

継手部に緩衝キーを設けたセグメントの開発

DEVELOPMENT OF SEGMENTAL LINING WITH KEY LOCK AROUND JOINTS

園田徹士*, 藤本明生*, 田中秀明*, 萩原 勉*, 内田雅博**

Tetushi SONODA, Akio FUJIMOTO, Syumei TANAKA, Tsutomu HAGIWARA, Masahiro UCHIDA

This developed segment for shield driven tunnel lining has curved unevenness prominence around joint, called "Key Lock". It is able to disperse and reduce the concrete stress near the bolts effectively. On the occasion of the development of this segment, the basic shape and the effect of "Key Lock" were conducted by the contact FEM analysis, and the efficiency of this joint confirmed by basic experiments. Consequently, these conclusions were gotten; this segment has a superior distinction of shear strength, and the calculation of this segment agrees with the results of analysis using the beam-spring model. These results make us to use this segment at the construction of shield driven tunnel in Malaysia.

Keywords: shield driven tunnel, segment, Key Lock

1. はじめに

都市部の高度成長に伴う地下空間の有効活用的手段としてトンネルの利用が挙げられる。その施工方法にはシールド工法が多く用いられており、近年はより高品質、低コストの覆工構造(セグメント)が求められている。今回開発を進めたセグメントは継手部に曲率をもった突起(以下;「緩衝キー」)を設けることにより従来のボルト継手構造の利点をそのまま活かし、その欠点となるボルトなどの緊締部周囲のコンクリートへの応力集中を継手面全体に分散・低減させたシールド覆工用セグメントである。ここでは本セグメントの開発の経緯とその施工について述べる。

2. 形状検討

本セグメントの開発に先駆け、効果的な緩衝キーの形状の選定を目的として、構造解析を利用した効果の検討を行った。検討手順を以下に示す。

①任意の断面力(軸力とせん断力)作用下で継手部が滑動した場合にセグメント

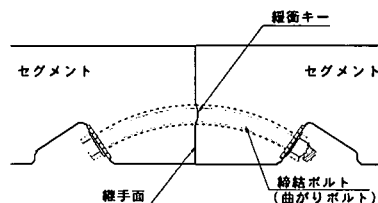


図-1 緩衝キー概念図

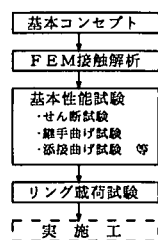


図-2 開発フロー

* 正会員 ハザマ 土木本部 都市土木統括部

** 正会員 ハザマ 土木本部 構造物・橋梁統括部

に発生する応力を求めるために、有限要素法による接触解析を実施する。

②緩衝キー部の形状を変えて検討を行い、効果的な緩衝キーの形状を選定する。

本接触解析では、緩衝キーの高さが $H = 3.5\text{ mm}$ と 17.5 mm の2ケースについて形状効果の検討を行った。その結果、セグメント継手部の緩衝キーの凹凸は高さを低く押さえることにより、接触部に発生する高応力状態の範囲を分散させ、応力集中のレベルを低減する効果があることが確認できた。図-4に解析による継手部のせん断応力分布図を示す。

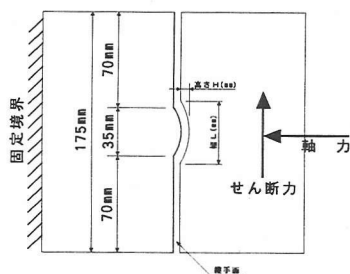
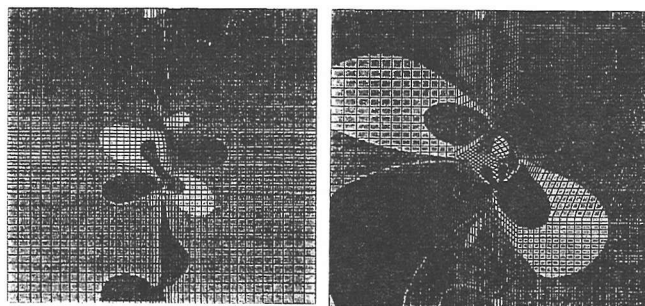


図-3 接触解析モデル



$H=3.5\text{ mm}$

$H=17.5\text{ mm}$

図-4 せん断応力分布図

3. 基本性能確認試験

継手部に緩衝キーを設けた本セグメントの継手特性を把握し、その結果を設計に反映させるために基本性能確認試験を実施した。

3.1 継手せん断試験

継手せん断試験は緩衝キーの効果を確認するとともに、継手部の持つせん断特性を確認した。

(a) 試験方法

試験はリング継手をモデル化した3ピースの直線梁型供試体の両端を固定し、中央部のセグメントを法線方向（半径方向）に押し抜くように載荷した。また表-1に示すように異なる継手形状を持つ供試体を用いてその特性比較を行った。

