

# 合理的な曲げモーメント伝達機構を有する 特殊形状セグメントの基礎的研究

三戸 憲二<sup>1</sup>・今田 徹<sup>2</sup>・山崎 良一<sup>3</sup>・野本 寿<sup>4</sup>・山崎 宏<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 西松建設株式会社 土木設計部 (〒105-8401 東京都港区虎ノ門1丁目20-10)

<sup>2</sup>正会員 工博 東京都立大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

<sup>3</sup>正会員 工博 東京都立大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

<sup>4</sup>正会員 工博 西松建設株式会社 技術研究所 (〒242-8520 神奈川県大和市下鶴間2570-4)

<sup>5</sup>正会員 工修 西松建設株式会社 技術研究所 (〒242-8520 神奈川県大和市下鶴間2570-4)

筆者らは、シールドトンネルのセグメントにおいて、合理的に曲げモーメントを伝達できる継手構造を考案した。このセグメントは、セグメント継手を円周方向に段違いに配置するとともに、継手面にホゾを設けることで、せん断抵抗力と継手間距離によって曲げモーメントを容易に伝達できる構造となっており、その形状から「ウイングセグメント」と呼称している。本論文では、セグメント継手の曲げモーメント伝達機構を「添え梁モデル」理論式で説明するとともに、継手要素試験で得られた継手のバネ定数を基準に添え梁モデルによる感度解析を行い、ウイングセグメントの特徴を検証した。その結果、ウイングセグメントは、せん断剛性の向上でボルトへの負担の低減、継手全体の曲げ剛性の向上が可能なが示された。

**Key Words :** shield tunnel, segmental lining, concrete lining, cost reduction, high rigidity, high resisting moment, key-locked joint, simplification

## 1. はじめに

都市部においては地下空間有効利用の観点から、シールド工事に対して大深度、大断面、長距離施工のニーズが高まるとともに、セグメント費を筆頭に建設コストの更なる低減が求められている。

セグメントに着目すると、ここ数年様々なセグメントの種類、継手構造が開発され、コストダウンや高速施工への取り組みなどが盛んに行われている。

シールドトンネルは堅固な洪積層から軟弱な沖積層まで幅広い条件下で、小口径から超大口径まで円形断面はもちろん、楕円、複円、矩形など様々な断面形状が計画・施工されている。これに伴い、覆工構造の技術開発もセグメントの種類、継手構造等、多岐にわたっている。

中～大口径で経済的とされているRCセグメントに着目すると、このコストは継手構造に占める割合が大きい。土質条件が良好で曲げモーメントが卓越しない条件では、曲がりボルト、鋼板直ボルト等、安価な継手構造が採用されるが、土質条件が悪く曲げモーメントが卓越する条件では、通しボルト、ダクトイル継手、コッター式継手等、高価な重構造継手が必要となってくる。従来

の矩形ピースを基本としたセグメントでは、継手における剛性低下を千鳥組で緩和させているが、覆工体としての耐力を確保する意味はもとより、覆工体の止水性能を確保するためにも継手部の目開きを抑制する必要がある。継手部に高い剛性が要求されてきた。

セグメント継手の軽構造化には、1)リング継手の添接効果を高め、千鳥組みされた従来形セグメントのセグメント継手の負担を軽減する流れと、2)セグメントピース形状の工夫により継手の軽構造化を図る流れがある。前者の代表例としては、「ホゾ付きセグメント」と「KLセグメント」が、後者の代表例としては、「ハニカムセグメント」と「台形セグメント」が挙げられる。

平出ら<sup>1)</sup>は、「ホゾ付きセグメント」の性能確認実験を行い、良質地盤下においては、リング間に設けたホゾの効果で継手部の剛性低下を千鳥組みされた隣接本体部で補うことができることから、セグメント継手の軽構造化が図れることを実証した。

園田ら<sup>2)</sup>は、リング継手に緩衝キーを設ける「KLセグメント」を開発し、セグメント継手に曲がりボルトを採用した施工例を紹介すると共に、実物大試験で緩衝キーの効果によって、セグメント継手への負担が軽減さ

れたことを実証した。平出ら<sup>3)</sup>、白石ら<sup>4)</sup>は、セグメントピース形状を六角形とする「ハニカムセグメント」の実物大載荷試験を行い、セグメント継手面の鏡り持ち効果で、継手面に作用する曲げモーメントを分散させることが可能なことを実証した。

筆者ら<sup>5),6),7),8)</sup>は、「台形セグメント」のセグメントリングの応力伝達が剛性一様リングに近似していることを、光弾性小型模型実験で実証し、続いて、実物大載荷試験で、台形セグメントは矩形セグメントに比べて添接効果大きいことを実証した。杉藤ら<sup>9)</sup>は、「台形セグメント」のリング間継手にDOWEL、セグメント継手にGUIDANCE-RODを採用した「CONEX-SYSTEM」を導入し、実物大載荷試験で解析値と実験値が整合することを実証した。

以上のように、セグメントの軽構造化を目指して各種セグメントが開発されてきたが、現在までに開発されたセグメントは、適用対象地盤を良質地盤に限定したもので、継手構造が特殊構造になっているものが多いことから、軽構造化の継手で軟弱地盤にも適用でき、経済的に優れたセグメントが求められている。

このような状況の中で、筆者らは従来の矩形ピースを基本としたセグメント（以下従来形と呼ぶ）では、継手構造の軽構造化には限界があると考え、セグメントピースの形状を工夫することで、継手部の軽構造化を図る試みを行った。その結果、セグメント継手を円周方向に段違いに配置するとともに、継手面にせん断キー（ホブ）を設けることで、せん断抵抗力と継手間距離によって曲げモーメントを合理的に伝達できる構造を考案した。このセグメントは、その形状から「ウイングセグメント」と呼称している。本論文では、セグメント継手部の曲げモーメント伝達機構を「添え梁モデル」理論式で説明するとともに、継手要素試験で得られた継手のバネ定数を基準に添え梁モデルによる感度解析を行い、ウイングセグメントの特徴を検証する。

## 2. ウイングセグメントの概要

### (1) 開発経緯

従来形セグメントでは、継手の剛性の低さを千鳥組みにすることで補い、リング全体の剛性を保つ構造としている。したがって、リング剛性を確保するため、リング間ボルトを多数配置してリング間の添接効果を確保すると同時に、曲げ応力が卓越する条件下では、セグメント継手自体を重構造にする必要があった。

そこで、イモ継ぎの状態でも従来形の千鳥組みリングと同等のリング剛性とリング耐力を有する、継手構造の軽構造化が可能なセグメントの開発を目標とした。

筆者らは、当初「台形セグメント」がせん断抵抗力(S)

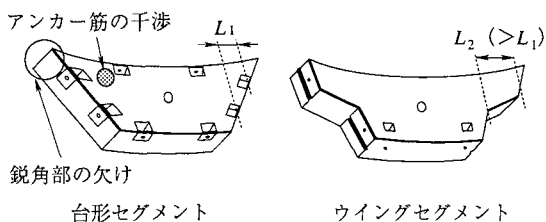


図-1 台形セグメントとウイングセグメントの比較

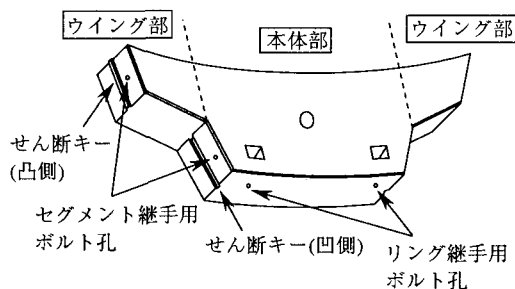


図-2 ウイングセグメントピース基本構造図

×セグメント継手間隔(L)によって曲げモーメントを伝達できる構造であることに着目し、研究・開発を進めた。まず、小型模型にて光弾性実験を行い、曲げが卓越しない条件下では、台形セグメントの応力状態が剛性一様リングに近いことを視覚でとらえ、構造の有効性を確認した<sup>5),6)</sup>。しかし、次に、実物大載荷試験を行った結果、曲げが卓越する厳しい荷重条件を対象とした場合、以下の問題点が確認された<sup>7),8)</sup>。

