

報告 軸力下におけるヒンジ継手の挙動

舟川 勲^{*1}・岩本 勲^{*2}・柴田卓詞^{*3}・前川岳康^{*4}

要旨: シールドトンネル用セグメントの継手構造を簡略化した「多ヒンジ系セグメント」は、従来式の継手と比較して、経済性、施工性、耐久性が向上することにより、コンクリート製品としての付加価値が高いと考えられる。本報告では、ナイロン製継手をセグメントリング間に用いた「多ヒンジ系セグメント」の継手性能に関して、押し込み実験、引き抜き実験、耐久性試験および軸力下におけるせん断実験を実施し、基礎的データを把握した。その結果、軸力はセグメントを模擬したコンクリートブロック部分の接触面の摩擦力に影響されるが、継手のせん断耐力には影響が少ないことがわかった。

キーワード: 多ヒンジ系セグメント, ナイロン, 継手, 軸力, せん断力

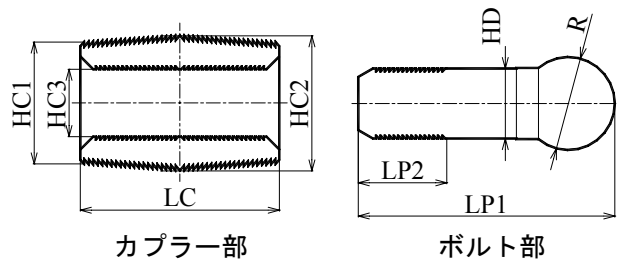
1. はじめに

従来のシールドトンネル用セグメントの継手構造は、鋼製の継手板とボルトを用いた剛性の高い構造としている。それに対して筆者らは、継手構造を簡略化した「多ヒンジ系セグメント」を考案し、種々の検討を行っている¹⁾。継手構造の簡略化は、施工時に継手ボルトの締結作業を省力化でき、露出鋼材が少なく耐久性が向上するといった効果もあり、コンクリート製品としての付加価値が高いと考えられる。

さらには、セグメント価格において15%程度も占める従来式の継手と比較して、半分程度という経済的なメリットもある。

本報告では、ナイロン製継手をリング間に用いた「多ヒンジ系セグメント」の継手性能に関して、基礎的データを把握するために、押し込み実験、引き抜き実験、耐久性試験および軸力下におけるせん断実験を実施し、これらの試験および実験で得られた力学的挙動特性等について報告する。

2. 継手素材の基本特性



単位: mm

| 種類 | LC | HC1 | HC2 | HC3 | LP1 | LP2 | HD | R |
|---------------|-----|-----|-----|------|-----|-----|------|----|
| Standard Duty | 70 | 40 | 45 | 21.3 | 102 | 30 | 22.3 | 33 |
| Medium Duty | 90 | 55 | 61 | 30.4 | 116 | 40 | 31.6 | 42 |
| Heavy Duty | 120 | 71 | 84 | 48.8 | 157 | 55 | 50 | 60 |

図-1 継手の寸法諸元

2.1 継手種類

本実験で用いられる継手は、ポリアミド（ナイロン）を主成分とする成形材料である。セグメント径に応じて小、中、大の3種類の継手を適用するが、便宜上、Standard Duty, Medium Duty, Heavy Dutyと呼んでいる。継手の寸法諸元を図-1に示す。

2.2 引張特性

継手素材の引張特性を把握するため引張試験を実施した。併せて、コンクリート中での長期安定性を確認するために、アルカリ溶液中への浸せき後の引張試験も実施した。試験体は JIS

*1 (株) 青木建設 施工本部研究所 工修 (正会員)

*2 近畿コンクリート工業(株) 土木事業部 エンジニアリンググループ 工博

*3 関西電力(株) 土木建築室 土木建設グループ 工修

*4 関西電力(株) 土木建築室 土木建設グループ

K7113 に従い、プラスチック 1 号形試験片に準じて、継手ボルトから幅 25mm，厚さ 6.0mm，長さ 140mm の試験片を切り出し，各水準について 3 体，変位制御型試験機を用いて，引張変位速度 5mm/分

