

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実証実験

三戸 憲¹・今田 徹²・山崎 良一³・野本 寿⁴・山崎 宏⁵

¹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)

²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)

³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)

⁴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)

⁵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、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を考案した。基礎的研究¹⁾では、セグメント継手の曲げモーメント伝達機構を理論式で説明するとともに、継手要素試験で得られたバネ定数を基準に理論式解析モデルで感度解析を行い、その特徴を検証した。本論文では、実物大載荷試験を実施し、特殊形状セグメントの曲げ耐力および曲げ剛性を確認するとともに、セグメント継手の挙動を理論式解析モデルでシミュレートし、その特徴を検証した。その結果、特殊形状セグメントは、イモ継ぎの状態でも、千鳥組みされた従来形セグメント設計値と同等以上の曲げ耐力と曲げ剛性を確保できること、継手の軽構造化が可能なことがわかった。

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

1. はじめに

近年、シールド工事に対して、地下空間有効利用の観点から、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。しかし、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や、継手金物が特殊構造になっているものが多いことから、軽構造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直ボルト鋼板継手のセグメント（以下従来形と呼ぶ）では、継手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、継手の軽構造化を図る試みを行った。当初は「台形セグメント」を対象として小型模型による光弾性試験²⁾³⁾、実物大載荷試験⁴⁾を行ったが、その結果、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た⁵⁾。

そこで、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（ホソ）を設けることで、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容易に伝達できる構造を考案し、軟弱地盤においても軽構造の継手で十分な曲げ耐力と曲げ剛性を有する「ウイングセグメント」を開発した⁶⁾⁷⁾（図-1 参照）。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種類と組立方法は、標準型（対称型）、標準型（非対称型）、連続掘進対応型に分類されるが、それぞれ構造面、施工面で特徴を有しており、施工条件に応じて選定可能である⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾。

筆者らは、すでに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」（3. (2)参照）理論式で説明するとともに、セグメント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解析的に検証した¹⁾。

本論文では、実物大載荷試験によってウイングセグ

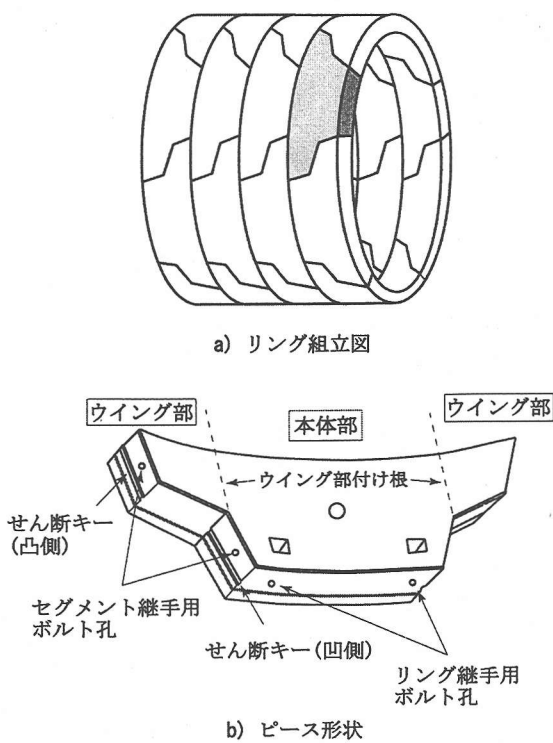


図-1 ウイングセグメント基本構造図

メントの曲げ耐力および曲げ剛性を確認するとともに、実応力レベルにおけるセグメント継手の挙動を添え梁モデルでシミュレートすることで、ウイングセグメントの特徴を検証する。

なお、以下に示すウイングセグメントの形状寸法は、全てリニア方式の地下鉄単線断面（セグメント外径φ5,300mm、幅1,200mm、厚さ250mm、6分割）を対象としたものである。

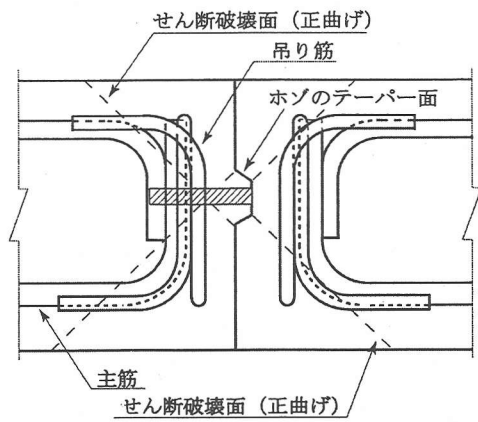
2. ウイングセグメントの概要

(1) 基本構造

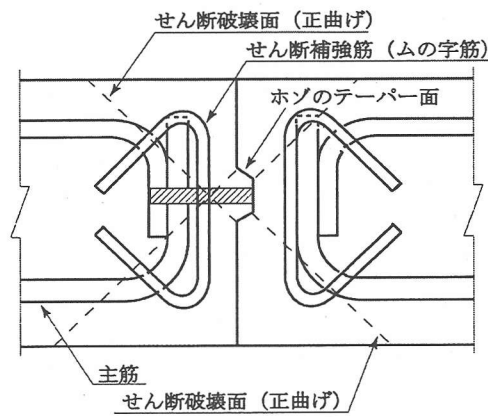
ウイングセグメントの代表例として、標準型ウイングセグメントの対称型¹⁾について、基本構造図を図-1に示す。このセグメントはセグメント継手が円周方向に段違いに配置された、凸字形を基本とした形状である。セグメントは「本体部」と張り出し部である「ウイング部」とで構成されている。セグメント継手面には、せん断キーと称するホゾを設けてあり、せん断抵抗力を有効に伝達できる構造となっている。ウイングセグメントの各構成要素とその働きについて、以下に説明する。

① 本体部

中央の平板状の部分を本体部と称し、セグメント継



a) 吊り筋と主筋の関係



b) せん断補強筋と主筋の関係

図-2 せん断キー（ホゾ形状）

手およびリング継手の箱抜きや、グラウトホールを設置する。また、シールドジャッキ推力は、この位置に作用させることを基本とする。

② ウイング部

本体部から円周方向に張り出した部分をウイング部と称す。後述する「3. セグメント継手の曲げモーメント伝達機構」に示すように、ウイング部には断面力が集中するので、基本的に箱抜き等を設けないものとする。

③ せん断キー（ホゾ）

セグメント継手面に設置したホゾで、凸側をウイング部に、凹側を本体部に設置する。解析では、せん断力を伝達するせん断バネとして評価する。

④ セグメント継手

セグメント間を締結する継手である。ウイングセグメントでは、ホゾのせん断抵抗力と継手間距離で曲げモーメントを伝達できるので、セグメント継手の軽構造化（ボルトおよび継手金物のサイズダウン、ボルト本数の削減等）を図ることができる。