- ① セグメント継手面に傾きを持っているため、セグメント継手間隔Lをある程度確保できるが、実物大載荷試験の結果、十分な耐力が得られなかった。
- ② 継手耐力を向上させるためにはLを大きくする必要はあるが、鋭角部の欠けや継手のアンカー筋同士が干渉する。

このため、台形セグメントの継手耐力の向上には限界があると判断し、Lを任意に設定できるように継手面を円周方向に段違いにした、ウイングセグメントを考案した<sup>10),11)</sup>。

### (2) ウイングセグメントの種類と組立方法

ウイングセグメントは、当初開発したピース形状が凸字形であったため、日本語名で「凸形セグメント」と称していたが、その後凸形以外のセグメントピースもその対象とすることにしたため、英語名の「Wing-Segment」で総称することにした。

ウイングセグメントの代表例として、標準型ウイングセグメントの対称型について、基本構造図を図-2に示す。このセグメントはセグメント継手が円周方向に段違

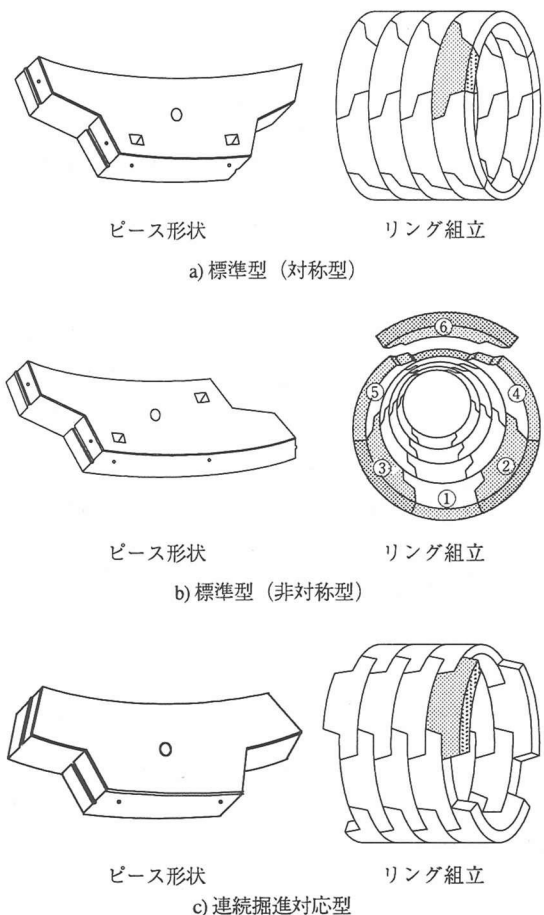


図-3 ウイングセグメントピース形状

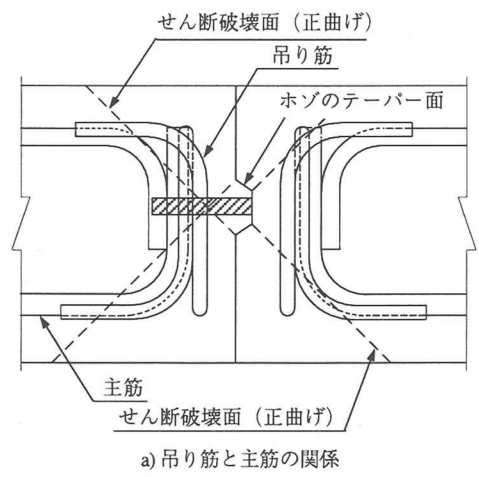
いに配置された、凸字形を基本とした形状である。セグメントは「本体部」と張り出し部である「ウイング部」とで構成されている。セグメント継手面には、せん断キーと称するホゾを設けてあり、せん断抵抗力を有効に伝達できる構造となっている。以下にウイングセグメントの種類とその組立方法について説明する。

① 標準型 (対称型)

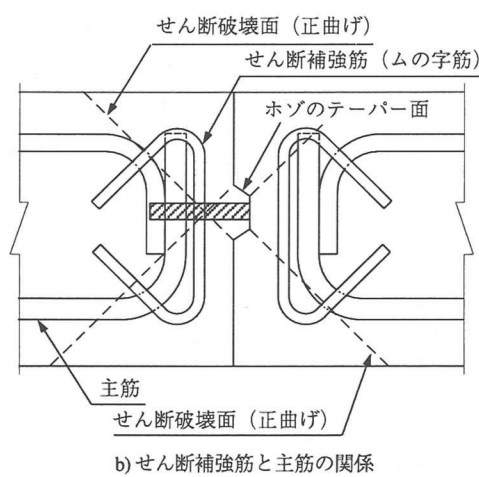
図-3a)に示すセグメントは、標準型の対称型ピースで、1リングは偶数個のピースで構成されている。このセグメントを用いた組立は、従来形セグメントと同様に、掘進と組立が別工程となる。また、組立順序は1ピースおきに軸方向挿入することにより行う。

② 標準型 (非対称型)

図-3b)に示すセグメントは、標準型の非対称型ピースで、1リングの構成は、偶数個および奇数個のいずれも可能である。組立作業は、①と同様に掘進と組立が別工程となるが、組立順序は従来形セグメントと同様、下部から順次組み立てることが可能となる。



a) 吊り筋と主筋の関係



b) せん断補強筋と主筋の関係

図-4 せん断キー (ホゾ) 形状

③ 連続掘進対応型

図-3c)に示すセグメントは、連続掘進を可能にしたピースで、その形状は対称型である。本体部とウイング部の継手面のテーパの向きを逆にし、リング端面が半リングづつ段違いになるようにしたもので、掘進と組立を並行する連続掘進が可能である<sup>12),13)</sup>。

(3) せん断キー(ホゾ)およびウイング形状

a) せん断キー(ホゾ)形状

ホゾ形状を決定する上で、留意すべき点を以下に列挙する。①、③に関してはホゾを大きくした方が有利であるが、④に関しては凹側のせん断抵抗を考えるとその逆となる。そこで、図-4)に示すようにこの相反する効果のバランスを取って、ホゾの形状、配置を決定するものとする。

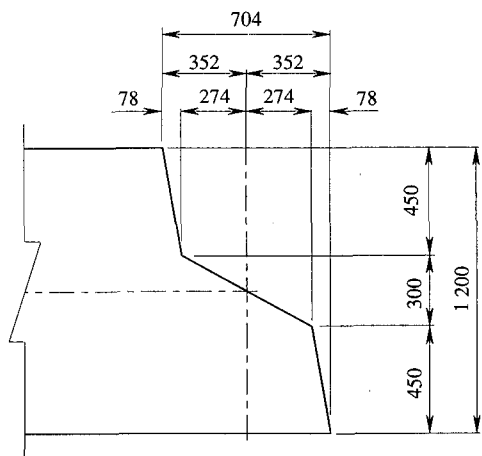


図-5 ウイング形状(例)

- ① ホゾ凸部は、骨材が十分にまわり、せん断面で骨材のかみ合わせが十分に発揮できる形状とする。
- ② 継手面に作用するせん断力をすべてホゾで負担できるように、凸側および凹側のホゾは、そのテーパ面で作接する形状とする。
- ③ ホゾ凸部付け根の純せん断耐力は、せん断面に作用する軸力が大きい程向上する。ホゾのテーパ面は、テーパ面に沿ったせん断力の分力によって、せん断面に軸力を作用させる働きを有するので、ホゾの乗り越えが生じない程度で、可能な限り鈍角とする。
- ④ 正、負のせん断に対して、ホゾ凸側、凹側の斜め引張せん断面が、せん断補強筋、吊り筋等と交差してその効果が発揮できるようなホゾの形状、配置とする。

