（両面）
- ：ボルトゲージによる軸力計測
- ▲：ＥＰＭひずみゲージ（両面）

120度側鋼板のひずみ計測位置拡大図




60度側鋼板のひずみ計測位置拡大図




KA2：ＥＰＭと鋼板のひずみ計測位置図

# KA2 載荷形式Ⅱ 計測位置

| | 位置 | 180 | 177.5 | 175 | 172.5 | 170 | 167.5 | 165 | 162.5 | 160 | 157.5 | 155 | 152.5 | 150 | 147.5 | 145 | 142.5 | 140 | 137.5 | 135 | 132.5 | 130 | 127.5 | 125 | 122.5 | 120 | 117.5 | 115 | 112.5 | 110 | 107.5 | 105 | 102.5 | 100 | 97.5 | 95 | 92.5 | 90 | 87.5 | 85 | 82.5 | 80 | 77.5 | 75 | 72.5 | 70 | 67.5 | 65 | 62.5 | 60 | 57.5 | 55 | 52.5 | 50 | 47.5 | 45 | 42.5 | 40 | 37.5 | 35 | 32.5 | 30 | 27.5 | 25 | 22.5 | 20 | 17.5 | 15 | 12.5 | 10 | 7.5 | 5 | 2.5 | 0 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 載荷ジャッキ(荷重制御) | 上 | | | | | ○ | | | | ○ | | | | ○

## 載荷実験進行表

## 載荷形式Ⅱ　KA2

| STEP | 制御圧力 (kgf/cm²) | 制御荷重 (kN) | ホース内圧力(kgf/cm²) 1ch | 2ch | 3ch | 4ch | 5ch | 6ch | ジャッキ1本当りの平均荷重 油圧換算値 (kN) | 荷重計 (kN) | 計測時刻 | 備考 荷重制御で全点載荷(ジャッキ34本) 載荷速度は1%/min(毎分3.5kgf/cm²)=4.2kN/min |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 10° 20° 30° | 40° 50° 60° | 70° 80° 90° | 100° 110° 120° | 130° 140° 150° | 160° 170° | | | | |
| 1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 9:17:45 | イニシャル計測。載荷速度は毎分4.2kN、載荷ピッチと計測ピッチは2.4kNで行う。便宜上、ひび割れ観察時の表記には制御荷重値を用いる。 |
| 2 | 6.0 | 7.2 | 6.1 | 6.6 | 6.8 | 6.5 | 6.4 | 6.7 | 7.8 | 5.3 | 9:33:32 | ジャッキストロークのみ再度イニシャル計測。 |
| 3 | 8.0 | 9.6 | 8.1 | 8.6 | 8.9 | 8.6 | 8.5 | 8.8 | 10.3 | 7.5 | 9:38:39 | |
| 4 | 10.0 | 12.0 | 10.1 | 10.6 | 10.8 | 10.5 | 10.4 | 10.7 | 12.7 | 9.6 | 9:42:04 | |
| 5 | 12.0 | 14.4 | 11.9 | 12.5 | 12.6 | 12.4 | 12.3 | 12.5 | 14.9 | 11.7 | 9:44:35 | |
| 6 | 14.0 | 16.8 | 14.0 | 14.5 | 14.6 | 14.4 | 14.4 | 14.6 | 17.3 | 14.1 | 9:49:05 | |
| 7 | 16.0 | 19.3 | 16.0 | 16.5 | 16.7 | 16.5 | 16.4 | 16.6 | 19.8 | 16.5 | 9:52:13 | 122.5° 覆工上面の内側スリット端部を起点に外面に向かってひび割れ発生。 |
| 8 | 18.0 | 21.7 | 17.9 | 18.4 | 18.6 | 18.4 | 18.3 | 18.4 | 22.1 | 18.7 | 9:55:18 | |
| 9 | 20.0 | 24.1 | 19.9 | 20.4 | 20.6 | 20.4 | 20.3 | 20.4 | 24.5 | 21.0 | 9:58:13 | |
| 10 | 22.0 | 26.5 | 21.9 | 22.5 | 22.6 | 22.5 | 22.4 | 22.4 | 26.9 | 23.5 | 10:03:12 | 119° 覆工上面の外面側にひび割れ発生。 |
| 11 | 24.0 | 28.9 | 23.7 | 24.3 | 24.4 | 24.2 | 24.2 | 24.2 | 29.1 | 25.5 | 10:05:17 | |
| 12 | 26.0 | 31.3 | 25.7 | 26.3 | 26.4 | 26.3 | 26.2 | 26.2 | 31.5 | 28.0 | 10:08:41 | |
| 13 | 28.0 | 33.7 | 27.7 | 28.3 | 28.3 | 28.3 | 28.2 | 28.3 | 33.9 | 30.5 | 10:12:17 | |
| 14 | 30.0 | 36.1 | 29.8 | 30.4 | 30.3 | 30.3 | 30.2 | 30.3 | 36.4 | 32.8 | 10:15:32 | これより載荷と計測は4.8kNピッチで行う。 |
| 15 | 34.0 | 40.9 | 33.6 | 34.2 | 34.1 | 34.2 | 34.1 | 34.1 | 41.0 | 37.3 | 10:19:59 | |
| 16 | 38.0 | 45.7 | 37.4 | 38.1 | 38.0 | 38.0 | 37.9 | 37.9 | 45.6 | 41.9 | 10:24:19 | |
| 17 | 42.0 | 50.5 | 41.5 | 42.1 | 42.0 | 42.0 | 42.0 | 41.8 | 50.4 | 46.8 | 10:28:34 | |
| 18 | 46.0 | 55.4 | 45.3 | 46.0 | 45.7 | 45.8 | 45.8 | 45.8 | 55.0 | 51.3 | 10:34:03 | |

## 載荷実験進行表

載荷形式Ⅱ　KA2

| STEP | 制御圧力 (kgf/cm²) | 制御荷重 (kN) | ホース内圧力(kgf/cm²) 1ch | 2ch | 3ch | 4ch | 5ch | 6ch | ジャッキ1本当りの平均荷重 油圧換算値 (kN) | 荷重計 (kN) | 計測時刻 | 備考 荷重制御で全点載荷(ジャッキ34本) 載荷速度は1%/min(毎分3.5kgf/cm²)=4.2kN/min |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 10° 20° 30° | 40° 50° 60° | 70° 80° 90° | 100° 110° 120° | 130° 140° 150° | 160° 170° | | | | |
| 19 | 50.0 | 60.2 | 49.3 | 49.9 | 49.8 | 49.8 | 49.8 | 49.7 | 59.8 | 56.2 | 10:37:56 | 119° 覆工上面の内側スリット面を起点に外面に向かってひび割れ発生。 |
| 20 | 54.0 | 65.0 | 53.1 | 53.8 | 53.5 | 53.7 | 53.6 | 53.5 | 64.4 | 60.8 | 10:43:16 | |
| 21 | 58.0 | 69.8 | 57.0 | 57.7 | 57.2 | 57.6 | 57.5 | 57.4 | 69.1 | 65.3 | 10:46:59 | |
| 22 | 62.0 | 74.6 | 61.1 | 61.7 | 61.1 | 61.6 | 61.5 | 61.4 | 73.9 | 70.1 | 10:51:29 | |
| 23 | 66.0 | 79.4 | 64.9 | 65.6 | 65.1 | 65.5 | 65.4 | 65.2 | 78.6 | 74.8 | 10:55:37 | 57.5° 覆工上面の内側スリット端部を起点に外面に向かってひび割れ発生。 |
| 24 | 70.0 | 84.2 | 68.9 | 69.5 | 69.0 | 69.5 | 69.4 | 69.2 | 83.3 | 79.6 | 11:01:01 | |
| 25 | 74.0 | 89.1 | 72.8 | 73.4 | 72.9 | 73.4 | 73.2 | 73.2 | 88.0 | 84.3 | 11:06:03 | |
| 26 | 78.0 | 93.9 | 76.7 | 77.2 | 76.7 | 77.2 | 77.1 | 76.9 | 92.6 | 88.9 | 11:10:26 | |
| 27 | 82.0 | 98.7 | 80.7 | 81.2 | 80.6 | 81.3 | 81.1 | 80.9 | 97.4 | 93.9 | 11:15:41 | |
| 28 | 86.0 | 103.5 | 84.5 | 85.1 | 84.4 | 85.1 | 84.9 | 84.6 | 102.0 | 98.5 | 11:20:01 | |
| 29 | 90.0 | 108.3 | 88.6 | 89.1 | 88.4 | 89.1 | 89.0 | 88.5 | 106.8 | 103.5 | 11:26:22 | |
| 30 | 94.0 | 113.1 | 92.4 | 92.9 | 92.1 | 92.9 | 92.9 | 92.3 | 111.4 | 108.2 | 11:29:45 | |
| 31 | 98.0 | 117.9 | 96.2 | 96.8 | 95.9 | 96.8 | 96.7 | 96.3 | 116.1 | 112.8 | 11:33:41 | 73° 覆工上面から外面にかけてのひび割れ発生。 |
| 32 | 102.0 | 122.8 | 100.3 | 100.8 | 99.9 | 100.9 | 100.7 | 100.2 | 120.9 | 117.6 | 11:39:14 | 115° 覆工上面から外面にかけてのひび割れ発生。 |
| 33 | 106.0 | 127.6 | 104.1 | 104.7 | 103.8 | 104.7 | 104.6 | 104.1 | 125.6 | 122.2 | 11:44:13 | CG8の計測はここまで。(取り付け冶具が限界に達する) |
| 34 | 110.0 | 132.4 | 108.2 | 108.8 | 107.8 | 108.8 | 108.7 | 108.2 | 130.5 | 127.2 | 11:48:27 | |
| 35 | 114.0 | 137.2 | 112.1 | 112.6 | 111.5 | 112.6 | 112.6 | 112.0 | 135.1 | 131.7 | 11:52:10 | O-50-57.5° のひずみが-2000 $\mu\varepsilon$ を超える。 |
| 36 | 118.0 | 142.0 | 116.1 | 116.6 | 115.5 | 116.7 | 116.6 | 116.0 | 139.9 | 136.6 | 11:55:06 | |
| 37 | 122.0 | 146.8 | 120.0 | 120.5 | 119.3 | 120.5 | 120.5 | 119.8 | 144.5 | 141.2 | 11:58:17 | |

載荷実験進行表　　載荷形式Ⅱ　KA2

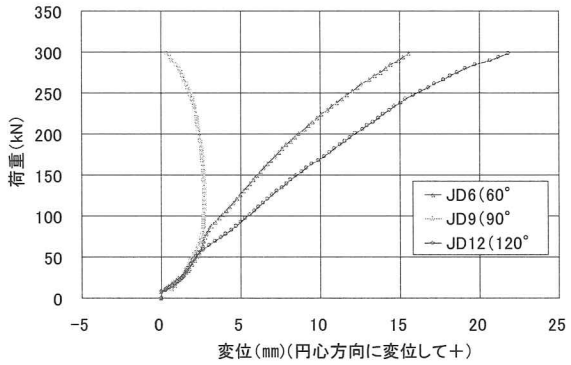
| STEP | 制御圧力 (kgf/cm²) | 制御荷重 (kN) | ホース内圧力(kgf/cm²) 1ch 10° 20° 30° | 2ch 40° 50° 60° | 3ch 70° 80° 90° | 4ch 100° 110° 120° | 5ch 130° 140° 150° | 6ch 160° 170° | ジャッキ1本当りの平均荷重 油圧換算値 (kN) | 荷重計 (kN) | 計測時刻 | 備考 荷重制御で全点載荷(ジャッキ34本) 載荷速度は1%/min(毎分3.5kgf/cm²)=4.2kN/min |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 38 | 126.0 | 151.6 | 123.9 | 124.3 | 123.0 | 124.4 | 124.3 | 123.5 | 149.1 | 145.8 | 12:02:00 | 57.5° と122.5° ECC内面にひび割れ発生。 |
| 39 | 130.0 | 156.4 | 127.8 | 128.3 | 127.1 | 128.4 | 128.4 | 127.5 | 153.9 | 150.7 | 12:09:42 | |
| 40 | 134.0 | 161.3 | 131.7 | 132.2 | 130.7 | 132.3 | 132.2 | 131.1 | 158.5 | 155.4 | 12:14:38 | |
| 41 | 138.0 | 166.1 | 135.7 | 136.2 | 134.7 | 136.3 | 136.3 | 135.0 | 163.3 | 160.2 | 12:21:42 | 70° ～90° 覆工外面にひび割れ発生。 |
| 42 | 142.0 | 170.9 | 139.6 | 140.0 | 138.5 | 140.2 | 140.1 | 138.9 | 167.9 | 164.9 | 12:32:42 | 90° ～105° 覆工外面にひび割れ発生。 |
| 43 | 146.0 | 175.7 | 143.4 | 143.9 | 142.2 | 144.0 | 144.0 | 142.6 | 172.5 | 169.7 | 12:46:57 | 上面 124° から123° の覆工コンクリートと接着剤の境界にひび割れ発生。 |
| 44 | 150.0 | 180.5 | 147.4 | 147.9 | 146.1 | 148.0 | 148.1 | 146.4 | 177.3 | 174.5 | 12:55:51 | |
| 45 | 154.0 | 185.3 | 151.3 | 151.7 | 149.9 | 151.9 | 151.9 | 150.3 | 181.9 | 179.2 | 13:01:33 | 57.5° 覆工上面のひび割れは外面近くまで進展。<br>上面 56° から54° の覆工コンクリートと接着剤の境界にひび割れ発生。 |
| 46 | 158.0 | 190.1 | 155.3 | 155.7 | 153.8 | 156.0 | 155.9 | 154.2 | 186.7 | 184.0 | 13:10:15 | |
| 47 | 162.0 | 195.0 | 159.1 | 159.6 | 157.6 | 159.8 | 159.7 | 158.0 | 191.3 | 188.6 | 13:16:51 | |
| 48 | 166.0 | 199.8 | 163.0 | 163.4 | 161.3 | 163.7 | 163.6 | 161.7 | 195.9 | 193.3 | 13:24:14 | |
| 49 | 170.0 | 204.6 | 167.0 | 167.4 | 165.3 | 167.7 | 167.6 | 165.7 | 200.7 | 198.1 | 13:30:13 | |
| 50 | 174.0 | 209.4 | 170.8 | 171.3 | 169.0 | 171.5 | 171.4 | 169.6 | 205.3 | 202.7 | 13:44:16 | |
| 51 | 178.0 | 214.2 | 174.8 | 175.3 | 173.0 | 175.5 | 175.5 | 173.6 | 210.1 | 207.5 | 13:50:08 | |
| 52 | 182.0 | 219.0 | 178.7 | 179.1 | 176.7 | 179.4 | 179.3 | 177.4 | 214.7 | 212.1 | 13:56:22 | |
| 53 | 186.0 | 223.8 | 182.5 | 182.9 | 180.5 | 183.2 | 183.2 | 181.2 | 219.3 | 216.6 | 14:02:23 | |
| 54 | 190.0 | 228.7 | 186.4 | 186.9 | 184.3 | 187.2 | 187.1 | 185.1 | 224.0 | 221.3 | 14:04:07 | 次ステップよりひび割れ観察は1回置きに行う。 |
| 55 | 194.0 | 233.5 | 190.4 | 190.7 | 188.1 | 191.0 | 191.0 | 188.8 | 228.7 | 226.1 | 14:12:27 | |
| 56 | 198.0 | 238.3 | 194.3 | 194.8 | 192.1 | 195.1 | 195.0 | 192.7 | 233.5 | 230.8 | 14:14:14 | CG9の計測はここまで。(容量を超える) |

