

ウイング（凸形）セグメントの実物大実験

Full-scale Tests of Wing Segment

山崎 宏*
Hiroshi Yamazaki

三戸 憲二**
Kenji Mito

坪井 広美*
Hiromi Tsuboi

野本 寿***
Toshi Nomoto

要 約

ウイングセグメントは、ピース形状が凸字形を基本とするセグメントで、セグメント継手面には、せん断キー（ほぞ）を設置してある。このため、この継手面に発生するせん断抵抗力とウイング長（張り出し部の長さ）との積により曲げモーメントを伝達できる特徴があり、継手構造の軽構造化を可能にしている。

開発では、実物大セグメント（外径 ϕ 5,300mm、幅1,200mm、桁高250mm）を用いて、継手曲げ試験およびリング載荷試験を行った。その結果、ボルトが負担する曲げモーメントが従来形の矩形セグメントに比べ大幅に低減されること、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のリング剛性およびリング耐力を有すること等が確認された。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. ウイングセグメントの概要
- § 3. 継手曲げ試験
- § 4. リング載荷試験
- § 5. おわりに

§ 1. はじめに

ウイングセグメントは、図-1および図-2に示すように、セグメント継手を円周方向に段違いにして幅を持

たせ、継手面のせん断抵抗力で曲げモーメントを伝達できる構造としている。このため、曲げモーメントが卓越する設計条件下でも軽構造の継手で、十分なリング剛性とリング耐力を有することを可能にしている。

開発に当たっては、単独リング組みの状態で千鳥組みされた従来形の矩形セグメント（以下従来形セグメント）リングと同等以上のリング剛性、リング耐力を確保することを目標とした。そのため、開発したセグメントの性能を確認する、地下鉄単線断面を対象にした実物大セグメント（外径 ϕ 5,300mm、幅1,200mm、桁高250mm）を用いて、継手曲げ試験およびリング載荷試験を行った^{1)~3)}。本報文では、ウイングセグメントの概要と実物大載荷試験の結果について報告する。