で引張試験を実施した。アルカリ溶液 (Ca(OH)₂=2g/l, NaOH=10g/l, KOH=14g/l) はコンクリートと同等の pH (=12.5 ~13.0) とした。シールドトンネルは地中構造物であるため，環境温度は年間を通じてほぼ一定温度 (20℃程度) を保つ。ここで，材料の反応温度と反応速度との関係において，反応速度は温度の逆数に対して指数関数的に減少し，一般に 10℃の温度降下によって反応速度は 1/2 倍となる「アレニウスの 10 度半減則」と呼ばれている。セグメントの耐用年数を 50 年と仮定し，50 年後の 20℃での継手の引張強度低下率を推定するため，溶液の温度による促進効果を考慮し，40℃と 60℃の 2 水準とした。なお，本報告では浸せき 3 ヶ月の試験結果までであるが，試験は継続して実施している。

試験水準および試験結果を表 1 に示す。引張強度は浸せき期間の増加と温度の増加に伴ってゆるやかに減少する傾向が見られ，「60℃-3 ヶ月」の浸せき条件では，「浸せき無し」と比較して，20%程度小さい結果となった。引張弾性率も強度の低下に伴って低下した。

3. 継手の押し込みおよび引き抜き特性

3.1 概要

試験体形状を図 2 に示す。試験体は幅 0.25m×長さ 0.30m×厚さ 0.25m のコンクリートブロックを用い，継手は図 1 の Medium Duty を用いた。継手の構造は，ボルト部がコンクリートに埋め込まれており，接続時にカプラーを装着して，その中に次のセグメントのボルトが入り込む。ボルトおよびカプラーには溝が刻まれており，この溝の形状はボルトが入りやすく

表 1 試験水準および引張試験結果

| 試験水準 (温度-浸せき期間) | 引張強度 (N/mm ²) 平均値/最小値 | 引張弾性率 (kN/mm ²) 平均値 | 破断伸び (%) 平均値 |
|--------------------|---|---------------------------------------|--------------------|
| 浸せき無し | 50.2/49.2 | 1.44 | 179.9 |
| 40℃-1 ヶ月 | 46.7/44.2 | 0.92 | 208.2 |
| 40℃-3 ヶ月 | 44.2/41.6 | 0.79 | 222.0 |
| 60℃-1 ヶ月 | 43.7/42.4 | 0.91 | 199.1 |
| 60℃-3 ヶ月 | 40.1/39.9 | 0.83 | 158.8 |

