

# 新型合成セグメントの開発と実工事での検証

白土正美<sup>1</sup>・古市耕輔<sup>2</sup>・滝本邦彦<sup>3</sup>・原廣<sup>4</sup>・向野勝彦<sup>5</sup>・吉田健太郎<sup>6</sup>

<sup>1</sup>国土交通省 関東地方整備局 江戸川工事事務所 放水路課長

<sup>2</sup>正会員 工修 鹿島建設(株) 技術研究所 土木技術研究部 主任研究員

<sup>3</sup>正会員 工修 鹿島建設(株) 土木設計本部 プロジェクト設計部 グループ長

<sup>4</sup>正会員 鹿島建設(株) 外郭放水路第4工区トンネル新設工事事務所 所長

<sup>5</sup>正会員 (株)クボタ 素形材技術部 副部長

<sup>6</sup>正会員 鹿島建設(株) 技術研究所 土木技術研究部 研究員

近年、シールドトンネル分野では、施工の合理化、二次覆工の省略の観点から「継手の自動締結」、「完全内面平滑」のニーズが高まっている。さらに、放水路等では、内水圧によりシールドセグメント本体及び継手部に作用する引張力に対して確実な耐力を有することが要求されている。今回、著者らは、上記要求性能を満たした新型合成(DRC)セグメントを開発し、実際に首都圏外郭放水路第4工区トンネル新設工事へ適用した。

本論文では、新型合成セグメントの適用に当たって実施した各種性能確認試験結果と現場施工時計測結果から得られた本セグメントの設計手法及び構造特性について述べる。

**Key Words:** shield tunnel, segmental lining, composite structure, DRC segment, AS joint, anchor joint, discharge channel

## 1. はじめに

大都市圏では市街地化が進み、浸透域の減少と地下街等の浸水しやすい空間が多いことから、いわゆる「都市型水害」が頻発している。また、大都市郊外圏においても、河川の流下能力が低いことにより生じるいわゆる「内水型水害」が多く発生している地域がある。このような場合、河川拡幅が用地確保の面できわめて困難であること、あるいは広範囲の河川改修のための用地確保に多くの時間を要すること等の理由で、早期に実現が可能な幹線街路直下の深部に洪水調節池や放水路(地下河川)を設ける構想が各地で計画、実施されている。

一方、大都市への人口や産業の集中によって生じた都心幹線道路や都市間連絡道路の渋滞、通勤電車のすし詰め状態に対する改善要望は長年、多く出されている。この対策である道路や鉄道の増線計画においても用地確保の困難さから地下化の計画が多い。

このような地下トンネルにおいて、安全性、施工の確実性からシールド工法が現状では主な施工法になると考えられ、その中で工事期間、工事費に関する鍵となるのがトンネル覆工体(セグメント)である。と

くに多くの地下河川や地下道路では必然となる長距離・大断面のシールドトンネルでは、セグメントの組立時間が工期へ大きく影響する。また、セグメント費用の工事費用に占める割合が大きいのはもちろんのこと、セグメント厚さによる掘削土量の変化は長距離になるほど工事費への影響が大きい。

このようなことから、セグメントの組立時間短縮、セグメント薄肉化及びそれらを含めた総合的な工費縮減が大きなニーズとして浮上してきている。

さらに地下調節池や地下河川では、作用する内水圧に対して確実な耐力を有するとともに、防食の観点から漏水を防止する必要がある。また、雨水の流下を妨げず、継手部の防食を図る意味からも内面が平滑である必要がある。

しかしながら、従来のボルト締結方式のRCセグメントでは、内面にボルト締結用の大きなボルトボックスを有し、組立後のボルト締結作業が必要であることから、セグメント内面が平滑ではなく二次覆工やボックス後埋め工を必要とするとともに、施工の高速化を図ることが困難であった。とくに、従来は二次覆工を施工していたため内面平滑性が確保されていたが、今回、二次覆工を省略する事例が増えているため、その

場合にボルトボックス等への内面処理方法が課題となっている。また、セグメント本体がRC部材であることから、引張力に対抗するため覆工厚さが厚くなり、適用性に限界があった。

さらに、道路、鉄道トンネルにおいては円形のみならず、必要空間形状への合理的設計から矩形、連円及び楕円といった断面形状のニーズも多く、その場合もRC部材では剛性、強度、部材厚さ等の関係で限界があった。

そこで筆者らは、大深度地下における大口径の地下調節池・地下河川に適するとともに、道路・鉄道トンネルに対しても適用が可能なセグメントとして、「完全内面平滑」、「覆工薄肉化」、「継手の自動締結」、「高速施工」、「セグメント本体及び継手の高耐力・高剛性・高止水性」を図ることが可能な新型合成セグメント（DRCセグメント（Ductile and Reinforced Concrete Segment））を考案した。写真-1にDRCセグメントを示す。

本論文では、首都圏外郭放水路第4工区へのDRCセグメントの適用に当たり、設計法の確立・検証を目的とした各種性能確認試験結果と、その妥当性を確認することを目的とした施工時の現場計測結果と検証結果について述べる。

## 2. 首都圏外郭放水路

### (1) 事業概要

首都圏外郭放水路事業は、中川・綾瀬川流域の中流部における治水対策として、図-1に示すように、中川・綾瀬川の各河川と江戸川を地下放水路で結び、これら河川の洪水を江戸川に排水するものである。総延長約6.3kmのうち、第1工区から第3工区の約4.7kmのトンネルはすでに貫通している。平成14年度には第3立坑から江戸川までの部分完成した放水路を使って試験通水を開始する予定である。

### (2) 第4工区工事概要

第4工区トンネル新設工事は、第4立坑から大落古利根川までの国道16号線の地下約50mに延長1,235mのシールドトンネルを構築するものである。平成13年7月に第4立坑を発進し、初期掘進工、段取替え工を経て、同年12月から本掘進を行い、平成14年3月末現在740リング(896.7m)までの掘進を終了している。セグメントの組立は、1リング当たり最短33分の高速度施工を実施中である。工事概要を、表-1に示す。

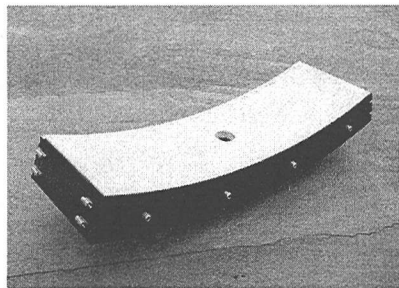


写真-1 DRCセグメント

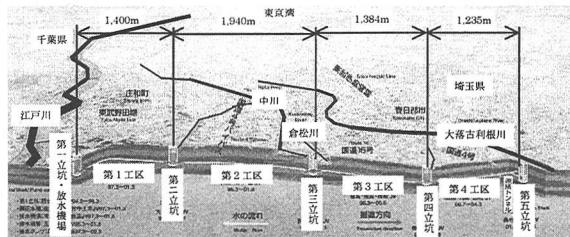


図-1 外郭放水路位置

表-1 第4工区工事概要

|      |                             |   |                                       |
|------|-----------------------------|---|---------------------------------------|
| 工事名称 | 外郭放水路第4工区<br>トンネル新設工事       | 発注者   | 国土交通省関東地方整備局                          |
| 施工者  | 鹿島・飛島・西松<br>特定建設工事共同企業体     | 工期  | 2000年7月8日～2004年3月31日                  |
| 施工場所 | 埼玉県北葛飾郡庄和町上金崎地先～埼玉県春日部市小湊地先 |   |                                       |
| 工事内容 | トンネル延長                      | L=1,235m  | トンネル外径 11.8m   掘削土量 14万m <sup>3</sup> |
|      | トンネル線形                      | 直線部L=751m、曲線部L=484m   | 最小曲線半径350m                            |
|      | 掘削方法                        | 泥水加圧式シールド工法<br>(中折れ型)   | 補助工法<br>発進：凍結防護、<br>到達：地中到達           |
|      | 一次覆工                        | ・一般部：DRCセグメント（合成型）<br>幅1.2m 厚46.5cm 9等分割軸挿入型<br>・接合部：鋼製セグメント（20リング） |                                       |
|      | 土質                          | シールドの通過する地層は、成田層部（洪積層）の砂質土層と粘性土層から成り立っている。                          |                                       |
| 土被り  | 51～54m                      |   |                                       |

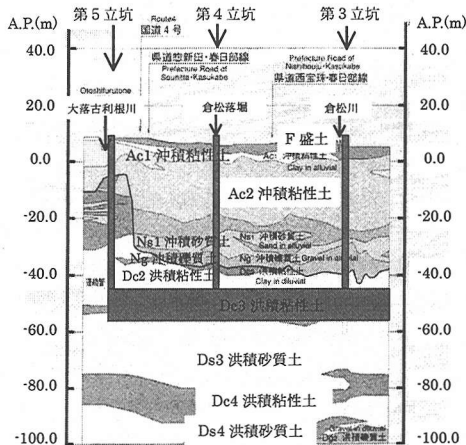


図-2 地質縦断面図

### (3) 検討概要

本トンネル区間の地質縦断面図を図-2に、設計用土層断面を図-3に示す。シールドが通過する地層は、成田層部（洪積層）の砂質土層と粘性土層の安定した地盤を通過しており土かぶり約50mと深いことから、設計では全線ではゆるみ土圧を適用した。

セグメントの設計は、セグメント本体を梁に、セグメント継手を回転バネに、リング継手をせん断バネにモデル化した「はり-バネモデル」を用いて実施した。DRC セグメントの一般構造及び配筋を図-4に示す。

#### (4) セグメントの要求品質

本工事に当たって、セグメントに要求された品質項目は以下のとおりである。

- 1) 内水圧（最大内外水頭差約 16m）対応、二次覆工省略。
- 2) 外径 11.8m、幅 1.2m、9等分割、軸方向挿入型、水平コッター方式 RC セグメント（または同等品）。
- 3) 内面は、高水密性、腐食・脱落・収縮の抵抗性に富み、流水が容易なこと。

