

曲がりボルト継手を用いたセグメントの耐震性の評価

EVALUATION OF ASEISMICITY ON R.C.SEGMENT JOINT BY CURVED BOLT

井上隆広¹⁾・名倉浩¹⁾・萩原勉¹⁾・浦野和彦²⁾

Takahiro INOUE, Hiroshi NAGURA, Tsutomu HAGIWARA, Kazuhiko URANO

developed

A curved bolt is an economical system and being adopted commonly to joint R.C.segmental linings of a shield tunnel. On the other hand, these days higher performance for seismic resistance of a shield tunnel structure is getting required in the basis at the Kobe Earthquake experience, and especially the deformational character of the long longitudinal joint is very important factor to improve the matter. However, the aseismicity of the curved bolt joint have not been studied well, and capacity. Then in this paper, the tensile stiffness of the curved joint was examined by the analysis and the actual scale loading test. Furthermore, water-tightness of the hydro-swelling seal was also experimented for the large lipping by earthquake.

Key Words: shield tunnel, segmental lining, seismic design, curved bolt, hydro-swelling seal

1. はじめに

近年、シールド工法における覆工用セグメントの合理化に向けた取り組みが活発に行われており、著者らも継手部に緩衝キーを設けたセグメントを開発して実施工に展開している。このセグメントでは、リング間の添接効果を高め、継手締結部材として簡略な曲がりボルトに着目し、継手部断面欠損の低減、継手金物の省略化により品質の向上およびコストダウンを図っている。¹⁾²⁾³⁾

一方、今日では兵庫県南部地震の経験をふまえて大規模地震動（以下L2地震動と称す）に対する構造物の安全性が重要視されており、シールドトンネルにおいてもより高い耐震性能の確保が求められている。この際に、多くの場合はトンネル縦断方向の挙動が問題となり、シールドトンネルでは軸方向に存在する多数のリング継手が地盤変位に追従するため、この部分の変形性能が重要である。

一般に、曲がりボルト継手はボルトが長いこと軸引張剛性を低減することでき、耐震性は比較的に高いと考えられる。しかし、これまで曲がりボルト継手の耐震性について検討した例は少なく、軸引張剛性の評価方法についても不明確である。さらにL2地震動においては大きな変形が想定され、コンクリートが多少の損傷を受けたとしても耐力、靱性を確保するため、限界状態を明確に設計する必要がある。また、発生した目開きに対する止水性の確保も重要である。

そこで今回は、塑性域まで踏み込んで曲がりボルトの変形性能の解析を試み、得られた結果より補強方法を求めた。さらに、セグメントの一部を軸方向に切り出した実物大供試体を用いて引張載荷試験、ならびに継手シール材の止水性能試験を実施して耐震性の評価を行った。

1) 正会員 機関組 土木本部 都市土木統括部

2) 正会員 機関組 技術研究部 土木研究室

2. 曲がりボルト継手の特徴および課題

図-1に示すように、曲がりボルト継手は相互のボルトボックスに挟まれたコンクリートを介して結合するものであり、曲がりボルト自体は頭部および曲げ変形がコンクリートに拘束されて有効な引張剛性を発揮する。そのため、L2地震動により大きな引張軸力を受けて、拘束部コンクリートにひび割れが進行し破壊に至ると引張剛性および耐力を失うことになり、このひび割れを抑制して曲がりボルトの延性およびコンクリートの靱性を十分に確保することが耐震上必要である。

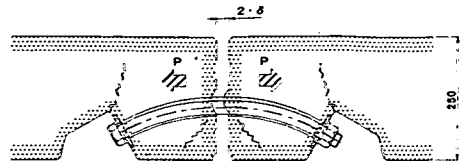


図-1 曲がりボルト継手概念図

今回検討の対象としたシールド工事の条件では、L2地震動に対するトンネル縦断方向の応答解析より、リング間の最大目開き量=5mmと想定された。そこで、L2地震動に対する曲がりボルト継手の耐震性能として、リング間の目開き量5mmに対してコンクリートのひび割れおよびボルトの降伏は許容するが破壊あるいは破断が生じないこととし、リング継手周辺のコンクリートに補強筋を配して靱性を持たせ、ボルト伸び性能を塑性領域まで利用することを考えた。