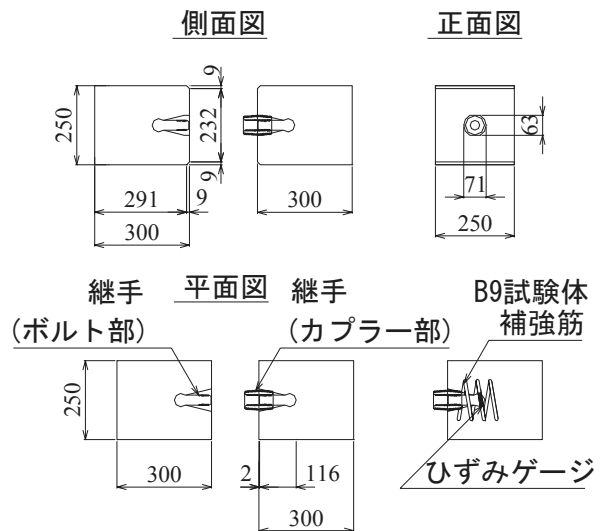


図 2 試験体形状

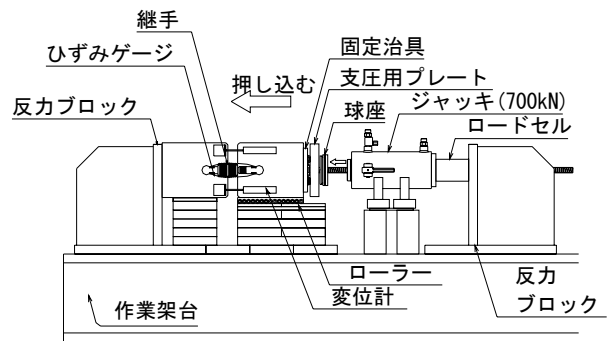


図 3 押し込み実験概要図

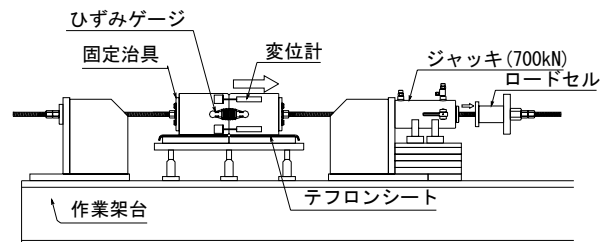


図 4 引き抜き実験概要図

抜けにくい構造となっている。

継手の押し込みおよび引き抜き特性を把握するため，押し込み実験および引き抜き実験を

施した。併せて、この継手のコンクリート中での長期間の安定性を検証するため、50℃アルカリ溶液中（pH=12.5, Ca(OH)₂=2g/l）に1, 3ヶ月浸せき後、引き抜き実験によって確認した。

図-3に押し込み実験概要図、図-4に引き抜き実験概要図をそれぞれ示す。なお、コンクリートは、設計基準強度 42N/mm² (Gmax=20mm, スランプ 8cm, 普通ポルトランドセメント)を用いている。なお、B9 試験体には継手ボルトの引張時に発生するコンクリート部分の引張補強筋として、ボルトホール周りにスパイラル筋 (φ10) を配置している (図-2 参照)。

実験結果を表-2に示す。また、一例として試験体の押し込み時の荷重と試験体間距離との関係を図-5に示す。試験体の押し込み状況は目視観察により、図中に示す「状態1」までは、双方のコンクリート面は接触しておらず、継手のみの押し込み荷重であった。「状態1」で双方のコンクリート面の一部が接触し始める。その後、「状態2」において双方のコンクリート面が全面的に接触した。

荷重除荷時においては、「状態3」より、双方のコンクリート面が離れ、継手への圧縮応力が解放され始める。なお、何れの試験体においても、荷重除荷後（「状態4」）には1mm程度の目開きが生じた。これは、継手が弾粘性体であるため、最大押し込み荷重時においてもボルトとカプラーの溝が完全にはまり込まないためと考えられる。実際の工事においては、推進ジャッキの残留力が存在するので、問題ないと思われる。

図-6にB1, B5, B9 試験体について、引き抜き時の荷重と試験体間距離との関係を示す。いずれの試験体においても最大荷重以後も、溝が1箇所ずつ抜け、荷重が徐々に下がっていく

表-2 実験結果一覧

| 試験体名 | 押し込み実験 | | 引き抜き実験 | | 備考 |
|------|----------|----------|-----------|----------------|----------------|
| | 状態1 (kN) | 状態2 (kN) | 最大荷重 (kN) | 引張剛性*2 (kN/mm) | |
| B1 | 10.20 | 12.60 | 23.8 | 3.7 | 浸せき無し |
| B2 | 9.20 | 15.90 | 16.1 | 2.7 | 浸せき無し |
| B3 | 11.00 | *1 | 37.2 | 6.4 | 1ヶ月浸せき |
| B4 | 10.20 | 11.50 | 32.4 | 6.2 | 1ヶ月浸せき |
| B5 | 10.90 | 16.25 | 22.3 | 4.6 | 3ヶ月浸せき |
| B6 | 9.85 | 15.15 | 34.5 | 4.6 | 3ヶ月浸せき |
| B9 | 9.90 | 19.90 | 26.5 | 4.1 | 浸せき無し 補強筋あり |

