

シールドトンネルのリング継手の引張性能に関する検討

A STUDY OF TENSILE PERFORMANCE ON RING JOINTS OF SHIELD TUNNEL

三宅 正人¹⁾・豊島 径²⁾・鱒田 実³⁾

Masato MIYAKE, Kei TESHIMA, Minoru INADA

In this report, to investigate the seismic performance of shield tunnel in longitudinal direction, results of tensile test on ring joints of segments are reported. Moreover basic tests of bolts, elastic washers, steel materials, and ductile cast iron materials that consists ring joints were also conducted. By using these results, the influence which mechanical properties of materials have on the seismic performance of ring joints are discussed.

Key Words: Shield segments, Ring Joints, Tensile Behavior

1. はじめに

2001年4月に(社)日本下水道協会から「下水道施設耐震計算例 2001年版」が発刊され、7月に改正された「シールド工事用標準セグメント」(社)日本下水道協会)の中には『シールドトンネルの耐震検討方法の現状』に関する記述が追記された。さらに、9月には(社)土木学会西部支部から「シールドトンネルの合理的耐震設計法 ガイドライン(案)」が発刊され、現在、シールドトンネルの耐震設計に対する関心が高まっている状況にある。

シールドトンネルを代表とする地下の線状構造物の耐震性に関する研究は1980年代より行われてきたが、1995年の兵庫県南部地震を契機として各自治体、各機関によりシールドトンネルの耐震設計に関する指針が独自に制定されてきた。しかしながら、これらの指針類は必ずしも互いに整合性の取れたものとはなっていない状況にある。表-1に耐震関連指針の例を示す。

本報告では、これら指針に示されているこれまでの知見を基にしながら独自に実施した実験から得られた結果を用いて、シールドトンネル縦断方向の耐震性能について考察を加えるものである。

表-1 耐震関連指針の例

1974	石油パイプライン技術基準	(社)日本道路協会
1982	ガス導管耐震設計指針	(社)日本ガス協会
1985	シールドトンネルの耐震性に関する研究	建設省土木研究所
1992	大規模地下構造物の耐震設計法・ガイドライン(案)	建設省土木研究所
1995	兵庫県南部地震発生	
1997	水道施設耐震工法指針・解説	(社)日本水道協会
	下水道施設の耐震対策指針と解説	(社)日本水道協会
2000	高圧ガス導管耐震設計指針	(社)日本ガス協会
2001	下水道施設耐震設計例	(社)日本水道協会
	シールド工事用標準セグメント	(社)日本水道協会
	シールドトンネルの合理的耐震設計法ガイドライン(案)	(社)土木学会関西支部

- 1) 正会員 工学修士 新日本製鐵株式会社 鉄鋼研究所鋼構造研究開発センター 主任研究員
2) 正会員 工学修士 新日本製鐵株式会社 鉄鋼研究所鋼構造研究開発センター 研究員
3) 正会員 工学修士 新日本製鐵株式会社 建材開発技術部 グループリーダー

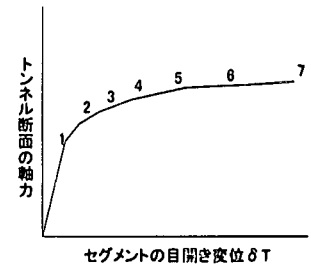
2. シールドトンネルのリング継手の引張特性

シールドトンネルは、トンネル縦断方向に圧縮力が作用する場合と引張力が作用する場合で剛性が大きく異なることが特徴である。特に、引張力を受ける場合にはボルトを代表とする継手部材の複合挙動により継手の引張剛性および耐力が決定することとなる。鉄筋コンクリート製（RC）セグメントを用いたシールドトンネルの耐震性能に関する研究は、旧建設省土木研究所を中心として精力的な研究^{1) 2) 3)}が過去になされているが、鋼製（ST）セグメントや球状黒鉛鋳鉄製（DC）セグメントの耐震性能に関する研究はほとんどなされていない状況にある。

（社）土木学会西部支部から発刊された「シールドトンネルの合理的耐震設計法ガイドライン（案）」の中では、シールドトンネルのリング継手が引張力を受ける場合の継手挙動の一例が示されている。⁴⁾（図－1 参照）