* 技術研究所土木技術課

** 土木設計部設計課

*** 技術研究所技術部

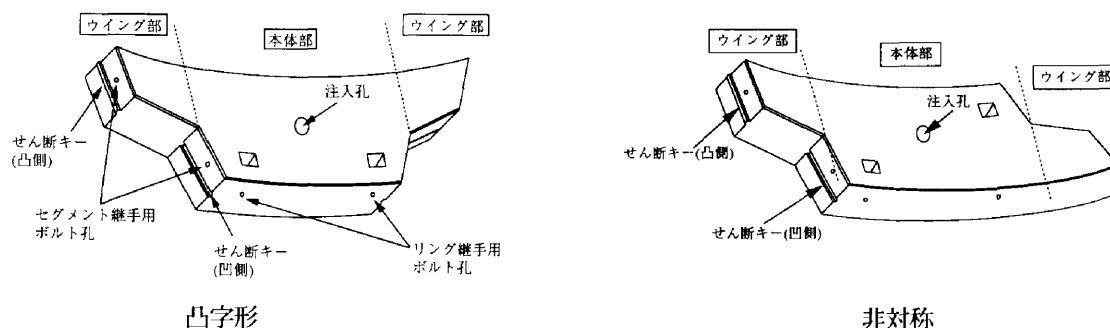


図-1 セグメント基本構造図

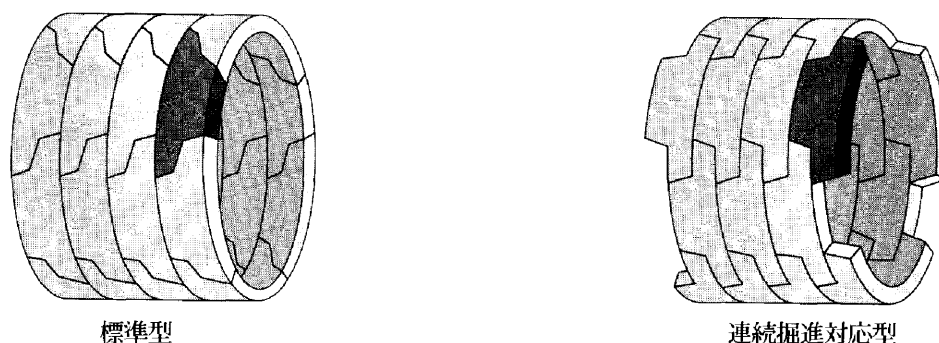


図-2 セグメントリング概念図

§ 2. ウイングセグメントの概要

2-1 形状

ウイングセグメントは図-1に示すように凸字形と非対称形がある。ウイング部を平行にずらした非対称形セグメントは、従来形セグメントと同様にリング下部からの組み立てを可能にしている。それぞれのセグメントは「本体部」と「ウイング部」とで構成され、セグメント継手面にはせん断キーと称するほぞを設けている。このせん断キー部に発生するせん断抵抗力和ウイング長の積により、曲げモーメントを伝達できる構造となっている。

また、リングの構成は図-2に示すように「標準型」と「連続掘進対応型」とがある。標準型は、従来形と同様に、リング端面が同一面のリングを構成する。連続掘進対応型は、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ずつ段違いになるようにしたもので、連続掘進が可能である⁴⁾。

2-2 セグメント継手の曲げモーメント伝達機構

ウイングセグメントの継手の曲げモーメント伝達機構を図-3に示す。継手に作用する曲げモーメント (M) は、ボルトが負担する曲げモーメント (M_b) とウイング部付け根が負担する曲げモーメント (M_w) に分配される。

M_w はせん断キーが負担する曲げモーメント ($M_s = S_j \times L$) と、 M_b との和であり、 M は次式で表すことができる。

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

ここに、 M : 継手に作用する曲げモーメント

M_b : ボルトが負担する曲げモーメント ($= d_b \cdot M$)

M_w : ウイング部付け根が負担する曲げモーメント ($= d_w \cdot M$)

M_s : せん断キーが負担する曲げモーメント ($= S_j \times L = d_s \cdot M$)

S_j : せん断キーが負担するせん断力

L : ウイング長

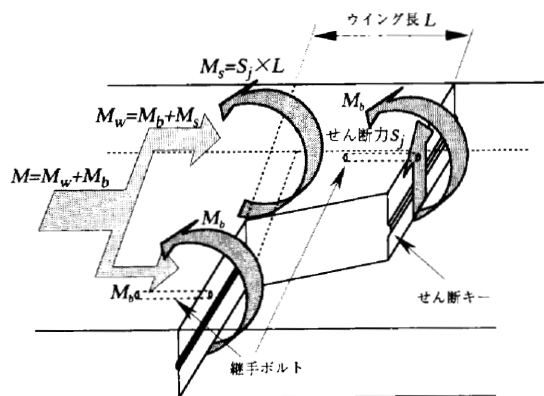
d_b, d_w, d_s : 各部が負担する曲げモーメント分担率

したがって、曲げモーメント M に対し、 M_s と M_b との総和で抵抗するので、 M_s を大きく取ることにより M_b を小さくでき、ボルト等の継手構造の軽構造化が図れる。

2-3 添え梁モデル

継手の曲げモーメント伝達機構の理論的な解析は、図-4に示すようにウイング部を片持ち梁として、それが互に向き合った状態で回転バネとせん断バネで接合されている「添え梁モデル」にモデル化して行った。