#### b) ウイング形状

ウイング形状は、以下の点に留意して決定する。後述するセグメント載荷試験供試体のウイング形状を、図-5に示す。

- ① ボルトが負担する曲げモーメントとホゾが負担する曲げモーメントを加えたものが、ウイング部付け根に作用するため、セグメント継手面に比べてウイング付け根の負担が大きいことから、このバランスを考えて各部の幅を設定する。
- ② セグメントピースの軸挿入セットを考えると、ウイング部付け根の幅を広くして、セグメント継手面のテーパ角度を鋭角にした方が、セットバック量を減らすことができる。

#### (4) 継手構造

ウイングセグメントは、セグメント継手のせん断抵抗力と継手間距離によって曲げモーメントを伝達できるこ

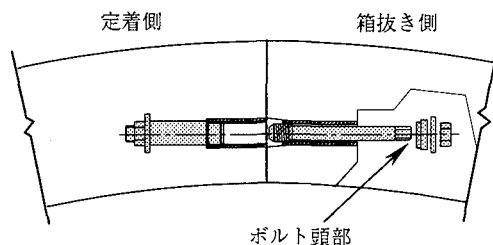


図-6 プレセット鍛造ボルト式継手

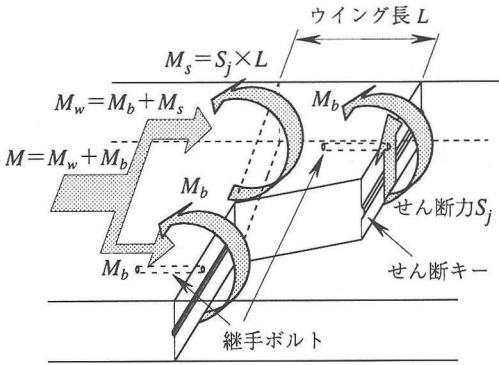
とから、セグメント継手には大きな回転剛性を要求されない。曲げが卓越するような地盤条件では、ある程度の回転剛性を有する継手構造が要求されるが、軸力が卓越する地盤条件では組立用ボルト程度の仕様の継手構造で十分である。曲げが卓越するような地盤条件に着目すると、特に、図-6に示す筆者らが開発した「プレセット鍛造ボルト式継手」<sup>14)</sup>を採用することにより、セグメント継手面全面にホゾを設けることができること、応力が集中するウイング部に断面欠損となる箱抜きを避けられることから、構造的に有利である。

プレセット鍛造ボルト式継手とは、その名の通り継手ボルトをあらかじめセグメントピースに装着しておくことで、現場でのボルトの供給を不要とする継手形式である。この継手は箱抜き側と定着側に分けられ、箱抜き側にボルトをセットしておき、組立時にボルト頭部に取り付けられたナットでボルトを定着側へ送り込むことで締結する方式の継手である。定着側は箱抜きによる断面欠損がないため、構造および配筋上有利である。また、内面に露出する金物が減少するので、トンネル内面の平滑性が向上する。なお、組立誤差に対しては、箱抜き側のボルト径を定着側よりも若干細くすることで、対応できる構造となっている。

#### (5) 構造的特徴

ウイングセグメントの利点は、主に対称型や連続掘進対応型のように、全ピース同形状に起因する製作～施工面に関するものと、構造的なものに大別される。前者には、セグメント組立能率の向上、製作～施工管理の省力化、自動組立機構の簡略化、推進とセグメント組立を並行する高速施工の可能性等が挙げられる。

また、後者の構造的な利点に着目すると、当該継手は、継手面のせん断バネ( $k_s$ )と継手間隔( $L$ )の組合せによって、曲げモーメントを伝達できる特徴を有していることが挙げられる。継手面は基本的にホゾ等のせん断抵抗構造のみで外力に対応できるため、ボルト～金物が従来形に比べて軽構造となり、セグメントのコストダウンを図ることができる。さらに、せん断バネと継手間隔の組み合わせにより、高い継手剛性を発揮できるため、ウ



$$M = M_w + M_b$$

$$= (M_b + M_s) + M_b = 2M_b + M_s$$

図-7 せん断力による曲げモーメントの伝達

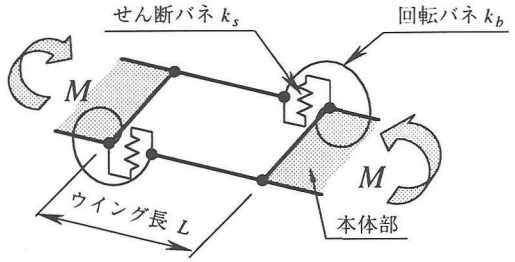


図-8 添え梁モデル

### 3. セグメント継手の曲げモーメント伝達機構

#### (1) 概要

ウイングセグメントのセグメント継手では、ホゾに作用するせん断力( $S_j$ )×ウイング長( $L$ )による曲げモーメントの伝達により、回転バネすなわちボルトの簡略化～省略化を図ることができる。本章では、図-7に示すように、継手部に一定の曲げモーメントが作用する状態を設定し、セグメント継手における曲げモーメント伝達機構を以下に説明する。実際には、継手部背面には土水圧が作用することから、継手部内でも曲げモーメント分布に勾配が生じるが、ここでは説明を単純化するために継手部内の作用曲げモーメントを一定とした。各々が負担する曲げモーメントは、式(1)のように整理される。

$$M = M_b + M_w$$

$$= M_b + M_b + M_s$$

$$= 2M_b + M_s \quad (1)$$

ここに、 $M$ ：継手に作用する曲げモーメント

$M_b$ ：ボルトに作用する曲げモーメント( $= d_b M$ )

$M_w$ ：ウイング部付け根に作用する曲げモーメント( $= d_w M$ )

$M_s$ ：ホゾで負担する曲げモーメント( $= S_j L = d_s M$ )

$S_j$ ：ホゾで負担するせん断力

$L$ ：継手間隔(=ウイング長)

$d_b, d_w, d_s$ ：各々が負担する曲げモーメント分担率

解析的に曲げモーメントの分担率を求める手法として「添え梁モデル」を提案し、継手各部の曲げモーメント分担率と、ウイングセグメントのセグメント継手を従来形に置き換えた場合の等価回転剛性を求める。

#### (2) 添え梁モデル

いま、図-8に示すように、セグメント継手のウイング部を2本の梁として考える。ウイング部は片持ち梁で、

ウイングセグメントは単独リングで剛性一様リングに近い挙動を示す。したがって、イモ継ぎで外荷重に対抗でき、地震時対応等で特にリング継手に引張剛性が要求されない場合には、リング間ボルトを従来形セグメントに比べて大幅に削減することが可能である。

以上の構造的特徴を踏まえ、ウイングセグメントの主な特徴を以下にまとめる。

#### ① セグメントリングの剛性が高い

セグメント継手を円周方向に段違いに配置することで、作用外力をトンネル円周方向に広い範囲で受け持たせるため、単独リングで、千鳥組みされた従来形セグメントリングと同等以上のリング剛性を有する。

#### ② 継手構造の簡略化が可能である。

継手面の回転剛性が低くても、せん断キー(ホゾ)を設けることで曲げモーメントを伝達でき、かつ、継手全体の回転剛性を高くできることから、ウイング部付け根の補強を適切に行うことで、ボルト～金物等の継手構造の簡略化が可能である。また、単独リングで外荷重に対抗できるため、リング間継手の簡略化も可能である。

#### ③ 経済性の向上

②に示す継手構造の簡略化によって、セグメント製作費用が低減できる。また、連続掘進型を実施することにより、工期が短縮され、工費を低減できる。

#### ④ 高速施工への対応が可能

連続掘進対応型を用いて、1ピースごとに段違いに組み立てることにより、シールド掘進と組立を並行作業とする連続掘進が可能である。

#### ⑤ 内面平滑性の向上

②に示す継手構造の簡略化によって、継手金物の数を減少させることができ、地盤条件によっては、セグメント継手のボルトや金物を省略することが可能なため、トンネル内面の平滑性が向上する。