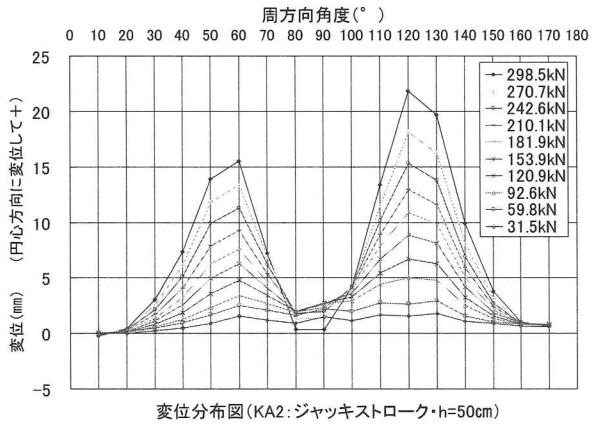
載荷実験進行表　　載荷形式Ⅱ　KA2

| STEP | 制御圧力 (kgf/cm²) | 制御荷重 (kN) | ホース内圧力(kgf/cm²) 1ch | 2ch | 3ch | 4ch | 5ch | 6ch | ジャッキ1本当りの平均荷重 油圧換算値 (kN) | 荷重計 (kN) | 計測時刻 | 備考 荷重制御で全点載荷(ジャッキ34本) 載荷速度は1%/min(毎分3.5kgf/cm²)=4.2kN/min |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 10° 20° 30° | 40° 50° 60° | 70° 80° 90° | 100° 110° 120° | 130° 140° 150° | 160° 170° | | | | |
| 57 | 202.0 | 243.1 | 198.2 | 198.6 | 195.9 | 198.8 | 198.9 | 196.5 | 238.1 | 235.4 | 14:19:50 | |
| 58 | 206.0 | 247.9 | 202.0 | 202.4 | 199.6 | 202.7 | 202.7 | 200.3 | 242.6 | 239.9 | 14:21:30 | 上面覆工コンクリートと接着剤の境界に生じたひび割れは56° を起点に50° まで進展。 |
| 59 | 210.0 | 252.7 | 206.0 | 206.4 | 203.6 | 206.7 | 206.7 | 204.2 | 247.4 | 244.7 | 14:26:44 | |
| 60 | 214.0 | 257.5 | 209.9 | 210.2 | 207.4 | 210.5 | 210.5 | 208.0 | 252.0 | 249.4 | 14:32:20 | |
| 61 | 218.0 | 262.4 | 213.9 | 214.2 | 211.3 | 214.5 | 214.5 | 212.0 | 256.8 | 254.1 | 14:36:03 | |
| 62 | 222.0 | 267.2 | 217.7 | 218.0 | 215.1 | 218.3 | 218.3 | 215.8 | 261.4 | 258.5 | 14:37:50 | ひび割れ観察はここまで。 |
| 63 | 226.0 | 272.0 | 221.5 | 221.8 | 218.8 | 222.1 | 222.2 | 219.6 | 266.0 | 263.4 | 14:43:06 | |
| 64 | 230.0 | 276.8 | 225.5 | 225.8 | 222.8 | 226.1 | 226.1 | 223.5 | 270.7 | 268.2 | 14:44:49 | |
| 65 | 234.0 | 281.6 | 229.3 | 229.6 | 226.6 | 230.0 | 229.9 | 227.3 | 275.3 | 272.8 | 14:47:04 | UI-50-75° のひずみが-2000μεを超える。 |
| 66 | 238.0 | 286.4 | 233.2 | 233.6 | 230.6 | 233.9 | 233.9 | 231.2 | 280.1 | 277.6 | 14:48:48 | UI-50-85° とUI-50-95° のひずみが-2000μεを超える。 |
| 67 | 242.0 | 291.2 | 237.0 | 237.4 | 234.3 | 237.7 | 237.7 | 235.0 | 284.6 | 282.2 | 14:50:34 | |
| 68 | 246.0 | 296.1 | 241.0 | 241.4 | 238.2 | 241.7 | 241.7 | 238.9 | 289.4 | 287.2 | 14:55:49 | O-50-57.5° 、I-50-120° およびUI-50-105° のひずみが-2000μεを超える。 |
| 69 | 250.0 | 300.9 | 244.8 | 245.1 | 242.0 | 245.4 | 245.5 | 242.6 | 293.9 | 291.5 | 14:57:32 | |
| 70 | 254.0 | 305.7 | 248.6 | 248.9 | 245.8 | 249.3 | 249.1 | 246.4 | 298.5 | 296.0 | 14:59:25 | 載荷中に120° 近傍で断続的に"パチパチ"という音有り。 |
| 71 | - | | 13.4 | 8.8 | 7.2 | 5.6 | 7.7 | 14.4 | 11.5 | 13.5 | 15:00:12 | ステップ70の計測終了と同時に荷重が急激に落ちる。荷重低下直後に計測。ポンプを停止。実験終了。<br>(122.5° ～132.5° の鋼板が剥離し、132.5° でECCが破断する。) |