「レベル2地震動：供用期間中に発生する確率は低い、大きな強度を持つ地震動（損傷過程まで立ち入って、構造物の耐震性能を照査する水準）」に対する耐震設計を行う場合には、「継手ボルト」、「継手板」、「アンカー鉄筋」などの剛性および耐力に対する検討が必要である。

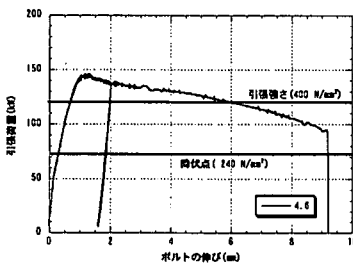
1：継手板降伏、2：継手板塑性化進展、3：継手ボルト降伏、4：アンカー鉄筋降伏、5：アンカー鉄筋破断、6：継手板破断、7：継手ボルト破断



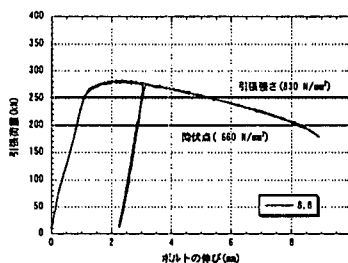
図－1 継手挙動の一例

(1) 継手ボルトの引張挙動

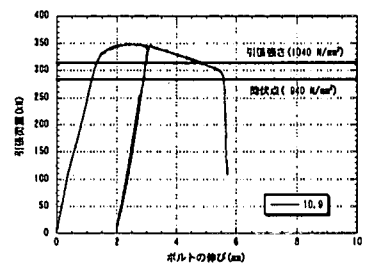
セグメントの継手用ボルトとして使用される強度区分（4.6）、（8.8）、（10.9）の六角ボルトを用い、ナットを取付けた状態で行った引張試験の結果を図－2～図－4に示す。試験に供した六角ボルトは、ねじの呼び M22、首下長さ 80mm でボルトとナットの間隔を 45mm とした状態で引張力を載荷した。



図－2 4.6の荷重～伸び関係



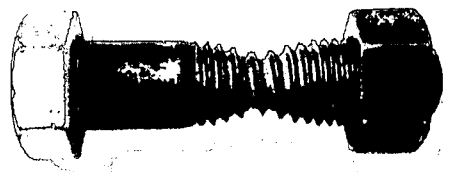
図－3 8.8の荷重～伸び関係



図－4 10.9の荷重～伸び関係

何れのボルトもねじ部が塑性変形して径が絞られた後に破断に至ったが、引張強さを示した後も良好な伸び性能を有している。また、そのような状態で除荷、再载荷を受けた場合でも荷重～伸び関係は線形性を有することを確認した。破断に至る直前のボルトの変形状況を写真－1に示す。

メートル並目ねじの有効断面積は軸部断面積の約 80%程度であるため軸部に比べてねじ部の応力度が大きく、塑性化にともなう伸び変形はボルトのねじ部に集中して発生する。



写真－1 ボルトの変形状況

(2) 弾性ワッシャーの圧縮挙動

縦断方向の耐震設計において、リング継手の引張剛性を低下させ継手に作用する引張力を低減することを目的として、継手に弾性ワッシャーを用いることがある。そこで、弾性ワッシャーの荷重～変形関係を調べることを目的として、繰返し漸増载荷による圧縮試験を実施した。実験に供した弾性ワッシャーは縦維補強ゴム製で M16

のボルト用のものである。

実験結果を図-5、図-6に示す。図-5の圧縮荷重～圧縮量関係の包絡線はトリリニアの形状を示しているが、この弾性ワッシャーの適正な使用範囲は初期締付け荷重と弾性ワッシャーの降伏荷重の間にある2番目の直線領域である。この領域は本試験に供した弾性ワッシャーの場合には圧縮量として2mm程度であった。

図-6は同じ試験の荷重～試験機ストロークの関係であるが、図-6から弾性ワッシャーの降伏を示す3番目の直線部分が終了すると、さらに急激な荷重増加を示す領域が存在していることが分かった。

本試験に供した弾性ワッシャーは強度区分4.6のボルトに適合しているものと考えられるが、図-1と図-5、図-6に示した実験結果からは、ボルトが破断するまでに弾性ワッシャーの変形量が約1.4mm、ボルトの引張強さまでの伸びが約1mm、ボルトが引張強さに達した後の破断までの伸びが約8mmであることが分かる。