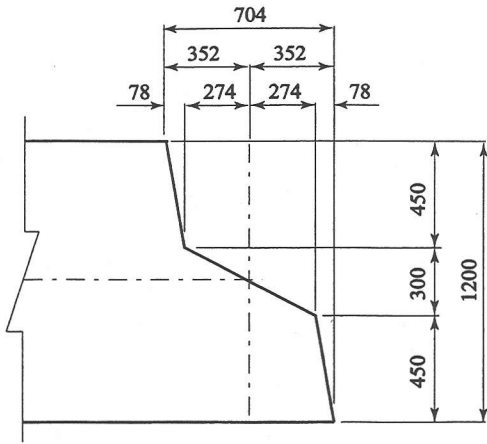


図-3 ウイング形状 (例)

⑤ リング継手

リング間を締結する継手である。ウイングセグメントは、単独リングで従来形の千鳥組セグメントリングと同等以上のリング剛性を確保できるので、リング継手を組立に必要な最低限の仕様とすることができる。

(2) 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

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、図-2 に示すようにそのテーパ面にて接する形状となっている。ホゾの形状および配置については、凹凸各部のせん断抵抗のバランスを考え決定している。

b) ウイング形状

「3. セグメント継手の曲げモーメント伝達機構」で示すように、セグメント継手面よりもウイング部付け根 (図-1 参照) に作用する曲げモーメントが大きくなるため、耐力のバランスを考え、図-3 に示すようなウイング形状を設定する。また、セグメントピースの軸方向挿入を考慮し、セットバック量を減らすために、セグメント継手面にテーパ角度を設けている。

(3) 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とから、従来形に比べて継手の軽構造化が可能である。特に、全土被り圧が作用し地盤バネが期待できない、曲げが卓越する軟弱地盤では、筆者らが開発した、図-4 に示す「プレセット鍛造ボルト式継手」²⁾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定着部を配置することで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。

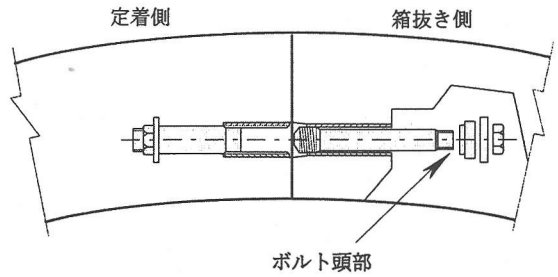
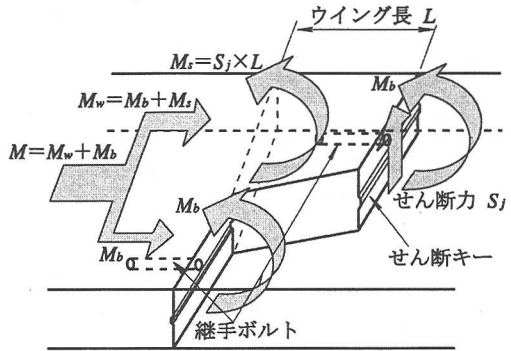


図-4 プレセット鍛造ボルト式継手



注) 図中の記号は式 (1) を参照。

図-5 せん断力による曲げモーメントの伝達

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) により曲げモーメントが伝達されるため、ウイング部付け根を適切に補強することで、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。各部が負担する曲げモーメントは、図-5 より式 (1) のように整理される。

$$\begin{aligned}
 M &= M_b + M_w \\
 &= M_b + M_b + M_s \\
 &= 2M_b + M_s
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

ここに、 M : 継手部全体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 : 各部が負担する曲げモーメント分担率 ($d_b = M_b/M, d_w = M_w/M, d_s = M_s/M$)

表-1 断面諸元比較表

	従来形セグメント	ウイングセグメント
本体部	<p> $A_s' = 8D16 = 15.89 \text{ cm}^2$ $A_s = 8D19 = 22.92 \text{ cm}^2$ </p>	<p> $A_s' = 10D16 = 19.86 \text{ cm}^2$ $A_s = 10D19 = 28.65 \text{ cm}^2$ </p>
継手部	<p> $4M24(12.9)$ </p>	<p> $A_s' = 8D16 = 15.89 \text{ cm}^2$ $A_s = 7D19 + 1D16 = 22.04 \text{ cm}^2$ $M24(10.9)$ </p>

注) ウイングセグメントは、従来形よりセグメント幅を広くしているが、ボルト本数を半分にし、材質も低減している。

(2) 添え梁モデル

ウイングセグメントは、セグメント継手に作用する曲げモーメントを、ホゾのせん断抵抗×ウイング長によって伝達することで、ボルトの負担を軽減するところに特徴がある。ボルトが負担する曲げモーメント分担率は、回転バネが大きくなれば大きくなり、せん断バネが大きくなれば小さくなる。筆者らはすでに、ウイングセグメントのセグメント継手における曲げモーメント伝達機構を、ウイング部を2本の片持ち梁とし、各先端を回転バネとせん断バネで本体部と接続した「添え梁モデル」(図-6)による理論式で説明している¹⁾。

また、セグメント継手要素試験で得られた継手のバネ定数を基準に、添え梁モデルで感度解析を行った結果、ウイング長を60cm確保すれば、従来形セグメントに比べてボルトの負担を約1/4に、継手全体の等価回転剛性を約4倍にすることができるという知見を得ている¹⁾。

しかし、上記はセグメント継手要素試験において、軸力を導入せずに行った継手曲げ試験の回転バネを反映させ、添え梁モデル理論式により導いた結論である。このことから、設計実応力レベルにおけるウイングセグメントの継手の特徴を確認するためには、設計軸力を導入した実物大載荷試験による検証が必要と考えた。

そこで、地下鉄単線断面を対象に、実物大セグメントを用いて設計軸力を導入した載荷試験を行い、ウイングセグメントの曲げ耐力、曲げ剛性、セグメント継手の挙動を確認するとともに、添え梁モデル理論式によるシミュレーションで、その曲げモーメント伝達機構を検証することとした。

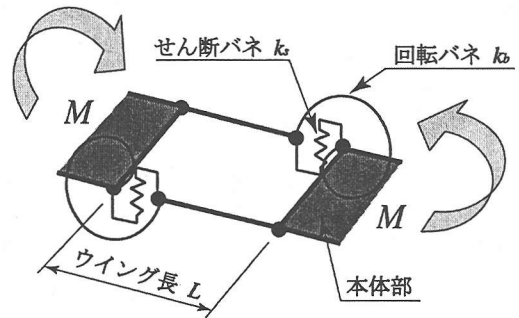


図-6 添え梁モデル

4. 実物大セグメント載荷試験

ウイングセグメントは、イモ継ぎ状態でも、千鳥組みされた従来形リングと同等の曲げ耐力と曲げ剛性を有することを開発目標としている。このことを確認するために、実物大セグメントで性能確認実験¹³⁾¹⁴⁾¹⁵⁾¹⁶⁾を行った。従来形との断面の比較を表-1に、使用材料一覧表を表-2に示す。

ウイングセグメントでは、ホゾのせん断抵抗力とウイング長による曲げモーメントの伝達に期待しているため、従来形よりセグメント幅を広くしているにも拘わらず、ボルト本数を半分にし、材質も低減している。なお、コンクリート1m²当たりの鉄筋量はウイング部付け根の曲げ補強、せん断キー周囲のせん断補強(図-2参照)のため、ウイングセグメントの方が従来形よりも5%多くなっている。