3. 曲がりボルト継手の解析および設計

軸方向引張試験に先立ち継手部の設計を行うため、図-2に示すモデルを用いて曲がりボルトの変形性能を解析した。すなわち、リング継手面に関する対称性を考慮してボルト半分の骨組構造にモデル化し、L2地震動に対しては塑性域の伸び性能まで利用するため、ボルト鋼材のひずみ硬化を塑性係数 E_p = 弾性係数 E_e $\times$ 1/50 として弾・塑性解析を行った。これにより引張剛性 K_b を入力荷重 P と出力変位 δ の関係より評価し、また終局耐力として断面の一部が引張強度に達する荷重を算定した。なお、ボルト孔による曲げ変形の拘束効果の評価は不明確であるが、ここでは弾性バネとしてモデル化し、過去の軸方向引張試験結果を参考にバネ定数 $K_c = 1.26 \times 10^4 \text{ kgf/cm}$ (ボルト周長 1 cm あたり)、分布範囲を全体の 1/3 ($\phi = 10$ 度) と仮定した。

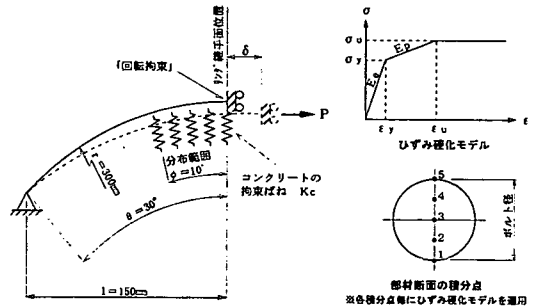


図-2 引張剛性解析モデル

検討を行ったボルトの仕様を表-1に、また解析結果を図-3に示す。荷重～変位関係はバイリニア型を示しており、同図に第1剛性(弾性域)および第2剛性(塑性域)を併せて示す。

本解析結果より、終局耐力=15tf(ボルト1本あたり)における最終目開き量は8.95mmであり、想定された最大目開き量5mmに対して十分な変形性能が期待できた。さらに、継手の破壊モードをボルトの伸びとするために、補強筋の降伏耐力がボルトの終局耐力を上回るようにして、図-4に示す補強筋を設計した。

表-1 ボルトの仕様

ボルト種別	M24(6・8)
軸断面積	4.52cm ²
有効断面積	3.53cm ²
断面二次モーメント	1.63cm ⁴
弾性係数 E_e	$2.1 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$
塑性係数 E_p	$4.2 \times 10^3 \text{ kgf/cm}^2$
降伏強度 σ_y	4,800kgf/cm ²
引張強度 σ_u	6,000kgf/cm ²