(b) 試験結果

直ボルトを用いた金物継手のケース(CASE1)は荷重の増加に伴い、コンクリートの摩擦が切れて継手面が滑り、ボルトと金物の変形で目違いが進み、ボルトの破断とボックス周りのコン

表-1 せん断試験ケース

ケース	キ-高さ	凸キ-幅	使用ボルト
1	なし	なし	直ボルト
2	なし	なし	曲がりボルト
3	5mm	35mm	
4	8mm	35mm	

クリート破損により破壊した。また、従来の曲がりボルト継手の

ケース(CASE2)は、ボルト孔とボルトが接触し、各々の変形により目違いが進み、ボルト孔を中心にコンクリートが剥離し破壊した。一方、緩衝キーを設けた継手のケース(CASE3, 4)では、緩衝キーによる構造的効果により荷重と目違いが弾性的に変化し、目違い量も少なく、高いせん断耐力を示した。また、試験後解体

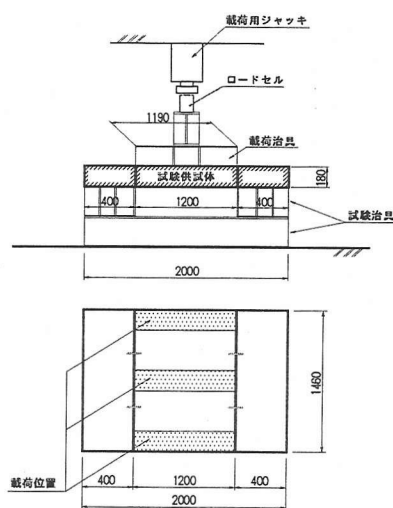
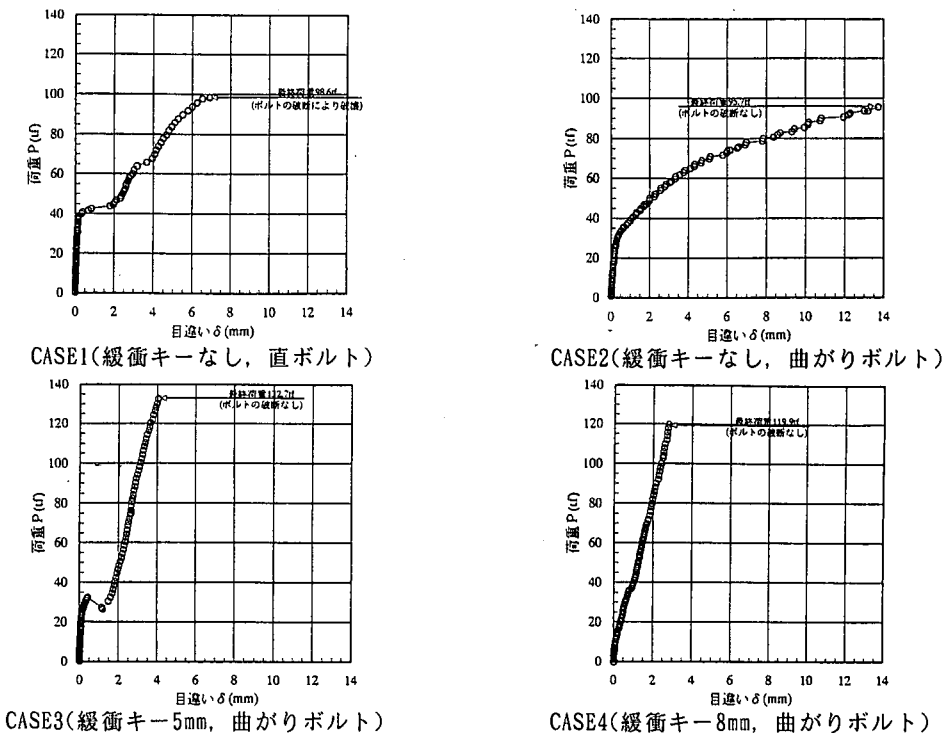


図-5 せん断試験試験概要図

した供試体継手部のボルト孔周りに損傷はなく、緩衝キー部分に摩擦抵抗跡が見られた。

これらから、継手面に緩衝キーを設けた本セグメントはせん断力に対して高い耐力を有し、ボルト部に生じる応力集中の緩和効果があることが確認できた。したがって、本セグメントにおいてはリング間に用いるボルトはせん断力に対する強度の必要性は低く、ボルト部の簡略化が図れるものと考えられる。