表-2 使用材料一覧

材 料	強度特性/単位: kgf/cm ² (N/mm ²)	
コンクリート	設計基準強度	$\sigma_{ck} = 480$ (47.0)
	許容圧縮応力度	$\sigma_{ca} = 170$ (16.7)
	許容せん断応力度	$\tau_{ca} = 5.5$ (0.54)
鉄筋 (SD345)	降伏点応力度	$\sigma_{sy} = 3,500$ (343)
	許容圧縮応力度	$\sigma'_{sa} = 2,000$ (196)
	許容引張応力度	$\sigma_{sa} = 2,000$ (196)
ボルト (109)	降伏点応力度	$\sigma_{sy} = 9,000$ (882)
	許容引張応力度	$\sigma_{sa} = 3,000$ (294)

表-3 単体曲げ試験結果

		設計値	実験値
曲げモーメント (kNm/m)	許容値	76.0	—
	終局値	155	194
安全率		2.04	2.55

(1) 試験項目とその目的

a) 単体曲げ試験

本試験の目的は、ウイングセグメント本体部が、終局状態に対して所要の安全率を満足していることを確認することとした。なお、単体曲げ試験は、従来形と同様に軸力を導入しないで行った。

b) 継手曲げ試験

本試験の目的は、継手面に設けられたホゾとウイング長による曲げモーメントの伝達機構の確認と、継手の曲げ耐力および曲げ剛性を確認することとした。ウイングセグメントは継手の回転バネ定数とせん断バネ定数の組み合わせで曲げモーメントを伝達するが、後述のように回転バネ定数は軸力によって大きく影響を受けることから、ウイングセグメントの継手の特性を確認するためには、設計軸力および曲げモーメントを同時に導入できるリング載荷試験が最適である。しかし、リング載荷試験は大がかりで不経済であるため、実応力レベルでの継手の挙動を確認するための簡易な試験方法として、軸力を導入した継手曲げ試験を実施した。

c) リング載荷試験

本試験の目的は、イモ継ぎ状態のウイングセグメントリングが、設計軸力が作用している実応力レベルで有する強度、変形特性を確認することとした。

(2) 単体曲げ試験

a) 試験方法

試験概要を図-7 に示す。試験方法は、支承スパン 1.60m、載荷スパン 0.30m の 2 点集中載荷で両支点は可動とし、載荷ピッチはクラック発生までを 98kN ピッチ、その後を 196kN ピッチとした。なお、載荷は設計許容荷重まで載荷した後一旦除荷し、再び破壊まで載荷する

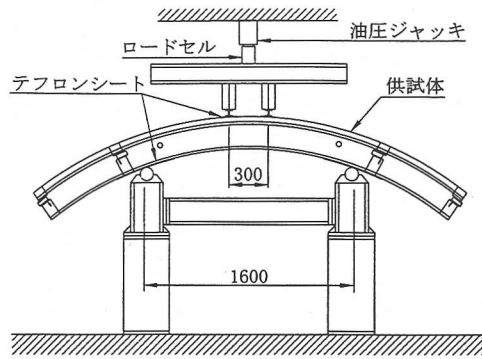


図-7 単体曲げ試験概要図

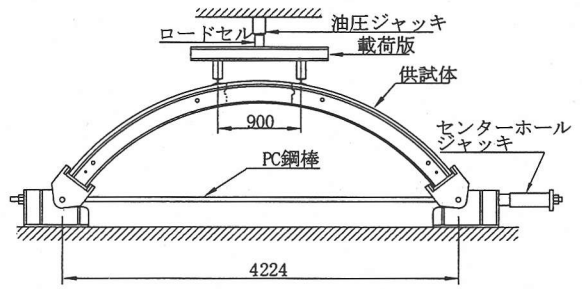


図-8 継手曲げ試験 Part-3 概要図

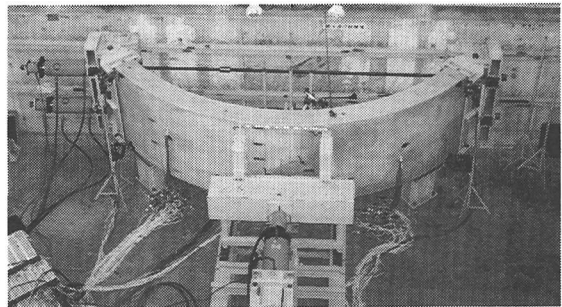


写真-1 継手曲げ試験 Part-3 載荷状況

繰り返し載荷とした。

b) 試験結果

試験結果を表-3 に示す。設計許容値に対する終局値の安全率において、試験値が計算値を大きく上回っている。このことから、ウイングセグメント本体部は十分な曲げ耐力を有していることが確認された。

(3) 継手曲げ試験

a) 試験方法

試験方法の概要を図-8 に、試験状況を写真-1 に示す。試験は 2 体の供試体を所定の初期締結力（許容応力度の 80%）でボルト接合し、支承スパン 4.22m、載荷スパン 0.90m の 2 点集中載荷とした。許容荷重までは曲げモーメントと軸力の比が一定となるように、許容荷重を超えてからは軸力を一定にして、曲げモーメントを

表-4 継手曲げ試験ケース一覧

	载荷開始～設計許容荷重	設計許容荷重～破壊
Part-1	M, N 未調整 ($N=0\text{kN/m}$)	N を未調整
Part-2	M, N 調整 ($N=368\text{kN/m}$)	N を未調整
Part-3	同上	N を一定に調整

表-5 継手曲げ Part-3 試験結果

		設計値	実験値
曲げモーメント (kNm/m)	許容値	90.7 (103)	—
	終局値	178 (186)	180
安全率		1.96 (1.81)	1.99 (1.75)

- 注1) 設計値の実数字は、従来形セグメントの本体部と継手部の抵抗曲げモーメントの平均値を、()内はウイングセグメントの継手面とウイング部付け根の抵抗曲げモーメントの合計値を示す。
- 2) 軸力は、許容荷重を越えてから、設計軸力の 368kN/m で一定とした。

