

(5) RCセグメントの新しい継手構造

村上 博智* ・ 日景 秀治**
 岡村 光政*** ・ 中野 均***

1. はじめに

セグメントはシールドトンネルの本体を構成する重要な構造部材であり、シールド工法の普及に伴ってその需要も増大している。シールドトンネルの施工に係る技術的条件は様々であるが、シールド工法の技術開発と相まって、その計画・設計および施工管理の合理化を図ることは、極めて重要である。その中で、セグメント継手は、設計・施工上常に問題点として挙げられてきた。特に、コンクリート系セグメントの問題点はその継手構造にあるといえる。

本報告は、筆者等が平板型RCセグメントの改良に際して行なってきた継手に関する研究成果の概要をまとめたものである。

2. コンクリート系セグメントの継手構造

2.1 継手構造の種類

コンクリート系セグメントの継手形式としては、主として直ボルト、曲がりボルト、ピン・ホゾの三つの形式が我国で採用されている。各形式の特徴をまとめると、表1のようになる。

表1 コンクリート系セグメントの継手形成

形 式	構 造	特 徴	備 考
直ボルト結合方式	予めセグメントに継手金具を埋込むかボルト孔を設けておき、さらにボルト締結に必要なスペース（箱抜き）を確保したうえ、直ボルトで締結。	・ 最も一般的な形式 ・ 箱型では継手部コンクリートの押抜き・せん断破壊が問題 ・ 平板型では継手金具の変形により継手曲げ剛性が低い。また箱抜きが大きくならざるをえない。	図-1
曲りボルト結合方式	ボルト締結に必要な箱抜きを縮小するため、弓形の曲りボルトで締結	・ 直ボルトに比べ組立作業性が悪い ・ リングの変形量大	図-2
ピン・ホゾ方式	継手端面に予めピンとホゾを埋込んでおき、エレクターとシールドジャッキではめ込む方式で、主にリング継手に採用	・ 箱抜き等のスペースが不要の為、配筋の制約がない ・ セグメント継手がヒンジ構造の場合、添架効果の為、他の形式より大きな本体強度が必要 ・ Kセグメントはトンネル軸方向にテーパをもつので、標準セグメントの規格からはずれる	図-3

上下水道等のトンネルでは殆んどの場合、平板型RCセグメントで直ボルト形式が用いられている。

* 早稲田大学理工学部土木工学科 教授

** 戸田建設株式会社 戸田技術研究所 主席研究員

*** 同 上 第五研究室

2.2 汎用型継手形式の問題点

(平板型RCセグメント、直ボルト)

(イ) ボルト接合方向の関係で機械締めがむきない。

- ・ 手間がかかる。
- ・ 増し締めの労力が大きい。
- ・ 人力締めのため継手面の締付け力が不足気味で、目開き等の原因になる。

(ロ) 箱抜きが大きくならざるをえない。

(ハ) 組立精度の確保が容易でない。

- ・ 施工エラー吸収のためのボルト孔のクリアランス(3~5mm)が、リング組立精度を落とす原因となる。

(ニ) エレクター操作、セグメントの位置出し、ボルト締めといった一連の作業は、かなりの熟練度を要する。

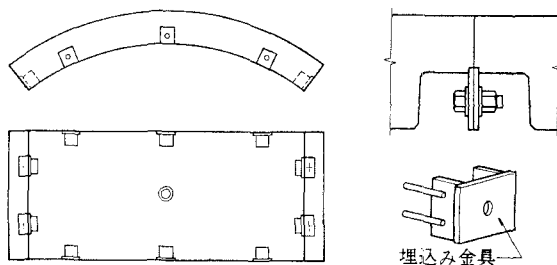


図-1 直ボルト方式(平板型セグメント)

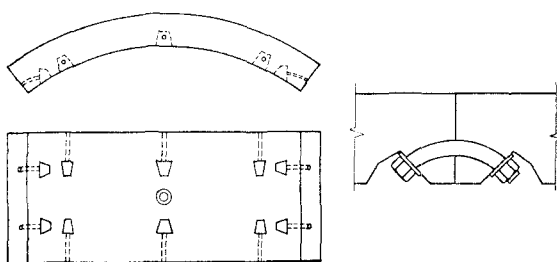


図-2 曲りボルト方式(平板型セグメント)