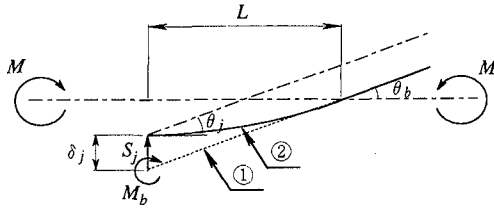


図-9 添え梁モデルの変形

自由端は回転バネとせん断バネで本体部と接続されている。ウイング部に曲げモーメントが作用すると、ウイング部は図-9に示す①のように変形しようとするが、ジョイント部が回転バネ( $k_b$ )とせん断バネ( $k_s$ )で拘束されているため、実線②のように変形する。

$S_j$ 、 $M_b$ が作用したことによる変位 $\delta_j$ 、 $\theta_j$ は、カステリアーノの第2定理を基に式(3)と式(4)で表される。

$$U = \frac{1}{2EI} \int_0^L M^2 dx = \frac{1}{2EI} \int_0^L (S_j \cdot x + M_b)^2 dx \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \delta_j &= \frac{\partial U}{\partial S_j} = \frac{1}{EI} \int_0^L (S_j \cdot x + M_b) \cdot x dx \\ &= \frac{L^2}{3EI} \cdot S_j + \frac{L}{2EI} \cdot M_b \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \theta_j &= \frac{\partial U}{\partial M_b} = \frac{1}{EI} \int_0^L (S_j \cdot x + M_b) dx \\ &= \frac{L^2}{2EI} \cdot S_j + \frac{L}{EI} \cdot M_b \end{aligned} \quad (4)$$

ここに、 $U$  : セグメント継手全体のひずみエネルギー

$M$  : 添え梁に作用する曲げモーメント

( $= S_j x + M_b$ )

$x$  : 継手面からの距離

$M_b$  : 継手部回転バネが負担する曲げモーメント

$S_j$  : 継手部せん断バネが負担するせん断力

$k_b$  : 継手部の回転バネ定数

$k_s$  : 継手部のせん断バネ定数

$L$  : 添え梁長 (=ウイング長)

$EI$  : 添え梁の曲げ剛性

$\theta_j$  : 添え梁モデル先端継手面の相対たわみ角

( $\theta_j = M_b / k_b$ )

$\delta_j$  : 添え梁モデル先端継手面の鉛直相対変位量

( $\delta_j = S_j / k_s$ )

また、2つの梁(ウイング部)はトンネル軸方向に対称なので、継手における鉛直方向の相対変位量( $\delta$ )と相

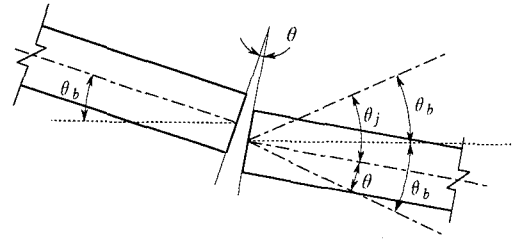


図-10 継手部における各バネの変位量

対回転角( $\theta$ )は式(5)および式(6)のようになる。

$$\begin{cases} \theta = 2\theta_b - \theta_j & (5) \\ \delta = \theta_b \cdot L - \delta_j & (6) \end{cases}$$

ここに、 $\theta_b$  : ウイング部付け根に作用する曲げモーメント( $M_w$ )によるたわみ角

$\delta$  : 継手の鉛直方向の相対変位量

$\theta$  : 継手の相対回転角

一方、継手におけるせん断力および曲げモーメントの伝達特性は、式(7)および式(8)で表すことができる。

$$\begin{cases} S_j = k_s \delta & (7) \\ M_j = k_b \theta & (8) \end{cases}$$

式(3)~(8)を解いて、式(9)~式(11)の関係式が得られる。

$$\theta = \frac{a_{21}(La_{12} - 2a_{11}) - a_{11}(La_{22} - 2a_{21})}{Lb_2(La_{12} - 2a_{11}) - Lb_1(La_{22} - 2a_{21})} \cdot M \quad (9)$$

$$d_b = \frac{b_1 a_{21} - b_2 a_{11}}{b_2(La_{12} - 2a_{11}) - b_1(La_{22} - 2a_{21})} \quad (10)$$

$$d_w = 1 - d_b = d_b + d_s \quad (11)$$

$$\text{ここに、} \quad a_{11} = 1 + \frac{k_s L^3}{3EI}, \quad a_{12} = \frac{k_s L^2}{2EI}$$

$$a_{21} = \frac{k_b L^2}{2EI}, \quad a_{22} = 1 + \frac{k_b L}{EI}$$

$$b_1 = k_s L, \quad b_2 = 2k_b$$

(3) 継手が1点に集中した場合の等価回転剛性

ここで、図-11に示すように、ウイングセグメントのセグメント継手を、従来形の継手に置き換えた場合の等価回転剛性を求める。

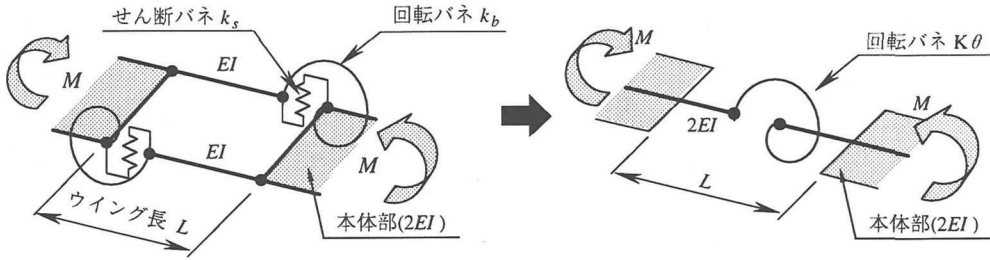


図-11 等価回転剛性への変換

継手間隔  $L$  の部分に蓄えるエネルギー  $U_r$ 、1 点に継手が集中した場合のウイング部に相当する範囲に蓄えられるエネルギー  $U_G$  は式(12)および式(13)で表される。

$$\begin{aligned}
 U_r &= 2 \times \frac{1}{2EI} \int_0^L (S_j \cdot x + M_b)^2 dx + 2 \times \frac{1}{2k_b} \cdot M_b^2 + 2 \times \frac{1}{2k_s} \cdot S_j^2 \\
 &= \frac{1}{EI} \left( S_j^2 \cdot \frac{L^3}{3} + S_j \cdot M_b \cdot L^2 + M_b^2 \cdot L \right) + \frac{1}{k_b} \cdot M_b^2 + \frac{1}{k_s} \cdot S_j^2 \\
 &= \frac{L}{EI} \left( \frac{d_s^2}{3} + d_s \cdot d_b + d_b^2 \right) M^2 + \frac{d_b^2}{k_b} \cdot M^2 + \frac{d_s^2}{k_s \cdot L^2} \cdot M^2
 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
 U_G &= 2 \times \frac{1}{2 \times 2EI} \int_0^{L/2} M^2 dx + \frac{1}{K_\theta} \cdot M^2 \\
 &= \frac{L}{4EI} \cdot M^2 + \frac{1}{2K_\theta} \cdot M^2
 \end{aligned} \quad (13)$$

$U_r$  と  $U_G$  が等しくなるものと仮定すれば、上式より式(14)および式(15)の関係が導かれる。

a)  $k_b = 0$  の時

$$K_\theta = \frac{2EI k_s L^2}{k_s L^3 \left\{ 4 \left( \frac{d_s^2}{3} + d_s \cdot d_b + d_b^2 \right) - 1 \right\} + 4EI d_s^2} \quad (14)$$

b)  $k_b \neq 0$  の時

$$K_\theta = \frac{2EI k_b k_s L^2}{k_b k_s L^3 \left\{ 4 \left( \frac{d_s^2}{3} + d_s \cdot d_b + d_b^2 \right) - 1 \right\} + 4EI (k_s \cdot k_b^2 \cdot L^2 + k_b \cdot d_s^2)} \quad (15)$$