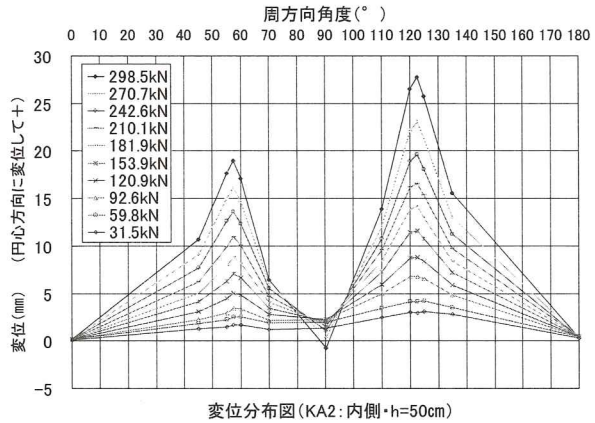
荷重－変位

KA2：60度/90度/120度ｼﾞｬｯｷｽﾄﾛｰｸ（50cm高さ）



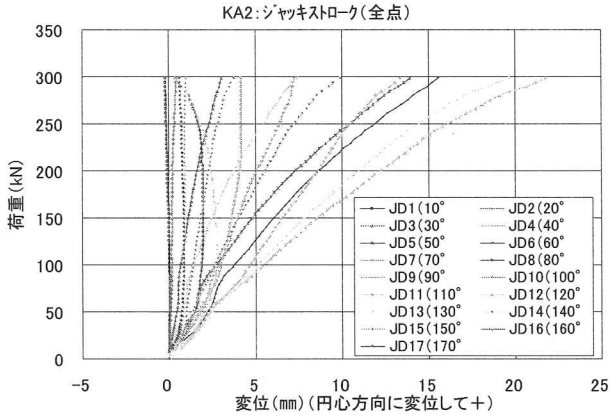

変位分布図（KA2：ジャッキストローク・h=50cm）




変位分布図（KA2：内側・h=50cm）

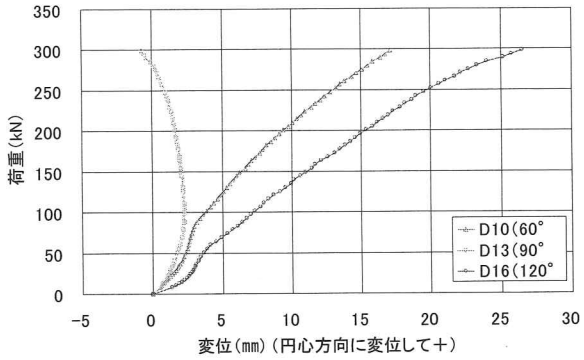
荷重－変位

KA2：ｼﾞｬｯｷｽﾄﾛｰｸ（全点）



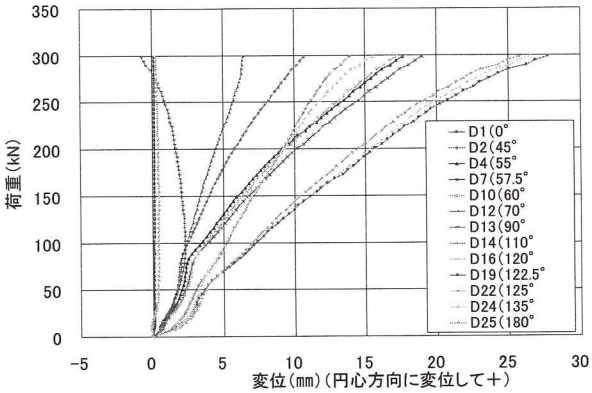
荷重－変位

KA2：60度/90度/120度内側変位（50cm高さ）



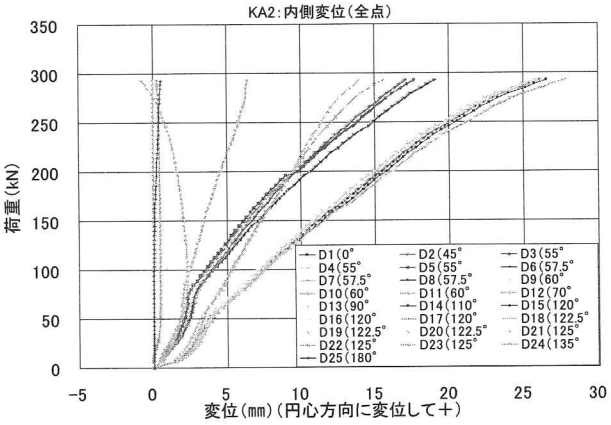

荷重－変位

KA2：内側変位（50cm高さ）



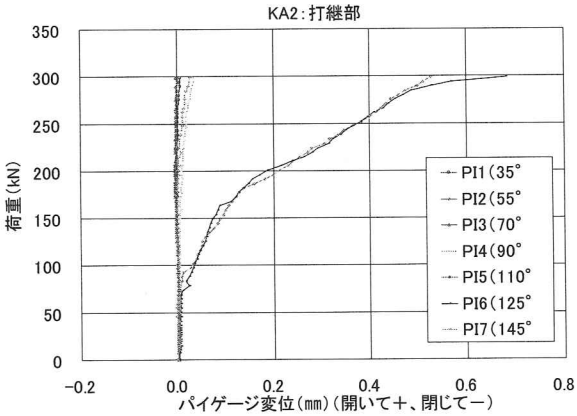

荷重－変位

KA2：内側変位（全点）



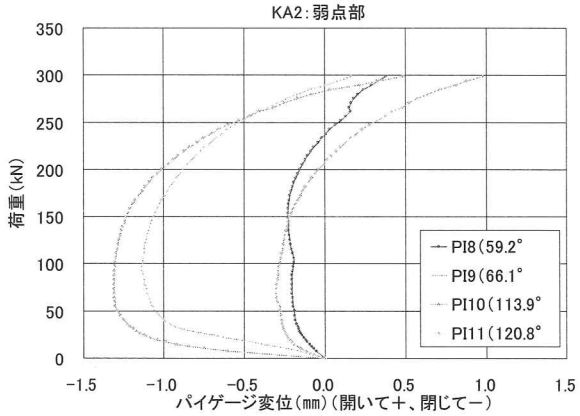

荷重－パイゲージ変位

KA2：打継部



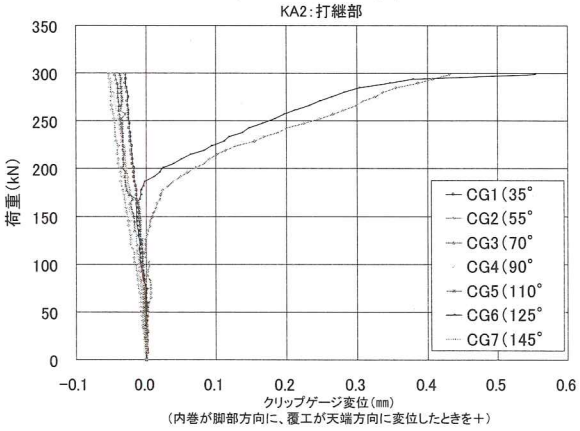
荷重ーパイゲージ変位

KA2：弱点部



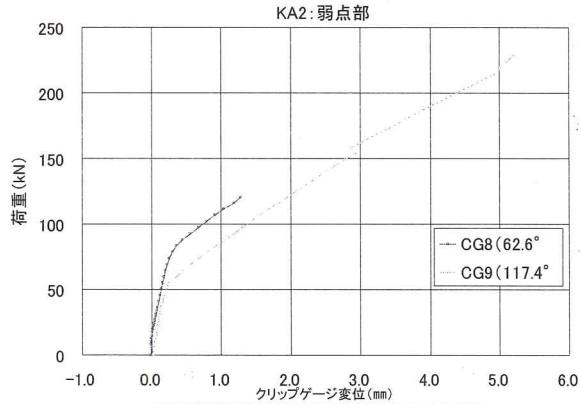

荷重ークリップゲージ変位

KA2：打継部



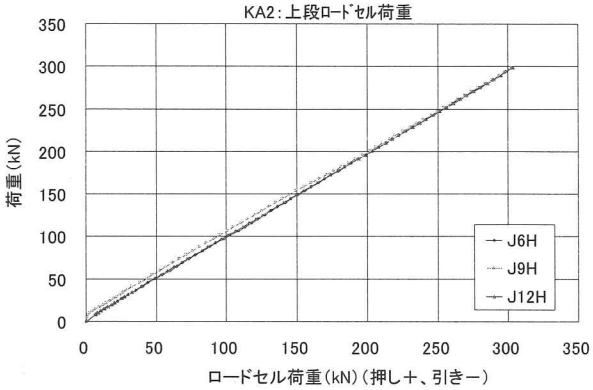

荷重ークリップゲージ変位

KA2：弱点部



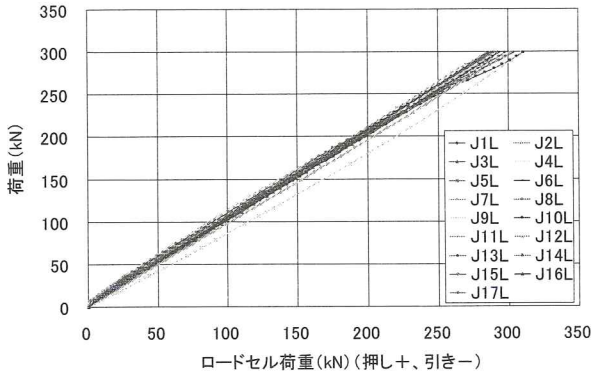

荷重ー荷重

KA2：上段ﾛｰﾄﾞｾﾙ荷重



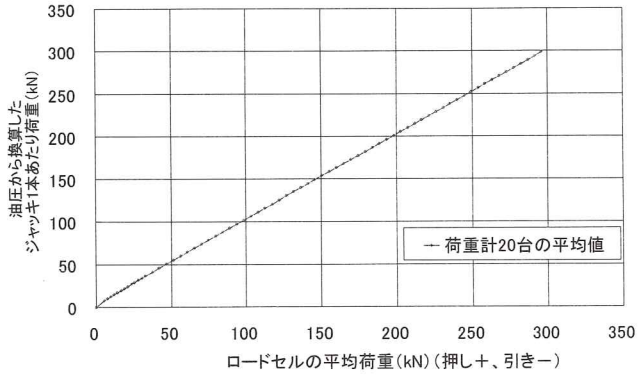
荷重ー荷重

KA2：下段ﾛｰﾄﾞｾﾙ荷重



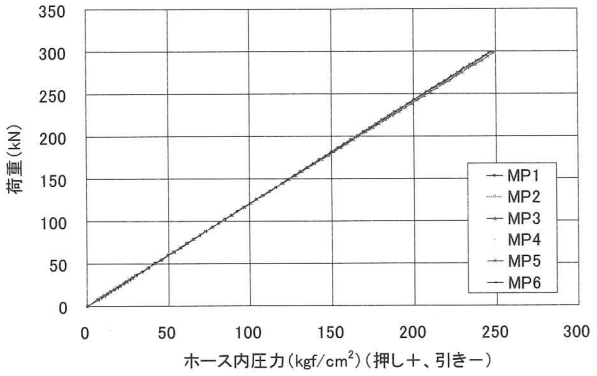

荷重ー荷重

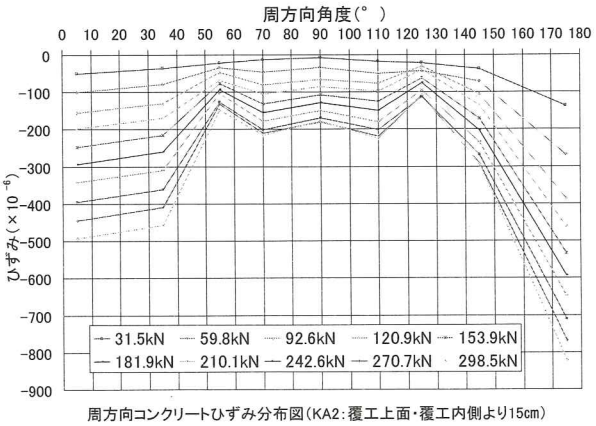
KA2：ﾛｰﾄﾞｾﾙの荷重平均値



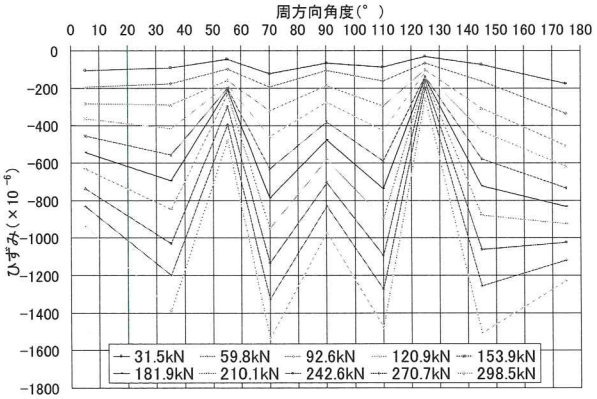

荷重ー圧力

KA2：ホース内圧力

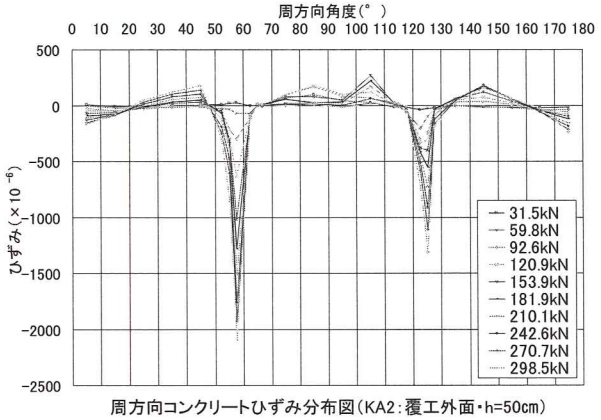


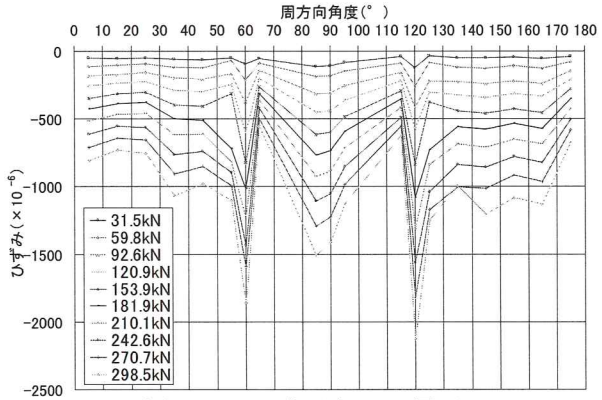

周方向コンクリートひずみ分布図（KA2：覆工上面・覆工内側より15cm）



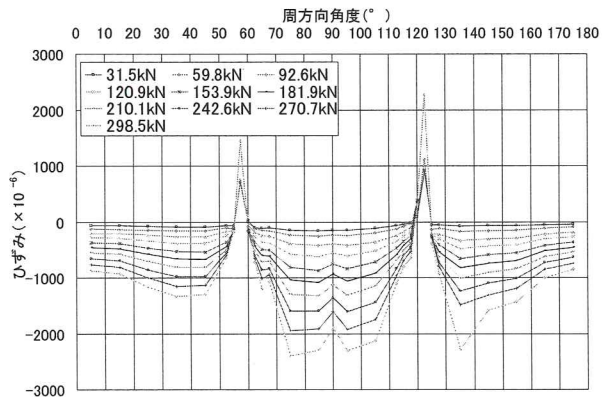

周方向コンクリートひずみ分布図(KA2:内巻上面・覆工内側より3.5cm)




周方向コンクリートひずみ分布図(KA2:覆工外面・h=50cm)



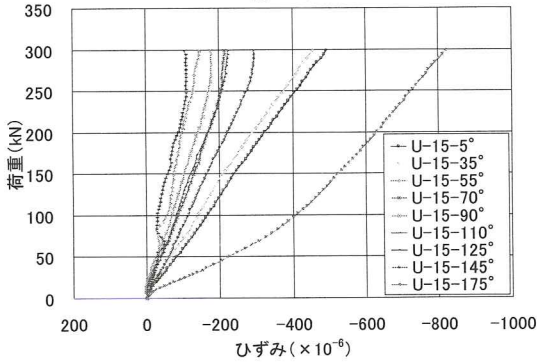

周方向コンクリートひずみ分布図(KA2:覆工内面・h=50cm)




周方向コンクリートひずみ分布図(KA2:内巻内面・h=50cm)