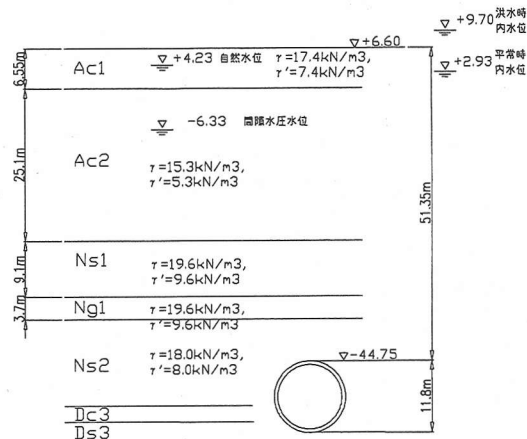


図-3 設計用土層断面図

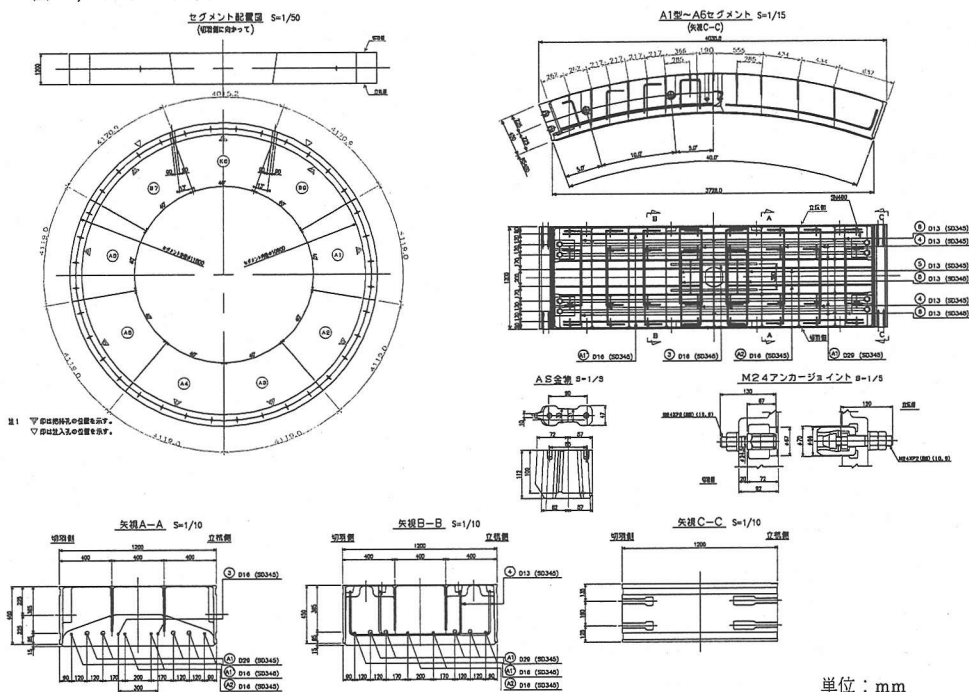


図-4 セグメント一般図

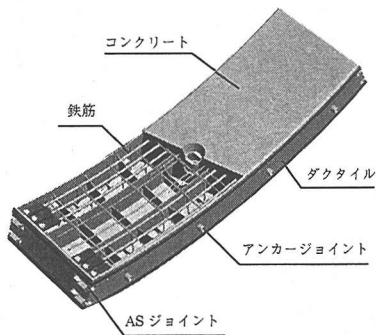


図-5 DRC セグメント概要図

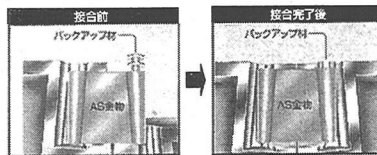


図-6 ASジョイント概要図

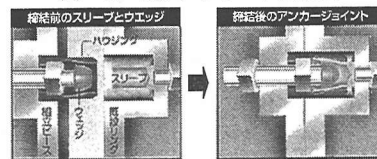


図-7 アンカージョイント概要図

### 3. DRC セグメントの概要

#### (1) 本体構造の特徴

本工事に採用する DRC セグメントの本体構造は、図-5 に示すように、コンクリートと接するダクトイル表面にスタッド等のずれ止めを設けず、ダクトイル鑄鉄と鉄筋コンクリートを補強鋼材やダクトイル鑄鉄リブにより一体構造とした合成セグメントである。特徴を以下に示す。

- 1) 合理的な合成構造の断面性能により、高耐力・高剛性を確保し、セグメントの薄型化が可能。
- 2) コンクリート充填、ボルトボックス無しによるトンネル内面側の平滑化。
- 3) 高耐久性のダクトイルセグメントの内面にコンクリートを充填することにより、耐久性と防食性を強化。
- 4) 5面をダクトイル鑄鉄で囲み、高い水密性を確保するとともに、RC型に比べ局部応力に対する安全性が向上し、万一の欠け落ちも許されない道路・鉄道トンネルの要求に合致。
- 5) セグメントの薄型化に伴う、トンネル・マシンの縮径によるコストダウン。
- 6) トンネル・マシン縮径に伴う、発生土量の低減による環境負荷の低減。

#### (2) AS ジョイント (セグメント継手)

セグメント継手には、セグメントをトンネル軸方向に挿入するだけでセグメントの組立が完了する、ワンパス継手の一種である AS (Axial Slide) ジョイントを用いた。AS ジョイントはトンネル軸方向挿入力により、バックアップ材を變形させながら反力を与え

ることで所定のプレストレスを継手部に導入するとともに、自らの引込み効果により締結する。AS ジョイントの概要図を図-6 に示す。AS ジョイントの特徴を以下に示す。

- 1) クサビ方式による自動締結により、セグメント組立の高速化が可能。
- 2) ボルトボックスが不要であり、完全内面平滑化が可能。
- 3) 継手部へのプレストレス導入の結果、高いリング剛性を確保。
- 4) AS ジョイントが新設セグメントを既設セグメントに引き付けるため、組立精度 (目違い、目開き、真円度) が向上。
- 5) AS ジョイントを2段配置することにより、「負曲げ (トンネル外径側が引張)」に対しても「正曲げ (トンネル内径側が引張)」と同等の継手強度、剛性を確保。

#### (3) アンカージョイント (リング継手)

リング継手には、セグメント組立時の推力ジャッキによる押し込みにより、組立ピース側のハウジングをウェッジ内に滑り込ませ、摩擦によるかみ合わせ効果を利用した自動締結可能なアンカージョイントを用いた。アンカージョイントの概要図を図-7 に示す。

- 1) ピン方式による自動締結により、セグメント組立の高速化が可能。
- 2) ボルトボックスが不要であり、完全内面平滑化が可能。
- 3) ハウジングによる位置ずれ修正機構により、リング間の目違いを防止できる。

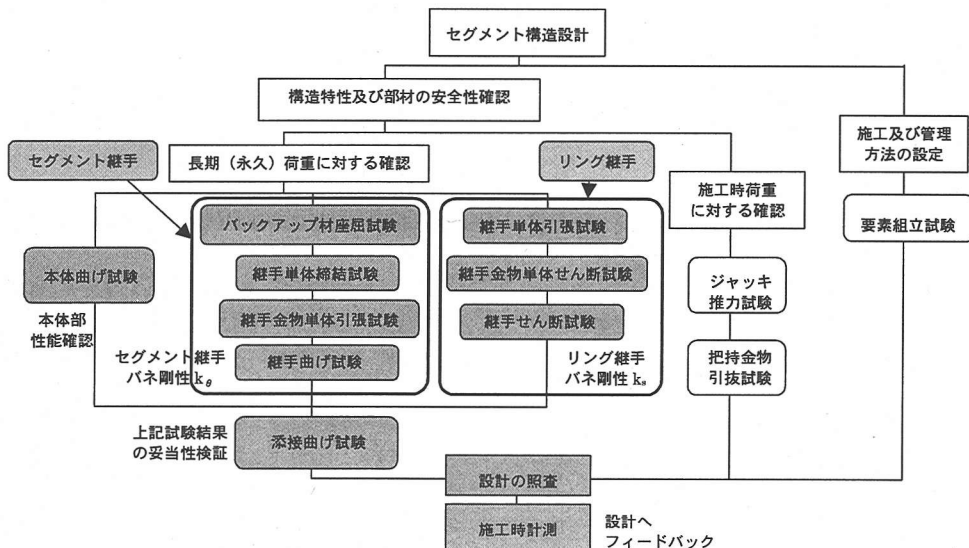


図-8 開発フロー図

#### 4. 開発概要

DRC セグメントを外郭放水路第4工区に適用するに当たって実施した全体の設計・開発フローを図-8に示す。本論文では、セグメントの構造設計を行う上で特に重要となる、「長期（永久）荷重に対する確認」に対する各種性能確認試験結果<sup>1)</sup>とその検証を目的とした「施工時計測」結果について述べる。

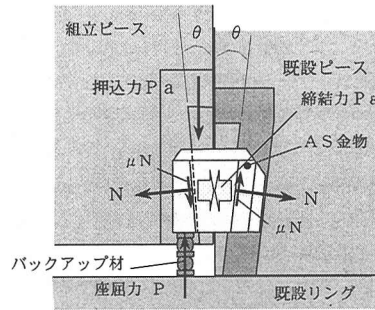


図-9 AS 金物縮結力図

#### 5. 性能確認試験

##### (1) AS ジョイント要素試験

###### a) 縮結機構

ASジョイントは、トンネル軸方向に挿入するクサビ式の継手であり、所定のトンネル円周方向縮結力を継手部に導入するため、所定の軸方向押込み力を保持するために、円筒座屈によるゆるやかな変形により軸変形量を確保するバックアップ材が取り付けられている。縮結力とバックアップ材の座屈反力の関係は、図-9に示す力の釣り合いから式(1)にまとめることができる。

$$P\varepsilon = P \frac{\cos^2 \theta - \mu^2 \sin^2 \theta}{(1 + \mu^2) \sin 2\theta} \quad (1)$$

ここで、P：バックアップ材の座屈力

$P\varepsilon$ ：ASジョイント縮結力

$\mu$ ：AS金物とセグメント本体の摩擦係数

$\theta$ ：くさびのテーパ角

式(1)に示すように、AS金物に確実に縮結力を導入するためには、バックアップ材が所定の座屈荷重により座屈し、その荷重を保持してAS金物を所定の位置まで押し込むことと、AS金物とセグメント間、シール材同士の摩擦係数の把握が重要となる。

また、ASジョイントはクサビ機構により縮結するため、縮結時のばらつきや長期の経時変化によって縮結力に変化が生じる。このため、既往の実績<sup>2)</sup>に応力集中を考慮して、図-10に示すAS金物の設計発生応力と時間の関係図を作成した。この関係図をもとに、縮結時に縮結力のばらつきを最大値が降伏応力度以下で、設計荷重作用時に継手部に目開きがほぼ生じない縮結力を導入するため、外郭放水路第4工区では図-11に示す材質・形状とした。