(1) 曲げモーメント分担率



$$M = M_w + M_b$$

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

図-3 曲げモーメント伝達機構

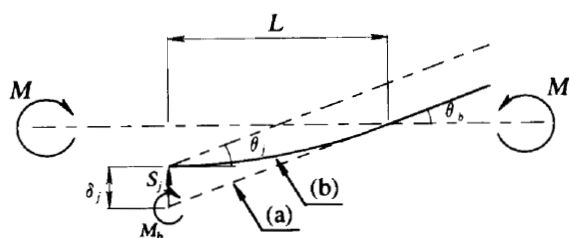


図-5 添え梁モデルの変形（側面）

ウイング部の固定端に曲げモーメントが作用すると、ウイング部は図-5に示す(a)のように変形しようとするが、継手部が回転バネ(k_b)とせん断バネ(k_s)とで拘束されているため、実線(b)のように変形する。 S_j 、 M_b が作用したことによる変位 δ_j 、 θ_j は、カステリアーノの第2定理を基に下式で表される。

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

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

$$= \frac{L^3}{3EI} \cdot S_j + \frac{L^2}{2EI} \cdot M_b \quad (2)$$

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

$$= \frac{L^2}{2EI} \cdot S_j + \frac{L}{EI} \cdot M_b \quad (3)$$

ここに、 U ：セグメント継手全体のひずみエネルギー

S_j ：継手部のせん断バネに作用するせん断力

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

EI ：片持ち梁の曲げ剛性

θ_j ：片持ち梁先端のたわみ角

δ_j ：片持ち梁先端の鉛直変位量

また、2つの梁（ウイング部）はトンネル軸方向に対

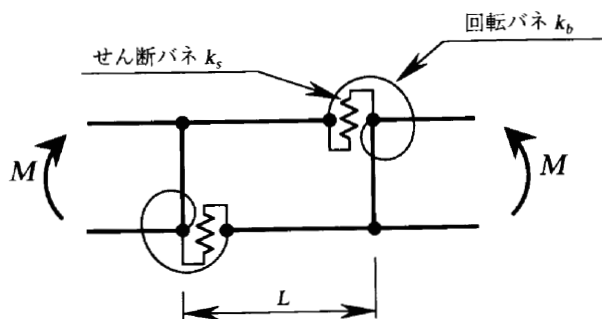


図-4 添え梁モデル（平面）

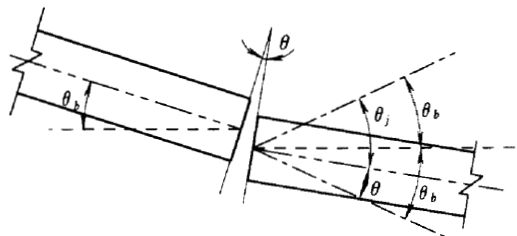


図-6 継手面の各バネによる変位量

称なので、継手における鉛直方向の相対変位量(δ)と相対回転角(θ)は以下ようになる(図-6参照)。

$$\delta = \theta_b \cdot L - \delta_j \quad (4)$$

$$\theta = 2\theta_b - \theta_j \quad (5)$$

ここに、 θ_b ：ウイング部付け根に作用する曲げモーメントによるたわみ角

δ ：継手の鉛直方向の相対変位量

θ ：継手の相対回転角

以上のことから、次の関係式が得られる。

$$\theta_b = \frac{a_{12}(La_{12} - 2a_{11}) - a_{11}(La_{22} - 2a_{21})}{Lb_2(La_{12} - 2a_{11}) - Lb_1(La_{22} - 2a_{21})} \cdot M \quad (6)$$

$$d_b = \frac{b_1 a_{21} - b_2 a_{11}}{b_2(La_{12} - 2a_{11}) - b_1(La_{22} - 2a_{21})} \quad (7)$$

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

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

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

(2) 解析結果

解析では実物大セグメントと同様、地下鉄単線断面を対象にウイング長 L および継手の回転バネ定数 k_b をパラメータに、各部材の曲げモーメント分担率 d_b 、 d_w 、 d_s および等価回転剛性 K_θ を求めた。それらの解析結果を図-7に示す。