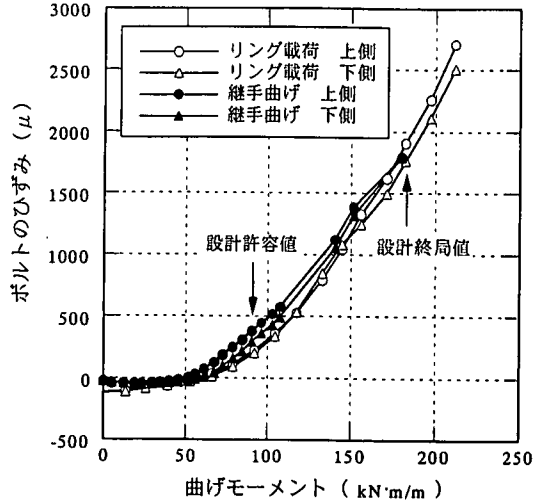
増加させるように载荷した。実施工では裏込め注入圧による軸力が先行した後、設計土水圧が作用する過程で次第に曲げモーメントが増加し、設計断面力に移行すると思われるが、設計軸力以下で曲げモーメントが作用する可能性は十分にある。そこで、ここでは安全側に曲げモーメントと軸力が設計許容荷重までは一定に増加し、設計許容荷重を越えてからは曲げ卓越型、すなわち軸力一定で曲げモーメントが増加する载荷パターンを設定した。なお、支承同士を $\phi 36\text{mm}$ のPC鋼棒でつないで、センターホールジャッキにて緊張することにより軸力を導入した。载荷荷重ケースは、後述のリング载荷試験 Case-5 に合わせた(表-6 参照)。継手曲げ試験は開発の段階に応じて表-4 の3ケースを行ったが¹⁰⁾、本稿ではリング载荷試験に代わる試験方法として、設計許容荷重以降の载荷過程で軸力を一定に調整した Part-3 の結果のみを報告する。

b) 試験結果

1) 強度特性

表-5 に試験結果を示す。設計値は、実数字が千鳥組みされた従来形セグメントの継手部を、()内がウイングセグメントの継手部を示している。継手曲げ試験で、両設計値と同等の継手耐力が得られたこと、破壊形態が継手面コンクリートの圧壊でホゾ周囲は健全であったことから、以下の知見が得られた。

- ① ウイングセグメントは軸力が導入された実応力レベルで、千鳥組みされた従来形セグメント継手部の設計値と同等の継手耐力を有している。
- ② ウイングセグメント継手面とウイング部付け根の曲げ耐力を単純合計した設計値と同等の継手の曲げ耐力が得られたこと、破壊時にホゾ周囲が健



注) ボルトのひずみは、初期締結力導入後の増分値を示している。

図-9 継手曲げ試験 Part-3 とリング载荷試験 Part-2 の比較

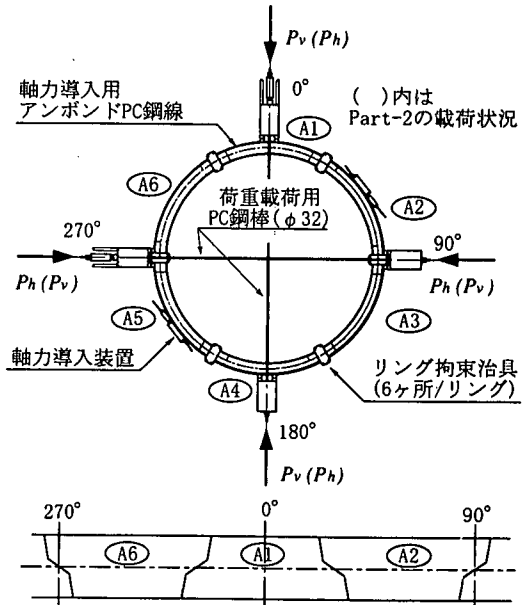


図-10 リング载荷試験概要図

全だったことから、ホゾのせん断抵抗(S)×ウイング長(L)による曲げモーメント伝達効果が十分に発揮されることがわかった。

2) リング载荷試験との比較

軸力を導入した継手曲げ試験 Part-3 と、リング载荷試験 Part-2 のセグメント間ボルトのひずみの変化を図-9 に示す。リング载荷試験では継手曲げ試験と異なり軸力を先行して導入しているが、軸力が等しくなった設計許容値以降は同様の傾向を示している。このことから、実応力レベルの継手の挙動を、軸力を制御した継手曲げ試験で表現できると言うことができ、本試験方法の

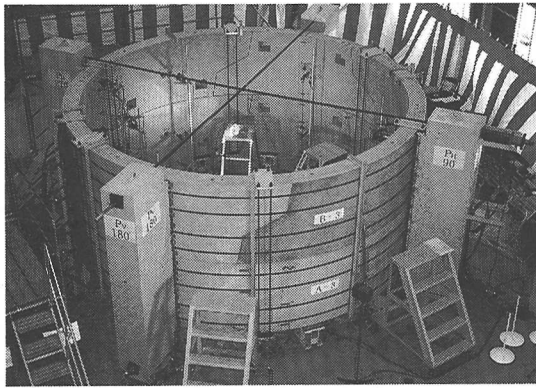


写真-2 リング載荷試験 Part-3 載荷状況

表-6 リング載荷試験 荷重ケース一覧

Case	軸力	$P_v : P_h$	最大載荷荷重
Case-1	490kN/m	1.0 : 0.9	設計許容荷重
Case-2	"	1.0 : 0.7	"
Case-3	368kN/m	1.0 : 0.9	"
Case-4	"	1.0 : 0.7	"
Case-5	"	1.0 : 0.0	終局荷重

妥当性が確認された。

(4) リング載荷試験

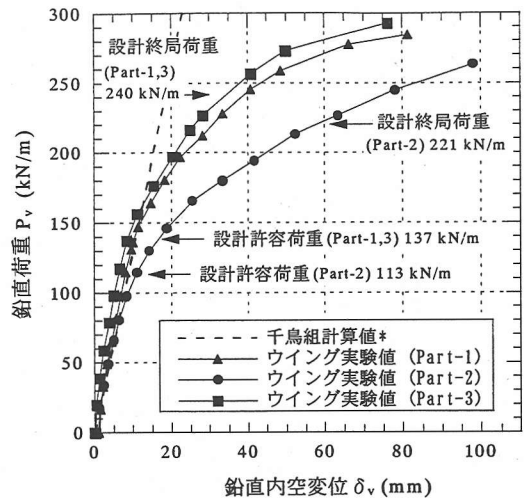
a) 試験方法

試験方法の概要を図-10に、試験状況を写真-2に示す。リング外周に巻き付けたアンボンドP C鋼線を緊張することで軸力を導入し、セグメントに鉛直方向と水平方向の集中荷重を載荷することで曲げモーメントを作用させた。Part-1, 3は正曲げ最大位置がセグメントピース本体部に、負曲げ最大位置がセグメントピース継手部に作用するように、Part-2はPart-1, 3と逆に配置した。また、Part-1, 2は単独リング、Part-3は2リングイモ継ぎの状態で行った。