###### b) バックアップ材座屈試験

本試験は、ASジョイントに縮結力を導入するに当たって重要となるバックアップ材の座屈荷重と荷重を保持しながらAS金物をセグメント本体部の所定の

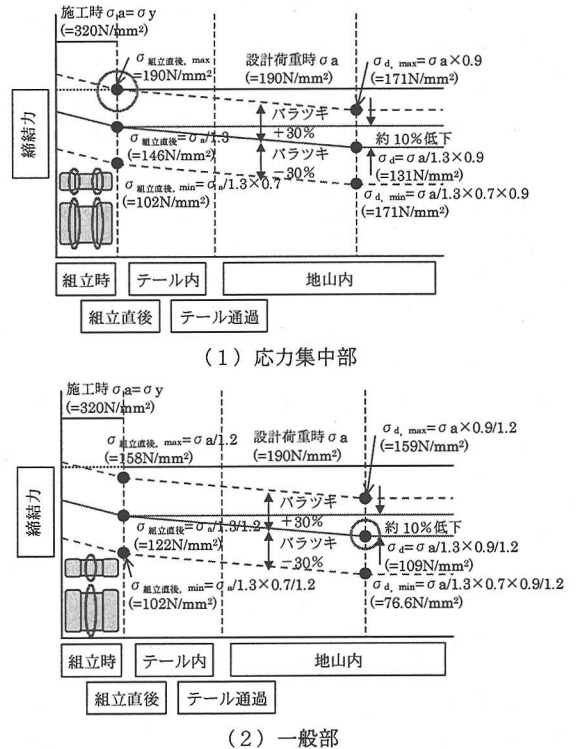


図-10 AS 縮結力経時変化図

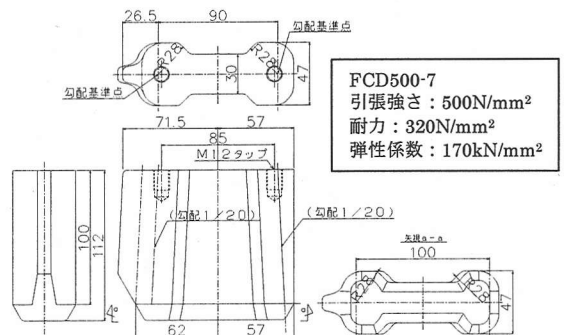


図-11 AS 金物図

単位：mm

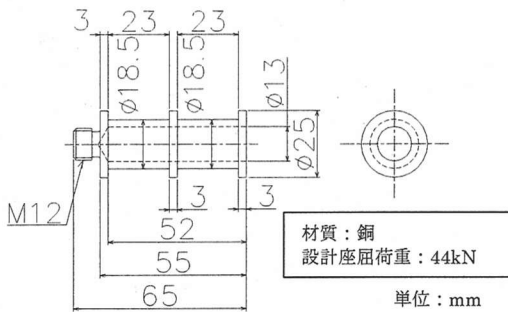


図-12 バックアップ材形状図

表-2 バックアップ材圧縮試験結果一覧

| 試験体 No. | 座屈荷重 [kN] | 設計座屈荷重 [kN] | 座屈荷重/設計座屈荷重 | 変形量 30mm以上 判定 ○× |
|---------|-----------|-------------|-------------|------------------|
| 1       | 46.5      | 44          | 1.057       | ○                |
| 2       | 47.4      |             | 1.077       | ○                |
| 3       | 46.8      |             | 1.064       | ○                |
| 4       | 46.1      |             | 1.048       | ○                |
| 5       | 46.1      |             | 1.048       | ○                |

位置に押し込むための設計上の変形量 (=30mm) が確保されていることを確認するために実施した。

試験体は図-12 に示す材質・形状寸法の 5 体とし、アムスラー型万能試験機により戴荷を行った。試験状況を写真-2 に示す。

試験結果一覧を表-2 に、戴荷荷重と変形量の間をを図-13 に示す。座屈荷重は、約+8%以内のバラツキで設計座屈荷重を再現できることを確認した。また、設計で定めた 30mm の軸方向変形範囲内での圧縮反発力保持機能を確保していることを確認した。

### c) 締結試験

バックアップ材により所定の締結力を AS ジョイントに導入できることを確認するため、AS ジョイント単体の締結試験を実施した。本試験では、施工時に生じる継手部の目開き・目違いが締結力に与える影響についても把握するため、表-3 に示す目開き・目違いを試験パラメータとした。締結力は、AS 金物一般部に表裏各 3 枚ずつ合計 6 枚貼り付けたひずみゲージにより計測を行った。

試験状況を写真-3 に、試験結果を表-4 に示す。本試験結果から、いずれの試験パラメータにおいても、設計上想定した 30% のばらつき範囲内の締結力を導入することが可能であることを確認した。

### d) 引張試験

AS ジョイントが、設計引張耐力以上の耐力を有し、破壊モードが AS 金物の破断によることを確認するため、AS ジョイント単体の引張試験を実施した。本試験では、初期締結力について表-5 に示す設計レベルを考慮した 4 ケースを試験パラメータとし、各 3 体の引張試験を実施した。

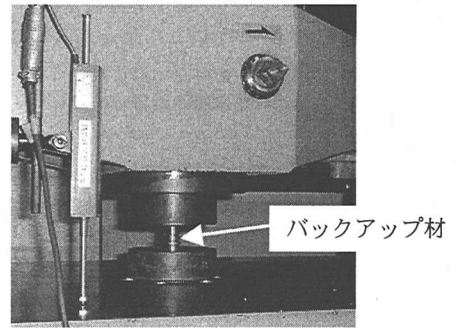


写真-2 バックアップ材圧縮試験状況

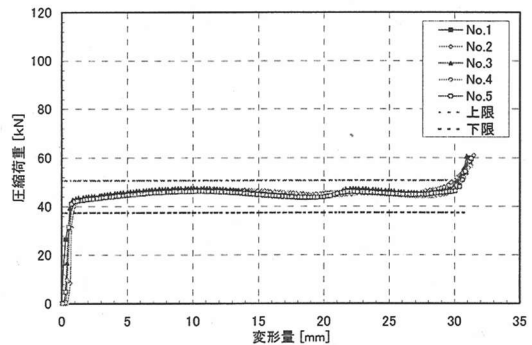


図-13 圧縮荷重-変形量関係

表-3 AS ジョイント締結試験パラメータ

| 試験体 No. | セグメント間目開き | リング間目開き | セグメント間目違い |
|---------|-----------|---------|-----------|
|         | mm        | mm      | mm        |
| 1       | 0.0       | 0.0     | 0.0       |
| 2       | 1.0       | 0.0     | 0.0       |
| 3       | 0.0       | 0.0     | 2.5       |
| 4       | 1.0       | 0.0     | 2.5       |
| 5       | 0.0       | 1.0     | 0.0       |
| 6       | 1.0       | 1.0     | 0.0       |
| 7       | 0.0       | 1.0     | 1.0       |
| 8       | 1.0       | 1.0     | 2.5       |

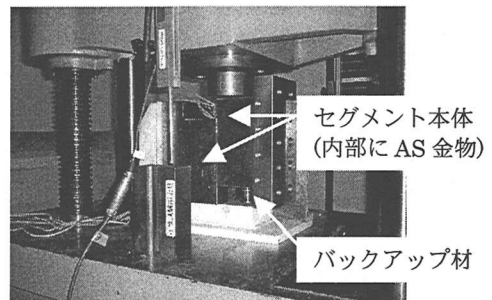


写真-3 AS ジョイント締結試験状況

試験方法を図-14 に示す。AS 金物の締結力及び引張力は、c) 締結試験と同様に AS 金物の一般部に表裏面各 3 枚ずつ合計 6 枚貼り付けたひずみゲージにより計測を行った。この他、引張荷重はロードセルで、また継手部の目開きを  $\mu$  ゲージで計測した。



表-4 ASジョイント締結試験結果一覧表

| 試験体 No. | 戴荷荷重<br>kN | AS金物<br>ひずみ<br>μ | 641 μ ± 30%   |   |
|---------|------------|------------------|---------------|---|
|         |            |                  | 449 μ ~ 833 μ | ○ |
| 1       | 1          | 122              | 733           | ○ |
|         | 2          | 176              | 616           | ○ |
|         | 3          | 130              | 499           | ○ |
|         | 平均         | 143              | 616           | ○ |
| 2       | 1          | 117              | 684           | ○ |
|         | 2          | 109              | 687           | ○ |
|         | 3          | 144              | 502           | ○ |
|         | 平均         | 123              | 624           | ○ |
| 3       | 1          | 79               | 613           | ○ |
|         | 2          | 93               | 660           | ○ |
|         | 3          | 120              | 770           | ○ |
|         | 平均         | 97               | 681           | ○ |
| 4       | 1          | 122              | 698           | ○ |
|         | 2          | 115              | 631           | ○ |
|         | 3          | 159              | 537           | ○ |
|         | 平均         | 132              | 622           | ○ |
| 5       | 1          | 84               | 732           | ○ |
|         | 2          | 94               | 630           | ○ |
|         | 3          | 107              | 580           | ○ |
|         | 平均         | 95               | 647           | ○ |
| 6       | 1          | 137              | 744           | ○ |
|         | 2          | 105              | 589           | ○ |
|         | 3          | 105              | 615           | ○ |
|         | 平均         | 116              | 649           | ○ |
| 7       | 1          | 96               | 626           | ○ |
|         | 2          | 116              | 703           | ○ |
|         | 3          | 131              | 712           | ○ |
|         | 平均         | 114              | 680           | ○ |
| 8       | 1          | 141              | 668           | ○ |
|         | 2          | 122              | 644           | ○ |
|         | 3          | 131              | 537           | ○ |
|         | 平均         | 131              | 616           | ○ |

$$\sigma_d = 109 \text{ N/mm}^2$$

$$E = 170 \text{ kN/mm}^2$$

$$\epsilon_d = \sigma_d / E = 641 \mu$$

表-5 ASジョイント引張試験パラメータ

| 試験体 No. | 初期締結力  |           |
|---------|--|-----------|
|         | 許容応力度比<br>(設定根拠)                               | 締結力<br>kN |
| 1       | $P \epsilon = 0.90 \sigma_a$<br>(設計荷重作用時最大締結力) | 428       |
| 2       | $P \epsilon = 0.69 \sigma_a$<br>(設計荷重作用時設計締結力) | 327       |
| 3       | $P \epsilon = 0.48 \sigma_a$<br>(設計荷重作用時最小締結力) | 228       |
| 4       | $P \epsilon = 0$<br>(プレストレスなし)                 | 0         |

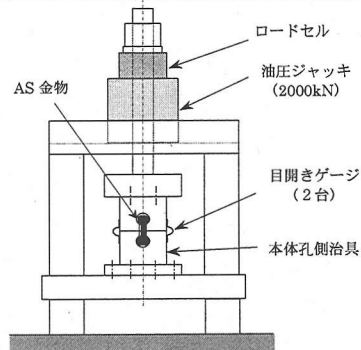


図-14 ASジョイント引張試験方法

表-6 ASジョイント引張試験結果一覧

| 試験体 No. | 破壊荷重 | 設計引張耐力<br>(応力集中部) | 破壊モード        |
|---------|------|-------------------|--------------|
|         | kN   | kN                |              |
| 1       | 1281 | 1250              | AS金物応力集中部の破断 |
| 2       | 1366 |                   |              |
| 3       | 1478 |                   |              |
| 4       | 1518 |                   |              |

試験結果を表-6に示す。全ての試験体が設計引張耐力を上回った後、AS金物の応力集中部が破断した。引張荷重とAS金物の平均ひずみを図-15に示す。ほぼ、締結力以上の引張力が作用した後、ひずみが増加しており、初期締結力によるプレストレスの効果を確認した。また、引張荷重と目開きの関係を図-16に示すが、ASジョイントに初期締結力を導入することで、目開きの制御が可能であることを確認した。

(2) アンカージョイント要素試験

a) 締結機構

アンカージョイントは、セグメント組立時の推力ジャッキによる押し込みのみで、スリーブがハウジングとウェッジの間に挿入され、締結が完了する。このため、締結時には、必要な押し込み力以上のジャッキ推力で確実に締結することが、締結後の確実な引張耐力とせん断剛性を確保する上で重要となる<sup>3)</sup>。