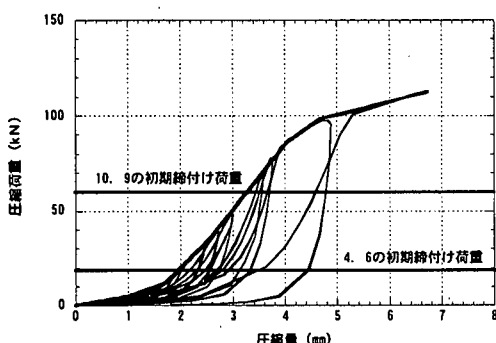


図-5 荷重～圧縮量関係

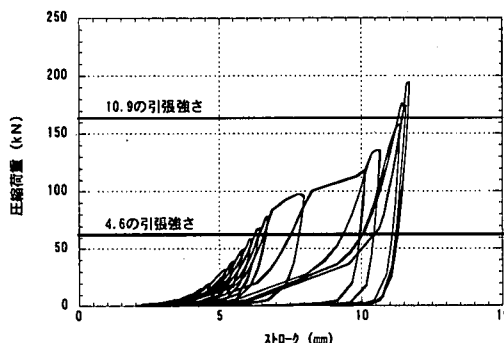


図-6 荷重～試験機ストローク関係

(3) 鋼製セグメントのリング継手引張実験

鋼製セグメントのリング継手の引張挙動を調べることを目的として「シールド工事用標準セグメント」⁵⁾に規定される標準鋼製セグメント、タイプ2、標準番号S29-2から主桁、縦リブおよびスキンプレートを切り出した試験体を作製し継手の引張試験を実施した。試験体の概要を図-7および表-1に示す。

表-1 要素試験体の概要

標準番号	外径 D0 (mm)	幅 b (mm)	主桁		継手板 の厚さ tj (mm)	スキンプレート の厚さ t (mm)	縦リブ				
			高さ h (mm)	厚さ tr (mm)			高さ hs (mm)	厚さ ts (mm)	中心線長さ us (mm)	幅 bs (mm)	中心角 θ_s (°)
S29-2	2750	1000	100	19	19	3.0	93	9	165	89	13.846

写真-2に載荷途中の状況を、図-8に試験体の縦リブ位置で測定した目開き量と載荷荷重の関係を示す。継手が破壊に至るまでに、縦リブ位置の目開きは約30mmに達した。また、継手の最大耐力 $P=220\text{kN}$ は継手板(主桁)を両端固定の梁として算定した降伏荷重 46.4kN の4.7倍であった。本試験に関する検討については別途の論文⁶⁾にて詳細に行っているの、そちらを参照して頂きたい。

本実験から鋼製セグメントのリング継手の引張剛性は、①主桁(継手板)の板厚、②縦リブの間隔および縦リブのフランジとボルトの位置関係、③スキンプレートからボルトまでの距離、④ボルトサイズの影響を受ける。一方、継手の最大耐力はボルト強度および主桁と縦リブまたはスキンプレートとの溶接接合部の強度に依存し、主桁の面外曲げ強度にはあまり影響を受けないことが分かった。

「下水道施設耐震計算例 2001年版」では、レベルⅡ地震動に対してボルトまたは鋼材の引張強さにより安全性の照査を行う方

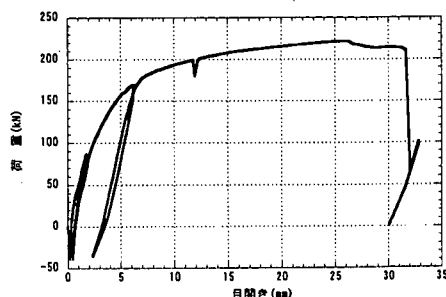


図-8 荷重～目開き関係

法が示されているが、本実験により「下水道施設耐震計算例 2001 年版」に示される照査方法では考慮されていない鋼製セグメントのリング継手の変形性能および損傷過程を確認した。