L 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、セグメント搬入～組立の作業性やシールドジャッキの配置等を考慮すると、効果が発揮される範囲での最

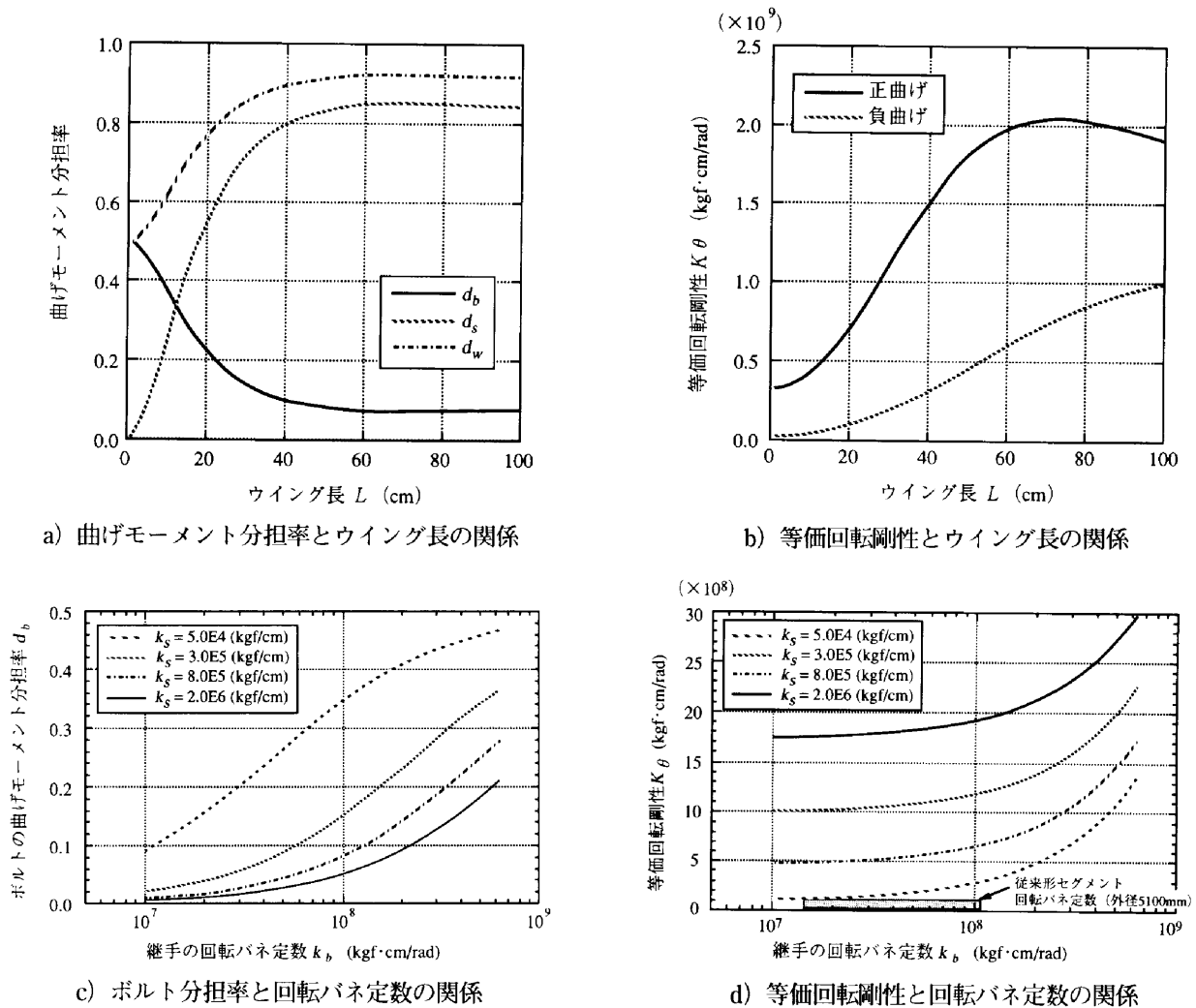


図-7 「添え梁モデル」による解析結果

小の長さが望ましい。図-7 a), b) から、 L が60.0cmを超えると、曲げモーメントの分担率および K_θ ともほぼ一定の値に収束し、かつ変化が少なくなっていることが判る。このため、実物大実験は L を60.0cmとして計画した。また、ウイングセグメントはせん断キーのせん断剛性を高くすることにより、従来形に比べボルトの負担が少なくなることも解析から確認された。

§ 3. 継手曲げ試験

ウイングセグメントの特徴である、継手面に設けられたせん断キーによる曲げモーメント伝達機構の妥当性と、軸力の有無による継手の耐力および剛性を確認することを目的として継手曲げ試験を行った。

3-1 使用材料および供試体

使用材料一覧表を表-1に示すが、設計許容値は従来形セグメントの平均的な値を採用した。

従来形セグメントとウイングセグメントの断面比較を

表-2に示す。前者の継手はセグメント幅1.00mでM24 (12.9) を4本使用しているのに対し、後者は幅1.20mでM24 (10.9) 2本となっており、大幅に継手の軽構造化が図られていることが判る。