3. 継手構造の改良

3.1 新しい継手構造のねらい

汎用型継手形式の種々の問題点を解決し、施工管理を容易にする継手として、図4~図6に示す構造を考案した。図7が継手接合模式図である。

この形式では、従来セグメント継手とリング継手にボルト締結方向が異なっていたものを、全てトンネル断面半径方向としている。

ボルト締付け力は、埋込み金具と連結金具の

テーパ面との噛み合いにより継手面の締付け力に転化される。

本継手構造のねらいは次の通りである。

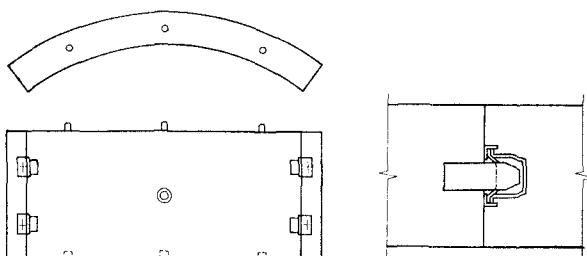


図-3 ピン・ホソ形式(平板型セグメント・リング間継手)

(イ) 機械締めが可能である。

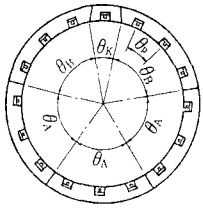
(ロ) 箱抜きが小さくて済む。

(ハ) 継手面の締付け力を大きくし、防水性の向上を図れる。

(ニ) トルク管理により均一なセグメントリングを形成でき、確実な品質保証ができる。

(ホ) 汎用型に比して継手製作費が安価となる。

リング組立図



A型セグメント

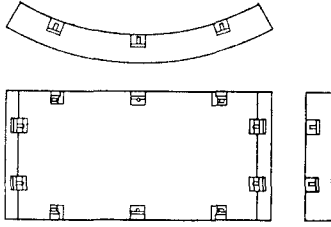


図-4 新しい継手構造のセグメント

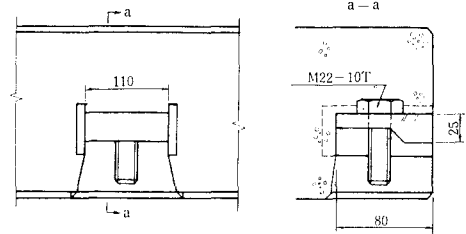


図-5 継手部概要

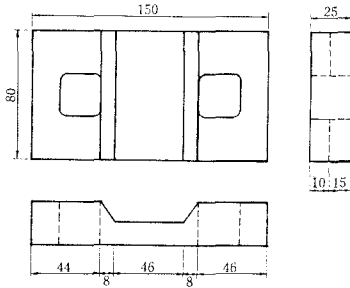


図-6 連結金具概要

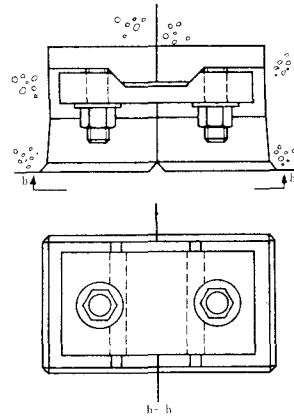


図-7 継手接合模式図

3.2 設計法

3.2.1 基本

新しい継手構造の設計法の特徴を下記に示す。

- (イ) 継手金具を骨組構造系にモデル化する。解析はマトリクス法による。
- (ロ) 鋼構造の塑性設計法を用いて、継手金具の耐力を算定する。
- (ハ) 継手の曲げ耐力については、RC終局強度理論に準じて算定する。

3.2.2 継手離間モーメントの算定

図8にボルト締付け時の解析モデルを示す。連結金具とボルトを表わす部材以外は、力の伝達のみを考慮した剛部材であり、バネ要素は其のセン断バネによって部材間の摩擦を考慮するものである。

ボルト締めに伴う継手面の初期ひずみ分布を図10(a)のように、また継手に純曲げモーメントが作用した時に継手面に付加されるひずみ分布を図10(b)のように仮定すると、継手面下縁が離間する作用モーメント M_d は、

$$M_d = \left(\frac{I_c}{A_c y_t} + e \right) \cdot 2 H_o \quad (1a)$$

$$e = y_r + \gamma_{or} / \delta_{or} \quad , \quad H_o = \gamma_{or} \cdot B_o \quad (1b)$$