性能確認試験において使用したアンカージョイントを図-17に示す。

b) 締結試験

アンカージョイントの締結時押し込み力を把握することを目的として、締結試験を実施した。

試験体は図-17に示すアンカージョイント3体とし、図-18に示す戴荷装置により締結試験を行った。

締結試験結果を表-7に示す。約175kNの押し込み力により締結が可能であり、ジャッキ推力から継手1本当たりの押し込み力として設定した200kN以下であることを確認した。

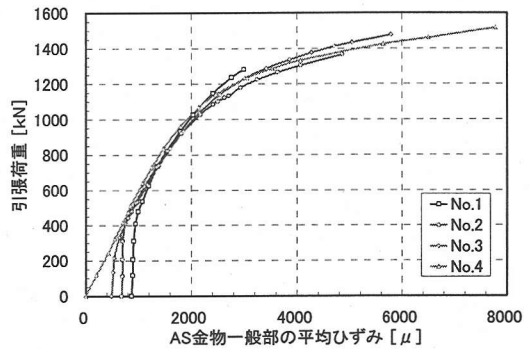


図-15 引張荷重-AS金物ひずみ

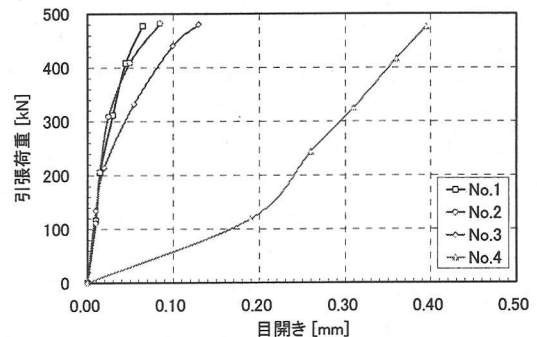


図-16 引張荷重-目開き

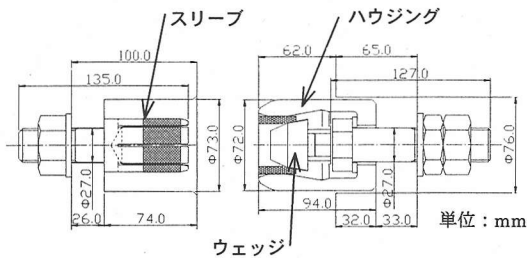


図-17 アンカージョイント形状図

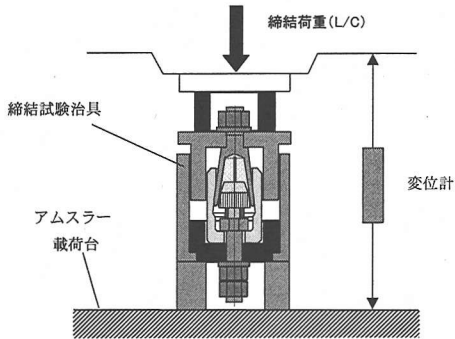


図-18 アンカージョイント締結試験概要図

表-7 アンカージョイント締結試験結果一覧

| 試験体 No. | 最大締結荷重  | 判定 |
|---------|---------|----|
| 目標値     | 200kN以下 |    |
| 1       | 170     | ○  |
| 2       | 175     | ○  |
| 3       | 176     | ○  |

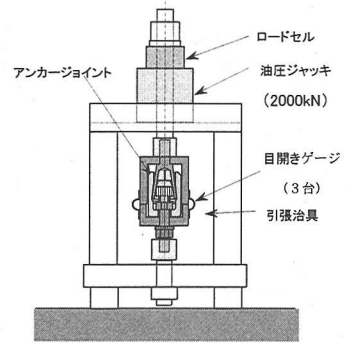


図-19 引張試験概要図

表-8 アンカージョイント引張試験結果一覧

| 試験体 No. | 目開き                    | 破断荷重        | 判定 |
|---------|------------------------|-------------|----|
|         | mm                     | kN          |    |
| 目標値     | 許容応力度相当載荷時<br>目開き3mm以下 | 477kN<br>以上 |    |
| 1       | 0.99                   | 510         | ○  |
| 2       | 0.90                   | 508         | ○  |
| 3       | 0.83                   | 495以上       | ○  |

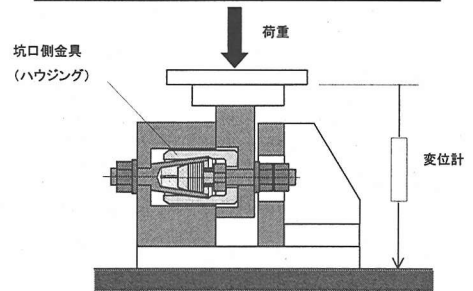


図-20 アンカージョイント単体せん断試験概要図

表-9 単体せん断試験結果一覧

| 試験体 No. | 締結時<br>偏心量 | 最大<br>載荷荷重<br>kN | 破断部位               | せん断バネ<br>剛性 $k_{s2}$ |
|---------|------------|------------------|--------------------|----------------------|
|         | mm         |                  |                    | MN/m                 |
| 1       | 0          | 1121             | 破断なし<br>ハウジングに変形有り | 234                  |
| 2       | 2.5        | 1121             | 破断なし<br>ハウジングに変形有り | 191                  |

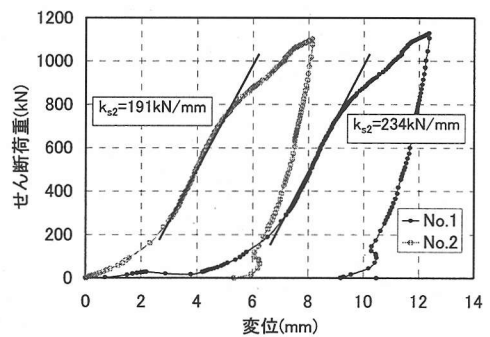


図-21 せん断荷重-変位関係

### c) 引張試験

アンカージョイントの設計荷重作用時の目開きと引張耐力 (M27 10.9 相当) の確認を目的として、引張試験を行った。

試験は、b) 締結試験の試験体を用いて実施した。引張試験概要を図-19 に示す。

引張試験結果を表-8 に示す。許容応力度相当荷重時の目開きは1mm 以下であり、設計上許容した目開き3mm 以下であることを確認した。また、破断時においても、設計引張耐力を上回る荷重で破断することを確認した。

### d) 単体せん断試験

アンカージョイント継手単体のせん断耐力 (M27 10.9 相当) とせん断バネ剛性を確認することを目的として、単体せん断試験を実施した。

締結時のアンカージョイントの偏心量を試験パラメータとして2体の試験を実施した。試験概要を図-20 に示す。

試験結果を表-9 に、せん断荷重と変位関係を図-21 に示す。本試験結果から、設計せん断耐力の3.3 倍せん断バネ剛性を把握した。



表-10 材料特性

| 部位    | 材料                     | 弾性係数<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) | 許容応力度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 降伏<br>応力度<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | 引張強さ<br>圧縮強さ<br>(N/mm <sup>2</sup> ) |
|-------|------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------------|
| ダクトイル | 球状黒鉛<br>鑄鉄<br>FCD500-7 | 170                           | 220 (圧縮)<br>190 (引張)          | 340                               | 516                                  |
|       | 設計基準<br>強度: 30MPa      | 23.8                          | 11.7 (圧縮)<br>0 (引張)           | -                                 | 49.3                                 |
| 主鉄筋   | D29SD295               | 210                           | 180                           | 349                               | 536                                  |
| 配力筋   | D13SD295               | 210                           | 180                           | 393                               | 531                                  |

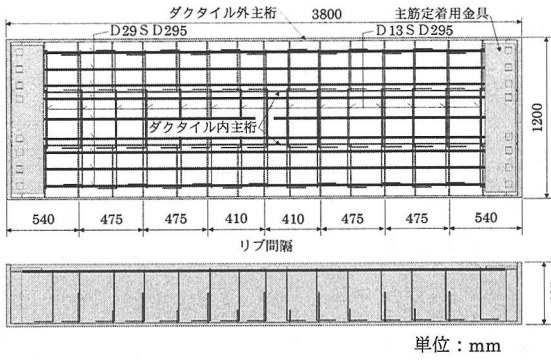


図-22 本体曲げ試験体形状

(3) 本体部曲げ試験

a) 目的

DRCセグメント本体部は、合成構造とすることで断面性能の合理化を図る構造であるため、ダクトイル鑄鉄と鉄筋コンクリートを確実に一体化することが重要となる。そこで、本試験ではDRCセグメント一般部の構造特性（変形性状、曲げ耐力、ひずみ分布、ひび割れ特性）を把握することで、本セグメントの合成構造化に対する評価を行った。

b) 試験体の種類及び材料

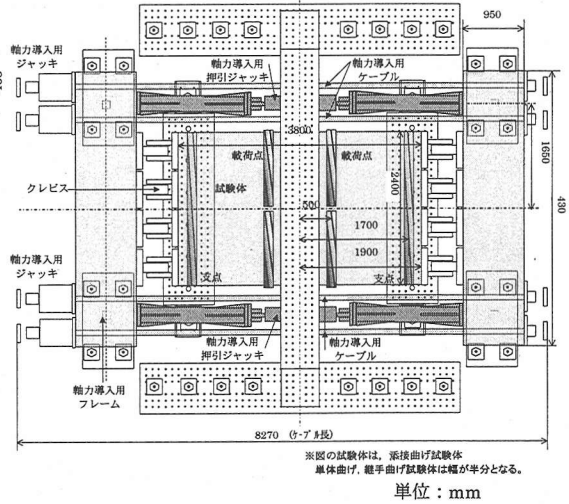
試験体は、正曲げ（トンネル内径側が引張）と負曲げ（トンネル外径側が引張）の2体とした。試験体の形状を図-22に示す。試験体の形状は、「内水圧が作用するトンネル覆工構造設計の手引き（1999年3月）」<sup>4)</sup>を参考として、曲率による影響が少ないこと、軸力を載荷するのは曲率のあるセグメントでは難しいことから、外郭放水路第4工区に適用するA型1ピースを平板に模擬した実物大試験体とした。

試験に用いた材料は、本体ダクトイル部をFCD500-7、充填コンクリートを設計基準強度 30N/mm<sup>2</sup>とした。鉄筋は、主鉄筋をD29、配力筋をD13とし、いずれも材質はSD295とした。材料特性を表-10に示す。

c) 試験方法

載荷装置図を図-23に示す。試験体の両側面に配置したケーブル及び押し引きジャッキにより、試験体に軸力を導入した状態で、鉛直ジャッキにより2点載荷を行った。各軸力時において鉛直載荷を行っている間は、各軸力値を一定に保持するものとした。

載荷ステップは図-24に示すように、4ステップとした。最初の3ステップは、各軸力時（圧縮軸力、軸力なし、引張軸力）における許容耐力まで載荷を行い、最後の4ステップ目において、軸力なしの状態まで破壊まで載荷を行った。ただし、2ステップ目の軸力