なお、式(3)、(4)、(9)～(15)の関係より、等価回転剛性  $K_\theta$  と、ウイングセグメントのセグメント継手面の目開きと継手部に作用する曲げモーメントから求められる見掛けの回転剛性  $K_g$  が等しいことが証明される。

$$K_g = M/\theta = Mk_b/M_b = k_b/d_b = K_\theta \quad (16)$$

#### 4. セグメント継手要素試験

セグメント継手のバネ定数、耐力を把握する目的で、地下鉄単線断面 ( $\phi 5300 \times 250 \times 1200\text{mm}$ , M24  $\times$  2本, 有効高さ  $d=165\text{mm}$ ) を対象とした、セグメント継手要素試験を行った。ウイング形状は、図-5に準じている。なお、セグメント継手曲げ試験は、プレセット鍛造ボルト式継手開発時の試験であるため、セグメント継手面にホゾが無くボルトの材質も異なるが、継手幅 (450mm  $\times$  2=900mm)、セグメント厚さ、ボルト径および本数、有効高さともに、対象としているウイングセグメント仕様と合致していることから、要素試験として引用して問題ないと判断した<sup>14)</sup>。

##### (1) 試験項目とその目的

###### a) セグメント継手曲げ試験

セグメント継手の回転剛性、曲げ耐力を確認することを目的とした。使用材料は、コンクリートについては設計基準強度  $\sigma_{ck} = 41.2\text{N/mm}^2$ 、鉄筋 SD295、ボルト M24 (8.8) である。

###### b) せん断キーせん断試験

継手面せん断キーのせん断バネ定数、せん断耐力を確認することを目的とした。使用材料は、コンクリートについては設計基準強度  $\sigma_{ck} = 47.0\text{N/mm}^2$ 、鉄筋 SD345、ボルト M24 (10.9) である。本試験はウイングセグメントのせん断バネ設計値を設定するための基礎試験であるため、実応力レベルを想定した軸力 221kN を導入した<sup>15)</sup>。

##### (2) セグメント継手曲げ試験

###### a) 試験方法

試験方法の概要を図-12に示す。試験は2ケース行い長さ1500mm、幅900mm、厚さ250mm、有効高さ165mmの供試体を所定の初期締結力(許容応力度の80%)でボ

表-1 コンクリートの圧縮強度と弾性係数

		圧縮強度 N/mm <sup>2</sup>	弾性係数 N/mm <sup>2</sup>
継手曲げ試験	CASE-1	50.4	3.23×10 <sup>4</sup>
	CASE-2	52.9	3.11×10 <sup>4</sup>
せん断試験	CASE-1	61.7	3.26×10 <sup>4</sup>
	CASE-2	63.2	3.43×10 <sup>4</sup>

表-2 継手曲げ試験結果

		設計値	試験値	
			case-1	case-2
曲げモーメント (kNm/m)	許容値	26.1	—	—
	終局値	77.6	103	106
安全率		2.97	3.95	4.06

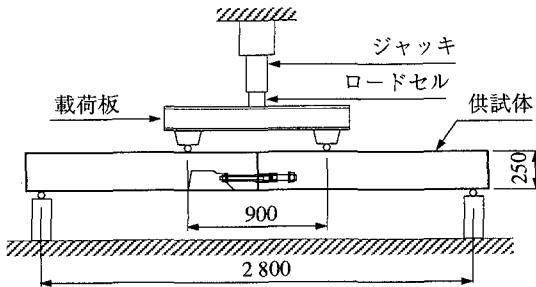


図-12 継手曲げ試験概要図

ルト接合し、支承スパン2800mm、載荷スパン900mmの2点集中載荷とした。荷重は、クラック発生まで4.9kNピッチで、その後破壊まで9.8kNピッチで載荷した。なお、標準供試体によるコンクリートの圧縮強度と弾性係数の試験結果を、せん断キーせん断試験の分と併せて表-1に示す。

b) 試験結果

① 強度特性

試験結果を表-2に示す。各試験ケースとも設計許容値に対する安全率が、標準セグメントで推奨されている安全率2.5を大きく上回り、さらに設計終局値を上回っていたことから、本継手は十分な耐力を有していることが実証された。

② 継手の回転剛性

目開き計の計測結果から求めた、曲げモーメントと継手面回転角の関係を図-13に示す。22kN・m/m付近までは、ほぼ直線的に継手面回転角が増加し、その後増加量が増えている。したがって、この点を目開き開始点として、継手面の目開き前と目開き後の回転バネ定数を求めた。その結果、従来の通しボルト継手と同等の値が得られた。

ボルトの自由長を考慮して算出した、目開き後の回転バネ定数設計値 $k_b = 1.2 \times 10^4$  kN・m/m/radは、実測値と良く一致しており、設計値の妥当性が確認された。

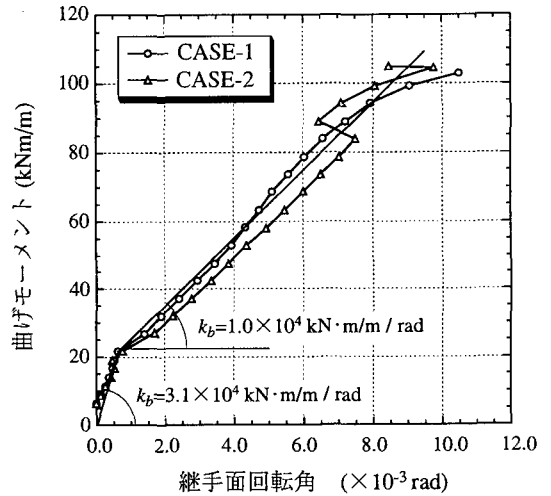


図-13 曲げモーメントと継手面回転角の関係

(3) せん断キーせん断試験

a) 試験方法

試験方法の概要を図-14に示す。セグメント継手面の幅(450mm)を有する平板型供試体を3体セットし、セグメント間ボルトを所定の初期締結力(許容応力度の80%)で締結した後、P C鋼棒4本をセンターホールジャッキで緊張し、継手面に所定の軸力221kNを導入した。そして、両サイドの供試体を支持金物に固定して、中央の供試体中央に鉛直荷重を加えて、せん断キーにせん断力を作用させた。中央供試体のせん断キーは両継手面とも凸側あるいは凹側にして、せん断抵抗が均等に得られるようにした。なお、せん断変形はホゾからの斜めひび割れ範囲に生じると考え、支承部、変位計測点ともに継手面から桁高の半分離れた位置とした。

試験は図-15に示すせん断キー形状の異なる2ケースについて行い、各ケース共、正曲げと負曲げに対応する2パターンについて行った。正曲げとは、凸側継手面が内側(図-15の下方)へ変位する方向を示す。

せん断キー形状は、凹凸間に隙間のないCase-1と、シール材を貼付する目的で凹凸間に5mmの隙間を設けたCase-2について試験を行った。



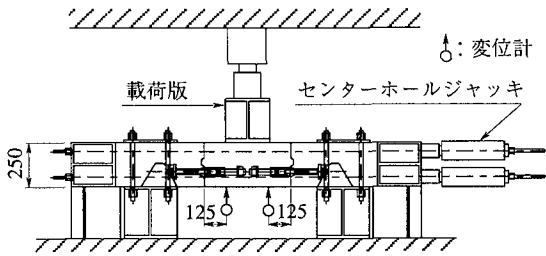
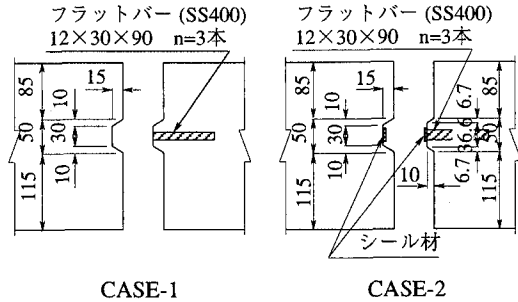