注) *1: 測定出来ず, *2: 引張剛性は試験体間距離 3mm で評価

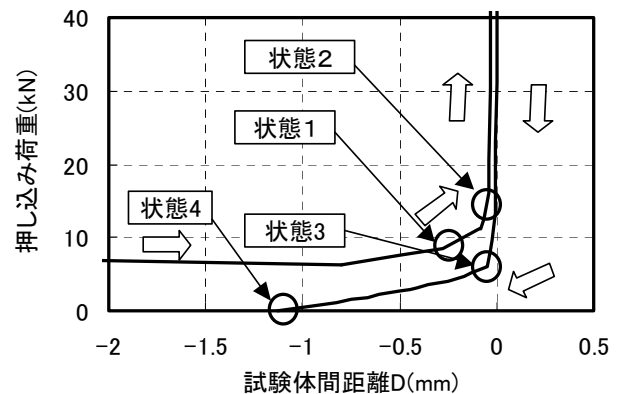


図-5 押し込み荷重と試験体間距離

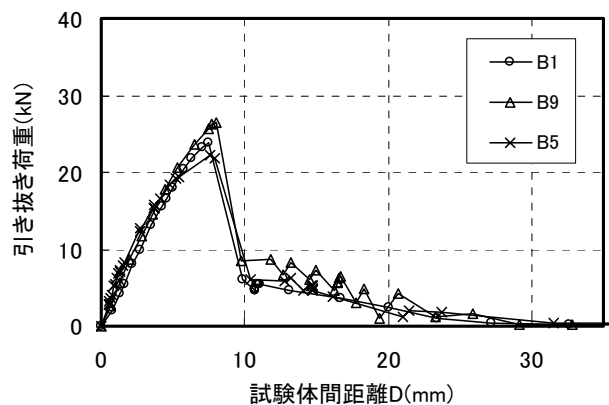


図-6 引き抜き荷重と試験体間距離

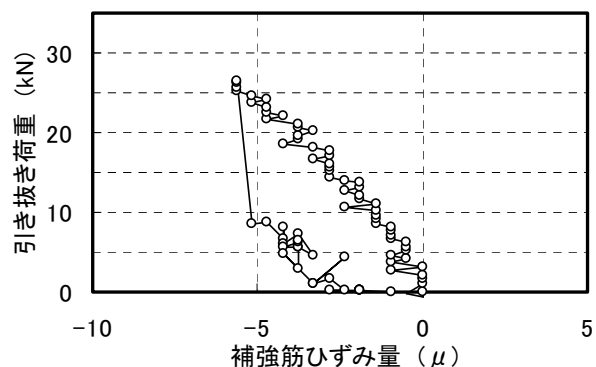


図-7 補強筋のひずみ量 (B9)

様子がわかる。このように、抜け出してからもしん性のある引き抜き特性を示す。

また、表-2より、押し込み荷重と比較して引き抜き荷重は概ね2倍程度大きなことがわかる。

継手素材の引張強度および引張弾性率はアルカリ溶液への浸漬期間の増加に伴って低下していたものの、50℃-3ヶ月の浸せき試験体の破壊形態は、浸せき無しの試験体と同様に、ボルト部がカプラーから引き抜けることとなり、ボルトの付着切れやボルトの引張破断は生ぜず、引き抜き特性には影響していなかった。なお、本報告は浸せき3ヶ月の実験結果までであるが、実験は継続して実施している。

図-7にB9試験体における補強筋のひずみ量と引き抜き荷重の関係を示す。補強筋には殆どひずみが発生しておらず、コンクリートへの影響は無いと考えられる。また、図-8はB1、B9試験体について、引き抜き時の荷重と継手ボルトのひずみ量の関係を示したものであるが、補強筋の有無の比較では、双方とも同程度のひずみ量が発生していた。また、補強筋の有無に関わらず、引き抜き実験時に継手周囲のコンクリート部分には有害なひび割れが発生していなかった。これらの結果より、継手ボルトの引張時に発生するコンクリート部分の引張補強筋は必要ないと考えられる。