図－6　せん断試験結果

3・2継手曲げ試験

継手曲げ試験は本セグメントに曲がりボルトを用いた場合のセグメント継手の回転ばね定数 $K\theta$ を求めるために行った。

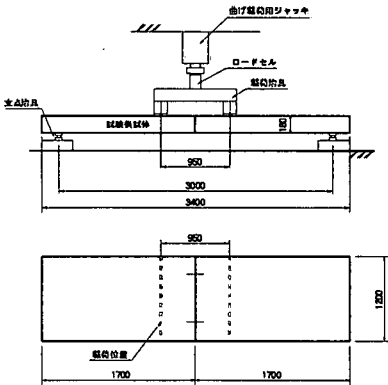
(a)試験方法

試験は図－7に示すように、曲がりボルトで連結した2ピースの直梁型の供試体継手部に曲げ荷重を与えた。また、軸力の影響による継手挙動の違いを確認するため、軸力無しの場合と100tf/mの軸力を与えたケースを行った。破壊は軸力無しで行った。

(b)試験結果

継手曲げ試験で得られた結果を表－2にまとめる。軸力が $N=0$ tf/mの場合の解析値は、直ボルトを用いた際の構造的なつり合い式によるものであり、ボルト離間前の値はよく試験値と合っている。このことから、セグメント組立時のように、軸力の発生しない状態で、かつ曲げモーメントが大きく生じない条件下での回転ばね定数 $k\theta$ は、継手構造のつり合いから求まる式(1)で評価できると考える。

$$K\theta = A_s \cdot E_s (d - y) (d - y/3) / I_s \quad \cdots (1)$$



図－7　継手曲げ試験概要図

ここに

$$\left\{ \begin{array}{l} A_s : \text{ボルトの総有効断面積}(\text{m}^2) \\ d : \text{ボルト有効高さ}(\text{m}) \\ y : \text{継手中立軸位置}(\text{m}) \\ l_s : \text{ボルト自由長}(\text{m}) \\ E_s : \text{ボルトのヤング係数}(\text{tf}/\text{m}^2) \end{array} \right\}$$

表-2 継手曲げ試験結果

CASE	試験値 $K\theta$ (tf・m/rad)		解析値 $K\theta$ (tf・m/rad)	
	離間前	離間後	離間前	離間後
軸力= 0tf/m	2.8×10^2	6.3×10^2	3.0×10^2	2.9×10^2
軸力=100tf/m	7.2×10^2	—	6.6×10^2	—

軸力導入の際の解析値はLeonhardtの理論式(2)より求めたもので、試験結果とよく合っているといえる。

$$K\theta = \frac{9a^2 \cdot b \cdot Ec}{8} m(1-2m)^2 \cdots(2)$$

ここに

$$\left\{ \begin{array}{l} a : \text{継手面有効高さ}(\text{m}), \quad b : \text{セグメント幅}(\text{m}) \\ Ec : \text{コンクリートのヤング係数}(\text{tf}/\text{m}^2) \\ m : \text{荷重偏心率 } m = e/a = M/(N \cdot a) \end{array} \right\}$$

これから、セグメント継手に曲がりボルトを用いた場合、その設計に用いる回転ばね定数 $K\theta$ の設定は軸力の有無によってその算定方法を選択する必要があると考える。

本試験における最終耐力は許容値の2倍で、継手部に設けた緩衝キーは健全であることが確認できた。

3.3 添接曲げ試験

添接曲げ試験は千鳥に組み立てた本セグメントのせん断力伝達特性と、解析方法を確認するために行った。

(a) 試験方法

試験は図-8に示すように4ピースの直梁型供試体を千鳥に組み立てて曲げ載荷を行った。組立に際し、リング間、ピース間には共に曲がりボルトを用いた。また、継手曲げ試験と同様の方法で軸力の有無による挙動の違いも確認した。

(b) 試験結果

図-9に軸力有・無しの荷重-たわみ曲線を示す。ここに示す理論値(直線)は、前述の性能試験から求めた $K\theta$, K_s を用いてはり-ばねモデルにより解析を行った結果である。理論値と試験結果は弾性範囲でよく一致し、本セグメントは、はり-ばねモデルによる解析が適用できることが確認できた。また、試験では継手の目違いが極めて小さく、リング継手ボルトの応力変化がほとんど見られなかったことから、緩衝キーによる十分な添接効果があると考ええる。なお、破壊は添接セグメントの引張側鉄筋の降伏によるものであった。