図-14 せん断キーせん断試験 試験装置概要図



CASE-1

CASE-2

注1) 凸側で寸法表示のない寸法は、凹側と同じ値である。

図-15 各ケースのせん断キー形状図

## b) 試験結果

### ① せん断耐力

各ケースの試験結果を表-3に示す。破壊形態は、全てのケース共に図-4に示すうち、凹側せん断キーの斜め引張せん断破壊であり、凸側せん断キーは健全であった。Case-2については、凹側と凸側の間にシール材を貼付したが、破壊時においても剥離することなく、シール機能を維持した状態であった。

最終耐力は、負曲げでは圧縮によるクラックが先行したため正曲げに比べて低い値となったが、設計値を上回っていることから、せん断キーはいずれの形状でも、せん断力に対して十分な耐力を有していることが確認されたと言える。

### ② せん断剛性

ここでは代表値として、Case-1の正曲げについて載荷荷重とせん断変形の間係を図-16に示す。図中の設計値とは、軸力による摩擦抵抗を考慮していない値である。せん断クラックは許容荷重を越えてから発生しているが、せん断剛性はクラックが発生しても大きな変化がないことが分かる。また、せん断補強鉄筋の剛性を考慮して算出したせん断バネ定数設計値は、設計終局荷重レベルでは実測値の割線せん断バネ定数とほぼ同等の値となっているが、設計荷重レベルでは約半分の値となっ

表-3 せん断キーせん断試験結果

		Case-1		Case-2	
		正曲げ	負曲げ	正曲げ	負曲げ
設計値	許容荷重(kN)	263	257	263	257
	終局荷重(kN)	555	512	551	508
	安全率 $F_s$	2.11	1.99	2.10	1.98
実験値	破壊荷重(kN)	842	669	892	617
	安全率 $F_s$	3.21	2.61	3.40	2.40

注1) 試験結果は、両側の継手面に作用する荷重の合計である。

2) 設計値には、継手面に作用する軸力による摩擦抵抗 ( $F = 2 \mu N = 2 \times 0.5 \times 221 = 221 \text{ kN}$ ) を考慮していない。

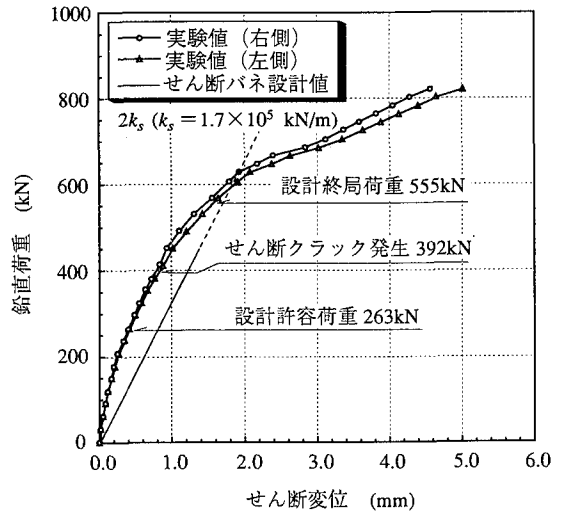


図-16 せん断キーせん断試験 せん断変位

ている。このことから、上記のせん断バネ定数設計値は、ホゾの効果でボルトが負担する曲げモーメント分担率を低減し、継手構造の軽構造化を図るという意味で、安全側の設定となっていることが示された。

## 5. 添え梁モデルによる感度解析

### (1) 添え梁モデルの設計諸定数の設定

#### a) 断面性能

ウイング部RC断面の剛性は、ウイング部セグメント幅の平均値60cmに対する矩形断面として計算した。

$$\begin{aligned}
 EI &= E_c \times b \times h^3 / 12 \\
 &= 3.8 \times 10^7 \times 0.60 \times 0.25^3 / 12 \\
 &= 3.0 \times 10^4 \quad (\text{kN} \cdot \text{m}^2)
 \end{aligned}$$

ここに、 $E_c$ : コンクリートのヤング率  
 (=  $3.8 \times 10^7$  kN/m<sup>2</sup>)

$I$ : 添え梁の断面 2 次モーメント (=  $bh^3/12$ )

$b$ : 添え梁の幅 (= 0.60 m)

$h$ : 添え梁の桁高 (= 0.25 m)

b) 設計せん断バネ定数  $k_s$

ウイングセグメントの主材料であるコンクリートのせん断バネ定数は、コンクリートを完全弾性体と仮定し、せん断変形の領域を継手面から桁高と同じ範囲  $h$  とすると、以下のように示される。

$$\begin{aligned} k_{s1} &= \frac{G_c A_c}{h} = \frac{E_c b}{2(1+\nu_c)} \\ &= \frac{3.5 \times 10^7 \times 0.45}{2 \times (1+0.2)} \\ &= 6.6 \times 10^6 \text{ (kN/m)} \end{aligned}$$

ここに、 $k_{s1}$ : 継手部 RC 断面を完全な弾性体と仮定した場合の、コンクリートのせん断変形から求めたせん断バネ定数

$G_c$ : コンクリートのせん断弾性係数

$A_c$ : 継手部 RC 断面の断面積  
 (= 幅  $\times$  桁高 =  $bh = 0.45 \text{ m} \times 0.25 \text{ m}$ )

$\nu_c$ : コンクリートのポアソン比 (= 0.2)

また、せん断補強筋の剛性を考慮したせん断バネ定数は、以下のように示される。

なお、せん断に抵抗する鉄筋としては、継手面に沿って曲げ上げられた主筋、ボルトの吊り筋 (D13  $\times$  4 本)、筆者らが「ムの子筋」と呼んでいるせん断補強筋 (D10  $\times$  3 本) が挙げられるが、下記の理由から安全側にムの子筋のみが有効と考えて、せん断バネ定数を算出した。

- ① 当該供試体の桁高とホゾの位置関係から考えると、図 4 に示すように、ムの子筋以外はせん断破壊面に対して確実に抵抗するとは言い難い。
- ② せん断キーせん断試験で、吊り筋とムの子筋にゲージを貼り付けて、継手面のせん断変形に伴う鉄筋のひずみを計測したところ、図 17 に示すようにムの子筋の反応が先行しており、吊り筋はせん断破壊近くになって反応している。

$$\begin{aligned} k_{s2} &= \frac{S_j}{\delta_s} = \frac{S_j}{12\phi S_j / A_s j E_s} = \frac{A_s j E_s}{12\phi} \\ &= \frac{2.14 \times 10^{-4} \times 7/8 \times 2.1 \times 10^8}{12 \times 1.0 \times 10^{-2}} \\ &= 3.3 \times 10^5 \text{ (kN/m)} \end{aligned}$$

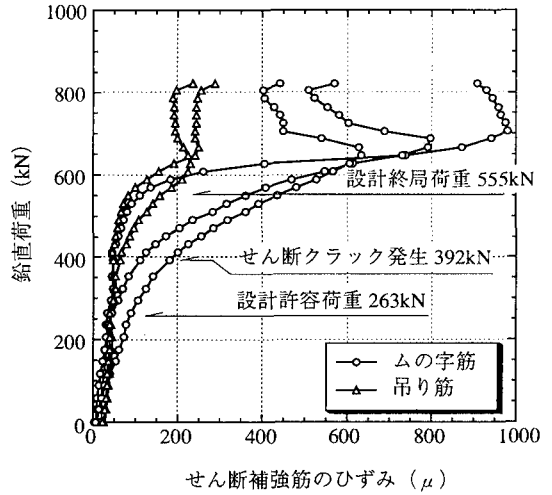


図-17 せん断補強筋のひずみ

ここに、 $k_{s2}$ : 継手部 RC 断面のせん断補強筋の伸びから求めたせん断バネ定数

$S_j$ : 継手面に作用するせん断力

$\delta_s$ : せん断補強筋の伸び量

$$\begin{aligned} \delta_s &= \sigma_s \times 12\phi / E_s \\ &= S_j / (A_s j) \times 12\phi / E_s \\ &= 12\phi S_j / (A_s j E_s) \end{aligned}$$

$12\phi$ : 鉄筋の定着長

$\phi$ : せん断補強筋の直径 (D10 =  $1.0 \times 10^{-2}$  m)