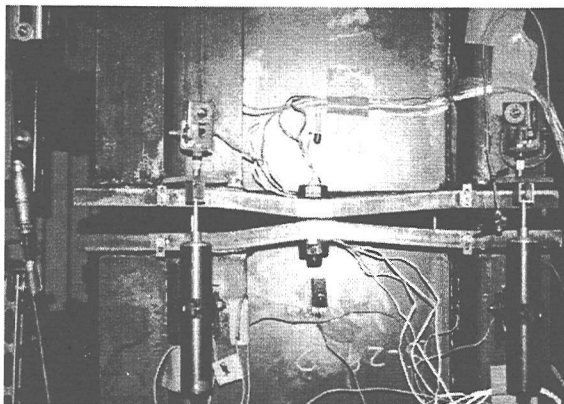


写真-2 継手の変形状況

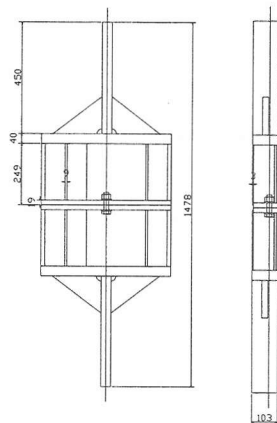


図-7 要素試験体の概要

(4) 鉄筋コンクリート (RC) 製セグメントのリング継手引張実験

RC セグメントのリング継手の引張挙動を調べることを目的として、球状黒鉛鋳鉄(ダクタイル)製の継手金物を用いた継手の引張実験を実施した。実験に使用した継手金物は M27 のボルト用のものであり、ボルト強度区分(8.8)を使用した。図-9、図-10 に試験体の概要図を示し、写真-3 に試験体のセットした状況を示す。この継手金物はナット側が埋め込み式のものであったので、実験では鋼管内面にねじ山を切った載荷用治具を用いて引張力を載荷した。この治具と継手金物および本体との距離の変化をクリップゲージで測定し、これを継手部の目開き量とした。図-12 に実験で測定された荷重～目開き関係を示す。継手の破壊時の目開き量は 1mm 程度であり、鋼製セグメントの継手に比較し剛な継手となっている。

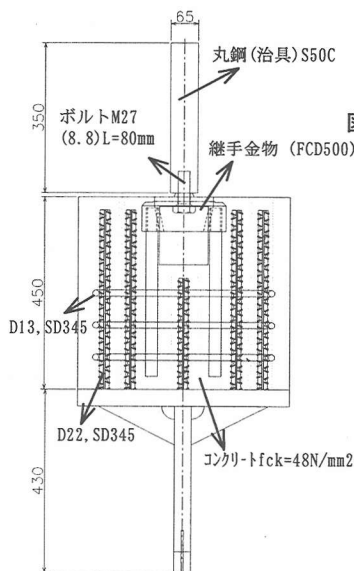


図-9 試験体の概要図

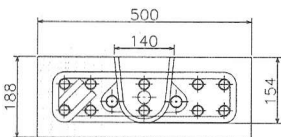


図-10 試験体の概要図(断面)

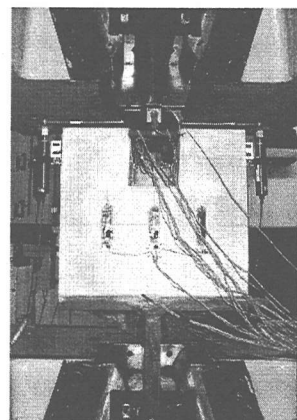


写真-3 試験機へセットした状況

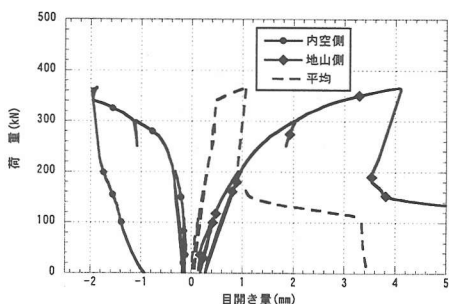


図-11 荷重～目開き関係

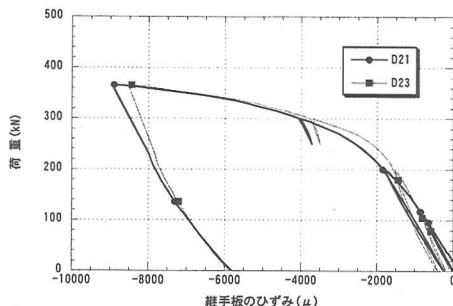


図-12 荷重～継手板ひずみ関係

図-12 に継手板で測定した荷重～継手板ひずみの関係を示す。図-12 中の D21 はボルト位置よりも内空側、D23 はボルト位置よりも地山側で測定値した継手板のひずみである。継手板の面外変形にともなう、これらの部位では圧縮ひずみが発生し、載荷重 $P=200\text{kN}$ 程度で継手板の表面が降伏し、本実験での最大荷重 ($P=370\text{kN}$) 時には約 $9,000\mu$ のひずみが発生していた。