4. 継手のせん断特性

4.1 実験概要

セグメントのリング間継手には常時、地震時ともせん断力が作用する。常時においてはシールド推進時の残存圧縮力があり、地震時には引張状態となることも考えられる。ここでは、軸力の影響を考慮して、常時の残存圧縮力である60kNを中心に、25kNと120kNの軸力について、二面せん断実験を実施した。

4.2 試験体形状および載荷方法

形状寸法および配筋図を図-9に示す。試験体は幅1.0m×長さ0.8m×厚さ0.3mのコンクリ

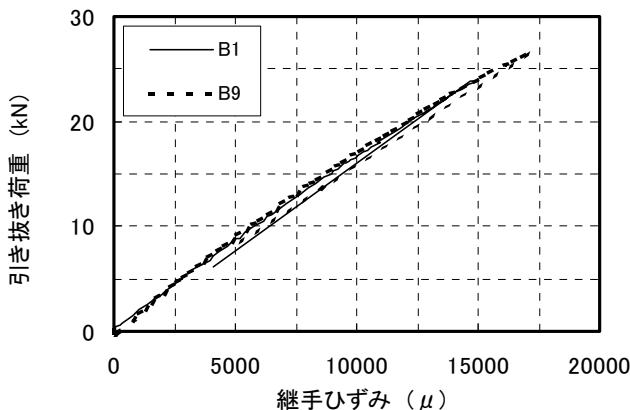


図-8 継手ボルトひずみ量

表-3 実験ケース

| 試験体名 | 導入軸力 (kN) | 備考 |
|------|-----------|--------------|
| E1 | 25 | 無負荷状態を想定 |
| E2 | 60 | 常時の残存圧縮力を想定 |
| E3 | 120 | 地震時=常時×2倍を想定 |

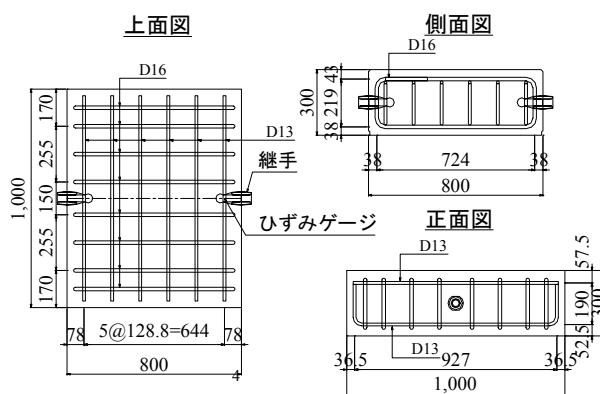


図-9 試験体の形状寸法および配筋図

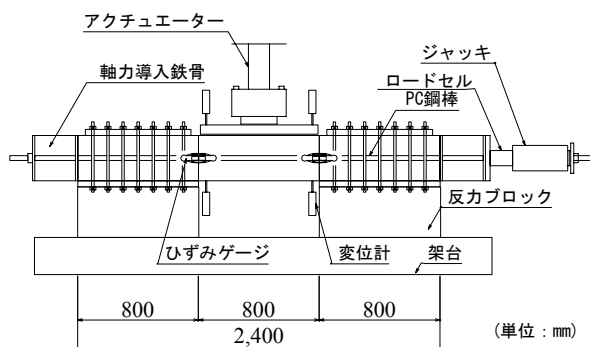


図-10 せん断実験概要図

ートブロック3体を、2本の継手を介して一体化させた。なお、継手は図-1のMedium Dutyを用いている。また、コンクリートブロック間には、接合時の応力集中によるコンクリート面のひび割れ発生を抑制するため、緩衝材 (JIS

A6005:ルーフィングペーパー、厚さ 1.5mm) を挟み込んである。なお、コンクリートは、設計基準強度 42N/mm^2 を用いている。実験ケースを表-3に示す。

荷重方法は試験体側面方向から表-3に示した軸力を導入し、一定保持させた状態で、図-10に示すように二面せん断実験とした。各荷重毎にせん断変位量、継手ひずみの測定を行うとともに、破壊状況の目視観察を行った。