と与えられる。ここに σ はボルト初期張力、 H_0 はボルト締付け時に連結金具中央部に生ずる軸力、 A_c 、 I_c は各々継手部の断面積、断面二次モーメント、 e は継手面圧縮力 ($= H_0$) 作用位置の断面図心からの偏心量、 γ_r 、 δ_r は図8においてボルトに単位荷重を与えた時の連結金具中央部に生ずる軸力、曲げモーメントである。

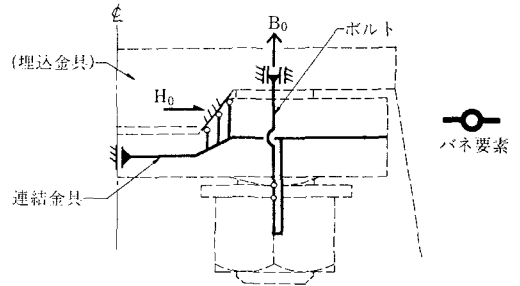


図 - 8 ボルト締付け時の解析モデル

3.2.3 継手曲げ耐力の算定

継手金具の耐荷機構を図11のように仮定する。いま離間後の付加モーメントによって、継手部が終局状態に移行する場合を考える。

ボルト締付け時と考慮した各部材断面の断面力に対して、矩形断面部材で提案されている全断面塑性相関式

$$\frac{M}{M_p} + \left(\frac{N}{N_Y} \right)^2 + \frac{(Q/Q_Y)^4}{\{1 - (N/N_Y)^2\}} = 1 \quad (2)$$

を適用して、各部材が全断面塑性化する作用張力を算定する。そのうち最小のものを継手金具の終局作用張力 H_u と見做す。式2で、 M_p 、 N_Y 、 Q_Y は各々全塑性モーメント、降伏軸方向力、降伏せん断力である。

継手部の終局時における力の釣合いを図12のように仮定する。図中、 M_{ru} は連結金具中央部における終局時の曲げモーメントである。これより、

$$M_u = 2 H_u \left(\gamma_r - \frac{f_{t2}}{f_{t1} f_{t3}} \cdot \frac{I}{B f_c} \right) + 2 M_{ru} \quad (3)$$

となる。ここに M_u は終局時の付加モーメント、 B はセグメント幅、 f_c はコンクリートの圧縮強度、 f_{t1} 、 f_{t2} 、 f_{t3} は終局強度理論において慣用される係数である。

以上より、継手の最終的な曲げ耐力 は、

$$M_{su0} = M_1 + M_u \quad (4)$$

と与えられる。

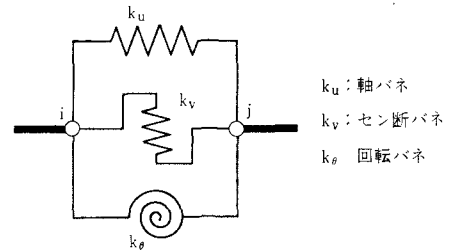


図 - 9 バネ要素

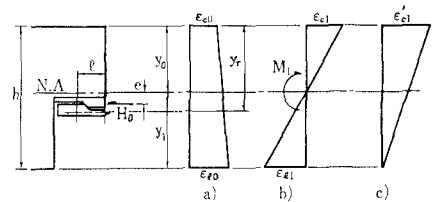


図 - 10 初期及び付加ひずみ分布 a), b) と合成ひずみ分布 c)

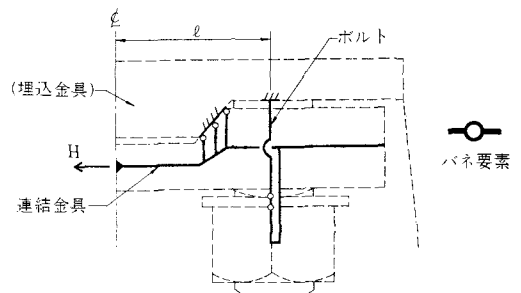


図 - 11 荷重作用時の解析モデル

3.3 継手曲げ強度確認試験

3.3.1 供試体

新しい継手構造を用いたセグメント供試体の形状寸法を図13に示す。これはシールド工専用標準セグメントを対象としたもので、継手の規定破壊モーメントが2.85 t・mである。図14、図15に、埋込み金具および連結金具の詳細図を示す。