$A_s$ : せん断補強筋の断面積  
 (D10  $\times$  3 本 =  $2.14 \times 10^{-4}$  m<sup>2</sup>)

$\sigma_s$ : せん断補強筋の引張応力度

$$\begin{aligned} \sigma_s &= S_j d / (A_s j d) \\ &= S_j / (A_s j) \end{aligned}$$

$E_s$ : 鋼材のヤング係数 (=  $2.1 \times 10^8$  kN/m<sup>2</sup>)

$j d$ : 全圧縮応力の作用点から引張鉄筋断面の図心までの距離 ( $j = 7/8$ )

継手面のせん断バネは、コンクリートとせん断補強筋の各せん断バネが複雑に連成したものである。コンクリートは、完全弾性体の範囲では大きなせん断剛性を示すが、図 17 に示すように、クラックの伸展に伴い剛性が低下すると共に、せん断補強筋が効果を発揮し始める。ウイングセグメントでは、せん断バネ定数が大きくなる程ボルトの負担が小さくなるため、ここでは安全側に、コンクリートにクラックが発生した後でも最低限確保できるせん断バネ定数として、せん断補強筋から算出した  $k_{s2}$  を採用した。なお、前述のせん断バネ定数計算

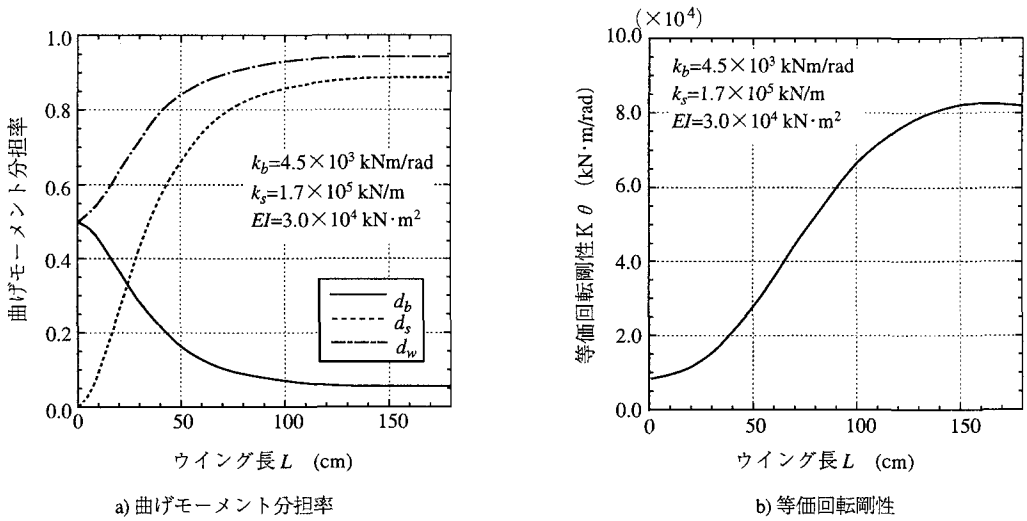


図-18 ウイング長 (L) の感度解析

値は、継手面一方のせん断変形に着目した値であるため、継手面全体のせん断バネ定数はその 1/2 となる。

$$k_s = k_{s2}/2$$

$$= 3.3 \times 10^5 / 2 = 1.7 \times 10^5 \quad (\text{kN/m})$$

$$k_b = \frac{M_o \cdot (d - x)}{\delta_s}$$

$$= \frac{1.0 \times (0.165 - 0.0570)}{1.0 \times 10^{-5}}$$

$$= 1.1 \times 10^4 \quad (\text{kN}\cdot\text{m}/0.9\text{m}/\text{rad})$$

$$= 1.2 \times 10^4 \quad (\text{kN}\cdot\text{m}/\text{m}/\text{rad})$$

### c) ボルトの回転バネ定数 $k_b$

「ホゾ付きセグメント」の設計では、セグメント継手の回転バネ定数の設定に、軸力を考慮したレオンハルトの式を引用している。ウイングセグメントは、ボルトの回転バネ定数  $k_b$ 、せん断バネ定数  $k_s$ 、ウイング部の断面剛性、ウイング長の組み合わせで、継手部全体の耐力、曲げ剛性が決定されるため、回転バネ定数もできる限り現実に近い値を設定する必要がある。そこで、ウイングセグメントでも、軸力が作用する場合にはレオンハルトの式を用いるものとする。ただし、本論文はセグメント継手要素試験結果を基に、ウイングセグメントの基本特性を添え梁モデルで検証することを目的としているため、軸力が作用しない単純な条件について以下検討を行う。なお、軸力が作用する場合の評価については、今後の課題としてウイングセグメント実物大載荷試験結果の整理に委ねるものとする。

セグメント継手の回転バネ定数は、継手の目開き前後で大きく異なる。ここでは、目開き後に着目し、プレセット鍛造ボルトの回転バネ定数を計算する。プレセット鍛造ボルトの形状から考えて、箱抜き側の変形は通しボルトタイプに準じ、定着側はアンカー筋の中心まで変形するものと考えた。

ここに、 $M_o$  : 単位曲げモーメント (= 1.0 kN·m)

$d$  : ボルトの有効高さ (= 0.165 m)

$x$  : 中立軸位置 (= 0.0570 m)

$\delta_s$  :  $M_o$  によるボルトの伸び量

$$\delta_s = \frac{\sigma_s}{E_s} \times l$$

$$= \frac{7.5 \times 10^3}{2.1 \times 10^8} \times 0.28$$

$$= 1.0 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$\sigma_s$  :  $M_o$  によるボルトの引張応力度

(=  $7.5 \times 10^3 \text{ kN/m}^2$ )

$E_s$  : ボルトの弾性係数 (=  $2.1 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$ )

$l$  : ボルトの自由長 (= 0.28 m)

### (2) 添え梁モデル感度解析

地下鉄単線断面(セグメント幅1200mm、厚さ250mm)を対象に、添え梁モデルによる感度解析を行った。継手の回転バネ定数 ( $k_b$ ) およびせん断バネ定数 ( $k_s$ ) については、要素試験で得られた値、 $k_b = 4.5 \times 10^3 \text{ kN}\cdot\text{m/rad}$  (目開き後)、 $k_s = 1.7 \times 10^5 \text{ kN/m}$  を基準にした。ウイング長 (L) と曲げモーメント分担率、継手全体の等価回転剛性 ( $K\theta$ ) の関係を図-18に、 $k_b$ 、 $k_s$  と  $d_b$ 、 $K\theta$  の関