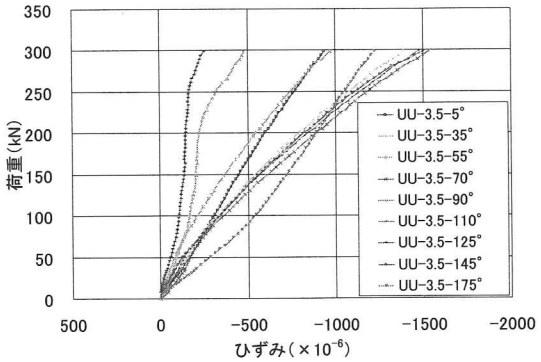
荷重-コンクリートひずみ

KA2：覆工上面・15cm



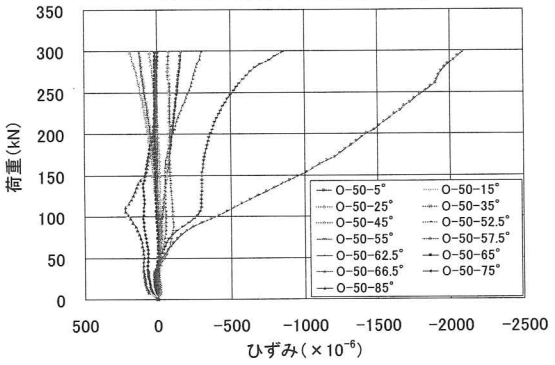

荷重-コンクリートひずみ

KA2：内巻上面・3.5cm



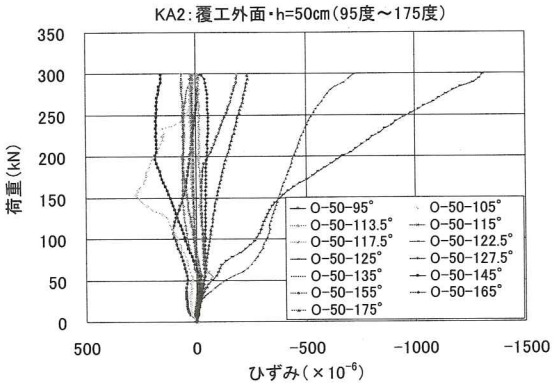

荷重-コンクリートひずみ

KA2：覆工外面・h=50cm（5度～85度）



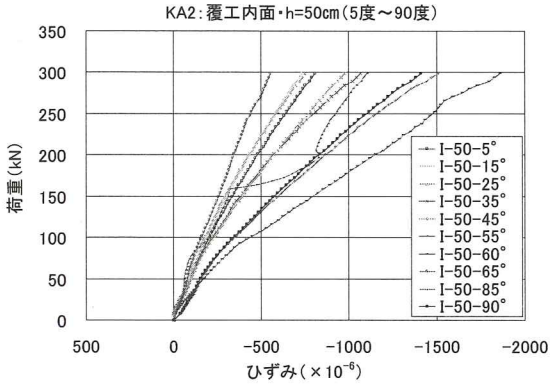

荷重-コンクリートひずみ

KA2：覆工外面・h=50cm（95度～175度）



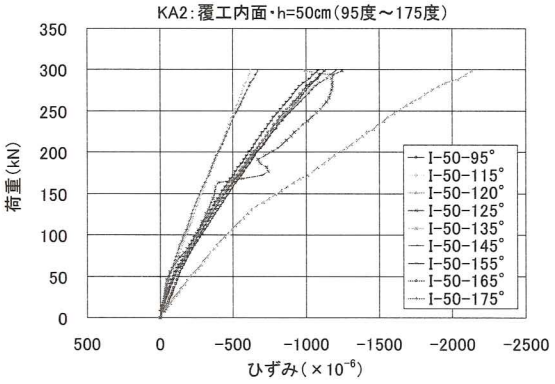
荷重-コンクリートひずみ

KA2：覆工内面・h=50cm（5度～90度）



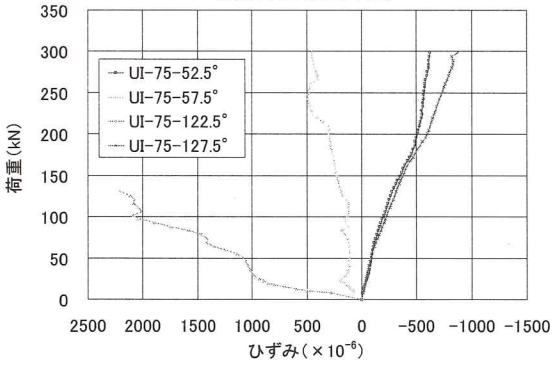

荷重-コンクリートひずみ

KA2：覆工内面・h=50cm（95度～175度）



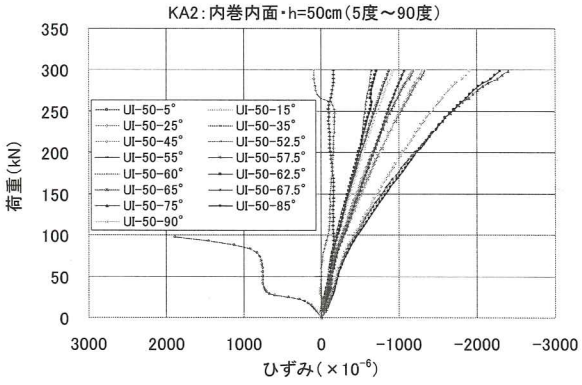

荷重-コンクリートひずみ

KA2：内巻内面・h=75cm

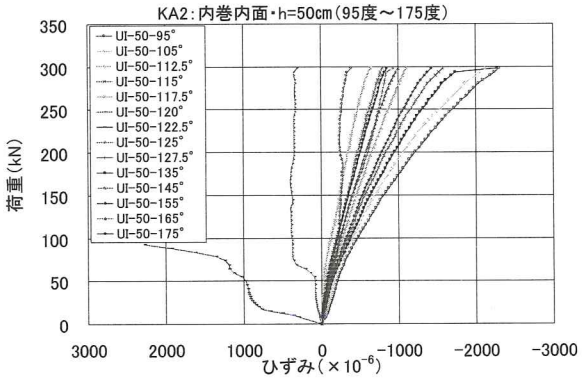



荷重-コンクリートひずみ

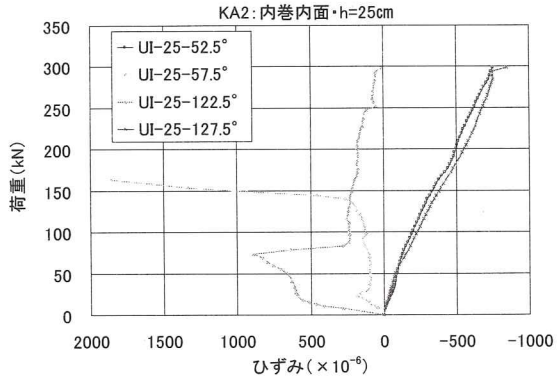
KA2：内巻内面・h=50cm（5度～90度）



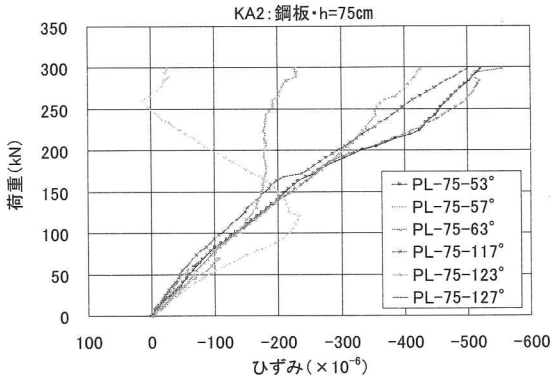
荷重-コンクリートひずみ



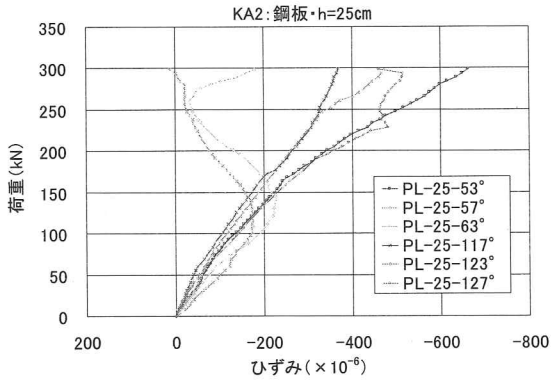

荷重-コンクリートひずみ




荷重-ひずみ

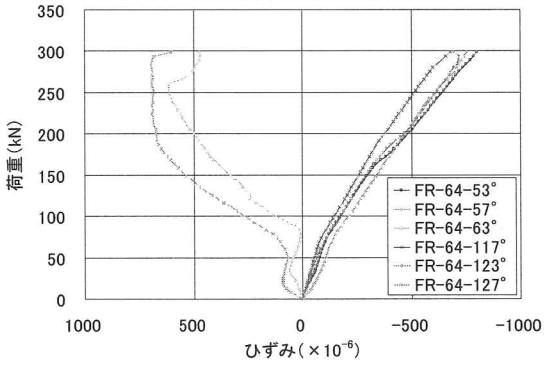



荷重-ひずみ



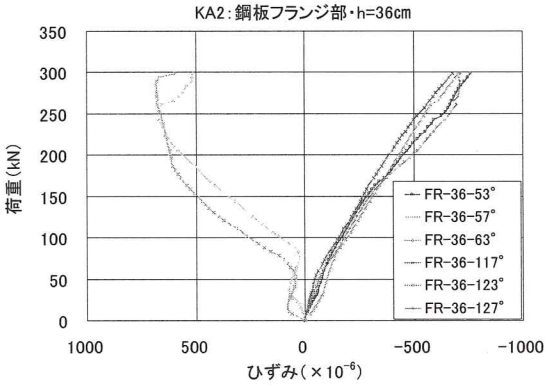
荷重-ひずみ

KA2：鋼板フランジ部・h=64cm



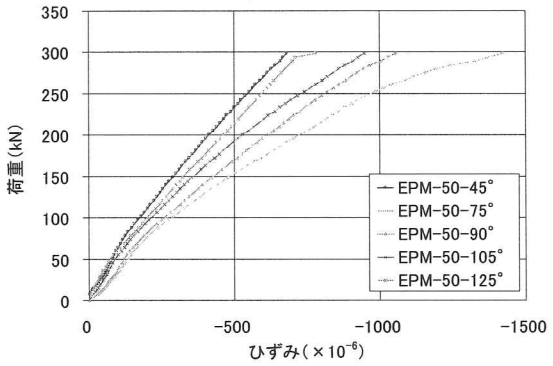

荷重-ひずみ

KA2：鋼板フランジ部・h=36cm



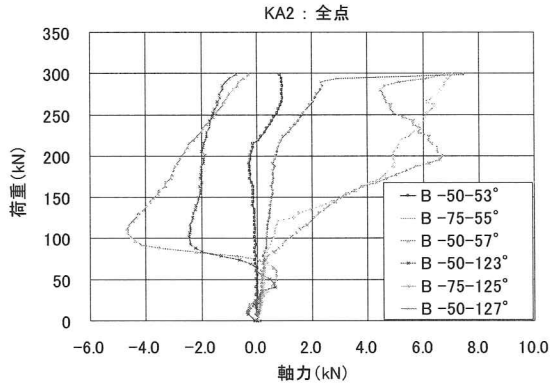

荷重-ひずみ

KA2：エキスパンドメタル・h=50cm




荷重-ボルトゲージ軸力

KA2 ： 全点



参考資料 4

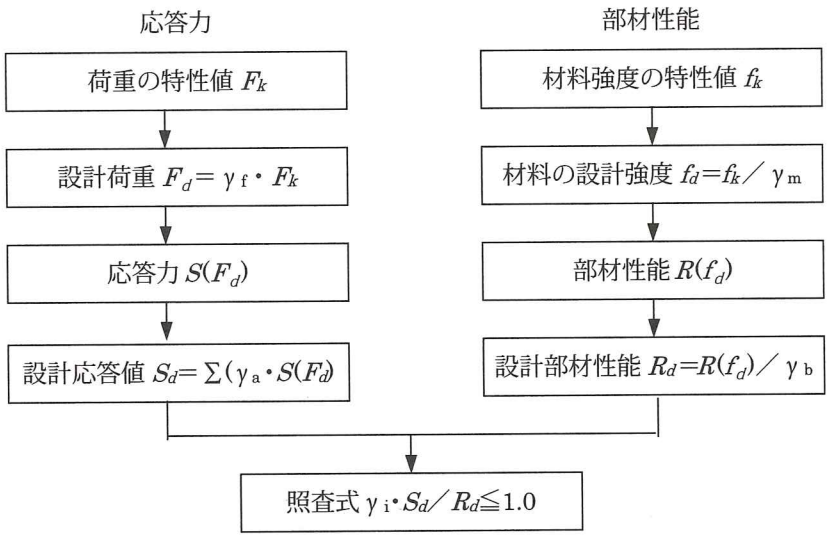
# 断面計算の考え方および載荷形式Ⅱの FEM 解析

1．断面計算

1．1　限界状態設計法の考え方

近年，トンネル覆工においても限界状態設計法の考え方が取り入れられてきている。限界状態設計法の考え方では，覆工の耐荷力（終局限界）に対する検討を，コンクリートの断面破壊に対する照査により行うこととされている。参 図－4.1 に終局限界状態に対する検討のフローを示す。終局限界状態に対する検討のフローでは，設計部材性能 $R_d$（部材断面耐力）が設計応答値 $S_d$ に対して参 図-4.1 の照査式を満足する必要がある。

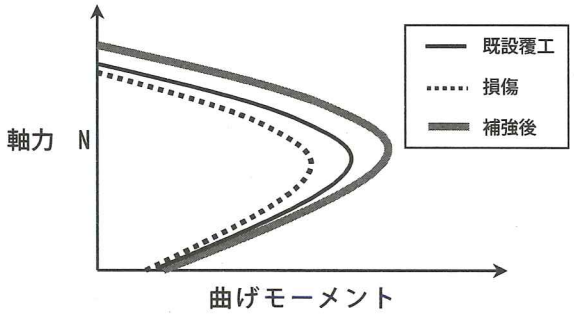
ここで，自重の違いはあるものの，荷重の特性値を補強前後で同等と考えると，補強後の設計部材性能を $R_{d\text{-}ECC}$，既設覆工の設計部材性能を $R_{d\ PLANE}$ とすると，$R_{d\text{-}ECC}$ が $R_{d\ PLANE}$ を上回れば良いと考えることもできる。




ここで，$\gamma_f$：荷重係数，$\gamma_a$：構造解析係数，$\gamma_m$：材料係数，$\gamma_b$：部材係数

参 図－4．1　終局限界状態に対する検討のフロー

補強後の部材断面耐力は，曲げ卓越型の損傷に対しては，ECC の材料特性を考慮した断面計算により求めた M-N 曲線などにより評価できる。参 図－4.2 に M-N 曲線での評価のイメージを示す。補強後の M-N 曲線が，既設覆工の M-N 曲線を包括する，すなわち，いずれの軸力に対しても補強後の曲げ耐力が大きくなることを目標とする。しかしながら，既設覆工の損傷状態を正確に評価する手法については，トンネル覆工という観点からは十分なデータがないため，今後の詳細な検討が必要である。現段階としては，圧縮損傷した部分は寄与しないとして，断面性能を算出することで概ね安全側になると考えられる。



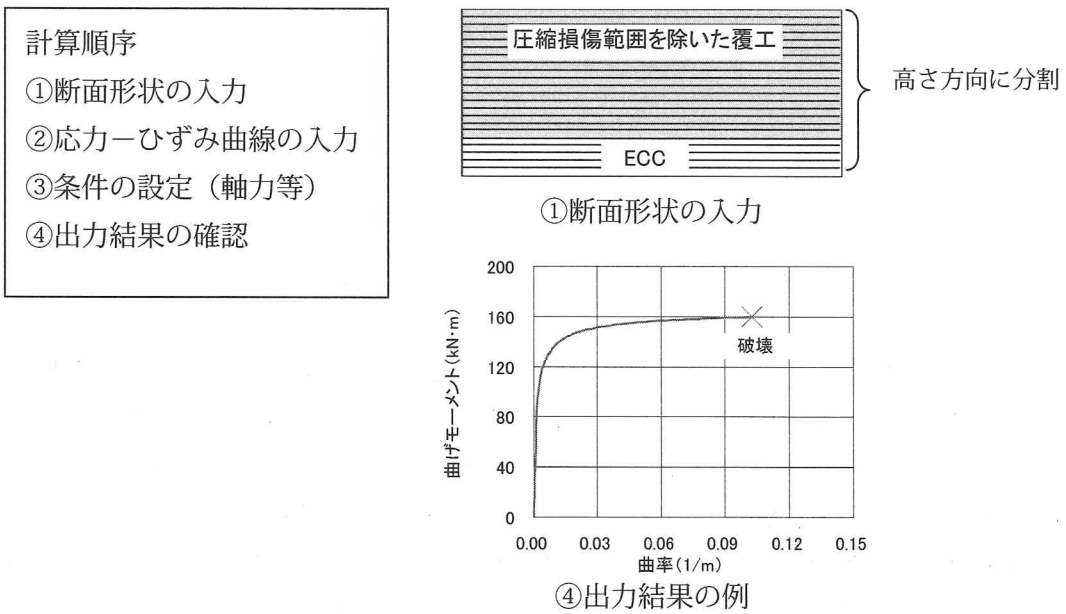

参　図－４．２　M-N 曲線での評価のイメージ

また，既設覆工にずれが生じて，界面のせん断伝達が全く期待できないような場合には，平面保持の仮定が成立しないために M-N 曲線を用いた評価は適用できない。この場合，ひび割れ部へのひび割れ注入工を併用して界面のせん断伝達を向上させて曲げ卓越型とすることにより，上記と同様の考え方が適用できるものと考えられる。さらに，必要に応じて局部的に鋼板で補強することで適用可能である。

## １．２　断面計算方法

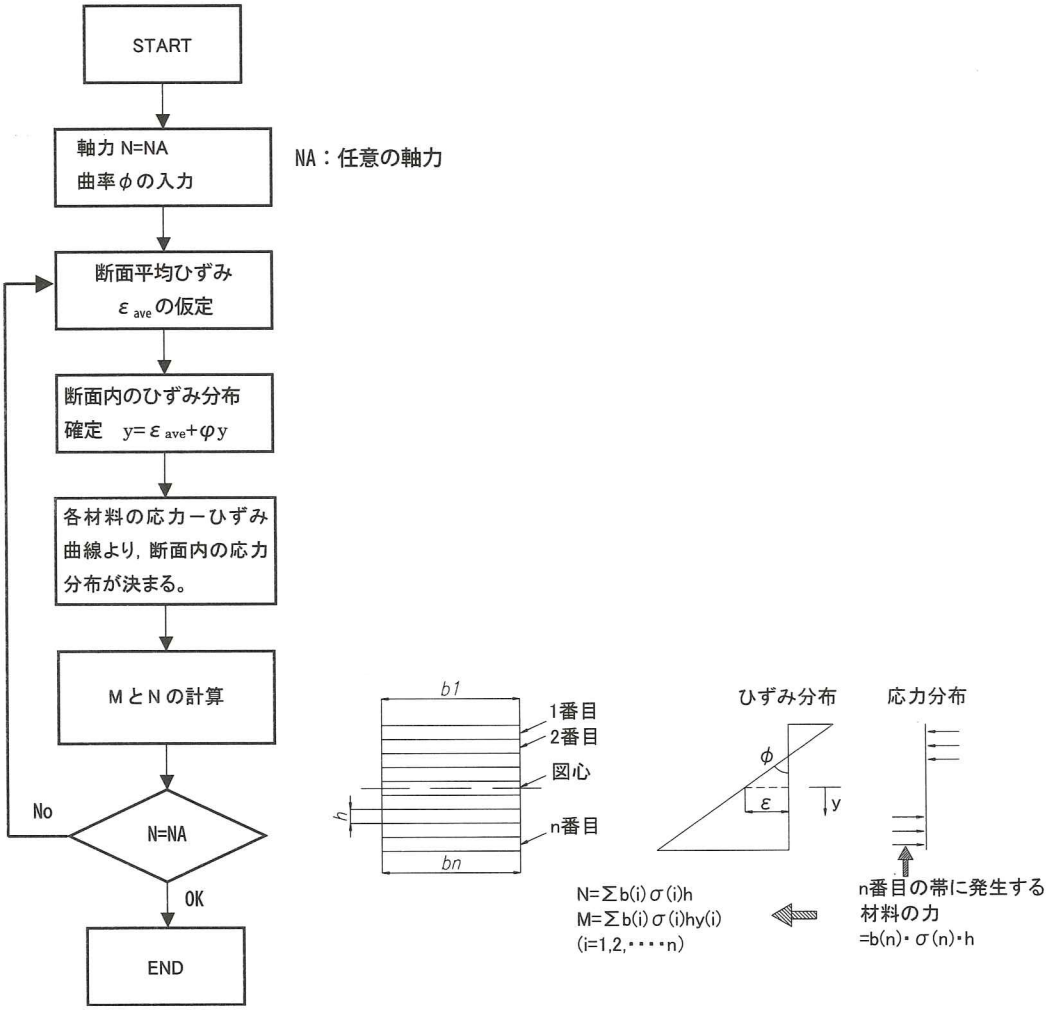
### （１）概要

補強後の部材断面耐力の評価方法として，ファイバーモデルによる耐力算定の流れを参図－4.3 に示す。計算は単位幅（1m）で行うことを基本とする。断面の分割数は解析の精度に影響するが，高さ方向に 50 分割程度とする。ファイバーモデルを用いた計算は，市販の M－φ（曲げモーメント－曲率）計算プログラムなどを使用する。



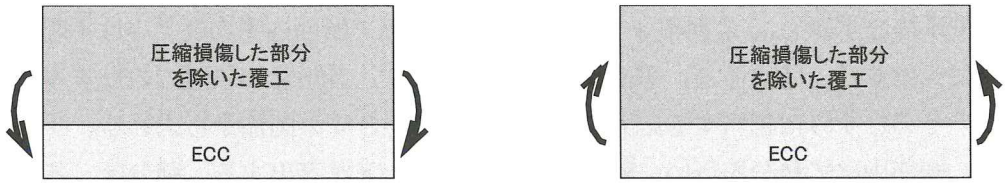

参　図－４．３　ファイバーモデルによる耐力算定の流れ

ファイバーモデルの考え方を参 図－4.4 に示す。①対象となる断面を縦方向に n 個の短冊（ファイバー）に分割し，それぞれの位置での幅 b を求める。幅 b は，矩形断面の場合は一定である。②次に軸力（NA）を設定して，入力した断面形状において図心位置を算出し，断面内平均ひずみ $\varepsilon_{ave}$ と曲率 $\phi$ を決める。この段階で断面内平均ひずみは不明であるので適当に入力する。③すると，平面保持の仮定により，各短冊の位置でのひずみが確定するので，そのひずみに相当する応力を，各材料の応力ひずみ関係から求める。④求まった応力を，断面内にて積分を行い，軸力と曲げモーメントを算出する。積分は，各短冊内では応力とひずみは一定と仮定して算出する。ここで算出された軸力が初めに設定した軸力（NA）と比較して十分な精度で等しければ計算は終了し，異なっていれば断面平均ひずみを設定し直して収束するまで繰り返す。この手法はコンピュータの発達した現代においては，特に労力を要することなくできるようになっている。ここでは，各段階の曲率について曲げモーメントを算出し，最終的に覆工または ECC が破壊に至るまで計算を行う。さらに，各軸力の曲げ耐力を計算することにより，M-N 曲線が求まる。




参　図－４．４　ファイバーモデルの考え方

ECCによる補強は，内空側からの補強になるため，補強後の断面性能は，参 図－4.5に示すように補強断面が圧縮になる場合と引張になる場合に分けて算出する。




①補強断面が引張になる場合　　②補強断面が圧縮になる場合

参　図－４．５　断面計算のパターン

（２）覆工の損傷度評価

覆工の損傷度の評価方法として確立したものはないため，損傷した部分の部材断面耐力については，簡易的には，圧縮損傷部分と引張損傷部分に分けて，以下のように仮定する。

・圧壊損傷部分

圧縮により損傷した部分（圧ざ等が発生している部分）は，部材断面耐力に寄与しない。

・引張損傷部分

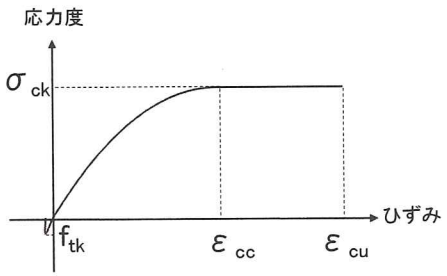
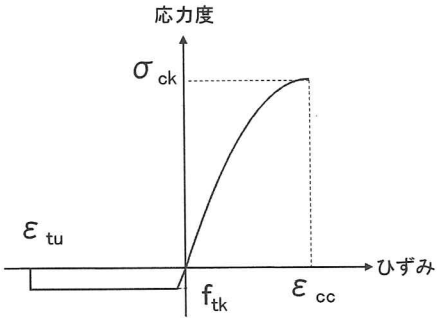
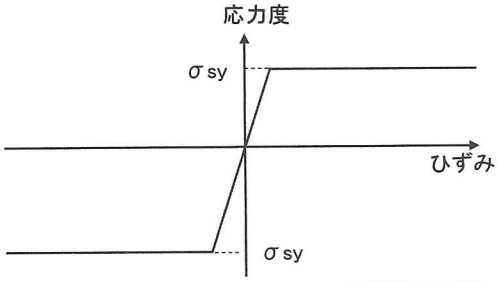
引張により損傷した部分（曲げひび割れ等が発生している部分）は，引張力は伝達できないが，圧縮力を伝達する。