(1) 平面図

(2) 側面図

図-23 載荷装置図

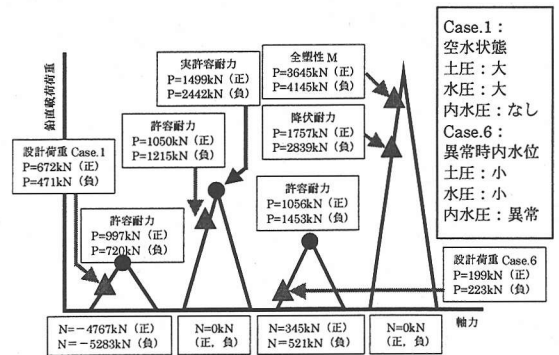


図-24 載荷ステップ

なしにおいては、許容耐力以降も、計測されたひずみ値が許容ひずみに達する（実許容耐力）まで载荷を行っている。各軸力値は、外郭放水路第4工区的设计軸力を参考に設定した。

d) 試験結果

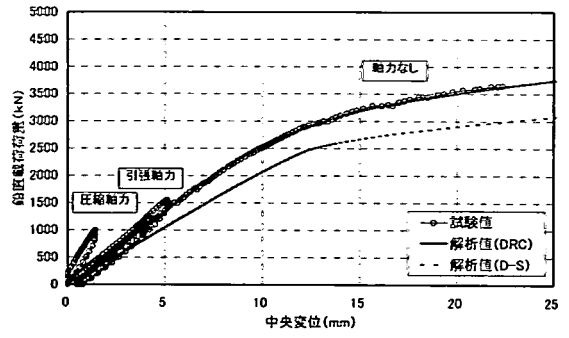
1) 荷重-中央変位関係

正曲げ及び負曲げ試験の荷重-中央変位関係を図-25に示す。いずれの試験においても、各軸力時の許容耐力範囲では、荷重と変位は線形関係を示すことを確認した。正曲げ試験では、軸力なしにおける最大荷重が、許容耐力の約3.4倍となる全塑性モーメント ( $M=2187\text{kNm}$ ,  $P=3645\text{kN}$ ) に達するとともに、ダクタイル外主桁の破断により終局に至った。負曲げ試験では、軸力なしにおける最大荷重が、全塑性モーメント ( $M=2487\text{kNm}$ ,  $P=4145\text{kN}$ ) を上回る、許容耐力の約3.7倍の鉛直荷重  $P=4500\text{kN}$  を有することを確認して、载荷装置の制約から試験を終了した。

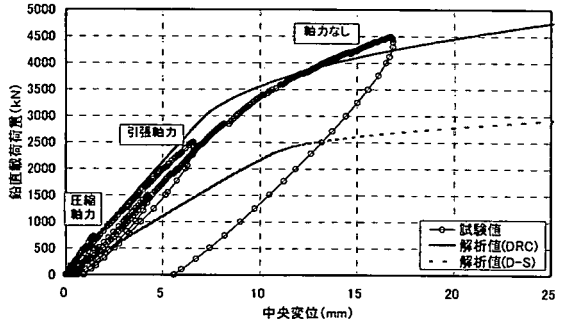
試験の再現を目的として、2次元の非線形FEM解析を行った。解析は、ダクタイルと充填コンクリートの合成度を確認することを目的として、①ダクタイル部、充填コンクリート及び鉄筋をモデル化し、それぞれを完全合成化した「DRC」タイプ、②ダクタイル部と鉄筋のみをモデル化した「D-S」タイプの2ケースを実施した。解析に用いた材料の応力-ひずみ関係を図-26に示す。解析結果を図-25中に示すが、両試験ともにDRCタイプによって、ほぼ試験結果の再現が可能であることを確認した。

2) 断面内ひずみ分布

正曲げ・負曲げ両試験体の軸力なしの実許容耐力及び降伏耐力における断面内ひずみ分布と、DRCタイプによる解析値を図-27に示す。いずれの試験結果においても、断面内ひずみ分布は線形を示し、合成構造としてモデル化したDRCタイプの解析値により評価できることを確認した。

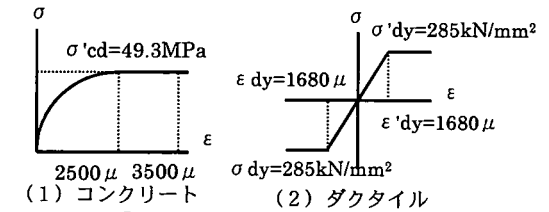


(1) 正曲げ



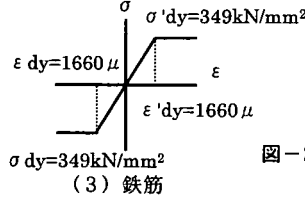
(2) 負曲げ

図-25 荷重-中央変位関係



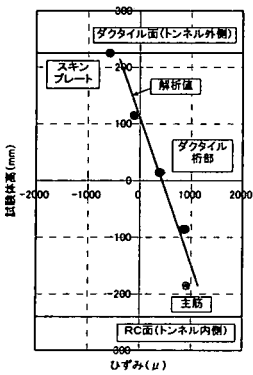
(1) コンクリート

(2) ダクタイル

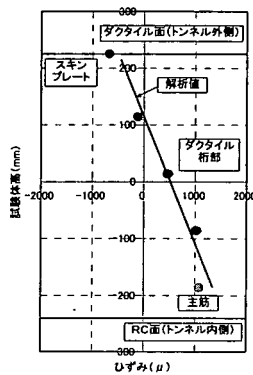


(3) 鉄筋

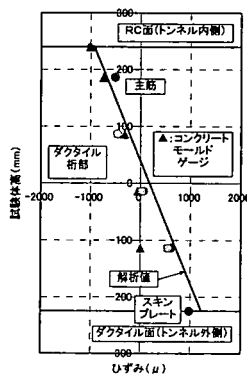
図-26 FEMに用いた 応力-ひずみ関係



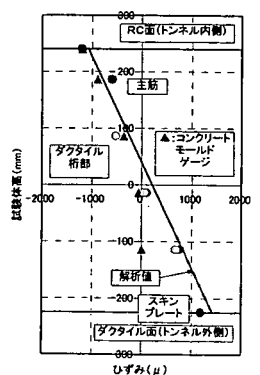
(1) 実許容耐力  $P=1499\text{kN}$  (正曲げ)



(2) 降伏耐力  $P=1757\text{kN}$  (正曲げ)

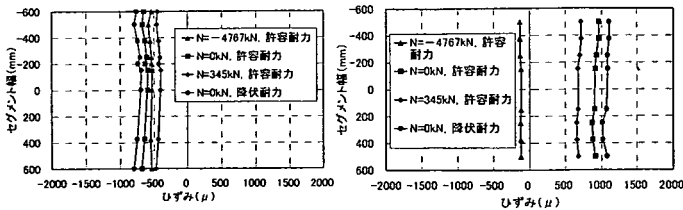


(3) 実許容耐力  $P=2442\text{kN}$  (負曲げ)

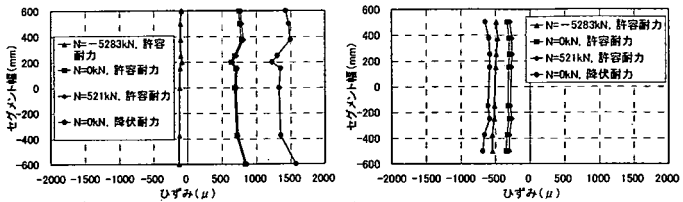


(4) 降伏耐力  $P=2839\text{kN}$  (負曲げ)

図-27 単体曲げ応力-ひずみ関係

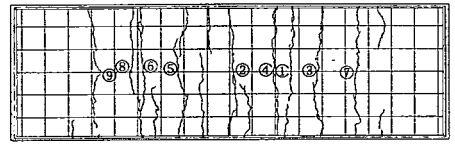


(1) スキンプレート (正曲げ) (2) 主筋 (正曲げ)



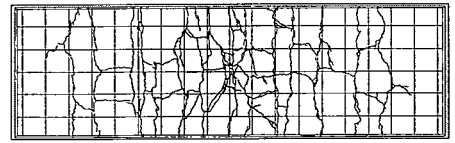
(3) スキンプレート (負曲げ) (4) 主筋 (負曲げ)

図-28 セグメント幅ひずみ分布



ひび割れ幅 (単位: mm): ①0.08, ②0.15, ③0.10, ④0.08, ⑤0.10, ⑥0.06, ⑦0.06, ⑧0.04以下, ⑨0.04以下, ⑩0.04

(1) 設計荷重作用時 (Case.6)



(2) 試験終了後

図-29 ひび割れ状況

### 3) セグメント幅方向ひずみ分布

本セグメントは、4本のダクタイル主桁（外主桁2本、内主桁2本）の近傍とその中間では、スキンプレートに与える剛性の差が大きい。このため、セグメント幅方向のひずみ分布から、その影響を確認した。両試験体のダクタイルスキンプレートと主鉄筋のセグメント幅方向ひずみ分布を図-28に示す。両試験体の各軸力においても、ダクタイルスキンプレート及び主鉄筋に様にひずみが発生しており、幅方向に均等に力が分散していることを確認した。

### 4) ひび割れ性状

正曲げ試験の、引張軸力時の設計荷重作用時 (Case.6) と試験終了時のひび割れ図を図-29に示す。設計荷重作用時の最大ひび割れ幅は0.15mmと、設計許容ひび割れ幅0.35mmに対して十分に小さく、構造上・耐久性上問題となるようなひび割れ幅を生じないことを確認した。また、試験終了時のひび割れ図から、ひび割れ間隔は20~30cm程であり、コンクリート面に均等に分散することを確認した。

なお、負曲げ試験では、充填コンクリートは圧縮側であり、引張軸力導入時に一部ひび割れが生じたのみである。

### e) 考察

本体曲げ試験結果における考察は、以下のとおりである。

- 1) 荷重-中央変位関係及び断面内ひずみ分布から、本試験結果はダクタイル鋼鉄、充填コンクリート及び鉄筋を合成構造とした「DRC」タイプの非線

形 FEM 解析により評価が可能であり、本セグメントが合成構造として機能していることを確認した。

- 2) セグメント幅方向ひずみ分布から、力が断面内に均等に分散し、全幅有効であることを確認した。
- 3) 設計荷重作用時に発生しているひび割れは、構造上・耐久性上十分に安全なひび割れ幅であることを確認した。また、均等に分散するひび割れ性状により、主鉄筋がひび割れ分散性に寄与していることを確認した。

### (4) セグメント継手曲げ試験

#### a) 目的

本試験は、DRCセグメントのセグメント継手部 (ASジョイント) の回転バネ剛性、曲げ耐力及び継手部目開きの把握を目的とした。

#### b) 試験体の種類及び材料

試験体は、正曲げ (トンネル内径側が引張) と負曲げ (トンネル外径側が引張) の2体とした。試験体の形状を図-30に示す。試験体の形状は、外郭放水路第4工区に適用するA型ピースの半分を平板に模擬し、この平板2体をAS金物4個により締結した実物大試験体とした。AS金物には、設計荷重作用時に目開き量の発生がほとんど生じないように、1個当たり327kNの設計プレストレスを導入した。なお、許容目開き量は、シール材と止水性の関係から3mmとした。