図-13 は継手金物のアンカー筋で測定した荷重～ひずみの関係である。アンカー筋は SD295-D25 であり、本実験結果から求めた降伏応力度は $\sigma_{sy}=335\text{ N/mm}^2$ であった。本実験ではアンカー鉄筋は載荷重 $P=340\text{kN}$ 程度で降伏している。

写真-4、写真-5 は本実験の載荷終了後に確認した本体のひび割れ状況である。実験で確認されたひび割れは実際のセグメントとはひび割れの発生状況は異なるものと考えられるが、アンカー筋が降伏するとセグメント本体にもアンカー筋と同等のひずみが発生してひび割れが生じ、地震後のトンネルの止水性に極めて重大な影響を与えることが考えられる。

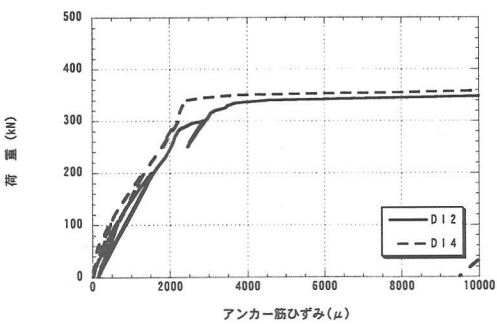


図-13 アンカー筋の荷重～ひずみ関係

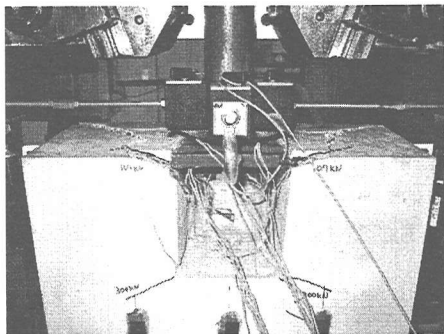


写真-4 本体のひび割れ状況（内空側）

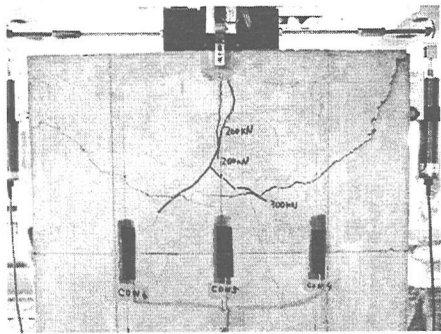


写真-5 本体のひび割れ状況（地山側）

（6）球状黒鉛鑄鉄と溶接構造用圧延鋼材の機械的特性

本実験に用いたリング継手用の継手金物は球状黒鉛（ダクタイル）鑄鉄製のものであったが、同じく溶接構造用圧延鋼材（SM 材）を用いて溶接組立てされた継手金物も使用されている。『トンネル標準示方書 [シールド工法編]・同解説』⁷⁾では、球状黒鉛鑄鉄（FCD500）と溶接構造用圧延鋼材（SM490）には、ほぼ同等の許容応力度が規定されている。

表-2 許容応力度 (N/mm^2)

鋼 種 応力の種別	FCD500	SM490
許容曲げ引張応力度	190	215
許容曲げ圧縮応力度	220	215
許容せん断応力度	130	125

許容応力度設計法では同等の材料として扱われる FCD500 と SM490 であるが、レベル 2 地震動に対する耐震設計を行う場合には、降伏点以降の挙動が極めて重要である。そこで、両材料について材料の引張試験および衝撃荷重に対するじん性を評価するためのシャルピー衝撃試験を実施した。

図-14 に引張試験で測定された応力～ひずみ関係を写真-6 に試験体の破断状況を示す。レベルⅡ地震動に対する耐震設計で重要となる降伏以降の伸び性能は、SM490A と FCD500 では大きく異なるが、このような伸び性能の差が部材性能に与える影響は、部材が全体として曲げや引張を受ける場合よりもむしろ局所的な曲げを受ける場合に顕著に現れる。主桁にリング継手のボルトから引張力が作用して面外変形を起こすような場合には、ボルト近傍の主桁は局所的に塑性化するが、伸び性能が十分でない場合には塑性化した領域が広がらず“き裂”が発生し、この“き裂”が断面内に進展して主桁が部材としての破壊（破断）に至ると考えられる。