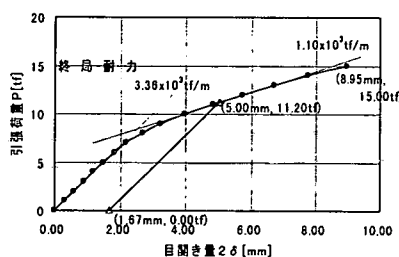


図-3 引張剛性の解析結果

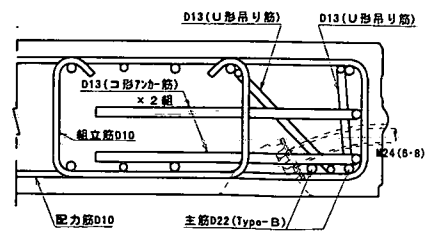


図-4 リング継手部補強筋

4. 軸方向引張試験

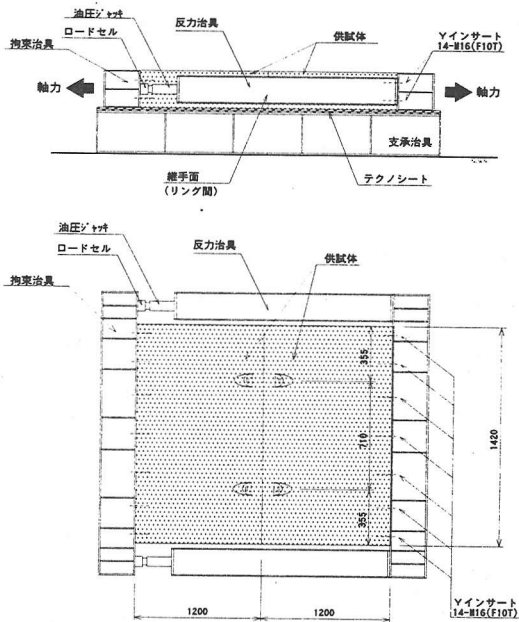
(1) 試験方法

本試験は、前章の設計に基づいて補強された供試体を用いて、図－５に示すように曲がりボルトにより締結された２体の平板供試体の両端部に引張荷重を与え、継手面の目開き量ならびに供試体各部のひずみを計測することによって、継手の引張剛性、耐力、破壊状況等を確認するために行った。写真－１に試験状況を示す。

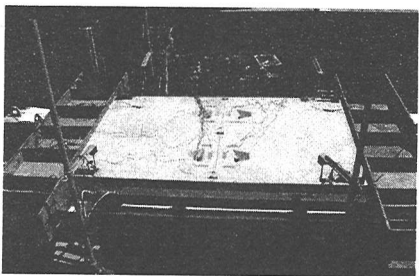
使用した供試体の形状寸法は、外径 5,050mm × 厚さ 250mm × 幅 1,200mm のセグメントのリング継手２ヶ所分を想定したものである。また、曲がりボルトの締結はトルク管理にて行い、別途試験により定めたトルク係数(= 0.25)を基準にして、初期導入軸力は全体で 14.8tf と想定される。

加力方法は左右の油圧ジャッキにより荷重を静的に制御し、目開き量 2 mm および 5 mm の時点で除荷サイクルを計測した後、最終的に破壊に至るまで載荷することとした。

なお、表－２に供試体の使用材料を、表－３に計測項目と目的を、図－６に計測位置をそれぞれ示す。



図－５ 軸方向引張試験概要図



写真－１ 試験状況

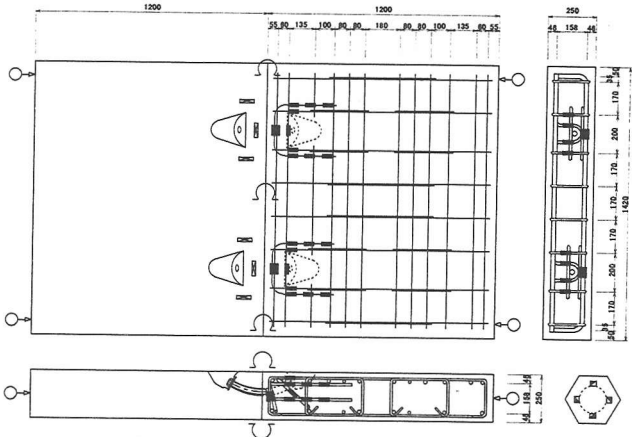
表－２ 供試体の使用材料

コンクリート	$\sigma_{ck} = 480\text{kgf/cm}^2$
鉄筋 (SD345)	主筋: 8-D22, 2-D19 配筋筋: 8-D10 補強筋: 2-D13 コ形アンカ筋 2-D13 U形吊り筋
リング継手ボルト	M24(6・8)曲がりボルト

表－３ 計測項目と目的

計測項目引	計測目的引	計測機器・	点数	記号
張荷重	張軸力	ドセル	2	
目開き量	リング継手目開き量	メジャー	6	⤿
供試体変位量	供試体全体伸び量	変位計	4	○➡
コンクリートひずみ	継手部コンクリート発生応力	ひずみゲージ	12	⊠
ボルトひずみ	ボルト発生応力	ひずみゲージ	8	■
補強筋ひずみ	継手部補強筋発生応力	ひずみゲージ	68x2*	
主筋ひずみ	継手部主筋発生応力	ひずみゲージ	8x2*	
配筋筋ひずみ	継手部配筋筋発生応力	ひずみゲージ	16x2*	
ひび割れ	ひび割れ進展状況	目視	—	