（3）各材料の応力－ひずみ関係

断面計算を実施するにあたっては，各材料に適切な応力－ひずみ曲線を設定する。各材料の応力－ひずみ曲線の例を 参 表－4.1 に示す。なお，ECC は材料の特性上，長期強度の伸びが大きいため，管理材齢に応じた応力－ひずみ曲線を用いる。覆工についても十分な現地データがある場合にはその値を採用する。エキスパンドメタルなどの鋼材は，通常モデル化しないが，適切な継手等を採用して十分な定着を確保していれば，参 表－4.1 に示すような完全弾塑性でモデル化する。

なお，ECC の引張性能を考慮するためには，引張側の応力－ひずみ曲線を任意に設定できる解析ソフトを適用する必要がある。

参　表－4．1　断面計算に用いる応力－ひずみ曲線

| 項目 | 応力－ひずみ曲線 |
|---|---|
| 覆工 |  <br>（$\sigma_{ck}$：18N/mm²）<br>（$f_{tk}$：1.6N/mm²）<br>（$\varepsilon_{cc}$：2000×10⁻⁶）<br>（$\varepsilon_{cu}$：3500×10⁻⁶） |
| ECC |  <br>（$\sigma_{ck}$：35N/mm²）<br>（$\varepsilon_{cc}$：4000×10⁻⁶）<br>（$f_{tk}$：3.5N/mm²）<br>（$\varepsilon_{tu}$：5000×10⁻⁶） |
| 鋼材 |  |

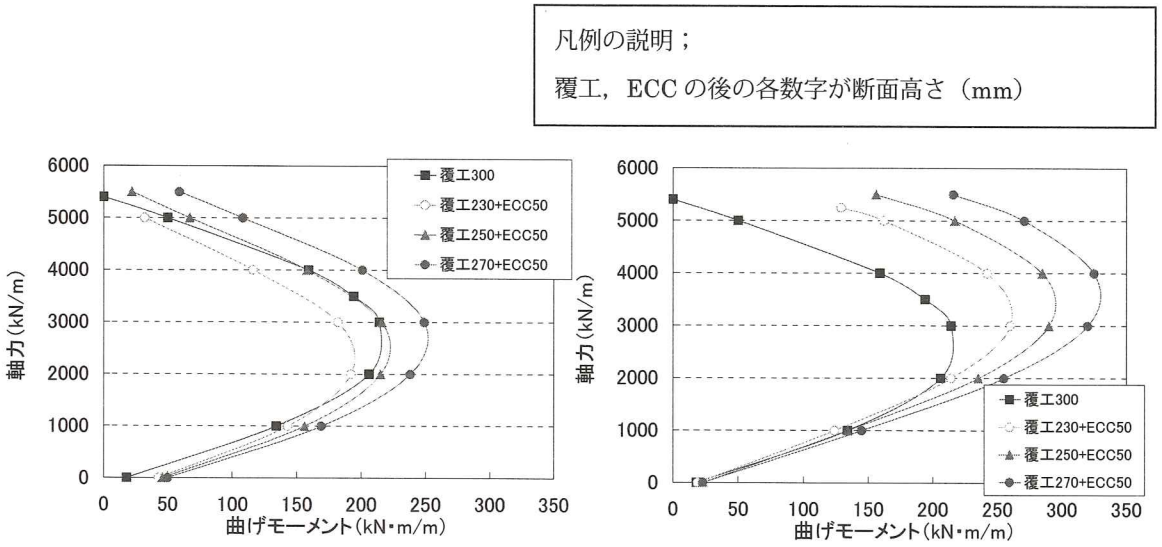
（　）内の数字は本検討で使用した値

（4）断面計算結果

覆工の損傷度を正確に評価するのは困難であるため，ここでは，圧縮損傷範囲を 30mm，50mm，70mm と仮定し，ECC を 50mm 吹き付けた断面計算の結果（M-N 曲線）を 参 図－4.6 に示す。

補強断面が引張になる場合は，ECC が引張力を負担するため，軸力の小さい範囲では，補強断面の部材断面耐力が大きい。軸力が一定の値を超えると，圧縮領域の増加により断面高さの影響が大きくなるため，圧縮損傷範囲 70mm では，補強後の部材断面耐力が覆工 30cm を下回る結果となった。

補強断面（内空側）が圧縮になる場合は，ECC の圧縮強度が覆工より高いため（今回の計算は $f'=35N/mm^2$ と設定），軸力が大きいほど，部材断面耐力の向上効果が顕著に現れる。




(a) 補強断面引張　　(b) 補強断面圧縮

参　図－4．6　M-N 曲線

（5）まとめ

本断面計算により、補強断面の部材断面耐力は，補強断面引張側における断面高さが支配的となり，ECC の吹付け厚さ 50mm で，圧縮損傷範囲 50mm までは無垢の覆工の部材断面耐力を上回る解析結果となった。

## ２．載荷形式Ⅱの解析

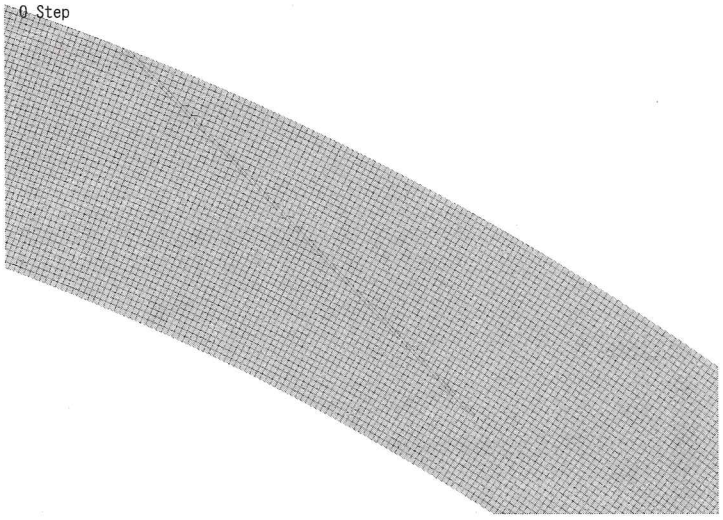
### ２．１　概要

載荷形式Ⅱでは，覆工にスリットがあり，平面保持の仮定が成立しないため，断面解析を用いた耐荷力評価は適用できない．ここでは，参考までに，２次元平面応力要素を用いたFEM解析を実施した．なお，肩部に設置した鋼板の複雑な形状やアンカーを詳細にモデル化することは困難であるため，補強用鋼板なしで，ECCの厚さをパラメータ（5cm，6cm，7cm，8cm）とし，実験値（鋼板補強あり、ECC7cm）と比較した．

### ２．２　解析方法

（１）解析モデル

参 図－4.7 に解析の要素分割を示す．モデルの対称性から２分の１モデルとした．要素分割は，補強部分の解析を詳細に行うため，１片約１cmの四角形とした．載荷板は梁要素でモデル化し，既設覆工間とノーテンションバネ（せん断方向連成）で結合した．スリット部は，厚さ5mmの接合要素（ジョイント要素）とし，接合面での摩擦係数は解析の安定性を考慮して０とした．




参　図－４．７　解析の要素分割（スリット部拡大）

（2）材料特性

既設覆工，ECC のいずれも前川らの擬似直交 4 方向ひび割れモデル

(a)覆工

圧縮強度 20N/mm$^2$（圧縮強度時のひずみ 2500×10$^{-6}$）で強度維持．引張強度 1.6N/mm$^2$ で軟化特性考慮（引張破壊エネルギー100N/m）

(b)ECC

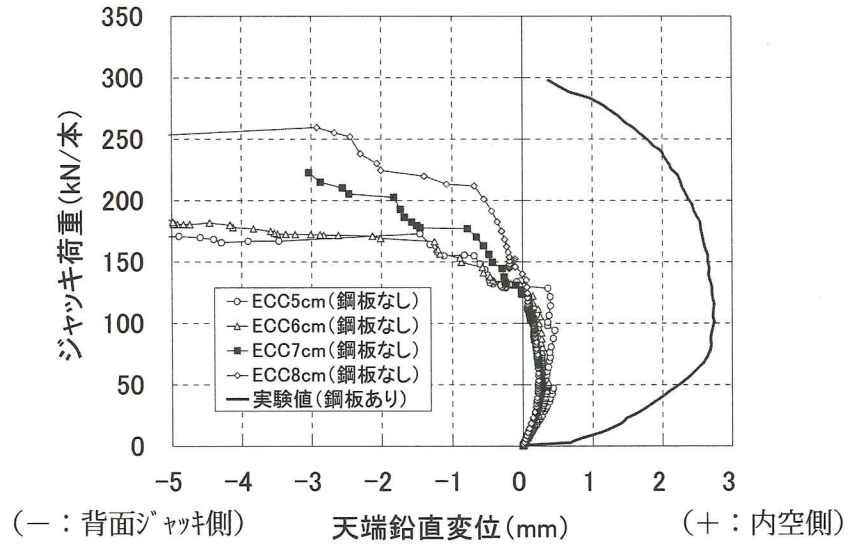
圧縮強度 43N/mm$^2$（圧縮強度時のひずみ 3500×10$^{-6}$）で強度維持．引張強度 3.5N/mm$^2$ で 2.5%まで強度維持，その後指数関数で軟化．

- ひび割れ発生にともなう圧縮強度低下
- 圧縮損傷にともなう引張強度低下の挙動
- ひび割れ面のせん断伝達強度
- 除荷履歴ルール

} 通常のコンクリート特性

## 2．3　解析結果

参 図－4.8 にジャッキ 1 本あたりの荷重と天端の鉛直変位の関係を示す。解析結果は，収束しなくなったステップまでを示した．実験値と比較すると，弱点部でずれが生じるために，載荷初期から背面側に変形する結果となった．実験では鋼板によりずれが抑制されているため，載荷初期は内空側に変位したものと考えられる．




参　図－4．8　荷重－天端鉛直変位関係

参考資料５

# 吹付け施工性に関する
# 要素試験結果

参考資料5

# 吹付け施工性に関する
# 変条試験結果

## 1．目的

ECC の一層の吹付け厚さは経験的に 10～20mm であるが，今回のように，エキスパンドメタルを使用した際の吹付け性状については未確認である。そこで，エキスパンドメタルの設置方法などを水準として，良好な吹付け性状が得られる吹付け方法を選定することを目的に吹付け施工性試験を実施した。また，鋼板との付着性能を確認することを目的とした施工性試験についても併せて実施した。

## 2．使用材料

使用材料を表－1 に示す。基盤コンクリートは，配合強度 27N/mm$^2$ の普通コンクリートとした。エキスパンドメタルは ECC の充填性を考慮して XS-82 とした。

表－1　使用材料

| 材料 | 摘要 |
|---|---|
| 基盤コンクリート | 1000×1000×50mm<br>配合強度：27.3N/mm$^2$ |
| エキスパンドメタル | XS-82 |
| 鋼板 | 1000×200×6mm<br>SS400 |
| ECC | 高靭性FRC |

## 3．試験体

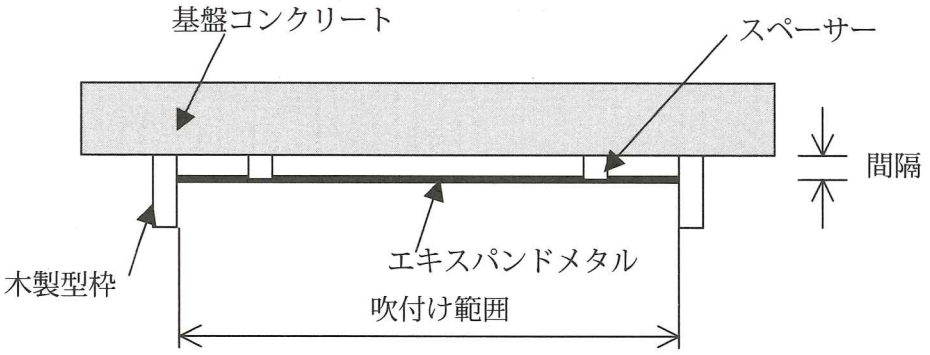
### （1）エキスパンドメタルへの吹付け施工性確認試験体

表－２に試験体配列を示す。図－１に示すエキスパンドメタルと基盤コンクリートの間隔を試験水準とし，0mm，10mm，20mm の３水準とした。試験体形状を図－２に示す。1000mm×1000mm×50mm の基盤コンクリートにエキスパンドメタルを設置し，800mm×800mm×50mm の木製型枠で ECC の吹付け範囲を囲った試験体とした。

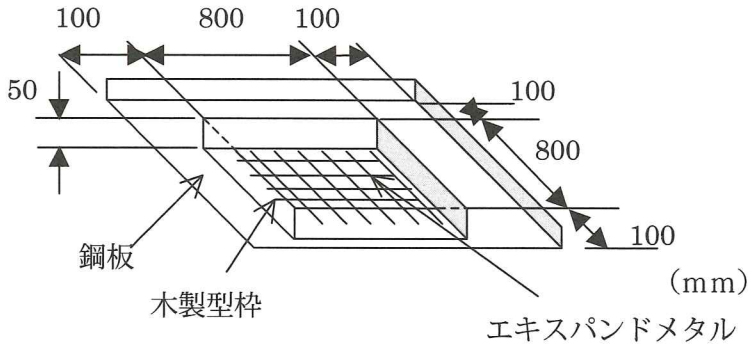
ECC の吹付けは，エキスパンドメタルを設置した基盤コンクリートを架台に設置した後に行った。ECC の吹付け厚さは 50mm とし，３層に分けて吹付け施工した。

表－２　試験体配列

| 試験体No. | エキスパンドメタルとの離隔 |
|---|---|
| No.1 | 0mm |
| No.2 | 10mm |
| No.3 | 20mm |