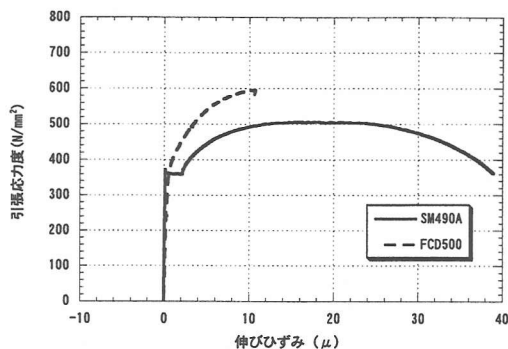


図-14 引張試験による応力～ひずみ関係

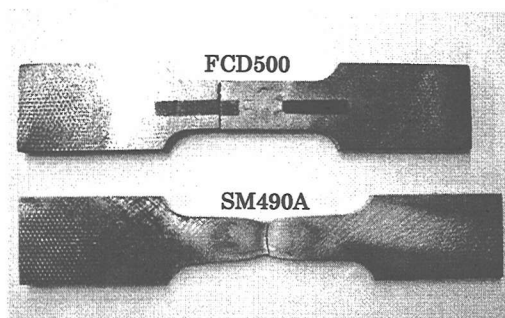


写真-6 供試体の破断性状

表-3 シャルピー衝撃試験結果

鋼種	供試体 No.	試験温度 (°C)	シャルピー吸収エネルギー (J)	脆性破面率 (%)
FCD500	1	28	5.6	100
	2		5.6	100
	3		4.1	100
SM490A	1	28	195	0
	2		237	0
	3		225	0

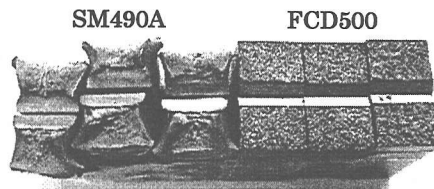


写真-7 シャルピー衝撃試験による破面

耐震性能に影響を与える材料のエネルギー吸収能力はシャルピー衝撃試験で評価することができる。いずれの材料も JIS にシャルピー吸収エネルギーの規定はない。室温 (28°C) の条件で試験を行った結果、SM490A のシャルピー吸収エネルギーが 219J であったのに対して FCD500 では 5J しかなく、非常に脆い材料であることが分かる。写真-7 に試験後の破面を示すが、右側の FCD500 は極めて脆性的な破壊を起こしていることが確認できる。

(7) まとめ

本検討で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 強度区分 4.6, 8.8, 10.9 のボルトは引張強度に達した後も十分な伸び性能を有している。
- (2) 弾性ワッシャーの許容変形量はボルトの破断伸びに比較すると小さい。
- (3) RC セグメントに比較して ST セグメントは、リング継手剛性は低く、破壊に至るまでの変形量は大きい。
- (4) SM490A と FCD500 の降伏以降の応力ひずみ関係は相当に異なる。

参考文献

- 1) 川島一彦, 大日方尚巳, 他: シールドトンネルの耐震性に関する研究—(その1) シールドセグメントの等価剛性の評価および応答変位法の適用—, 土木研究所資料, 昭和 60 年 10 月
- 2) 川島一彦, 大日方尚巳, 他: シールドトンネルの耐震性に関する研究—(その3) 鉄筋コンクリートシールドセグメントの載荷実験—, 土木研究所資料, 昭和 61 年 4 月
- 3) 川島一彦, 杉田秀樹, 中島 燈: 大深度地下構造物の耐震設計法・ガイドライン(案), 土木研究所資料, 平成 4 年 3 月
- 4) 「シールドトンネルの合理的設計法 ガイドライン(案)」, pp. 54, 土木学会西部支部, 平成 13 年 9 月
- 5) 「シールド工事用標準セグメント」, pp. 6, 日本下水道協会, 平成 13 年 7 月 1 日改正
- 6) 豊島径, 他: シールド工事用標準鋼製セグメントのリング継手の引張性能に関する研究, 第 12 回トンネル工学発表会論文・報告集に投稿中
- 7) 「トンネル標準示方書 [シールド工法編]・同解説」(平成 8 年版), pp. 66-67, 土木学会, 平成 8 年 7 月