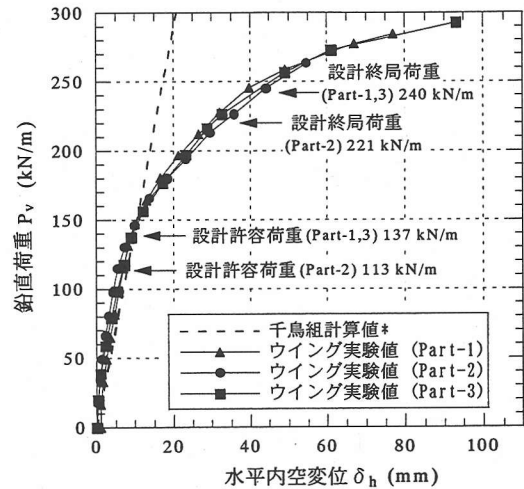
軸力と載荷パターンを表-6に示す。Case-1からCase-4においては設計許容荷重まで載荷し、Case-5においては設計許容荷重まで載荷した後、最終耐力まで載荷した。

b) 試験結果

代表値として、終局曲げ耐力を確認したCase-5に着目し、載荷荷重と内空変位の関係および曲げモーメントの分布図を図-11~12に示す。ウイングセグメントは、従来形に比べボルトの仕様を下げていても拘わらず、単独リングおよび2リングイモ継ぎの状態でも、設計許容荷重レベルにおいて、梁-バネモデルによる従来形千鳥組みリングの計算値と同等以上のリング剛性を有している。このことは、ホゾとウイング長による曲げモーメントの伝達が有効に働き、曲げ剛性が向上し



a) 鉛直内空変位



b) 水平内空変位

*: 千鳥組みされた従来形セグメントリングのはり-バネモデル計算値を示す。

図-11 リング載荷試験内空変位

たことを示している。

また、図-12より、鉄筋のひずみ計測値から算出したセグメント本体部の曲げモーメントが、剛性一様リング計算値と同等の分布を示していることから、ウイングセグメントの断面力は剛性一様リングとして算出できることが確認された。

表-7に最終耐力を整理した結果を示す。破壊形態は、各荷重ケースとも、設計通り正曲げ最大位置における曲げ破壊であったが、Part-1では設計終局耐力を越えてから負曲げ最大位置で継手部ホゾの雌側にクラックが進展したため、Part-3ではホゾの補強鉄筋を増やした。試験終了時の安全率は、従来形千鳥組みリングを対象とした安全率の計算値を上回り、単独リングおよびイ

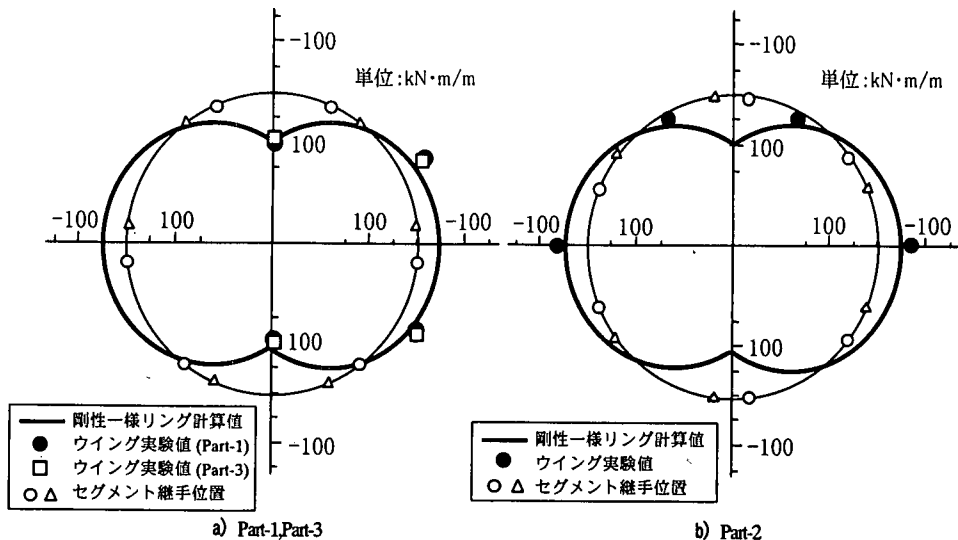


図-12 リング載荷試験 曲げモーメント分布図

モ継ぎの状態でも十分な曲げ耐力を有していることが確認された。このうち Part-3 では、ホゾの補強鉄筋を増やしたため、同一条件で本体部に鉛直荷重を載荷した Part-1 に比べ最終曲げ耐力が向上した。

5. 添え梁モデルによる諸定数の設定

(1) ウイング部の曲げ剛性

ウイング部 RC 断面の曲げ剛性は、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

$$(=3.8 \times 10^7 \text{ kN/m}^2)$$

I ：添え梁の断面 2 次モーメント ($=bh^3/12$)

b ：添え梁の幅 ($=0.60\text{m}$)

h ：添え梁の桁高 ($=0.25\text{m}$)

(2) せん断バネ定数の設定

ウイングセグメントの主材料であるコンクリートは、圧縮変形に対しては高い剛性を示すが、曲げ引張～せん断変形に対しては、クラックの伸展に伴い剛性が低下する。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

表-7 リング載荷試験結果一覧表

		Part-1	Part-2	Part-3
正曲げ最大位置		本体	継手	本体
設計値	P_d (kN/m)	137	113	137
	M_d (kNm/m)	110	90.7 (103)	110
	M_u (kNm/m)	193	178 (186)	193
	安全率 F_s	1.75	1.97 (1.81)	1.75
実験値	M_u (kNm/m)	209	212	243
	安全率 F_s	1.90	2.34 (2.06)	2.21

注 1) P_d ：設計許容荷重、 M_d ：設計許容曲げモーメント、 M_u ：設計終局曲げモーメント、 M_u ：終局曲げモーメント
 2) 継手部設計値の実数字は、従来形セグメント本体部と継手部の抵抗曲げモーメントの平均値、() 内はウイングセグメントの継手面とウイング部付け根の抵抗曲げモーメントの合計値を示す。

も最低限確保できるせん断バネ定数として、せん断補強筋の伸び量から算出した k_2 を採用することとした。せん断キーせん断試験によると、この k_2 は設計終局荷重までの平均的な値であることが確認されている。なお、以下に示すせん断バネ定数計算値 k_2 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 k_2 、継手面両面のせん断変形を考慮して k_2 の 1/2 となる。

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 (D13×4本)、筆者らが「ムの子筋」と呼んでいるせん断補強筋 (D10×3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-2 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、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。

$$k_{s1} = \frac{G_c A_c}{h} = \frac{E_c b}{2 \times (1 + \nu_c)}$$

$$= \frac{3.8 \times 10^7 \times 0.45}{2 \times (1 + 0.2)}$$

$$= 7.1 \times 10^6 \quad (\text{kN/m})$$

$$k_{s2} = \frac{S_j}{\delta_s} = \frac{S_j}{12 \phi S_j / (A_s j E_s)} = \frac{A_s j E_s}{12 \phi}$$

$$= \frac{2.14 \times 10^{-4} \times 7 / 8 \times 2.1 \times 10^8}{12 \times 1.0 \times 10^{-2}}$$

$$= 3.3 \times 10^5 \quad (\text{kN/m}) < k_{s1}$$

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

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

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

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

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×桁高= $bh=0.45\text{m} \times 0.25\text{m}$)

ν_c ：コンクリートのポアソン比 (=0.2)