試験に用いた材料は、AS金物はFCD500-7とし、本体部は(3)本体部曲げ試験と同様である。材料特性を表-11に示す。

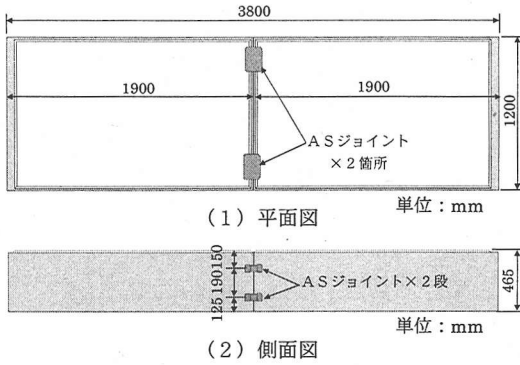


図-30 継手曲げ試験体

c) 試験方法

荷重装置は、(3) 本体部曲げ試験と同様である(図-23 参照)。

荷重ステップは図-31 に示すように、3 ステップとした。最初の2ステップは、圧縮軸力時、軸力なし時における許容耐力まで荷重を行い、最後の3ステップ目において、引張軸力の状態で許容耐力を確認後、継手部の降伏耐力を上回るまで荷重を行った。なお、各軸力の設定は、(3) 本体部曲げ試験と同様の方法で設定した。

d) 試験結果

1) 曲げモーメント-回転角関係

正曲げ及び負曲げ試験の曲げモーメント-回転角関係を図-32 に示す。いずれの試験においても、引張軸力時に全塑性モーメント(正曲げ:  $M=609\text{kNm}$ (許容耐力の約 3.1 倍), 負曲げ:  $562\text{kNm}$ (許容耐力の約 4.7 倍))以上の耐力を有することを確認した。正曲げ試験体の許容耐力までのバネ剛性は、圧縮軸力時  $8.45 \times 10^6 \text{kNm/rad}$ , 軸力なし時  $1.77 \times 10^6 \text{kNm/rad}$ , 引張軸力時  $1.3 \times 10^6 \text{kNm/rad}$  であった。負曲げ試験体の許容耐力までのバネ剛性は、圧縮軸力時  $1.99 \times 10^6 \text{kNm/rad}$ , 軸力なし時  $1.67 \times 10^6 \text{kNm/rad}$ , 引張軸力時  $1.09 \times 10^6 \text{kNm/rad}$  であった。

2) 継手部目開き

両試験体の継手部目開き量分布を図-33 に示す。いずれの試験結果においても目開きはセグメント幅方向に均等に発生した。設計荷重作用時の目開きは最大で  $0.3\text{mm}$  であり、AS 金物によるプレストレスの効果を確認した。また、許容耐力時の目開きは計算値よりも小さいが、これは、通常の鋼製セグメントにおける目開き量の計算では継手部圧縮縁をヒンジ支点として目開き量を計算しているのに対して、実際はダクタイル鋳鉄端面の圧縮域と引張側のAS 金物が、荷重に対して抵抗していることによるものと考えられる。

表-11 材料特性

| 部位     | 材料               | 弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> ) | 許容応力度 (N/mm <sup>2</sup> ) | 降伏応力度 (N/mm <sup>2</sup> ) | 引張強さ 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> ) |
|--------|------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------|
| ダクタイル  | 球状黒鉛 鋳鉄 FCD500-7 | 170                        | 220 (圧縮) 190 (引張)          | 342                        | 517                            |
| コンクリート | 設計基準 強度: 30MPa   | 23.8                       | 11.7 (圧縮) 0 (引張)           | -                          | 55.5                           |
| AS 金物  | 球状黒鉛 鋳鉄 FCD500-7 | 170                        | 220 (圧縮) 190 (引張)          | 332                        | 522                            |
| 主鉄筋    | D29 SD295        | 210                        | 180                        | 349                        | 536                            |
| 配力筋    | D13 SD295        | 210                        | 180                        | 393                        | 531                            |

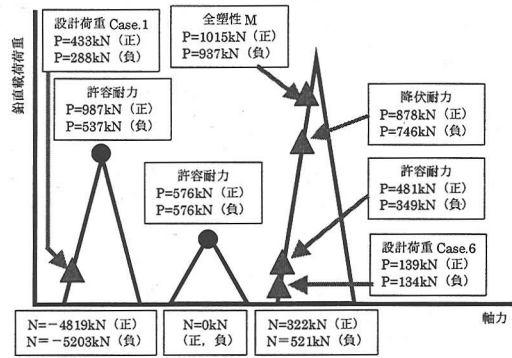
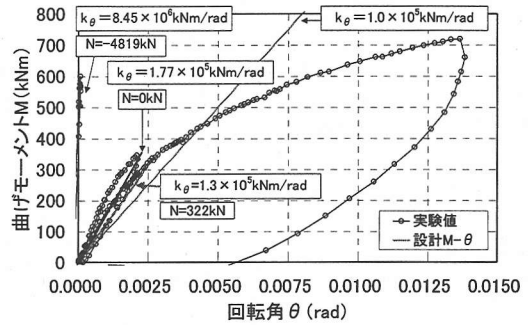
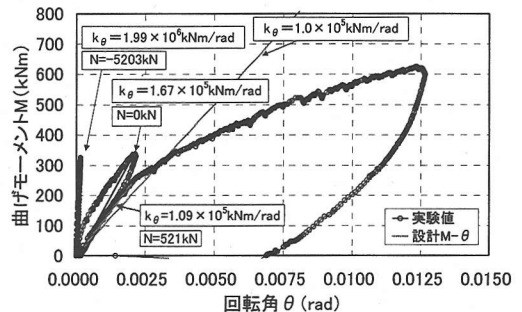


図-31 荷重ステップ

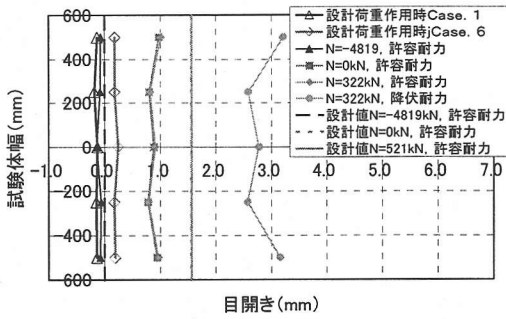


(1) 正曲げ

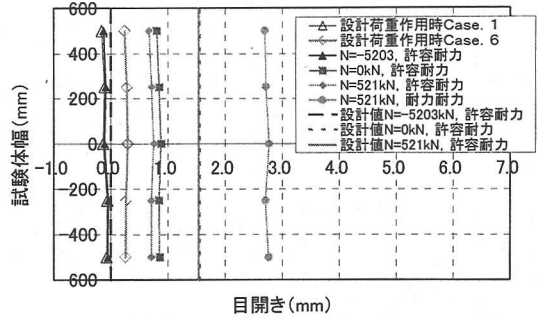


(2) 負曲げ

図-32 曲げモーメント-回転角関係



(1) 正曲げ



(2) 負曲げ

図-33 目開き量分布

d) 考察

継手曲げ試験結果における考察は、以下のとおりである。

- 1) 曲げモーメント-回転角関係から、継手部が確実な耐力を有することを確認した。また、各軸力時のセグメント間継手の回転バネ剛性を得た。
- 2) AS金物のプレストレス効果により、継手部の目開き量を小さく抑えることができることを確認した。また、実際に生じる目開き量は設計上の目開き量よりも小さく、安全側に評価していることを確認した。

(5) リング継手せん断試験

a) 目的

本試験は、DRCセグメントのリング継手（アンカージョイント）のせん断バネ剛性と耐力を確認することを目的とした。

b) 試験体の種類及び材料

試験体は図-34に示す1体とした。アンカージョイントは、1面当たり2本配置し、合計4本とした。アンカージョイントは表-12に示す材料とし、本体部は(3)本体部曲げ試験と同様とした。

c) 試験方法

載荷方法は図-34に示す2面純せん断試験とした。載荷ステップは、繰返しのない静的単調増加とし、アンカージョイントのせん断降伏耐力まで載荷を行った。

d) 試験結果

載荷荷重-目違い量関係（継手1本当たり）を図-35に示す。目違い量は、初期に1.0~2.0mm程度のずれを生じた後、許容耐力相当の荷重で平均目違い量3.13mm、耐力相当の荷重で5.24mmを示した。降伏耐力に相当する荷重まで、コンクリート表面にひび割れの発生は確認されず、健全であった。リング間せん断

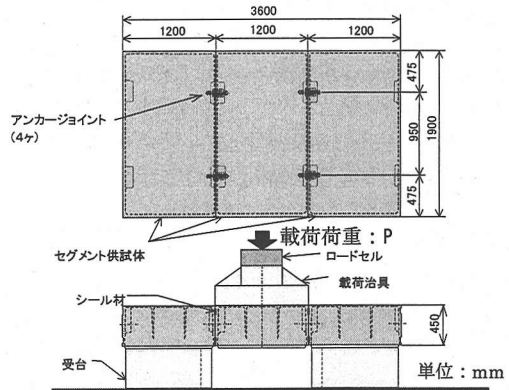


図-34 リング間せん断試験体及び載荷方法

表-12 アンカージョイント構成材料

| 種別 | 材質               | 区分          |
|----|------------------|-------------|
| ①  | ハウジング            | SCM435      |
| ②  | ハウジング取付ボルトM27    | SCM435 10.9 |
| ③  | ハウジング取付ナットM27    | SCM435 10   |
| ④  | ハウジング取付ワッシャーM27用 | S45C 2.2 H  |
| ⑤  | スリーブ             | SCM435      |
| ⑥  | スリーブ用ナットM27      | SCM435 10   |
| ⑦  | スリーブ用ワッシャーM27用   | S45C 2.2 H  |
| ⑧  | ウェッジ             | SCM435      |

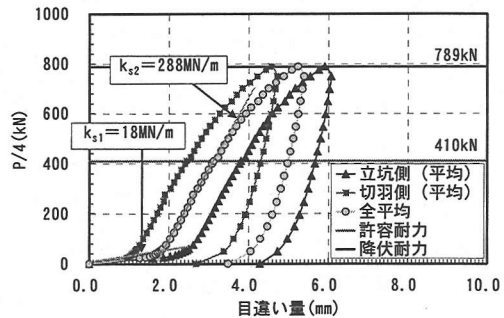
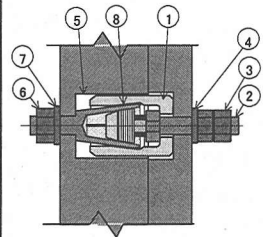


図-35 載荷荷重-目違い量関係（継手1本当たり）

バネ剛性は、図-35に示す関係から、初期のずれとして  $k_{s1}=18\text{MN/m}$  を、アンカージョイント本体のせん断バネ剛性として  $k_{s2}=288\text{MN/m}$  を得た。本試験結果のせん断バネ剛性は、アンカージョイント単体で実施した (2) d) 単体せん断試験から得られたせん断バネ剛性 ( $k_{s2}=234, 191\text{MN/m}$ ) とオーダー的にほぼ同じであり、設計に用いるアンカージョイント自体のせん断バネ剛性は、単体せん断試験により求めても支障ないものと考えられる。

e) 考察

リング継手せん断試験における考察は、以下のとおりである。

- 1) 初期のずれは、アンカージョイント内機構に保有する施工時を考慮した隙間によるものであると考えられる。
- 2) 本試験結果より、リングせん断バネ剛性  $k_{s1}=18\text{MN/m}$  (初期ずれ部分)、 $k_{s2}=288\text{MN/m}$  (実荷重作用時) を得た。