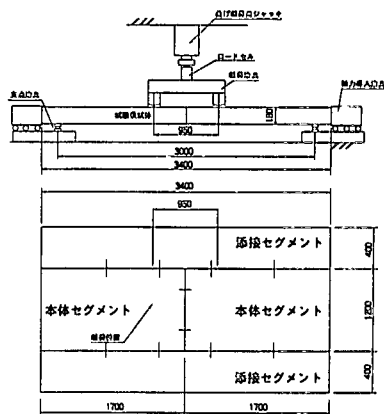


図-8 添接曲げ試験概要図

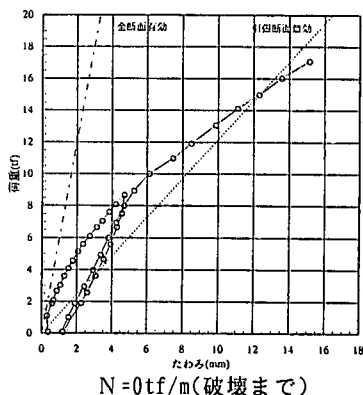
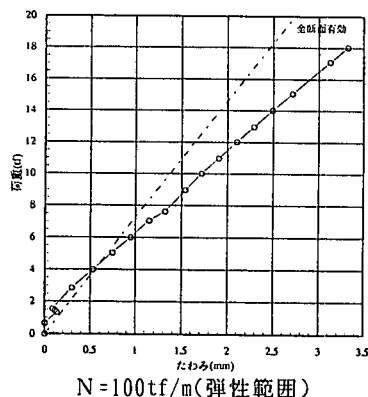


図-9 荷重-たわみ曲線

4. 実大リング載荷試験

本試験は実物大のセグメントを用い、実荷重を模擬した実大リング載荷試験を行うことによって、本セグメントのリングとしての挙動把握と解析結果との比較による評価を行うために行った。

4・1試験方法

試験はリング状に組み立てた本体セグメントの両側に半割の添接セグメントを千鳥組みした2リングモデルとした。また、載荷は許容耐力範囲内で軸力と曲げを段階的に変えて行い、破壊は軸力をかけずに曲げ荷重のみにより行った。試験概要図を図-10に、試験ケースを表-3に示す。

- 実大リング載荷試験供試体(セグメント)仕様
- 種類 : RCセグメント
 - 継手構造 : 緩衝キー付き曲がりボルト(リング間, ピース間共)
 - 外径 D_o : 5,240mm
 - 桁高 H : 180mm
 - 幅 B : 1,200mm(添接セグメント $B=600$ mm)
 - 分割数 : 6分割(5+K)

4・2試験結果

図-11に軸力 $N=100\text{tf/m}$ 、曲げ方向 P_x の荷重-変位図の試験結果を示す。曲げ荷重の載荷に伴う変形は、はり-ばねモデルを用いた解析値とよく一致していることがわかる。これは他の試験ケースに関しても同様であった。また破壊まで載荷したケースでは、最終荷重で載荷位置の鉄筋の降伏とコンクリートの圧壊が生じ、その値は許容荷重の約3倍と十分な耐力を示した。

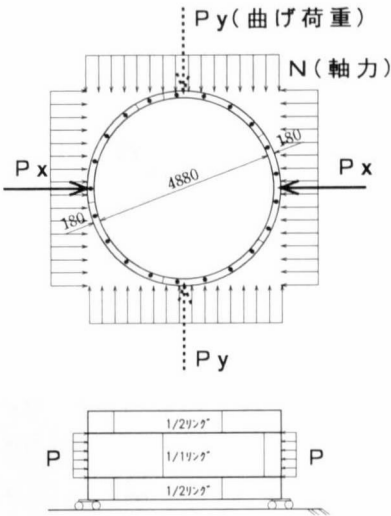


図-10 リング試験概要図

表-3 試験ケース

導入軸力	曲げ荷重方向	載荷範囲
50tf/m	P_x, P_y	許容範囲
100tf/m	P_x, P_y	
200tf/m	P_x, P_y	
0tf/m	P_x, P_y, P_x+P_y	
0tf/m	P_x	破壊まで

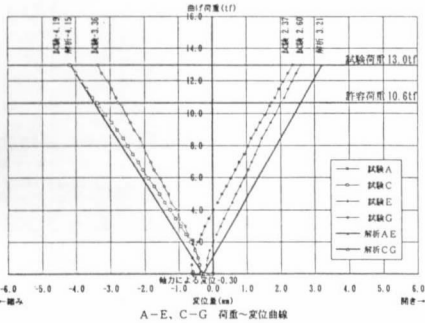
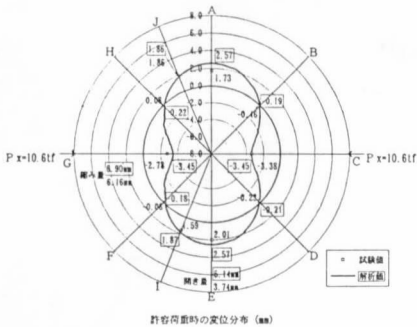
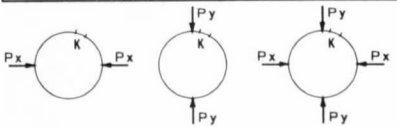