4.3 実験結果および考察

(1) 破壊状況

荷重と変形量の関係を図-11に示す。加力初期の段階(「状態1」)では、いずれの試験体においても、荷重のみ大きくなっている。ここでは、導入軸力による反力ブロックと載荷ブロック間の接触面の摩擦力のみが影響していると考えられる。次に、「状態2」までは変形曲線は横這いとなっているが、この原因として、加力に伴い、せん断変形量が大きくなるが、継手がボルトホール上部に接触するまではクリアランスが 1mm あり、継手自体へのせん断力の影響が少ないこと、および継手カプラーと継手ボルトの初期のかみ合いが影響することにより、このような挙動を示したと推測される。その後、「状態3」まで弾性的に挙動し、「状態3」以降は非線形挙動となった。地震時を想定した軸力を導入したケース(E3)から考察すると、せん断変形量は 25mm 程度まで許容されると考えられる。

実験終了時の破壊形態は、コンクリートブロックにはほとんど損傷が見られず、片方の継手カプラー中央部分でせん断破壊され(写真-1)、もう一方の継手については破断に至らぬものの、塑性的に殆ど伸びきっている状態であった。

表-4に実験結果の一覧を示す。最大荷重はE1~E3試験体でそれぞれ、211.6kN、229.2kN、254.4kNとなり、そのときの変形量は34.3mm、32.1mm、27.8mmとなっていた。なお、「状態2」から「状態3」を弾性範囲として、この割線勾配をせん断ばね定数(継手1本当たり)として

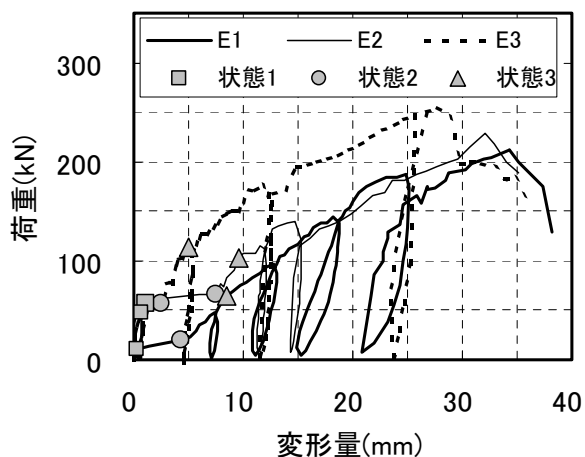


図-11 荷重と変形量



写真-1 継手の破壊状況

表-4 実験結果一覧

| 適用状態 | | 試験体名 | | | |
|----------------|---------|---------|-------|-------|-------|
| | | E1 | E2 | E3 | |
| 状態1 | 荷重(kN) | 10.4 | 56.2 | 47.3 | |
| | 変形量(mm) | 0.3 | 1.1 | 0.8 | |
| 弾性範囲 | 状態2 | 荷重(kN) | 19.6 | 65.5 | 57.0 |
| | | 変形量(mm) | 4.3 | 7.4 | 2.6 |
| | 状態3 | 荷重(kN) | 63.8 | 103.0 | 113.9 |
| | | 変形量(mm) | 8.4 | 9.5 | 5.0 |
| せん断ばね定数(kN/mm) | | 5.39 | 8.93 | 11.85 | |
| 最大荷重時(Pmax) | 荷重(kN) | 211.6 | 229.2 | 254.4 | |
| | 変形量(mm) | 34.3 | 32.1 | 27.8 | |