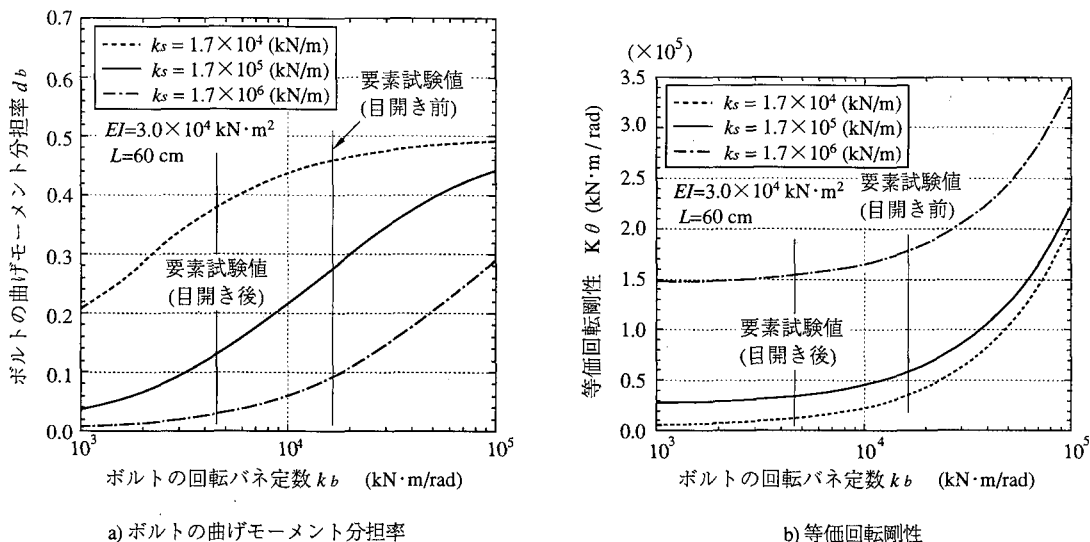


図-19 セン断バネ ( $k_s$ ) の感度解析

係を図-19に示す。これら感度解析によって、以下に示すウイングセグメントの基本特性が検証された。

#### a) ウイング長の効果

ウイング長は、ボルトの負担軽減の観点からは長い方が有利であるが、セグメントリング組立時のセットバック量やウイング部を避けたシールドジャッキの配置等、施工面の対応を考慮すると、短い方が有利である。また、セグメント継手に作用する曲げモーメントは、ボルトとウイング部付け根のRC断面に分配されるため、ボルトの負担軽減に偏重すると、ウイング部付け根のRC断面の負荷が過大となるので、この両者のバランスを考慮しなければならない。解析の結果、ウイング長を60cm確保することで、ボルトの負担は約13%と従来形に比べて1/4程度に低減可能であり、セグメント継手全体の等価回転剛性も従来形の約4倍程度に向上することが検証された。

#### b) セグメント継手の軽構造化

図-19より、 $k_s$ が大きくなるほど $d_b$ が小さくなっていることから、 $k_s$ を確保すればウイングセグメントの特徴である、ボルトの負担軽減、すなわちセグメント継手の軽構造化が可能であることが検証された。また、 $k_s$ が大きくなるほど $K\theta$ が大きくなっていることから、 $k_s$ の向上によってセグメント継手の高剛性化が可能であることも検証された。なお、継手要素試験から得られたバネ定数を用いると、 $d_b$ は目開き前で約27%、目開き後で約13%となっており、従来形に比べ確実に継手の負担が軽減されることが示された。

## 6. 結論

セグメント継手部の曲げモーメント伝達機構を「添え梁モデル」理論式で説明し、継手要素試験で得られた継手のバネ定数を基準に添え梁モデルによる感度解析を行った結果、ウイングセグメントに関して得られた知見を以下に示す。

- ① セン断キーのせん断抵抗力( $S$ )×ウイング長( $L$ )の効果で、曲げモーメントを伝達できることが添え梁モデル理論式で説明できた。
- ② 継手曲げ試験の結果、ボルトの自由長の伸びを考慮したRC断面設計値で、セグメント継手の回転剛性および耐力が説明できた。
- ③ セン断キーせん断試験の結果、せん断補強筋の効果を検討した設計値で、セグメント継手のせん断変形および耐力が説明できた。
- ④ 添え梁モデルによる感度解析の結果、ウイング長 $L$ の効果により、適切なウイング長および継手のせん断剛性を設定することで、ボルトの負担が軽減され、継手部全体の回転剛性が向上することが確認された。

## 7. おわりに

ウイングセグメントは、軸力に対し曲げモーメントが卓越するような軟弱地盤でも、軽構造の継手で高剛性のリングを構築できる経済性に優れたセグメントである。地下鉄単線断面を対象にした添え梁モデルによる解析では、従来形に比べボルトの負担が大幅に軽減されるこ

とが確認された。今後は、実物大セグメント載荷試験を基に、実応力レベルでのウイングセグメントの特性を解明する予定でいる。

謝辞：最後に、本研究を進めるにあたって御協力頂いた、西松建設(株)坪井広美氏、大江郁夫氏、セグメント載荷試験にあたって御協力頂いたジオスター(株)加瀬明氏、藤野豊氏、岩田和実氏に感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 平出享, 福島昭男: ホゾ付きセグメントの性能確認実験, トンネルと地下, 第25巻10号, pp.825~836, 1994年10月.
- 2) 園田徹士, 杜平: KLセグメント, “新しいセグメントー開発から施工へー”, 日本プロジェクトリサーチ, 第40回「シールドトンネル工法講習会テキスト」, pp.105~119, 1996年3月.
- 3) 平出享, 福島昭男, 相馬誠人: ハニカムセグメントの実大載荷試験, トンネルと地下, 第26巻4号, pp.303~314, 1995年4月.
- 4) 白石浩司, 荒川賢二: 我が国初のハニカムセグメントの実用化, “新しいセグメントー開発から施工へー”, 日本プロジェクトリサーチ, 第40回「シールドトンネル工法講習会テキスト」, pp.59~72, 1996年3月.
- 5) 今田徹, 山崎良一, 野本寿: 台形セグメントの力学特性について, 土木学会第48回年次学術講演会講演概要集Ⅲ-11, pp.76~77, 1993年9月.
- 6) 今田徹, 山崎良一, 野本寿, 三戸憲二: 台形セグメントの力学特性について(2), 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集Ⅲ-608, pp.1206~1207, 1994年9月.
- 7) 今田徹, 山崎良一, 三戸憲二, 野本寿: 台形セグメントの開発(セグメント載荷曲げ試験結果について), 土木学会第49回年次学術講演会講演概要集Ⅲ-609, pp.1208~1209, 1994年9月.
- 8) 三戸憲二, 今田徹, 山崎良一, 野本寿: 台形セグメントの開発(セグメント載荷曲げ試験その2), 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集Ⅲ-605, pp.1210~1211, 1995年9月.
- 9) 杉藤哲也: CONEX-SYSTEMーセグメント高速施工・自動組立に向けてー, “新しいセグメントー開発から施工へー”, 日本プロジェクトリサーチ, 第40回「シールドトンネル工法講習会テキスト」, pp.21~32, 1996年3月.
- 10) 野本寿, 今田徹, 山崎良一, 三戸憲二: 凸形セグメントの開発, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集Ⅲ-603, pp.1206~1207, 1995年9月.
- 11) 高橋賢一, 今田徹, 山崎良一, 三戸憲二: 台形セグメントおよび凸形セグメントの力学特性について, 土木学会第50回年次学術講演会講演概要集Ⅲ-604, pp.1208~1209, 1995年9月.
- 12) 坪井広美, 内田克己, 山口潮: 凸形セグメントを用いたシールド高速施工法について, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集Ⅲ-190, pp.380~381, 1996年9月.
- 13) 山崎宏, 野本寿, 三戸憲二: 継ぎ手の軽構造化が可能な特殊形状セグメントの開発, トンネルと地下, 第28巻5号, pp.387~395, 1997年5月.
- 14) 増田義孝, 栗原和夫, 野本寿, 三戸憲二: プレセット鍛造ボルト継手の構造実験, トンネルと地下, 第23巻4号, pp.311~317, 1992年4月.
- 15) 山崎宏, 今田徹, 山崎良一, 三戸憲二: ウイング(凸形)セグメント実物大載荷試験(その3)ーせん断キーせん断試験ー, 土木学会第52回年次学術講演会概要集Ⅲ-B121, pp.242~243, 1997年9月.

(1997.7.10 受付)

## NUMERICAL EVALUATION OF THE SEGMENTS TRANSPORTING BENDING MOMENT WITH THE EFFECTIVE SHAPE, ON FUNDAMENTAL JOINT TESTS OF SEGMENTS

Kenji MITO, Toru KONDA, Ryoichi YAMAZAKI, Toshi NOMOTO  
and Hiroshi YAMAZAKI

The authors devised “Wing Segments”, making cost reduction of segmental lining, because of simplification of longitudinal joint structure by transporting bending moment with sharing stiffness of the joint. In this paper, the structural mechanism of transporting bending moment with sharing stiffness of the joint, was expressed by “Soe Bari Model”, and the effect was established by “Soe Bari Model” using experimental value of bending and sharing spring of the joint by fundamental loading tests of prototype segments. At the result, it was confirmed that the sharing stiffness and the overhang length of the longitudinal joint were effective to transport bending moment in “Wing Segment”