図-11 試験結果

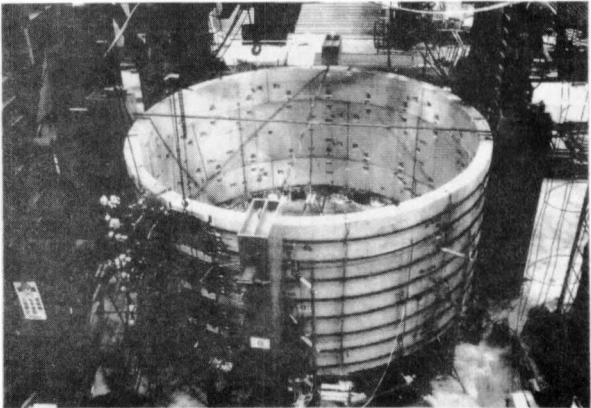


写真-1 試験状況

5. 実施工への展開

5・1工事概要

本セグメントを初めて実施工に展開した工事は、図-12に示すようにマレーシア・クアラルンプール市近郊のスパン空港とゴンバックを結ぶ全長約35kmの鉄道(Light Rail Transit System)の内、市の中心部を通るシールド工事(LRT two for Kuala Lumpur Section 2B-tunnel works)である。

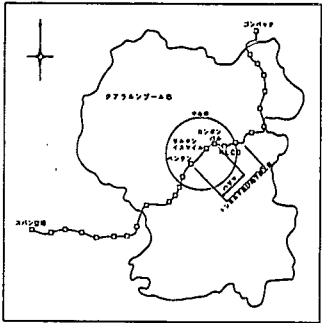


図-12 路線概要図

工事概要	
トンネル延長：	ベンソン駅～サンタソイマイル駅間 854m×2本
	：サンタソイマイル駅～カンソナル駅間 645m×2本
	：総延長 L=2,998m
トンネル径：	内径φ=4,880mm, 外径φ=5,240mm
工期	：1994年11月～1997年6月

5・2セグメント

セグメントの設計は前述した性能試験やリング載荷試験などの結果を踏まえ、2リングはりばねモデルによりMSC/NASTRANを用いて行った。また、設計仕様書にはBS8110(コンクリート構造設計), BS4449(鉄筋規格)を用いた。

図-13に設計断面例を、図-14に解析結果を示す。

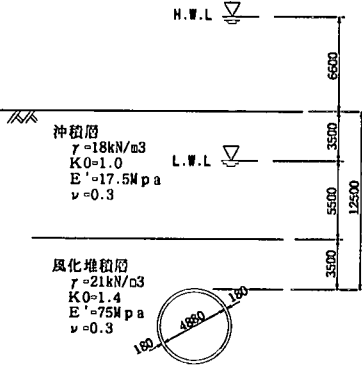


図-13 設計計算断面

L.W.L(通常時)		H.W.L(200年洪水水位)	
変位量 (mm)	軸力 (kN)	変位量 (mm)	軸力 (kN)
せん断力 (kN)	曲げモーメント(kN・m)	せん断力 (kN)	曲げモーメント(kN・m)

図-14 解析結果

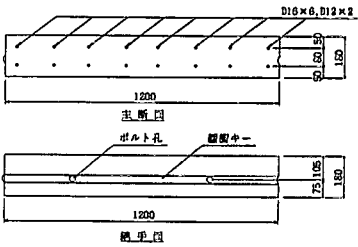


図-15 セグメント断面

6. おわりに

継手部に緩衝キーを設けた本セグメントは、セグメント継手部の性能を向上させる効果が十分にあることが種々の性能試験により確認できた。現在シールド工法に用いられるセグメントに対する課題は多く残されているが、本セグメントの開発はそれらの問題の一つの解決手段であると考えます。また、本セグメントを初めて採用したマレーシア地下鉄工事に続いて、国内においてもその採用が決まり、今後このセグメントが広く展開されることを望んでいる。最後に、本セグメントの開発にあたり、多くの学識経験者に貴重なご意見をいただいた。この場を借りて感謝する次第である。