(6) 添接曲げ試験

a) 目的

本試験は、(3) 本体部曲げ試験から得られたセグメント本体の構造特性及び(4) 継手曲げ試験から得られた  $k_{\theta}$ 、(5) リング継手せん断試験から得られた  $k_s$  のバネ剛性を用いた「はり-バネモデル」による設計の妥当性を照査することを目的とした。

b) 試験体の種類及び材料

試験体は、図-36に示す正曲げ試験体1体とした。試験体の形状は、継手曲げ試験体の両側面に単体曲げ試験体の1/2幅の平板セグメントを添接版としてアンカージョイントにより締結した。

試験に用いた材料は、AS金物、アンカージョイント及び本体部全て(3)~(5)にて実施した試験体と同じ規格とした。材料物性は、(4)セグメント継手曲げ試験に使用した材料(表-11参照)と同様である。

c) 試験方法

荷重装置は、(3)本体部曲げ試験と同様である(図-23参照)。

荷重ステップは図-37に示すように、4ステップとした。最初の3ステップは、各軸力時(圧縮軸力、軸力なし、引張軸力)における許容耐力まで荷重を行い、最後の4ステップ目において、軸力なしの状態の主鉄筋の降伏まで荷重を行った。なお、各軸力の設定は、(3)本体部曲げ試験と同様の方法で設定した。

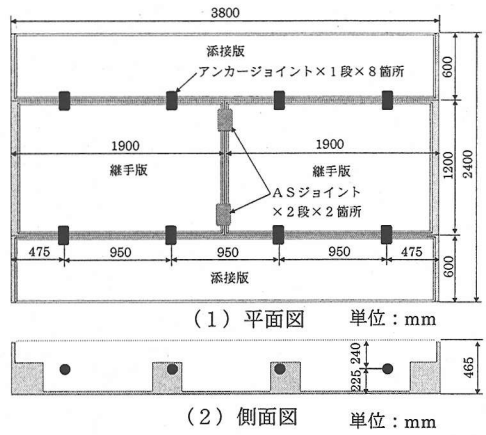


図-36 添接曲げ試験体図

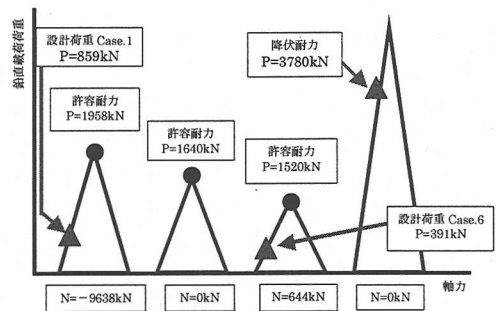


図-37 添接曲げ載荷ステップ

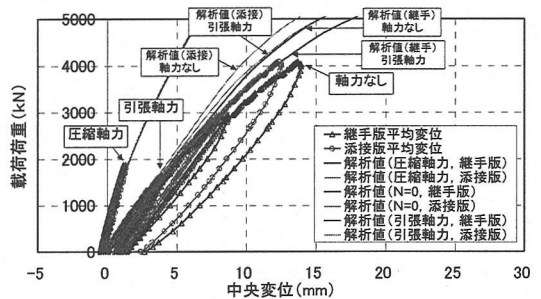


図-38 荷重-中央変位関係

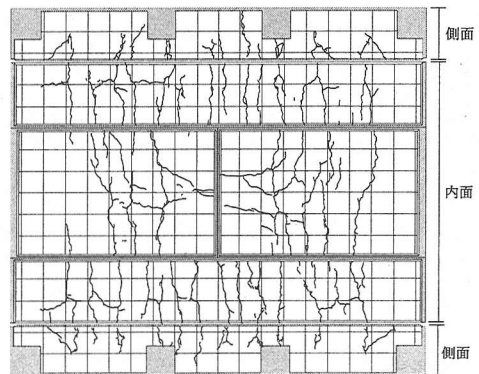


図-39 ひび割れ発生状況



d) 試験結果

1) 荷重-継手部中央変位関係

荷重-継手部中央変位関係を図-38に示す。試験は、軸力なしにおける最大荷重が、許容耐力における約3.0倍で添接版の主鉄筋が降伏したのを確認して、載荷装置の制約から試験を終了した。

本体部曲げ試験より得られた本体部の剛性(DRCタイプ)と継手曲げ試験及びリング継手せん断試験から得られたバネ剛性の妥当性を照査するために、リング解析モデル「はり-バネモデル」により、試験結果の再現を行った。解析の結果を図-38中に示す。各軸力時ともに、試験結果を再現しており、本体部のモデル化及びバネ剛性の設定が妥当であることを確認した。

2) ひび割れ性状

設計荷重作用時に発生したひび割れ幅は、最大で0.15mmであり、本体部曲げ試験結果と同様に構造上・耐久性上問題となるようなひび割れ幅を生じないことを確認した。また、試験終了時のひび割れは図-39に示すように、20~30cmの間隔で発生し、添接版にも良好に分散することを確認した。

e) 考察

添接曲げ試験結果における考察は、以下のとおりである。

- 1) 試験結果荷重-継手部中央変位関係は、これまでの試験結果から得られた、セグメント本体部の剛性及びセグメント間回転バネ剛性  $k_\theta$  とリング間せん断バネ剛性  $k_s$  を用いた「はり-バネモデル」により評価することができた。これにより、各値の設定が妥当であることを確認した。
- 2) 設計荷重作用時に発生したひび割れは、構造上・耐久性上十分に安全なひび割れ幅であることを確認した。また、添接版のひび割れも良好に分散しており、力の伝達が確実になされていることを確認した。

6. DRCセグメントの設計

(1) 性能確認試験の設計へのフィードバック

5. 性能確認試験から得られた設計用値・特性を、表-13に示す。これら性能確認試験から得られた結果を、セグメント構造設計へフィードバックし、設計の照査を行った。設計方法は、セグメント本体をはり要素に、セグメント継手及びリング継手をバネ要素にモデル化する「はり-バネモデル」により実施した。はり-バネモデルのモデル図を図-40に示す。設計の照査を実施した結果、アンカージョイント(リング継手)が、5.(2)アンカージョイント要素試験で性能を確認したM27 10.9ボルト相当タイプからM24 10.9ボルト相当タイプへ小型化することが可能となり、構造設計の最適化を図るとともにコストダウンを図ることが可能となった。なお、M24 10.9ボルト相当タイプのアンカージョイントについても、M27 10.9ボルト相当タイプと同様の試験を実施し、各性能の確認を行っている。性能確認試験結果を表-13中に示す。また、最終的な設計の照査に用いたセグメント継手、リング継手のバネ剛性を図-41に示す。リング継手のバネ剛性は初期ずれを考慮する場合としない場合の2種類の方法を用いるものとした。

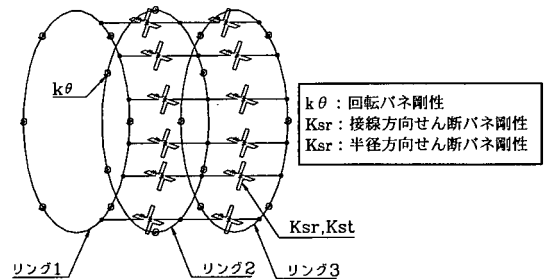
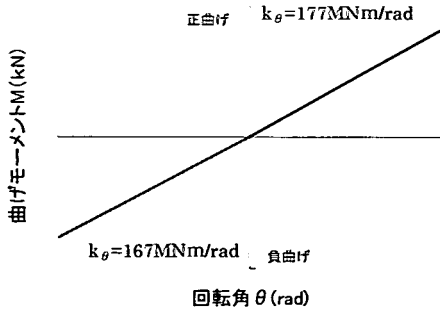


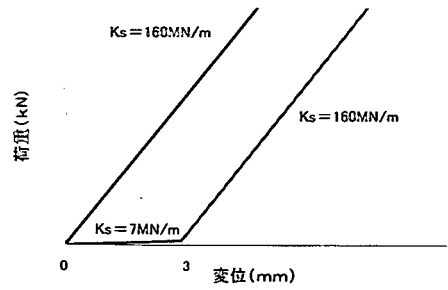
図-40 はり-バネモデル

表-13 性能確認試験と設計定数

| 性能確認試験項目                |   | 試験結果から得られた設計用値・特性  |
|-------------------------|---|--|
| ASジョイント要素試験             | バックアップ材座屈試験   | 設計荷重作用時締結力: 327kN (641μ)   |
|                         | 締結試験  | 締結力のバラツキ: ±30%以下 (228kN~425kN (448μ~833μ))   |
|                         | 引張試験  | 引張耐力: 1250kN以上   |
|                         | 既往の実績   | 経時変化(リラクゼーション): 10%以下  |
| アンカージョイント要素試験           | 締結試験  | 締結押込み力: 200kN以下  |
|                         | 引張試験  | 引張耐力: 477kN以上 (M27 10.9), 367以上 (M24 10.9)   |
|                         | 単体せん断試験   | M27 10.9タイプ: $k_{s2}=234\text{MN/m}$<br>M24 10.9タイプ: $k_{s1}=7\text{MN/m}$ , $k_{s2}=160\text{MN/m}$ |
| 本体部曲げ試験                 | 合成構造として機能   |  |
| セグメント継手 (ASジョイント) 曲げ試験  | $k_\theta$ (正曲げ) = 177MNm/rad, $k_\theta$ (負曲げ) = 167MNm/rad  |  |
| リング継手 (アンカージョイント) せん断試験 | M27 10.9タイプ: $k_{s1}=18\text{MN/m}$ , $k_{s2}=288\text{MN/m}$ |  |
| 添接曲げ試験                  | はり-バネモデルの設計法の妥当性を確認   |  |



(1) セグメント継手の回転バネ剛性



(2) リング継手のせん断バネ剛性

図-41 セグメント継手の回転バネ剛性

(2) 現場計測結果による設計の検証

a) 現場計測結果

計測リングには作用荷重を計測するために、図-42に示す位置に土圧計と水圧計を設置した。また、鉄筋応力を計測するための鉄筋計とダクト外主桁・中主桁のひずみとAS金物のひずみを計測するために、図-43に示す位置にひずみゲージを設置した。