図－１　エキスパンドメタルの設置方法



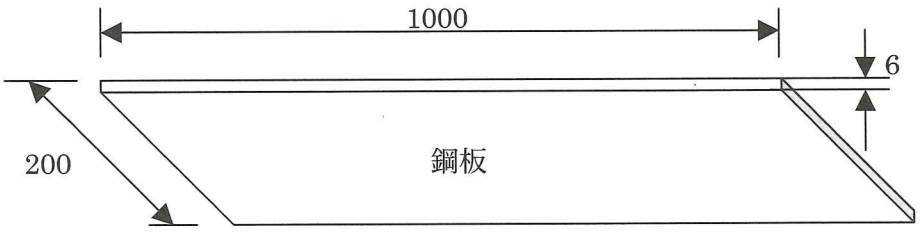

図－２　エキスパンドメタルへの吹付け施工性確認試験体

### （2）鋼板への吹付け施工性確認試験体

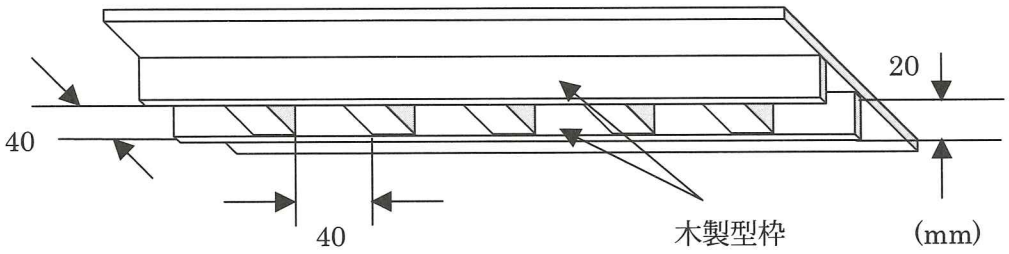
ECC と鋼板の付着性状を向上させる方法として，あらかじめ鋼板に 1mm 程度の薄吹きを実施して表面に微細な凹凸をつける方法が考えられる。そこで，薄吹きの有無を試験水準に吹付け施工性試験を実施した。

吹付け時における鋼板との付着性能確認と，硬化後の付着強度を確認することを目的に，2 種類の試験体を製作した。それぞれの試験体の形状・寸法を図－3 および図－4 に示す。

フレッシュ時における付着性能確認試験体は，1000mm×1000mm×6mm の鋼板とした。硬化後の付着強度確認試験体は，図－4 に示す木製型枠で，40mm×40mm×20mmの供試体を 20 体製作した。いずれの試験体も，ECC の吹付けは上向き施工で行った。




**図－3　試験体 No.4　フレッシュ時における鋼板への付着性能確認試験体**




**図－4　硬化後の付着強度確認試験体**

## 4　試験項目

### 4．1　フレッシュ性状

フレッシュ時における試験項目を表－３に示す。練混ぜ時において，所定のフレッシュ性状が得られていることを確認した。各試験体へのECCの付着性状および施工については，目視により観察した。

**表－３　フレッシュ時の試験項目**

| 試験項目 | 適用 |
|---|---|
| スランプフロー | 325mm±75mm |
| Vロート | － |
| 単位容積質量 | － |
| 空気量 | － |
| 練り上がり温度 | － |
| 吹付け性状 | 各試験体の吹付け性状を目視により観察 |

## 4．2　硬化性状

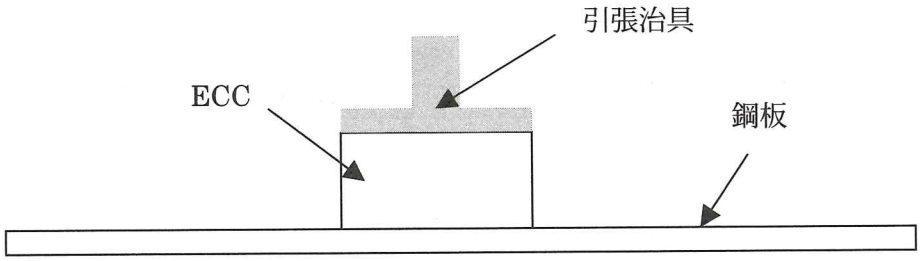
硬化後の試験項目を表－4に示す。ECCの充填状況を確認するため，試験体No.1～No.4について，ECCの吹付け後に気乾養生を行い，材齢7日程度でコンクリートカッターにて切断し，充填状況の観察と空隙面積率を測定した。

付着試験は，図－5に示すような建研式引張試験で行った。試験体は20体とした。供試体は，吹付け施工終了後，材齢28日で木製型枠を脱型し，引張治具を設置して試験を実施した。

圧縮強度試験体については，吹付け終了後 20℃封緘養生とした。また，引張強度試験体については，吹付け終了後 20℃湿潤養生とし材齢3日にて脱型した。脱型後は水中養生とし，材齢28日で試験を行った。

**表－4　硬化時の試験項目**

| 試験項目 | 適用 |
|---|---|
| 充填状況 | 試験体切断後，目視確認および空隙面積率の測定 |
| 鋼板との付着強度 | 建研式引張試験　材齢28日　20体 |
| 圧縮強度 | φ100mm×200mm　材齢28日　3本 |
| 引張強度 | ダンベル型一軸引張試験　材齢28日　5本 |




**図－5　鋼板とECCの付着強度試験方法**

## 5．試験結果

### 5．1　フレッシュ性状

#### （1）ECC のフレッシュ試験

ECC のフレッシュ試験結果を表－5に示す。練り混ぜは4バッチ行った。各バッチで実施した試験について，表－5中の備考に示す。

表－5　練り上がり性状

| No. | 練り上がり時間 | モルタル温度（℃） | 空気量（%） | モルタルフロー（mm） 測定値 | | | 平均 | スランプ 停止時間（秒） | スランプフロー 測定値 | | | 平均 | Vロート（秒） | 単位容積質量（kg/m$^3$） | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 11:10 | 20.5 | 20over | 147 | × | 150 | 148.5 | 18.7 | 36.0 | × | 35.0 | 35.5 | 11.1 | 1229 | 一層目吹付け |
| 2 | 11:20 | 21.5 | 20over | 148 | × | 150 | 149.0 | 12.3 | 33.5 | × | 32.5 | 33.0 | 13 | 1343 | 鋼板吹付け，供試体作製 |
| 3 | 14:10 | 21.2 | 20over | 146 | × | 146 | 146.0 | 15.8 | 33.5 | × | 33.0 | 33.3 | 9.1 | 1321 | 二層目吹付け |
| 4 | 16:10 | 19.1 | 20over | 155 | × | 150 | 152.5 | 20.1 | 36.0 | × | 35.0 | 35.5 | 6.8 | 1294 | 三層目吹付け |

#### （2）吹付け性状

##### 1）試験体 No. 1～3

各層の吹付け性状を表－6に示す。一層目の吹付けにおいて，エキスパンドメタルと基盤コンクリートとの離隔を 20mm とした試験体 No.3 では，ECC が基盤コンクリートに付着する手前でエキスパンドメタルに付着し，エキスパンドメタルが基盤コンクリートへの付着を阻害していることが確認された。二層目以降の吹付け性状はいずれも良好であった。

表－6　吹付け性状

| 施工層 | 試験体No. | 吹付け性状 |
|---|---|---|
| 一層目 | 1 | 良好。<br>吹付け厚は15mm～20mm程度であった。 |
| | 2 | 良好。<br>吹付け厚は20mm～25mm程度であった。 |
| | 3 | エキスパンドメタルへの絡みが多く，ダレの原因となっている。<br>大きなダレはないが，細かいダレが多い。<br>吹付け厚は10mm～15mm程度であった。 |
| 二層目 | 1 | 良好。<br>累計の吹付け厚は30mm～35mm程度であった。 |
| | 2 | 良好。<br>累計の吹付け厚は35mm～40mm程度であった。 |
| | 3 | 良好。<br>二層目はエキスパンドメタルを巻き込む位置となるため，<br>ダレが生じにくく，結果的に累計の吹きつけ厚はほかの水準より厚く，<br>4.0mm～4.5mm程度であった。 |
| 三層目 | 1 | 良好。吹きつけ終了 |
| | 2 | 良好。吹きつけ終了 |
| | 3 | 良好。吹きつけ終了 |

### 2）試験体 No. 4

鋼板への吹付け性状を表－７に示す。今回の実験では，薄吹きをしたほうが吹付け性状は良好な結果となった。しかし，吹付け角度あるいは吹付け時の鋼板の湿潤状態なども，吹付け性状に大きく影響すると考えられるため，今後，検討が必要と考えられる。

表－７　鋼板への吹付け性状

| 水準 | 吹付け性状 |
|---|---|
| 薄吹きあり | 40～50mmの吹付けが可能であった。 |
| 薄吹きなし | 40～50mmの吹付けが可能であったが，<br>数分後にダレが生じ，最終的に脱落した。 |

## 5．2　硬化性状

### （1）圧縮強度

圧縮強度試験結果を表－８に示す。

表－８　圧縮強度試験結果

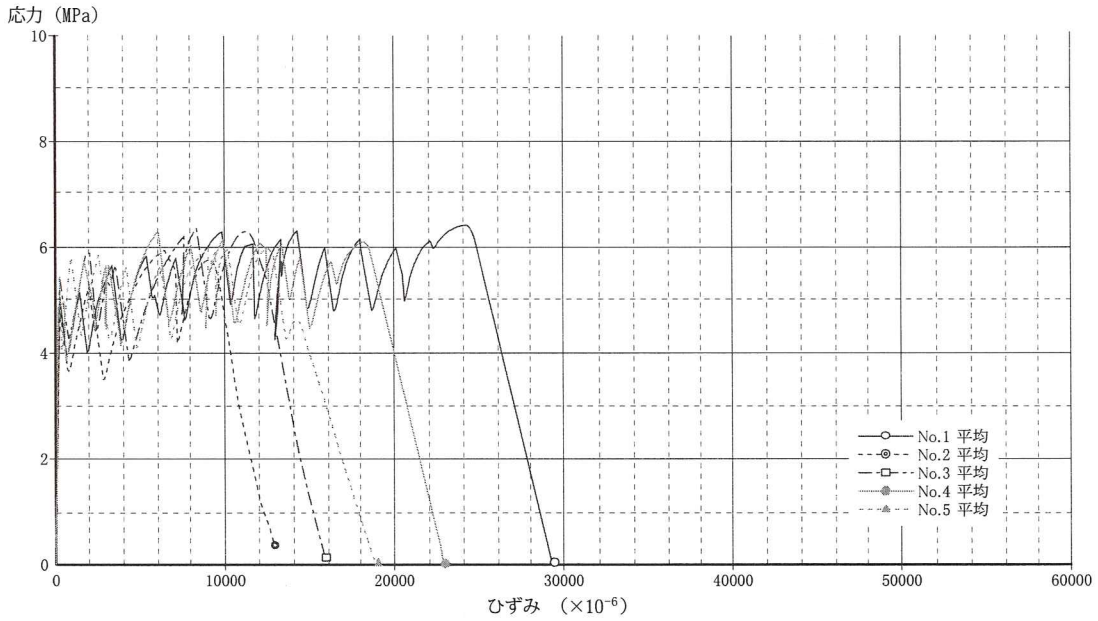
| No. | 圧縮強度<br>($N/mm^2$) | ヤング係数<br>($\times 10^3$ $N/mm^2$) |
|---|---|---|
| 1 | 52.493 | 21.376 |
| 2 | 52.976 | 21.187 |
| 3 | 53.360 | 21.341 |
| 全平均 | 52.943 | 21.301 |

### （2）引張強度

引張強度試験結果を表－９に示す。応力－ひずみ曲線を図－６に示す。なお，試験時のひずみは，供試体の両側に設置した変位計の平均としているが，No.５には，この２点の測定値の差が過大であったため，２次曲げの影響が大きいものと考え，平均値の算出からは除外した。

表－９　引張強度試験結果

| No. | 降伏強度 (MPa) | ヤング係数 ($\times 10^4$MPa) | 引張強度 (MPa) | 破断伸び (%) | 破壊状態 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 5.198 | 1.887 | 6.417 | 2.413 | 良好 |
| 2 | 5.104 | 1.894 | 5.941 | 0.906 | 良好 |
| 3 | 5.083 | 2.190 | 6.365 | 1.126 | 良好 |
| 4 | 5.350 | 2.609 | 6.281 | 1.825 | 良好 |
| 5 | 4.913 | 1.852 | 5.995 | 1.246 | 測定誤差大 |
| 1，2，3，4平均 | 5.184 | 2.145 | 6.251 | 1.568 | |




図－６　応力－ひずみ曲線

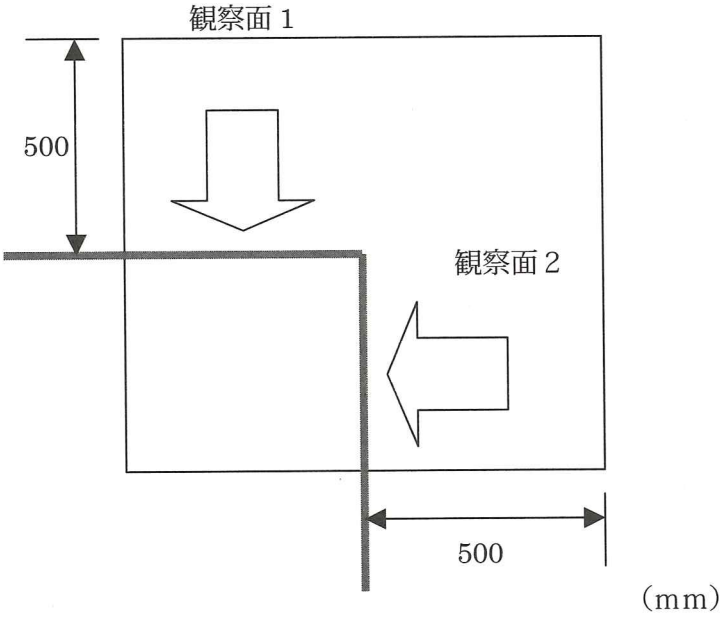
### （3）鋼板と ECC の付着強度

付着強度試験結果については，薄吹きあり，薄吹き無しのいずれについても，型枠脱型時に ECC が鋼板から剥離したため，実験を実施することができなかった。

### （4）充填状況

#### 1）試験体 No. 1～No. 3

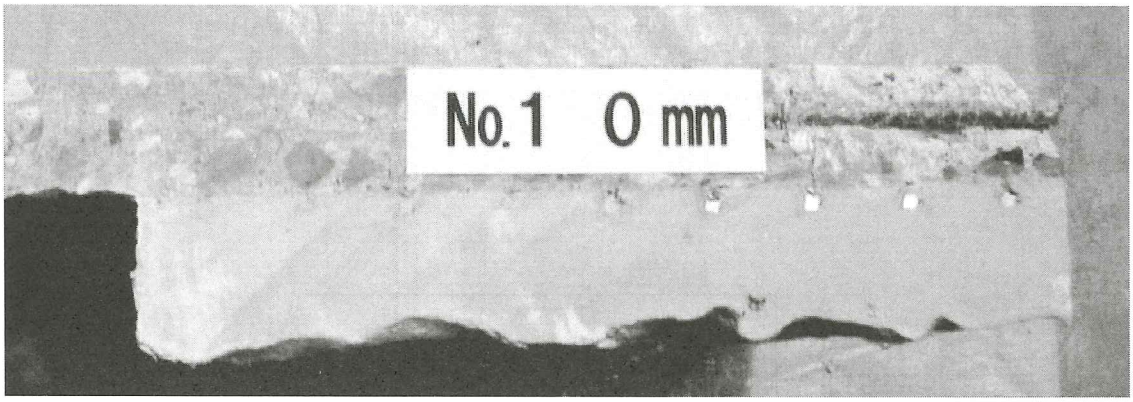
図－7 に試験体 No.1～No.3 の切断位置を示す。各試験体の写真を以下に示す。