*鉄筋ひずみは１ヶ所あたり２点計測して平均値を採用する。



図－６ 計測位置

(2) 試験結果

図-7に目開き量の計測結果を、図-8および図-9にそれぞれボルトひずみおよび補強筋ひずみ（コ形上側）の代表的な計測結果を示す。なお、目開き量はボルト締結後を初期値（＝0 mm）に、各部ひずみはボルト締結前を初期値（＝0 μ ）に設定した。また、図-7には前章の解析値を併せて示すが、試験がボルト2本分であることより荷重軸を2倍に、また目開き量＝0 mmの荷重をボルト締結による想定軸力＝14.8tfに補正している。

次に、荷重段階の順に試験結果を整理して記述する。

① [荷重＝0.0tf→24.0tf（目開き量2 mm）]

荷重 10.0tf まで各計測値の変化はほとんど無く、ボルト締結によるプレストレスが全体で 10tf 程度であったことがわかる。その後、目開き量は 24.0tf で 2.0mm に至まで線形に増加しており、第1剛性 $Kb1 = 3.47 \times 10^3$ （解析値 3.36×10^3 ）tf/m/本が得られる。なお、初期ひび割れが 5.0tf で観察されたが、微少であり進展は見られなかった。

② [除荷＝24.0tf→0.0tf]

荷重 0.0tf まで除荷した後の残留目開き量は 0.2mm であり、ほぼ完全に復元した。ただし荷重過程と同経路では戻らず、拘束部のコンクリートが塑性化していることが推察される。なお、これに対してボルトひずみは弾性域内を推移している。

③ [荷重＝0.0tf→38.5tf（目開き量5 mm）]

除荷前の状態に復元した後、目開き量は荷重 38.5tf で 5.0mm に至までほぼ第1剛性に従って増加した。なお、30.0tf 付近でボルトひずみの降伏、36.0tf 付近で補強筋ひずみの増大が見られ、引張剛性の変化およびひび割れの進展が始まったと推察される。写真-2に目開き量 5 mm 時の供試体状況を示す。

④ [除荷＝38.5tf→0.0tf]

荷重 0.0tf まで除荷した後の残留目開き量は 3.0mm であり、復元量は前章の解析で想定されたより 1.3mm ほど少なかった。これは、ボルトの残留ひずみのほかに、拘束部コンクリートの塑性化の影響が加わったためと考えられる。

⑤ [荷重＝0.0tf→50.0tf]

除荷前の状態に復元した後、目開き量は最終荷重 50.0（解析値 $44.8=14.8+15.0 \times 2$ ）tf で約 15mm に至まで線形に増加しており、第2剛性 $Kb2 = 0.73 \times 10^3$ （解析値 1.10×10^3 ）tf/m/本が得られる。なお、破壊形態は最終段階での拘束部コンクリートの剥離であり、補強筋ひずみは降伏に達していない。写真-3に供試体の最終状況を示す。

以上より、本試験の結果を総括すると以下のとおりである。

- 1) 引張剛性および引張耐力ともに、前章の解析と良い一致を示した。
- 2) 破壊形態はコンクリートの剥離であったが、ボルトの伸び性能が十分活用されるまで補強筋が有効に機能し、十分な靱性を示した。