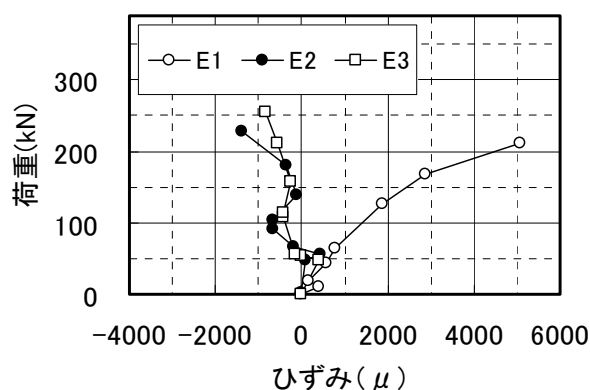


図-12 継手のひずみ性状

表－5 継手のせん断強度の算定

| 試験体名 | 荷重P (kN) | ブロック自重W (kN) | 軸力N (kN) | 摩擦力 $f=\mu N$ (kN) | 継手せん断強度 (1本当たり) $P_s=(P+W)/2-f$ (kN) |
|------|-------------|-----------------|-------------|-----------------------|---|
| E1 | 211.6 | 5.88 | 24.5 | 6.1 | 102.6 |
| E2 | 229.2 | 5.88 | 58.8 | 14.7 | 102.9 |
| E3 | 254.4 | 5.88 | 117.7 | 29.4 | 100.7 |

μ : 動摩擦係数 (=0.25)

評価し、E1～E3 試験体ではそれぞれ、5.39kN/mm, 8.93kN/mm, 11.85kN/mmとなった。

(2) 継手のひずみ性状

継手のひずみ性状を図－12に示す。なお、ひずみ量は継手ボルトに貼付した泊ゲージの平均値とした。E1 試験体（軸力：25kN，無負荷状態を想定）では、ひずみは引張側領域で終了しているが、E2 試験体（軸力：60kN，常時の残存圧縮力を想定）、E3 試験体（軸力：120kN）では、圧縮側領域で終了する結果となっていた。

(3) 軸力の影響

3 体の実験結果から、ルーフィングペーパーを緩衝材として挟み込んだコンクリートブロックの動摩擦係数として、0.25 が得られた。

継手のせん断強度は、断面積×材料（ナイロン）のせん断強度で計算され、 $(1679\text{mm}^2 \times 60\text{N/mm}^2)$ 約 100kN となる。実験で得られた動摩擦係数を用いて、表－5 のように算定すると継手の受け持つせん断耐力とほぼ一致する。

従って、軸力はセグメントを模擬したコンクリートブロック部分の接触面の摩擦力に影響するが、継手のせん断耐力には影響が少ないと考えられる。

また、表－4 により、軸力が大きくなるほど、せん断ばね定数が大きくなる傾向を示した。

これらの結果は、土木学会 コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]²⁾の 6.3.7 設計せん断伝達力 [解説] (1) に記述される内容より、同様に考察できる。

本研究で用いたセグメントリング間に用いるナイロン製継手のせん断特性は、材料であるナイロンのせん断特性と断面形状によって決定されると考えられる。また、破断個所であるカブ

ラー部分は円環であるので変形性能が大きく、それによって大きなじん性が得られたと推測される。

5. まとめ

従来のシールドトンネル用セグメントに用いられている、剛性の高い継手ではなく、継手構造を簡略化した「多ヒンジ系セグメント」で用いるナイロン製継手に関して、基礎データの把握を目的として各種実験を行った。

得られた知見は以下の通りである。

- (1) 軸力はセグメントを模擬したコンクリートブロック部分の接触面の摩擦力に影響するが、継手のせん断耐力には影響が少ないと考えられる。また、軸力が大きくなるほど、せん断ばね定数が大きくなる傾向を示した。
- (2) ナイロン製継手において、破断個所は円環であるので変形性能が大きく、それによって大きなじん性が得られたと推測される。
- (3) 継手素材の引張強度および引張弾性率はアルカリ溶液への浸漬期間の増加に伴って低下していたものの、50℃－3ヶ月浸せき後の引き抜き実験では、引き抜き特性には影響していなかった。

参考文献

- 1) 岩本 勲, 伊豆好弘, 三鼓 晃, 前川岳康 : 多ヒンジ系セグメントの耐荷特性について, トンネル工学研究論文・報告集, 第12巻, pp.489-494, 2002.11
- 2) 土木学会 2002 年制定 コンクリート標準示方書 [構造性能照査編], 2002.3