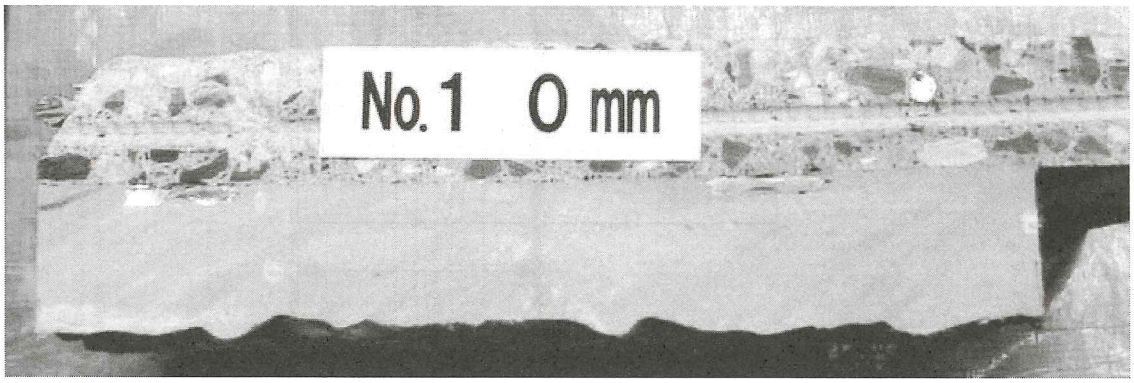

**図－7　切断位置**

**①No.１試験体写真**

No.1 試験体の切断結果を写真－１および写真－２に示す。写真－１および写真－２に示すように，ECC の充填状況は良好であった。



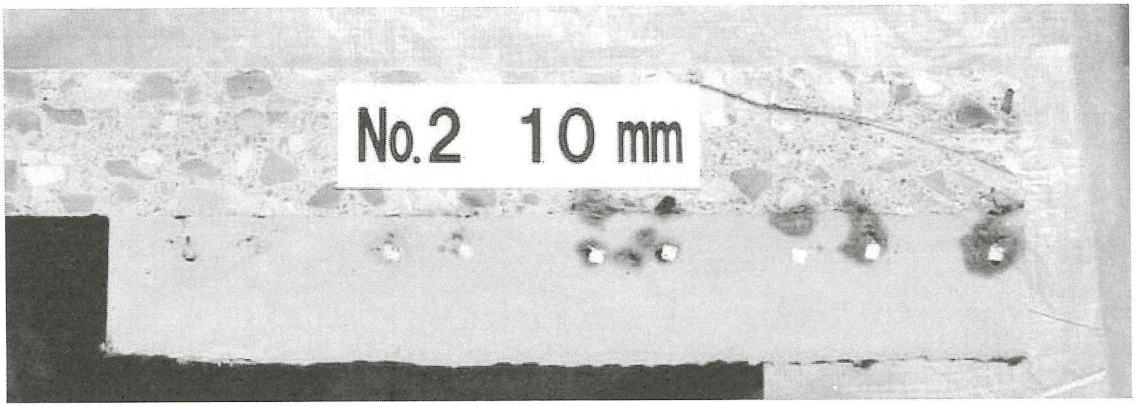

写真－１　NO.１試験体観察面１



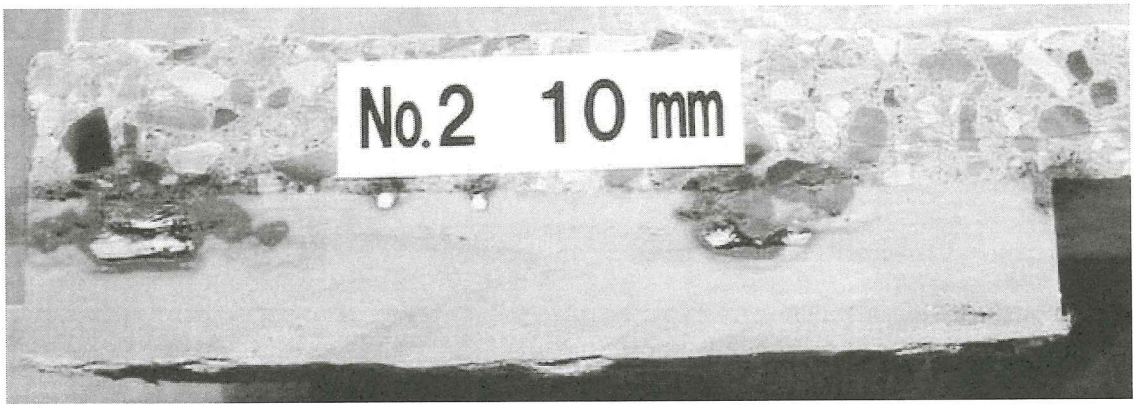

写真－２　NO.１試験体観察面２

②No, 2 試験体写真

No.2 試験体の切断結果を写真－３および写真－４に示す。写真－３および写真－４に示すように，エキスパンドメタルの配置された部分に若干の空隙が点在したが，空隙部分は連続しておらず，概して ECC の充填状況は良好であった。



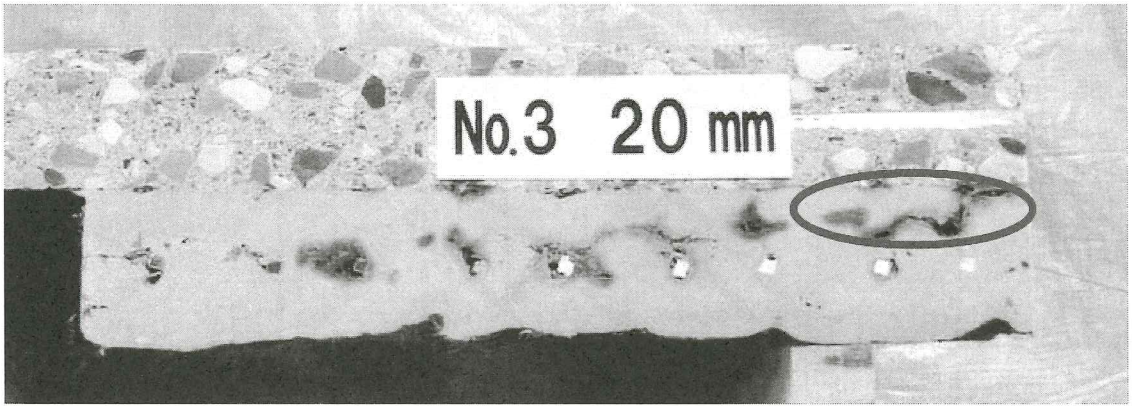

写真－３　NO. 2 試験体観察面 1



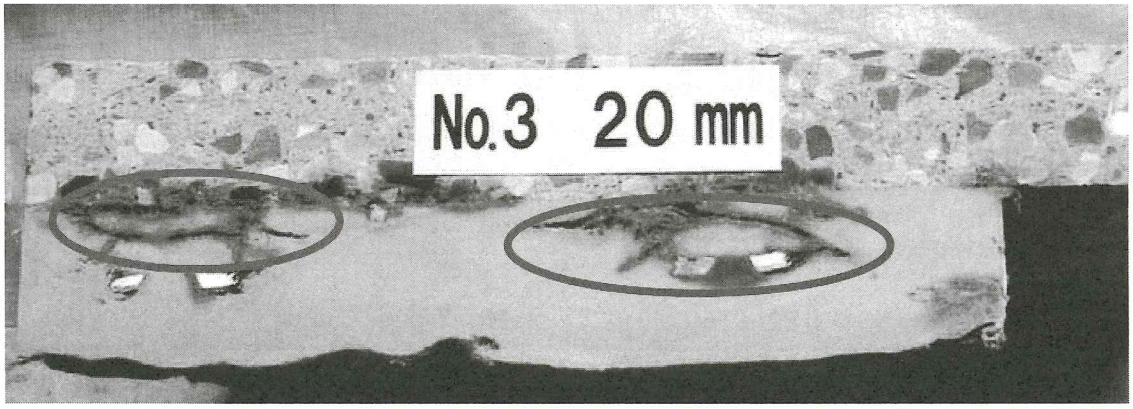

写真－４　NO. 2 試験体観察面 2

### ③No. 3 試験体写真

N0.3 試験体の切断結果を写真－５および写真－６に示す。写真－５および写真－６に示すように，基盤コンクリートとエキスパンドメタルとの間に空隙が多く確認された。空隙は連続的に分布しているため，基板コンクリートと ECC およびエキスパンドメタルの一体性に大きく影響を及ぼすと考えられる。




写真－５　NO. 3 試験体観察面 1




写真－６　NO. 3 試験体観察面 2

：連続的な空隙部分

④空隙面積率

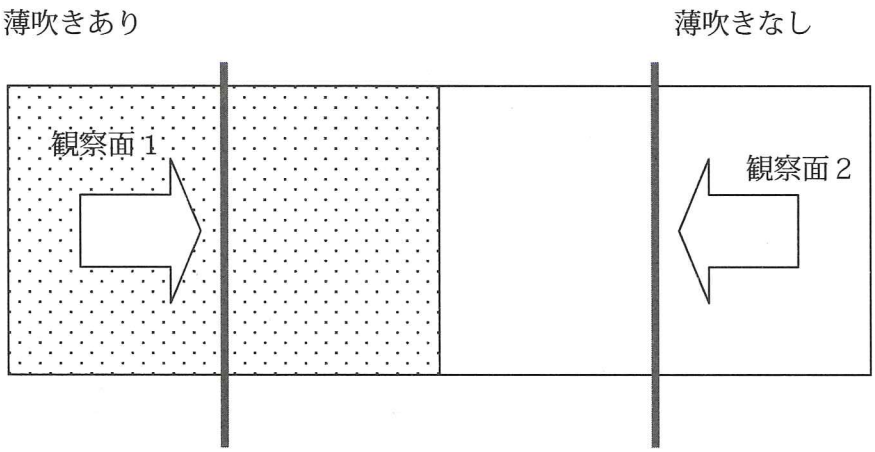
各試験体における空隙状況を表－１０に示す。表－１０において，空隙率とは，切断面における ECC 部分の面積を 400×50mm=20000mm$^2$ とし，空隙面積をこの面積で除した値である。表－７に示すように，基盤コンクリートとエキスパンドメタルとの離隔が 10mm（No.2）から 20mm(No.3)に変化すると，空隙率が大幅に増加することが確認された。

表－１０　各面における空隙

| 供試体No. | 観察面1 | | 観察面2 | | 平均空隙率（%） |
|---|---|---|---|---|---|
| | 空隙面積（mm$^2$） | 空隙率（%） | 空隙面積（mm$^2$） | 空隙率（%） | |
| No.1 | 124.931 | 0.62 | 170.130 | 0.85 | 0.74 |
| No.2 | 687.654 | 3.44 | 255.075 | 1.28 | 2.36 |
| No.3 | 1773.050 | 8.87 | 1024.690 | 5.12 | 6.99 |

**2）試験体 No. 4**

図－８に切断位置を示す。切断面の写真を－７および写真－８に示す。薄吹きの有る無しにかかわらず，ECC の充填状況は良好であった。




**図－８　鋼版観察面**




**写真－７　観察面１（薄吹きあり）**




**写真－８　観察面２（薄吹きなし）**

## 6．まとめ

エキスパンメタルへの充填性確認を目的とした試験体 No.1～No.3 では，フレッシュ性状において，基盤コンクリートとエキスパンドメタルの間隔を 20mm とした試験体 No.3 で施工性が低下することが確認された。さらに，この試験体では硬化後の切断面の観察においても ECC の充填が十分ではなく，今回の工法には適さないものと考えられる。

基盤コンクリートとエキスパンドメタルの間隔を 0mm および 10mm とした試験体 No.1 および No.2 では，施工性，充填性ともに大きな違いが確認されなかった。この両者を比較した場合，エキスパンドメタルを適用した目的の 1 つとしての剥落防止性能を考慮すると，0mm の間隔では，基盤コンクリートとエキスパンドメタルの間に ECC が充填されず，ECC とエキスパンドメタルの付着部分が片側だけになることから，十分な剥落防止効果が得られない可能性があると思われる。

以上より，今回の実施工で適用する工法としては，基盤コンクリートとエキスパンドメタルの間隔は，10mm とすることが望ましいと考えられる。

鋼板への吹付け施工性確認を目的とした試験体 No.4 では，フレッシュ性状において薄吹きを実施したほうが良好な結果となったが，硬化後の充填性確認では大きな差は確認されなかった。しかし，付着強度試験においては，いずれの場合も脱型時に鋼板と ECC が剥離したことから，鋼板表面に加工を施さないような今回の実験条件においては、付着強度を期待することが出来ないことを確認した。

参考資料 6

# 関連論文

# 高靭性セメント複合材料を用いたトンネル補強工法の実大載荷試験

鹿島技術研究所　　正会員　名児耶　薫
（独）土木研究所　正会員　真下　英人
鹿島技術研究所　正会員　○福田　一郎　正会員　松原　功明

## 1．はじめに

変状トンネルの補強対策として鋼材と吹付け施工型の高靭性セメント複合材料（Engineered Cementitious Composite，以下，ECC）[1)]を用いた内巻補強工法（以下、本工法）を開発した．本工法の概要を図-1 に示す．本工法は，覆工内面にブラストなどによる表面処理を行った後，エキスパンドメタルなどの鋼材をアンカーで覆工に設置して，ECC の吹付けを行うものである．ECC は，ひび割れ発生後も繊維の架橋効果により引張力を負担する．鋼材の降伏ひずみの 10 倍程度の引張ひずみが作用下しても引張力を保持できるため，局所的な破壊を抑制する．覆工と合成した補強効果が期待でき，補強断面の薄肉化により建築限界の確保が図れる。また，ECC のひび割れ抑制効果により，補強断面におけるひび割れの貫通を抑制し，さらに，エキスパンドメタルを介して，アンカーにより機械的に覆工に定着されるため，コンクリート片の剥離・剥落を防止する。ここでは，実大規模の試験体（半径 4.85m）を用いた載荷試験を行い，本工法の耐荷力を検討した．

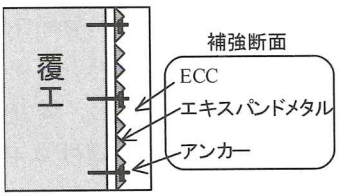



図-1　補強工の概要図

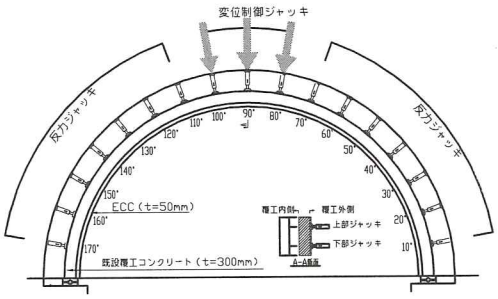



図-2　載荷試験Ⅰ

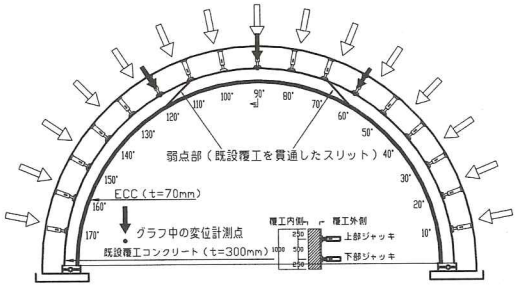



図-3　載荷試験Ⅱ

## 2．実験概要

図-2 および図-3 に試験概要図を示す．載荷試験は２種類の載荷パターン（試験Ⅰ，試験Ⅱ）を実施した．

試験Ⅰは，天端ゆるみ土圧などを想定し，比較的大きな軸力が作用する曲げ卓越型の破壊モードとなる．載荷要領は，全周のジャッキ（17 箇所×２段＝34 本）で同一荷重の 20kN まで加力した後，中央３箇所（80，90，100°）以外のジャッキのバルブを閉めて反力ジャッキとした上で，中央３箇所のジャッキによる変位制御とした．覆工が損傷した状態での補強効果を確認するため，覆工単体の試験で最大荷重を確認して除荷を行った後に，本工法による補強を行い，同じ載荷要領で加力を行った．エキスパンドメタルの継手は突き合せとし，５本/m$^2$ の間隔で M10 の金属拡張系アンカー（根入れ長 40mm）で設置した．ECC の吹付け厚さは 50mm とした．

試験Ⅱは，覆工にせん断ひび割れや目違いが生じた状態を想定しており，左右肩部に覆工内面から外面に貫通する斜め面状に弱点部を設けた．弱点部は，テフロン板を２枚のステンレス板で挟みこんだものを覆工コンクリート打設前に予め設置した．覆工コンクリート打設後に補強工を行い，全周から等荷重を作用させた．ECC の吹付け厚さを 70mm とし，弱点部のずれ抑制を目的に，覆工内面の弱点部先端を中心に両側 20° の範囲のみを厚さ 9mm の鋼板で補強した．鋼板には補剛リブ（厚さ 6mm，高さ 50mm）を覆工周方向に 4 本溶接し，250mm 間隔（22 本/m$^2$）で M16（根入れ長 50mm）の金属拡張系アンカーにより固定した．鋼板以外の部分は，試験Ⅰ

キーワード　覆工，補強，高靭性セメント複合材料，吹付け
連絡先　〒182-0036　東京都調布市飛田給 2-19-1　鹿島技術研究所　ＴＥＬ0424-89-7076

と同様にエキスパンドメタルを設置した.