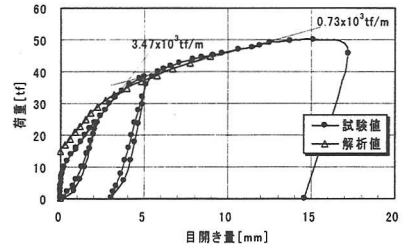


図-7 荷重～目開き量

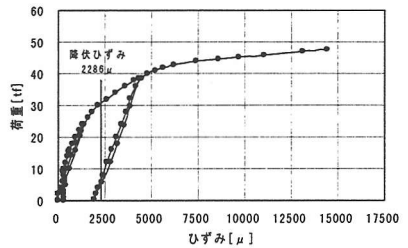


図-8 荷重～ボルトひずみ

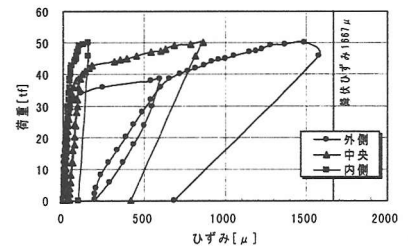


図-9 荷重～補強筋ひずみ
（コ形上側）

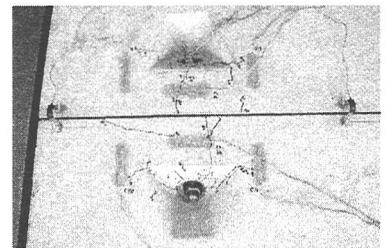


写真-2 目開き量 5 mm 時

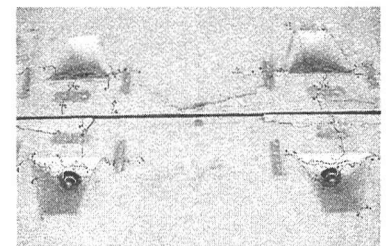


写真-3 最終状況

5. 止水性能試験

地震時における継手の止水性に関しては、発生した目開き量がシール材の水膨張性能の範囲内であれば再び止水機能を回復できると考えられる。ここで止水可能であるための条件は、所定の目開き量に対して膨張後のシール材の接面応力が作用水圧以上であることであり⁴⁾、これには膨張後のシール材の圧縮率と圧縮応力の関係が指標となる。そこで、表-4および図-10に示すシール材の圧縮試験より設計水圧を止水可能な目開き量を推定し、さらに耐水圧試験により実際の止水圧を確認した。なお、圧縮率とは圧縮前のシール材厚さに対する圧縮量の割合であり、図-11に示すとおりである。

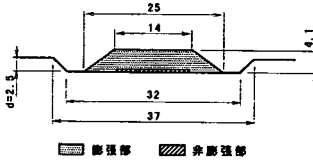


図-10 シール材形状寸法

表-4 シール材仕様

材 質	クロロレン合成ゴム系複合型
硬 度	45Hs
膨張倍率	3 倍
設計水圧	4.4kgf/cm ²

$$\text{圧縮率 } \alpha = \frac{h - (d + \delta)}{h} \times 100 (\%)$$

h : 圧縮前のシール材厚さ

図-11 目開き量と圧縮率

(1) 圧縮試験

本試験では、水膨張後のシール材の圧縮特性を確認するため、予め水に浸漬して十分に膨張させた長さ 20cm の試験片を図-12に示す試験治具のシール溝に貼付し、載荷重と圧縮量を測定した。なお、試験時の浸漬日数は28日でシール材厚さは $h = 6.9\text{mm}$ であった。また、圧縮速さは 10mm/min に制御し、試験治具の上端面は試験に支障のないように実際のシール溝より 0.5mm だけ低くした。

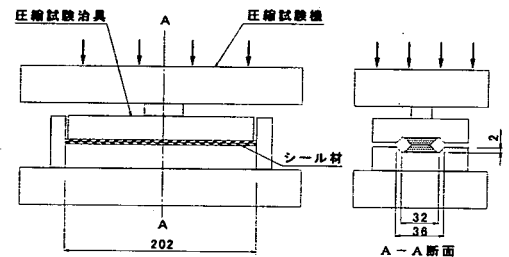


図-12 圧縮試験装置

図-13に試験結果を圧縮率と圧縮応力の関係に整理して示す。ここで、圧縮応力は載荷重をシール材の受圧面積（シール溝底面幅 $3.2\text{cm} \times$ 長さ 20cm と仮定）で除したものである。これより設計水圧 4.4kgf/cm^2 に相当する接面応力が得られる圧縮率は $\alpha = 21.5\%$ であり、これは図-11の関係より目開き量 $2\delta = 5.8\text{mm}$ に対応する。したがって、前章の軸方向引張試験よりL2地震後の残留目開き量を 3mm と仮定しても、十分な止水性が確保できると期待される。

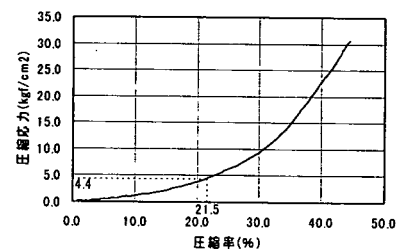


図-13 圧縮試験結果

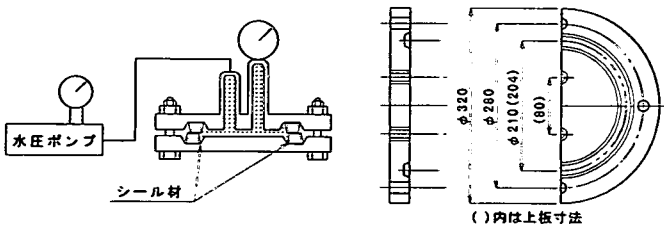
なお、膨張倍率から等方に膨張した場合に想定される厚さが $\sqrt[3]{3} = 1.44$ 倍であるのに対して実測値は 1.68 倍（ $= 6.9/4.1\text{mm}$ ）であり、非膨張部による膨張方向の限定効果が見られる。