S_j ：継手面に作用するせん断力

δ_s ：せん断補強筋の伸び量

$$\delta_s = \sigma_s \times 12 \phi / E_s$$

$$= S_j / (A_s j) \times 12 \phi / E_s$$

$$= 12 \phi S_j / (A_s j E_s)$$

σ_s ：せん断補強筋の引張応力度

$$\sigma_s = S_j d / (A_s j d)$$

$$= S_j / (A_s j)$$

12ϕ ：せん断補強筋の定着長

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

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

E_s ：鋼材のヤング係数 (= $2.1 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$)

jd ：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 ($j=7/8$, d は有効高さ)

(3) 軸力を考慮したボルトの回転バネ定数

「ホソ付きセグメント」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 、ウイング部の断面曲げ剛性、ウイング長の組み合わせで、継手部全体の曲げ耐力、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、ボルトに引張応力度が作用しない状態では、本稿でも軸力を考慮したレオンハルトの式を引用して、ボルトの回転バネ定数を式 (2) ~ (3) にて設定したり、また、ボルトに引張応力度が作用する状態では、鉄道総合研究所が提案している軸力を考慮したバネ値計算式¹⁹⁾を引用して、ボルトの回転バネ定数を式 (4) にて設定した。なお、ボルトの自由長は、プレセット鍛造ボルトの形状から考えて、箱抜き側は通しボルトタイプに準じて、定着側は定着部の中心まで伸びるものと仮定して設定した。回転バネ定数計算結果は、「6. 添え梁モデルによる試験結果のシミュレーション」に併記する。

a) ボルトに引張応力度が作用しない状態：

$$m \leq (3a - 2d) / 6a$$

① $m \leq 0.167$

$$k_b = \frac{9a^2 b E_c}{8} m_0 (1 - 2m_0)^2 \quad (2)$$

ここに、 m ：荷重偏心率 (= M / Na)

a ：セグメント継手接触面桁高

d ：ボルトの有効高さ

h ：セグメント桁高

b ：セグメント継手接触面幅

E_c ：コンクリートのヤング係数

m_0 ：継手面全面圧縮荷重偏心率上限値
(=0.167)

② $0.167 < m \leq (3a - 2d) / 6a$

$$k_b = \frac{9a^2 b E_c}{8} m (1 - 2m)^2 \quad (3)$$

b) ボルトに引張応力度が作用する状態：

$$m > (3a - 2d) / 6a$$

$$k_b = \frac{M_b}{\theta} \quad (4)$$

ここに、 M_b ：継手面に作用する曲げモーメント

θ ：継手面の回転角

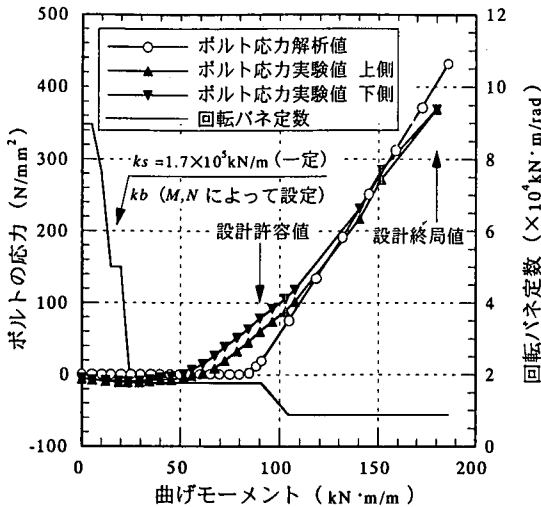
$$\theta = \frac{N_b}{\frac{bx E_c}{4} - (d - x) k_j}$$

N_b ：継手面に作用する軸力

x ：圧縮外縁から中立軸までの距離

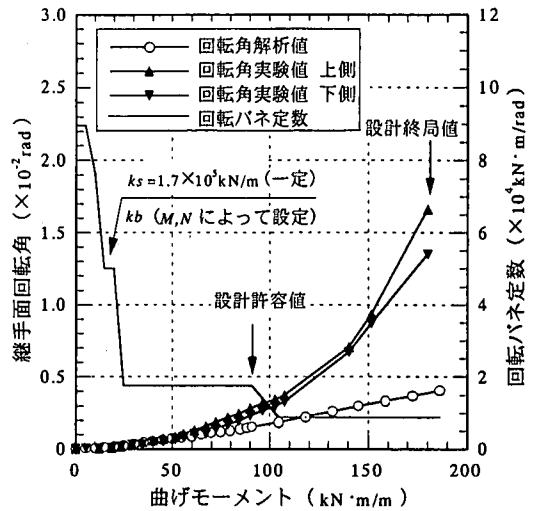
k_j ：継手の引張バネ定数

$$k_j = \frac{E_s A_b}{l_b}$$



注) ボルトの応力は実験値, 解析値ともに初期締結応力からの増分値を示している。

a) ボルトの応力



b) 継手面回転角

図-13 継手曲げ試験 Part-3 のシミュレーション結果

- E_s : ボルトのヤング係数
- A_b : ボルト喉部の断面積
- l_b : ボルトの自由長

6. 添え梁モデルによる試験結果のシミュレーション

(1) ボルトの初期締結力の評価

添え梁モデルの解析では、初期締結力の効果を以下のように評価している。

a) 初期応力状態

初期締結力 N_0 によって、継手面にはコンクリート圧縮応力が、ボルトには初期締結引張応力がプレストレスとして残留する。継手面コンクリートの応力分布は、ボルト位置に初期締結力を圧縮力として作用させた状態で、コンクリート面のみ有効として算出する。

b) 戦荷後の応力状態

作用曲げモーメント M 、軸力 N によって、継手面には以下のような応力が発生する。

① $N \leq N_0$ の範囲

N_0 によるプレストレスの効果で N の影響は表に出ない。 M 、 N の内、 N は無視して、 N_0 と M による応力分布をボルトを鉄筋とした全断面有効な RC 断面として算出し、a) の初期応力分布に加算する。加算した応力が引張になれば目開きすることになる。

② $N > N_0$ の範囲

N が N_0 を超えてから、 N の影響が継手面に発生する。 N と M を合成させて、継手面での応力分布を算出する。

目開き前は全断面有効な RC 断面、目開き以降は引張領域を無視した RC 断面で計算する。

(2) 継手曲げ試験

継手曲げ試験 Part-3 の試験結果に、添え梁モデル解析値を併記し、図-13~14 に示す。なお、荷重ケースはいずれも最終耐力を確認した Case-5 である。

a) 応力、変形特性

図-13a) より、設計許容値レベルで、ボルトの応力は実験値と解析値で大きく差があるように見えるが、これはボルトの応力が実験値、解析値ともに初期締結応力（許容値の 80% = 235 N/mm²）からの増分値で示しているためである。初期締結応力を含めると解析値は実験値の 84% になっており、解析値で実験値を比較的良く表現できたと言える。以上より、ボルトの応力、継手の回転角いずれも、設計許容値までは解析値が実験値をよく表現しており、ウイングセグメントの継手曲げ試験は添え梁モデル理論式で十分に説明できたと考える。継手の回転角は設計許容値を超えてから、実験値の方が大きくなっているが、これは解析値では中立軸の移動に伴うコンクリートの圧縮塑性変形を考慮していないためと考えられる。

b) 曲げモーメント分担率

継手部およびウイング部に作用する軸力が導入軸力の半分として、継手面のボルトについてはボルトおよび背面側コンクリートのひずみ計測値を基に、ウイング付け根 RC 断面については内・外の鉄筋のひずみ計測値を基に、作用曲げモーメントを算出した。その結果、図-14 に示すボルトの曲げモーメント分担率が得られた。