また表2、表3は各々コンクリートの示方配合、圧縮強度試験の結果である。

3.3.2 試験方法

図16に継手試験の模式図を示す。主な測定項目はボルトのひずみ、連結金具中央部のひずみ、継手回転角、最終強度などである。

ボルトの初期ひずみは、500 μ および 1,000 μ の二通りを考慮し、前者を三組、後者を二組用いて試験を実施した。

3.3.3 試験結果および考察

(1) 継手金具に生ずるひずみ

外力として継手に作用させた曲げモーメント M とボルトの軸ひずみ ε_b の関係の一例を図17に、また M と連結金具の軸ひずみ ε_r の関係を図18に示す。図中のプロットは実測値を、実線は解析値を表わしている。これより、本解析方法が金具各部に生ずるひずみをよく説明していることが分かる。

(2) 破壊強度その他

継手の破壊モーメント M_{su} と理論破壊モーメント M_{ruo} の関係を、その他の諸数値と共に表4に示す。

継手の破壊状況は、埋込み金具の引抜けが支配的であった。これは破壊モーメントがコンクリートの圧縮強度すなわち金具アンカー筋の付着強度と対応関係にあることより裏付けられる。ただし、破壊時には、ボルト、連結金具共降伏状態にあったと考えられる。

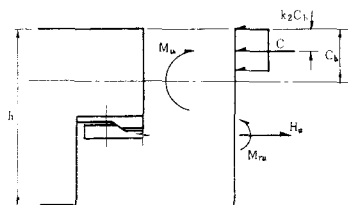


図 - 12 終局時の力の釣合い仮定

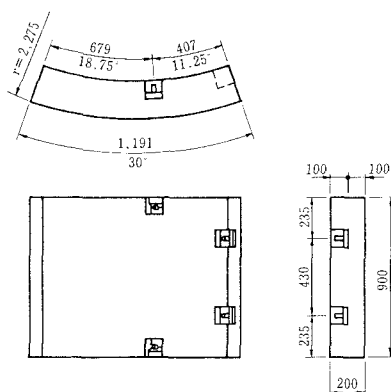


図 - 13 供試体形状寸法

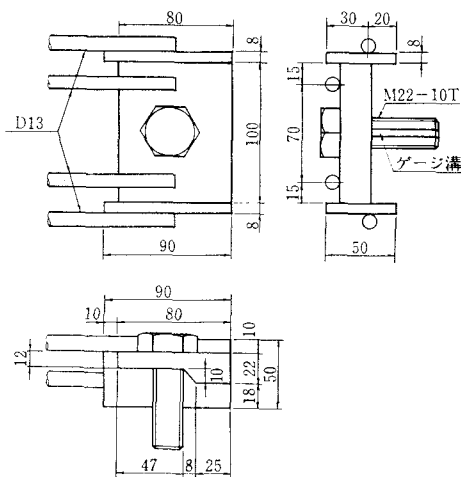


図 - 14 埋込み金具形状寸法

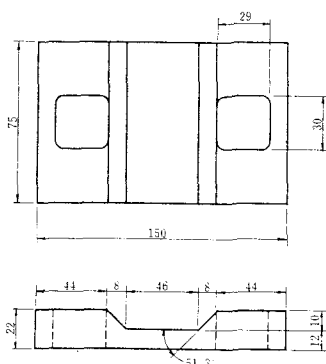


図 - 15 連結金具形状寸法

表-2 コンクリートの示方配合

骨材最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	細骨材率 (%)	単位重量 (kg/m³)			
				水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 5~25mm
25	6±1.5	42.8	40	167	390	728	1,092

表-3 コンクリートの圧縮強度試験結果

供試体	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4	CASE 5
圧縮強度 σ_{28} (kg/cm²)	476	519	593	535	467
ヤング係数 E_c (kg/cm²)	3.22 $\times 10^5$	3.26 $\times 10^5$	3.57 $\times 10^5$	3.49 $\times 10^5$	3.47 $\times 10^5$

表-4 継手曲げ強度試験結果

CASE	ボルト 初期軸力 B_0 (kg)	金具 初期軸力 H_0 (kg)	継手回転 角のオーダー (rad.)	破壊モーメント (t-m)	
				理論値 M_{ju0}	実験値 M_{ju}
1	3,165	3,970	10^{-3}	3.58	4.00
2	3,060	3,315	"	3.60	4.10
3	3,045	3,315	"	3.64	4.25
4	6,150	6,850	"	3.04	4.10
5	6,055	7,340	"	3.06	4.05