(2) 耐水圧試験

本試験では、図-14に示す試験治具のシール溝に予め試験片を貼付して、水に浸漬して十分に膨張させた後、スパーサーを用いて所定の目開き量で組み付けられた治具内を徐々に加圧して、漏水が生じたときの水圧を測定した。目違い量は上下のシール溝の半径に差をつけて 3mm に設定した。なお、試験時の浸漬日数は28日でシール材厚さは $h = 7.3\text{mm}$ と圧縮試験片より大きく、シール溝への接着により膨張方向がやや限定されたためと思われる。

表-5に試験結果を示す。これより、設計水圧 4.4kgf/cm^2 を許容できる目開き量は $6 \sim 7\text{mm}$ の間であり、圧縮試験における推定結果と概ね合致している。

なお、目開き量 6 mm 以下の止水圧が 10kgf/cm^2 以上と圧縮試験の想定より高いのは、シール材の自封効果が大きいためと考えられる。また、耐水圧試験後に目開き量 5 mm、水圧 5kgf/cm^2 に設定して 3 ヶ月間経過を観察したが、漏水は発生しなかった。



図－１４ 耐水圧試験装置

表－５ 耐水圧試験結果

目開き量 mm	止水圧 kgf/cm^2	圧縮率 %	備 考
5	10 以上	31.5	試験時シール材厚さ = 7.3mm (水浸漬 28 日)
6	10 以上	24.7	
7	4	17.8	

6. まとめ

曲がりボルト継手の耐震性および継手シール材の止水性について、特に L2 地震動による大きな目開き量を対称として設計方法を検討し、要素試験により確認した。本検討により得られた知見をまとめると以下のとおりである。

- ①曲がりボルト継手の引張剛性および引張耐力は、ボルト孔内面のコンクリートによる曲げ変形の拘束と、ならびにボルト鋼材のひずみ硬化を考慮した弾・塑性解析モデルにより評価することができ、継手部コンクリートの補強筋を合理的に設計することができる。
- ②曲がりボルト継手は引張軸力に対して、適切な補強筋により継手部コンクリートの靱性を高めることができ、ボルトの伸び性能を有効に利用して大きな変形性能を発揮することができる。
- ③地震時の目開き量に対する止水性については、水膨張性シール材の機能を活かして膨張後の圧縮特性により設計することができ、L2 地震動の大きな目開き量を許容することが可能である。

以上により、曲がりボルト継手の耐震性の評価に関する一定の成果が得られたが、軸方向引張試験の結果が示すように、最終的な破壊形態はボルトとコンクリートの接触部の剥離であり、この部分の応力集中の緩和方策を考案して、さらに合理的な設計方法および構造形式を追究して行きたいと考えている。また、今回は継手単独の軸引張挙動に焦点を置いたミクロ的な解析および試験であったが、地盤の応答変位、トンネル全体の剛性、これらの相互作用といったマクロ的な観点も含めて、今後の検討課題であると考えている。

おわりに、耐震性能の考え方から設計ならびに要素試験の全般にわたり、建設省土木研究所耐震研究室をはじめ関係各位に多大なるご指導をいただき、この場を借りて深甚なる感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 園田他：継手部に緩衝キーを設けたセグメントの開発，トンネル工学研究論文・報告集第 6 巻，1996
- 2) 園田他：曲がりボルト締結に関する試験報告，トンネル工学研究論文・報告集第 7 巻，1997
- 3) 大塚他：継手部に緩衝キーを設けたセグメントの施工報告，トンネル工学研究論文・報告集第 8 巻，1998
- 4) 日本トンネル技術協会：セグメントシール材による止水設計手引き，平成 9 年