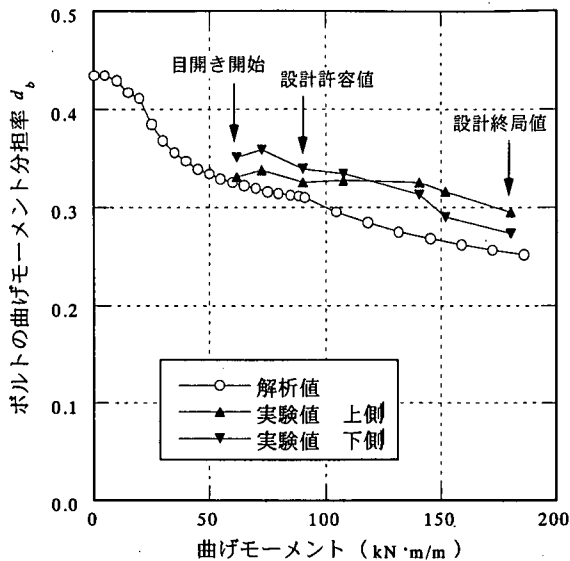


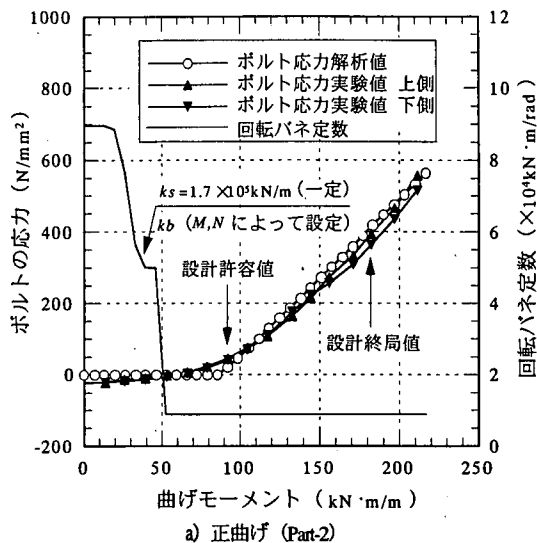
図-14 継手曲げ試験 Part3 ボルトの曲げモーメント分担率

継手面およびウイング部への作用軸力を導入軸力の半分としたのは、ウイングが左右対称のためである。実験値については、荷重初期段階では初期締結力の影響でボルトのひずみが微小であったため、継手が目開きした後の結果をプロットしている。これより、ボルトの曲げモーメント分担率は荷重に伴い減少しており、解析値と同様の傾向を示している。また、終局状態においては3割を下回っており、ホゾが有効に作用していることが分かると同時に、継手の軽構造化の可能性が示されたと言える。

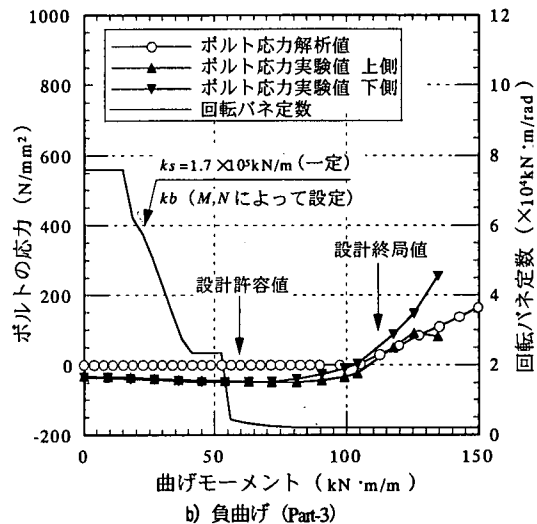
なお、ボルトの曲げモーメント分担率が、荷重初期段階と設計許容値以降とで大きく傾向が異なるが、その理由は以下の通りである。

- ① ボルトの初期締結力および軸力の影響で、荷重初期段階では継手面の回転バネ定数が大きいため、ボルトの曲げモーメント分担率が高い。
- ② 許容荷重を超えると継手面が目開きし始めて、継手面の回転バネ定数が低下することから、相対的にホゾの効果が発揮されて、ボルトの分担率が低下する。

以上より、せん断剛性によって曲げモーメントを伝達するというウイングセグメントの特徴は、ボルトの初期締結力による目開き抑制領域を過ぎてから、すなわち、設計許容値を超えた終局状態で顕著に発揮されることが分かった。これは、ボルト継手の場合、その初期締結力によって回転バネ定数が増えるためであり、ボルトに初期締結力を導入しなければ、ウイングセグメントの特徴は荷重初期の段階から発揮される。しかし、本研究では、折角ボルトを使用するのであれば、その効果を十分に発揮させるべきと考え、ボルトに初



a) 正曲げ (Part-2)



b) 負曲げ (Part-3)

注) ボルトの応力は実験値、解析値ともに初期締結力からの増分値を示している。

図-15 リング載荷試験 ボルトの応力

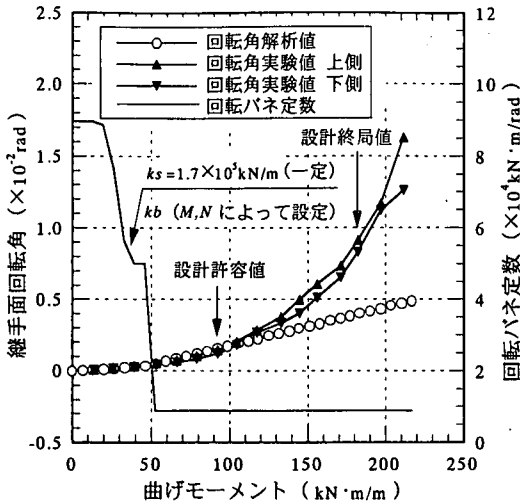
期締結力を導入した状態で試験を行い、終局までの全体系でウイングセグメントの特徴が検証できれば良いと考えた。

(3) リング載荷試験

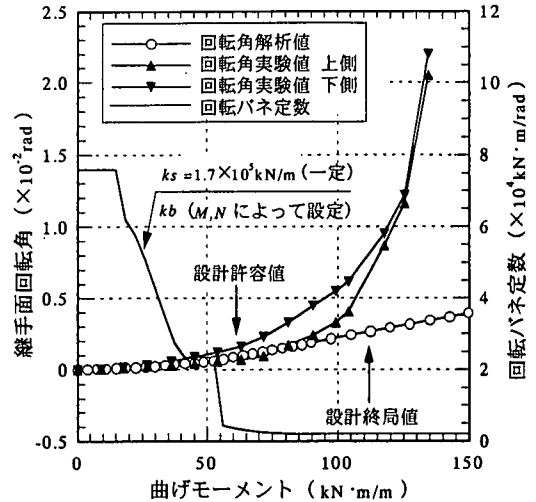
リング載荷試験 Part-2, 3 の試験結果に、添え梁モデル解析値を併記し、図-15~16 に示す。なお、荷重ケースはいずれも最終耐力を確認した Case-5 である。

a) 応力、変形特性

ボルトの応力、継手の回転角いずれも設計許容値までは解析値が実験値をよく表現しており、ウイングセグメントのリング載荷試験は添え梁モデル理論式で十分に説明できた。継手の回転角は設計許容値を超えて



a) 正曲げ (Part-2)



b) 負曲げ (Part-3)