各計測装置から得られた経時データを図-44~50に示す。

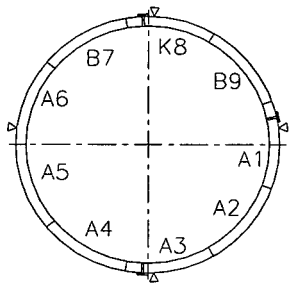


図-42 土圧・水圧計位置図

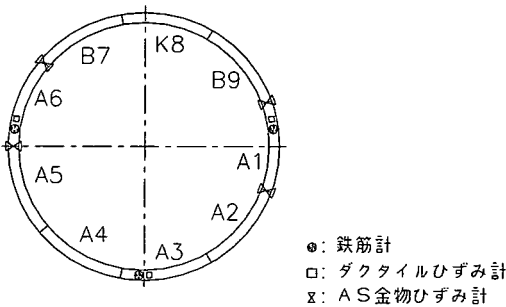


図-43 鉄筋計・ひずみゲージ位置図

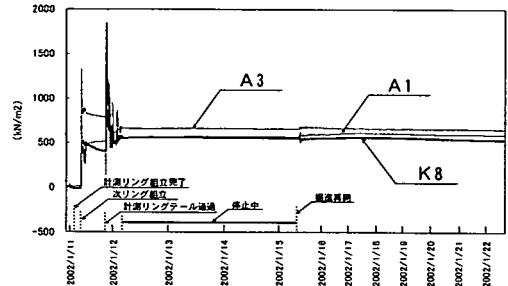


図-44 土圧の時刻歴

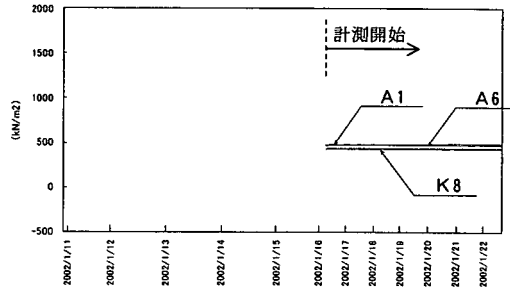


図-45 水圧の時刻歴

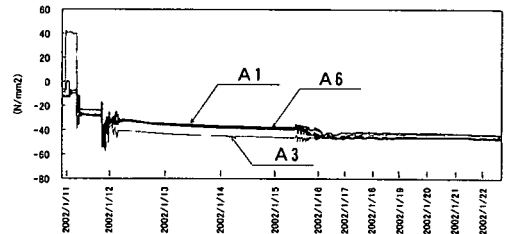


図-46 鉄筋応力度の時刻歴

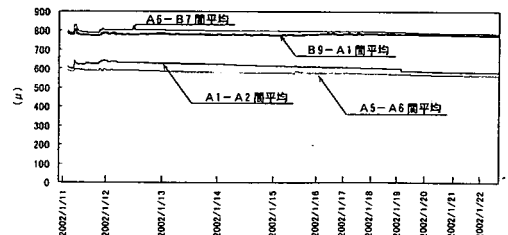


図-47 AS金物ひずみの時刻歴

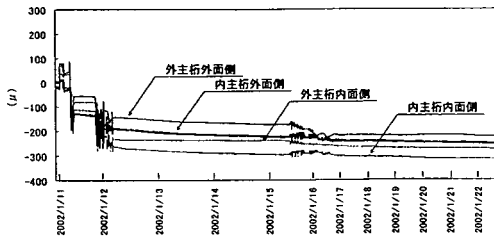


図-48 ダクトイル主桁ひずみの時刻暦 (A1)

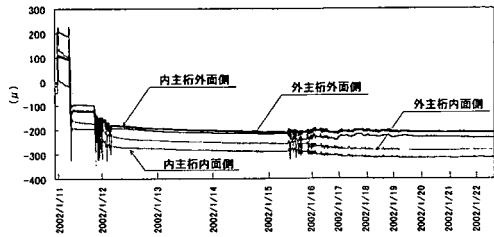


図-49 ダクトイル主桁ひずみの時刻暦 (A3)

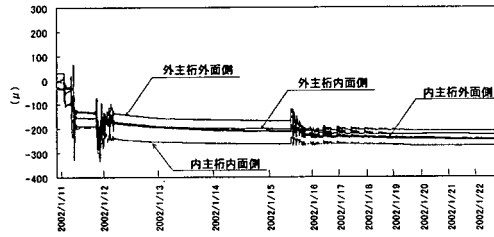


図-50 ダクトイル主桁ひずみの時刻暦 (A6)

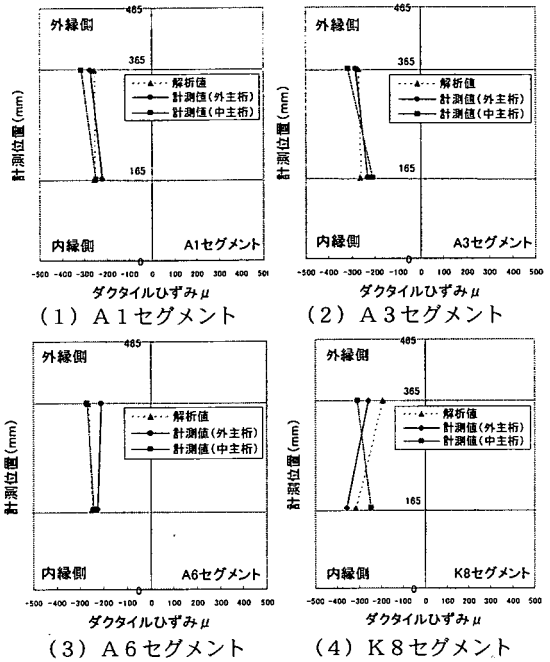


図-51 ダクトイル主桁ひずみの比較

表-14 鉄筋応力度の比較

|         | 周方向鉄筋応力度 (N/mm <sup>2</sup> ) |      |
|---------|-------------------------------|------|
|         | 解析結果                          | 計測結果 |
| A1セグメント | -54                           | -43  |
| A3セグメント | -54                           | -44  |
| A6セグメント | -52                           | -46  |
| K8セグメント | -74                           | -45  |

b) 計測リングのシミュレート解析

土圧計・水圧計による計測結果から、外荷重を想定して、計測リングのシミュレート解析を行った。

なお、解析は「はり-バネモデル」によるものとし、本体部を合成構造とした剛性で評価し、継手のバネも性能確認試験（軸力なしの場合）から設定したものをを用いた。

c) 計測値と解析値の比較

ダクトイル鋼殻の外主桁・中主桁に発生するひずみの解析値と計測値の比較を図-51に示す。また、周方向鉄筋に発生する応力度の解析値と計測値の比較を表-14に示す。

この結果から、解析値は計測値をほぼ再現できており、性能確認試験から得た設計用値・特性及び設計方法の妥当性が検証されたものと考えられる。

また、AS金物に発生するひずみの計測結果は表-15のとおりとなった。一方、シミュレート解析の結果は、軸力が卓越し継手部に引張応力は発生しない

表-15 AS金物ひずみの比較

|        | 解析結果  | 計測結果               |                    |                      |                  |
|--------|-------|--------------------|--------------------|----------------------|------------------|
|        |       | 組立直後<br>テール内<br>ε1 | 外圧作用<br>テール外<br>ε2 | 変化量<br>(ε2-ε1)<br>Δε | 経時変化率<br>(Δε/ε1) |
|        |       |                    |                    |                      |                  |
| B9-A1間 | 全断面圧縮 | 791                | 781                | -10                  | -1.3             |
| A1-A2間 | 全断面圧縮 | 611                | 586                | -25                  | -4.1             |
| A5-A6間 | 全断面圧縮 | 591                | 569                | -22                  | -3.7             |
| A6-B7間 | 全断面圧縮 | 804                | 788                | -16                  | -2.0             |

ため、解析上AS金物のひずみの変化は生じない。従って、計測結果における組立直後（テール内）から外圧作用時（テール外）のAS金物のひずみの変化はリラクゼーション及び添接リングとの添接効果による荷重の再配分によるものであると考えられる。組立直後（テール内）の締結力に対して、最大でも約4%の締結力の低下と、長期的な締結力の低下として設計上想定した10%以内に収まっていることから、締結力の経時変化に対する設計時の想定が妥当であり、かつ既往の実績との整合性を確認することができた。

## 7. まとめ

本論文では、外郭放水路第4工区へのDRCセグメントの適用に当たり、設計法の確立・検証を目的とした各種性能確認試験を行い、その試験結果を設計にフィードバックして、設計の照査を行った。また、各種性能確認試験から得られた設計用値・特性と設計法の妥当性を確認するため、施工時計測データと設計値の比較を行った。

これらより得られた知見を以下に示す。

- ①ASジョイント要素試験により、ASジョイントの構造性能を確認するとともに、設計用値を得た。
- ②アンカージョイント要素試験により、アンカージョイントの構造性能を確認するとともに、設計用値を得た。
- ③本体部曲げ試験と非線形FEM解析による検証から、セグメント本体構造はダクタイル鑄鉄と鉄筋コンクリートの合成構造として評価できることを確認した。
- ④セグメント継手曲げ試験により、セグメント継手部が確実な耐力を有することを確認した。また、設計に用いるセグメント継手の回転バネ剛性を得た。
- ⑤リング継手せん断試験により、設計に用いるリング継手せん断バネ剛性を得た。
- ⑥上記試験結果から得られた知見を用いて行った「はりーバネモデル」の解析結果は、添接曲げ試験結果を正確に再現することができた。

これにより、本体部を合成構造とし、試験結果から得られた継手部のバネ剛性を用いた「はりーバネモデル」による設計法の妥当性を確認した。

⑦各種性能確認試験結果を用いて「はりーバネモデル」で行った設計値と、施工時計測のデータを比較した結果、設計の妥当性を確認した。

以上の知見から、DRCセグメントの設計手法に関する一連の流れを確立することが出来た。

謝辞：本研究に対し、数々の御指導・御助言を頂いた今田徹・東京都立大学名誉教授、並びに小泉淳・早稲田大学教授に厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 古市耕輔, 吉田健太郎, 滝本邦彦, 鈴木義信, 桑原泰之, 原廣: 新型合成セグメント(DRCセグメント)の実大試験, 鹿島技術研究所年報 Vol.50, pp.29~36, 2001年11月。
- 2) 中島誠三, 渡邊健, 八坂光洋, 佐藤宏志, 辻本和則: ASセグメントの試験施工(その1)組立, 土木学会第53回年次学術講演概要集VI, pp.284~285, 1998年10月。
- 3) 石川, 渡邊, 辻本, 宮武, 吉野: 自動アンカージョイントの開発, 土木学会第51回年次学術講演会概要集III, pp.270~271, 1996年9月。
- 4) (財)先端建設技術センター: 内水圧が作用するトンネル覆工構造の手引き, 1999年3月。

(2002. 4. 5 受付)

## DEVELOPMENT OF NEW COMPOSITE SEGMENT AND APPLICATION TO THE TUNNELING PROJECT

Masami SHIRATO, Kousuke FURUICHI, Kunihiko TAKIMOTO,  
Hiroshi HARA, Katsuhiko MUKUNO and Kentaro YOSHIDA

In recent years, interest to automatic joints and segments of internal smoothness has grown in shield. Furthermore, discharge channel requests the strength of the main part of shield segments and joints against higher inner hydraulic pressure. This time, we developed the new composite (DRC) segment and applied to the project.

In this paper, we report the results of performance confirmation tests and measurement on-site construction for the confirmation of design method and structural characteristic of the new composite segment.