## 3．実験結果

**表-1** および**表-2** に覆工および ECC の材料試験結果を示す. **図-4～図-6** に試験Ⅰおよび試験Ⅱの荷重－変位関係，ひび割れ状況を示す.

試験Ⅰでは，損傷載荷，補強後載荷のいずれも天端部内面からひび割れが発生し，次に肩部外側でひび割れが発生した。損傷載荷では，天端部，肩部のコンクリートひずみがいずれも $3,500\times10^{-6}$ に達してから，周方向のひび割れが発生した後も荷重が増加し，最大荷重は 2,100kN（載荷ジャッキ６本の合計）だった。補強後載荷では，荷重の増加に伴い天端部内側の ECC のひび割れ本数が増加したが，個々のひび割れ幅は 0.04mm 程度と小さく，ECC のひび割れ抑制効果が認められた。荷重 2,745kN において，肩部で覆工と ECC 界面にずれが生じたが，その後も荷重は増加し，最終的には肩部の覆工が圧壊した。

補強後の最大荷重は，無垢の覆工耐力の約 1.3 倍であり，本工法の適用により，耐力が向上することが確認された.

試験Ⅱでは，載荷初期は全断面一様に内空側に変位したが，載荷荷重（１本当り平均）が 60kN の時点で，弱点部に大きなずれが生じ，その箇所の変位（120° ）の勾配が小さくなるとともに 90° の変位が反転した。最終的には，300kN で弱点部先端の覆工内面でコンクリートひずみが $2,000\times10^{-6}$ 以上になった後，鋼板を覆工に固定していたアンカーの抜けと，既設覆工と鋼板界面の付着切れが生じたため，弱点部を境に覆工で大きなずれが生じて，弱点部先端の覆工が圧壊し，鋼板先端でせん断引張破壊した。最大荷重時における全ジャッキ荷重の合計を覆工表面積で除した値を土圧とすると，670kN/m$^2$ であった.

鋼板に座屈等は生じておらず，アンカーの抜けにより鋼板のずれが大きくなり，補強後の剛性及び耐力が決まっているため，アンカー径を太くすることや覆工への根入れ長を長くすることで，耐力の増加が期待できると思われる.

## 4．おわりに

鋼材と吹付け施工型の高靭性セメント複合材料を用いたトンネル補強工法を開発し，実大載荷試験により補強効果を確認した．今後は，現場適用および現場適用をもとに様々な分野へ展開を図りたい.

## 参考文献

1）坂田ほか：高靭性繊維補強セメント複合材料の吹付け施工システムの開発，鹿島技術研究所年報，Vol. 50, pp. 187-190, 2002. 9

**表-1　覆工の材料試験結果**

| 項目 | 試験体 | 試験値 |
|---|---|---|
| 圧縮強度 (N/mm$^2$) | 試験Ⅰの損傷載荷 | 20.0 |
| | 試験Ⅰの補強後載荷 | 22.4 |
| | 試験Ⅱ | 17.9 |

**表-2　ECC の材料試験結果**

| 項目 | 試験体 | 試験値 |
|---|---|---|
| 圧縮強度 (N/mm$^2$) | 試験Ⅰ | 43.9 |
| | 試験Ⅱ | 51.0 |
| 引張降伏強度 (N/mm$^2$) | 試験Ⅰ | 3.5 |
| | 試験Ⅱ | 3.8 |
| 引張終局ひずみ (%) | 試験Ⅰ | 2.5 |
| | 試験Ⅱ | 2.2 |

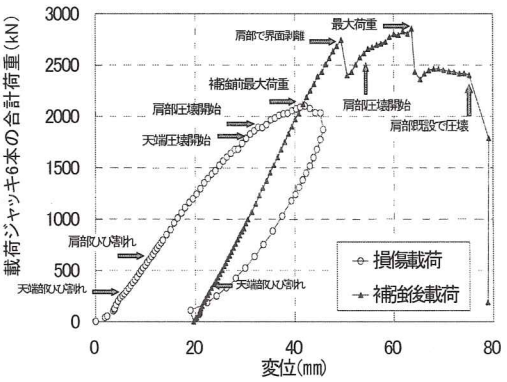



**図-4　試験Ⅰの荷重－天端変位関係**

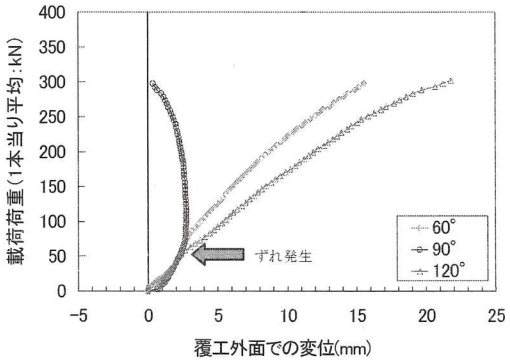



**図-5　試験Ⅱの荷重－変位関係**

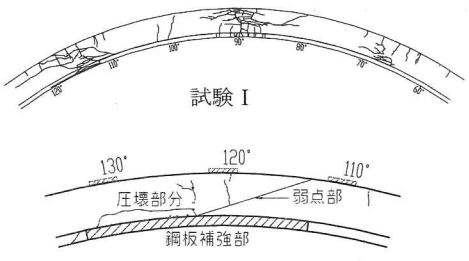



**図-6　ひび割れ状況（終局時）**

# 高靭性セメント複合材料を用いたトンネル補修技術

## －中越地震で被災したトンネル補修工事への適用－

鹿島建設㈱　正会員　山本　拓治
鹿島建設㈱　正会員　名児耶　薫
鹿島建設㈱　正会員　平石　剛紀
鹿島建設㈱　正会員　坂田　昇
ＪＲ東日本　正会員　清水　満
（独）土木研究所　正会員　真下　英人

### １．はじめに

比較的大きな変状が発生したトンネルの補強対策には，全断面覆工打替え工法や既設覆工の内面にプレキャストコンクリート，鋼板などを接着する内面補強工法などがある。しかし，打替え工法では，不安定な既設コンクリートの撤去に際し，多大な工費と工期も必要となる。一方，補強断面が厚い内面補強工法によれば，内空を侵すため建築限界を確保できないことが考えられる。そのため，出来得る限り薄肉で，圧縮・引張耐力ともに向上が期待でき，かつ安全性・経済性に優れた内面補強工法の開発が期待されている。このような市場ニーズを受け，筆者らは，鋼材と高靭性セメント複合材料（Engineered Cementitious Composite　以下，ECC）を用いた薄肉な内巻補強技術（以下，本工法）を開発し，実大規模の載荷実験で十分な耐力向上効果[1)]を確認している。ここでは，本工法を新潟中越地震により被災したＪＲ上越線天王トンネルの災害応急工事に適用したので，その工事実績について報告する。

### ２．工事概要

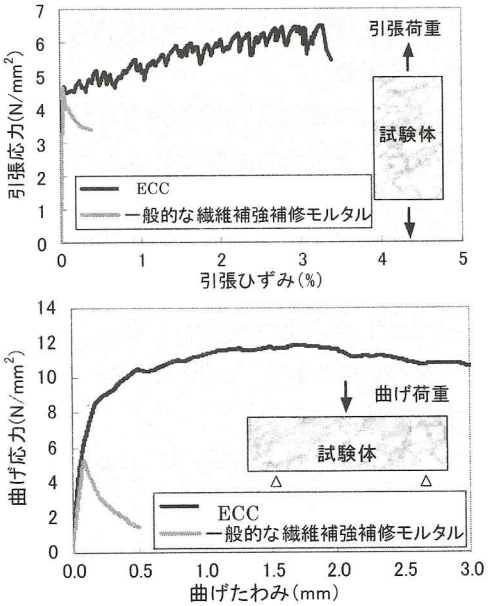
本工法が採用されたＪＲ上越線天王トンネルは，新第三紀鮮新世川口層に建設された延長 285m の単線鉄道トンネルで，1965 年に竣工した。工事は，建設当時の標準工法であった導坑先進上部半断面工法により施工された。中越地震の影響で，覆工コンクリートに変状が生じ，ＳＬ付近のコンクリート片の剥落（写真－1）などが確認された。補強対策工法の選定に際し，既設覆工コンクリートの耐力向上は当然のことながら，工期短縮と恒久的な剥落防止性能も要求され，各種対策工法を比較検討した結果，本工法が採用された。本工法の適用範囲は，特に損傷が著しかった計 37m区間であり，施工面積約 500m$^2$，ECC 施工数量約 25m$^3$（施工厚さ 50mm）であった。工事は，昼夜連続作業により実働 10 日間で完了した。



写真－１　側壁コンクリートの剥落

### ３．本工法の特徴

本工法で使用するECCは，従来のセメント系材料では考えられない鋼材に類似した伸び性能を示す材料で（図－１），ひび割れ発生後も繊維の架橋効果により引張力を負担するため，トンネル覆工に局所応力が作用した場合でも引張補強効果が期待できる。また，エキスパンドメタルなどの鋼材を，ECC 吹付け前に既設覆工コンクリートに相当数のアンカーで固定するため，補強部材の一体化がはかれるとともに，母材と補強材の界面が剥離したとしても補強部材の一部あるいは全体が剥離・剥落する危険が少ない。また，本工法は既設覆工にひび割れ等の弱面が存在す場合には当該箇所に



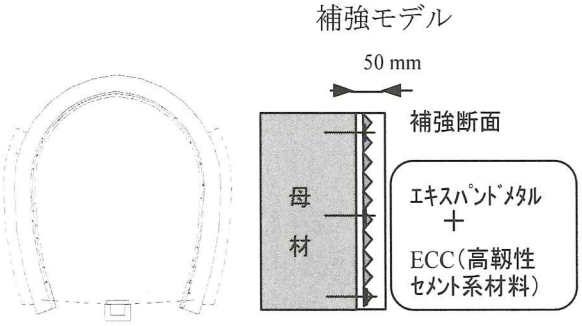

図－１　引張り性能および曲げ性能

キーワード　トンネル，覆工，補強，補修，高靭性セメント複合材料，震災復旧
連絡先　〒182-0036　東京都調布市飛田給 2-19-1　鹿島建設技術研究所　ＴＥＬ0424-89-7849

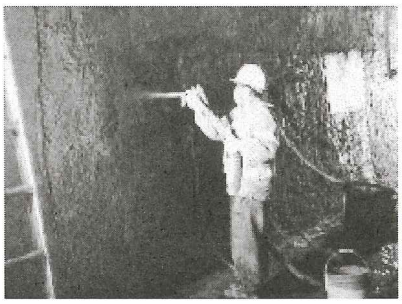
局所的な併用補強工として鋼板接着工を行った後にECC吹付けを行うことも可能で，補強厚はt=50～70mmを標準としている。また，ECC は中性化促進試験および凍結融解試験の結果から，一般のコンクリートと比較して，優れた耐久性を有することが示されており[2]，補強層内部の鋼材が腐食する可能性は低い。又，コンクリートとの付着性能にも優れた材料で，凍結融解作用後の付着強度が低下しないことを室内実験により確認している。

## 4．施工手順

トンネル断面図および補強断面を図－２に示す。本工事では，建築限界の制約から，損傷した既設覆工コンクリート内面に内巻補強を施すことができなかったため，補強断面 50mm 分をあらかじめ切削した。切削終了後，漏水対策としてひび割れ注入を行い，大規模剥落部分については，事前にポリマーセメントモルタルにて断面修復を行った。次に，既設覆工にアンカーを設置して，エキスパンドメタル（XS-82，2400×1200mm）の取付けを行った。エキスパンドメタルは，鋼材背面へのECC の充填性に配慮し，既設コンクリートから 10mm 離して設置した。最後に，補強断面 50mm に対し，ECC を 4～5 層に分けて吹付けた（写真－２）。




図－２　トンネル断面図・補強断面図



写真－２　吹付け ECC 施工状況

## 5．品質管理試験結果

本工事における ECC の品質管理試験としては，フレッシュ性状および圧縮強度について施工日毎に1回，引張降伏強度[3]および引張終局ひずみ[3]について 10m³に 1 回の頻度で試験を実施した。ECC の品質管理試験結果を表－1 に示す。フレッシュ性状として，スランプフローの平均値は約 32cm 程度であった。又，硬化後の力学特性として，圧縮強度の平均値は約 50N/mm²，引張降伏強度の平均値は 3.6N/mm²，引張終局ひずみの平均値は約 2.0%であった。全ての試験結果において，表－1 に示す吹付け ECC の品質管理基準値を満足する結果が得られ，良好な性状の ECC を円滑に施工できた。

表－１　品質管理試験結果

| 試験項目 | 品質管理値 | 試験値（平均） | 試験数 |
|---|---|---|---|
| スランプフロー | 325±75mm | 32.2mm | 12 |
| 圧縮強度 | 30N/mm² | 47.9N/mm² | 12 |
| 引張降伏強度 | 2.0N/mm² | 3.6N/mm² | 3 |
| 引張終局ひずみ | 0.20% | 2.00% | 3 |

## 6．まとめ

本工法は特殊な大型機械も必要とせず，混練プラントも汎用的かつ小型であるため，今回のような小断面トンネル内でも十分施工が可能であり，震災復旧工事のように，早期復旧・早期開通が求められる場合には，工場製作を必要とする鋼板やプレキャスト部材および型枠支保工（セントル）を使用する工法と比較して，非常に迅速性が高い。但し，吹付け能力には課題が残っており，本現場実績では平均 2.5m3/日であった。今後，さらなるコストダウンと急速施工に対応できるように技術開発を進め，共用トンネル補修工事への適用はじめ，幅広い分野で展開していく所存である。

## 参考文献

1) 真下，名児耶，福田，松原：高靭性セメント複合材料を用いたトンネル補強工法の実大載荷試験，平成 17 年度土木学会全国大会，2005. 9
2) 松原，横山，鹿野，坂田：下面増厚材料の力学特性および耐久性に関する基礎実験，コンクリート工学，Vol24，pp1419-1424，2002
3) 児島，坂田，閑田，平石：高靭性セメント複合材料を用いた吹付け補修工法の適用，コンクリート工学，Vol.42,N0.5pp135-139,2004.5