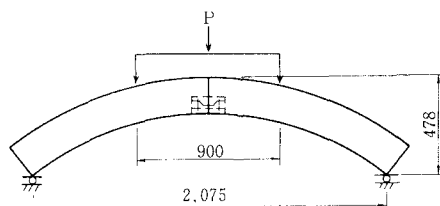


図 - 16 載荷試験

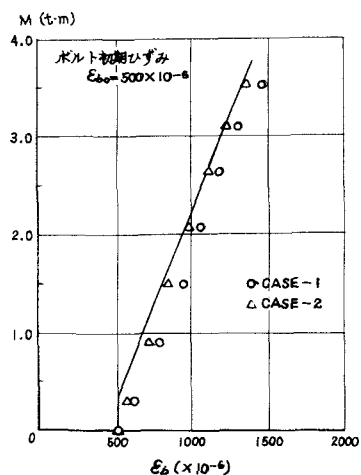


図 - 17 作用モーメントM~ボルト軸ひずみ E_b

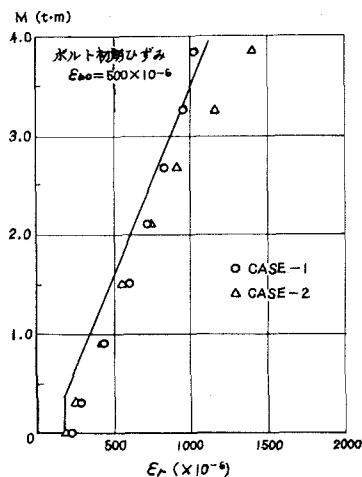


図 - 18 作用モーメントM~連結金具軸ひずみ E_r

破壊モーメントの実験値が理論値を上回る傾向にあるのは、後者が継手構造モデルの塑性解析によって得られた値なので、実際にはひずみ硬化等の影響で理論値以上の耐力があったものと思われる。

またボルト初期軸力の差の影響が破壊モーメントに表われないのは、破壊が埋込み金具の引抜けに起因しているためと考えられる。

継手部の回転角のオーダーは 10^{-3} rad. であり、これは汎用型継手形式と殆んど差のないものである。

以上のことから、継手の強度・変形に着目した場合、本設計法が実用上妥当なものであると考えられる。

4. おわりに

ロボットに代表される標準作業の自動化は、生産活動の合理化における究極の姿であろう。建設産業においても施工の合理化は時代の趨勢であり、急務の課題であるといえる。

従って、今後の継手に望まれることは、

- (イ) 組立時間のより短縮
- (ロ) 組立要員の削減
- (ハ) 機械的な組立作業(熟練度の不要)

等であると考えられる。

今回の新しい継手構造では、

- ・ 機械締めが可能である。
- ・ ボルト締結方向が全て同じである。

等の条件から、例えばエレクターでボルト締め工具を組合わせたセグメント組立装置を実現することによって、上述の要件を満足することが可能と思われる。

現在、この組立装置さらに組立精度向上のためのガイド装置を開発中である。

(参考文献)

- ・ 村上、小泉：シールド工専用セグメントのセグメント継手の挙動について、土木学会論文報告集、No. 296 1980-4
- ・ 村上、小泉、当麻：セグメント継手の合理的な設計法に関する研究、早稲田大学理工学研究所報告、No. 88 1979
- ・ 日本下水道協会、土木学会：シールド工専用標準セグメント、1982-11
- ・ 横山：鉄道シールドトンネルにおけるコンクリートセグメント設計施工に関する研究、鉄道技術研究報告、施設編 No. 423
- ・ 河田他：シールド工法の実例、鹿島出版会、1980-11
- ・ 小堀他：鋼構造設計理論、森北出版、1977-12
- ・ 土木学会：鉄筋コンクリート終局強度の参考、コンクリートライブラリ、No. 34 1972-8

ON THE NEW TYPE JOINT FOR RC SEGMENT

by HIROTOMO MURAKAMI*, HIDEJI HIKAGE**,
MITSUMASA OKAMURA** and HITOSHI NAKANO**

We have studied for development of a new type joint of RC segment, aiming at improvement in workability. The joint developed consists of simple metal fittings to be fitted in the radius direction, and it is completed by mechanical screwing of bolts. The design of the joint parts is made by application of ultimate strength design of RC structure and plastic designing of joint fittings.

As the first step to practical application of the new joint, we had a strength test of the joint by means of full size segments in conformity to "the standard segment for shield tunneling" (joint compatibility by JSCE and Japan Sewerage Association). As a result, it was confirmed that the joint has the prescribed strength well enough and that the method of designing joint is appropriate.

* Department of Civil Engineering, WASEDA University

** MATSUDO Research Institute, TODA Construction Co., Ltd.