図-16 リング載荷試験 継手面回転角

から、実験値の方が大きくなっているが、これは継手曲げ試験と同様に、解析値では中立軸の移動に伴うコンクリートの圧縮塑性変形を考慮していないためと考えられる。

b) 曲げモーメント分担率

継手曲げ試験と同様に、各計測値を基にボルトおよびウイング付け根 RC 断面に作用している曲げモーメントを算出した。

代表値としてリング載荷試験 Part-2 の試験結果に、添え梁モデル解析値を併記し、図-17 に示す。解析値は実験値と傾向が一致しており、ウイングセグメントのリング載荷試験は添え梁モデル理論式で十分に説明できることが確認された。

また、継手曲げ試験同様、ボルトの曲げモーメント分担率が終局状態においては3割を下回っており、ウイングセグメントの特徴が発揮されていることが分かった。

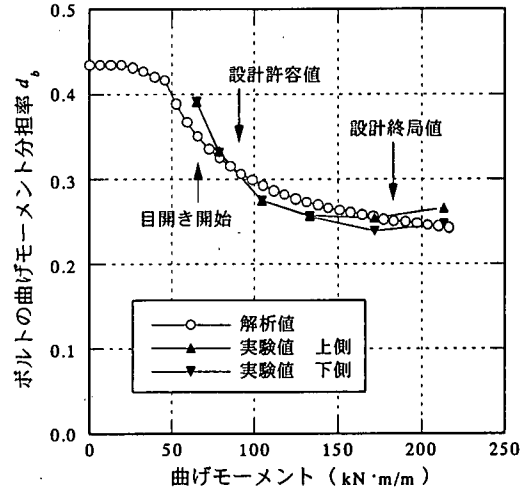


図-17 リング載荷試験 Part-2 (正曲げ) ボルトの曲げモーメント分担率

7. 結論

地下鉄単線断面を対象とする一連の実物大セグメント載荷試験結果、および添え梁モデルによるシミュレーションで得られた知見を以下に示す。

- ① 継手曲げ試験およびリング載荷試験の結果、実応力レベルにおいて、継手面せん断剛性とウイング長で曲げモーメントが伝達できるウイングセグメントの特徴が実証された。
- ② 軸力を導入した継手曲げ試験の結果、実応力レベルにおけるセグメント継手の挙動は、同試験で

表現可能であり、リング載荷試験の代用として十分であることが実証された。

- ③ リング載荷試験の結果、ウイングセグメントはリング剛性が高く、剛性一様リングと同等の断面力分布を示したことから、添え梁モデル計算値で各試験結果を十分シミュレートできたことから、剛性一様リングとした慣用計算法で断面力を算出し、添え梁モデルでその断面力を分配する簡易な設計法で設計可能と判断できた。
- ④ 以上の結果、ウイングセグメントはイモ継ぎの状態でも、継手面せん断剛性とウイング長による曲げモーメント伝達効果で、千鳥組みされた従来

形セグメントリングの設計値と同等以上のリング剛性、リング耐力を確保できること、さらには、従来形よりも継手の軽構造化が可能であることが示された。

8. 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実物大セグメント載荷試験では、単独リングおよび2リングイモ継ぎの状態でも、従来形よりも軽構造の継手で、千鳥組された従来形セグメントリング設計値と同等以上のリング剛性とリング耐力を確保できることが確認できた。今後、実施工に向けて施工面の充実を図っていく予定である。

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、町田 能章氏、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) 三戸憲二, 今田徹, 山崎良一, 野本寿, 山崎宏: 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, 土木学会論文集, No. 595/VI-39, pp. 77~89, 1998年6月.
- 2) 今田徹, 山崎良一, 野本寿: 台形セグメント継手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.
- 3) 今田徹, 山崎良一, 野本寿, 三戸憲二: 台形セグメント継手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.
- 4) 今田徹, 山崎良一, 野本寿, 三戸憲二: 矩形セグメント継手の応力性状に関する光弾性実験的研究, 土木学会論文集 No. 588/VI-38, pp. 51~60, 1998年3月.
- 5) 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.
- 6) 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.

- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) Konda, T., Nomoto, T., Mito, K. and Yamazaki, H.: Development of Wing Segments, Proceedings of The World Tunnel Congress '98 on Tunnels and Metropolises, pp. 715~720, 1998.
- 12) 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.
- 13) 山崎宏, 今田徹, 山崎良一, 三戸憲二: 凸形セグメント実物大載荷試験(その1)-継手曲げ試験-, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集III-B127, pp. 254~255, 1996年9月.
- 14) 三戸憲二, 今田徹, 山崎良一, 山崎宏: 凸形セグメント実物大載荷試験(その2)-リング載荷試験-, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集III-B128, pp. 256~257, 1996年9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)-せん断キーせん断試験-, 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集III-B121, pp. 242~243, 1997年9月.
- 16) 三戸憲二, 今田徹, 山崎良一, 山崎宏: ウイング(凸形)セグメント実物大載荷試験(その4)-軸力導入継手曲げ試験-, 土木学会第52回年次学術講演会講演概要集III-B122, pp. 244~245, 1997年9月.
- 17) Konda, T., Nomoto, T., Mito, K. and Yamazaki, H.: Development of Wing Segments, Proceedings of IABSE Colloquium Stockholm 1998, Tunnel Structures, pp. 163~168, 1998.
- 18) 財団法人 鉄道総合技術研究所, 参考資料 No. 16 セグメントの継手バネ定数と継手部材応力度の算定, 「鉄道構造物等設計標準・同解説-シールドトンネル」, pp. 157~160, 1997年8月.

(1999. 6. 3 受付)

EXPERIMENTAL EVALUATION OF THE SEGMENTS TRANSPORTING BENDING MOMENT WITH THE EFFECTIVE SHAPE

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

The authors devised "Wing Segments" which can reduce the cost of segmental lining by simplifying the joint structure. In this paper, full-scale loading tests were conducted to confirm the strength and rigidity of the wing segment joint and ring, and behavior of the joint was simulated by the theory model. As the results, it was confirmed that segmental rings assembled in a straight joint pattern had much the same strength and rigidity as the rings composed of ordinary segments assembled in a staggered joint pattern. Comparing with the ordinary segments, "Wing Segments" could have larger width and make the joint structure more simple. And the theory model was suitable because analytical simulations were shown the same inclination to experimental results.

2