なお、今回の試験で採用した継手構造は、応力が集中するウイング部に対してボルトボックスを設ける必要のない「プレセット鍛造ボルト式継手」⁵⁾を採用した。

3-2 試験方法

試験は、図-8に示すように軸力をほとんど導入しないpart-1と設計軸力を導入したpart-2の2種類の試験を行った。

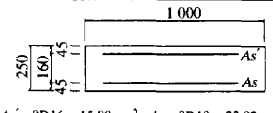
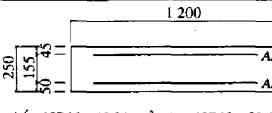
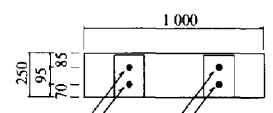
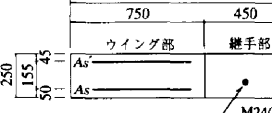
(1) part-1 (低軸力下)

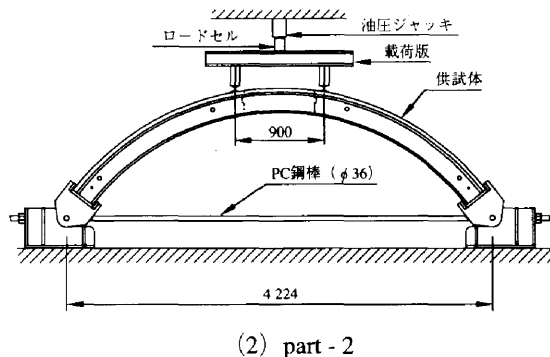
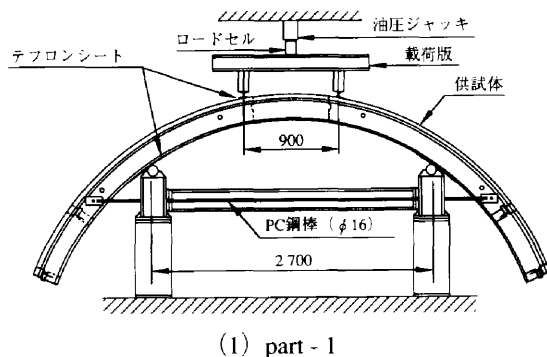
2体の供試体をボルトにより締結し、支承スパン2.70m、載荷スパン0.90mの2点集中載荷両端可動で行った。軸力は支承の外側にφ16のPC鋼棒を配置して導入した。ボルトの締結力は、継手面の回転バネの違いによる影響を見るために、ボルトの許容応力度の80%、40%、10%の3種類とした。

表－１ 使用材料一覧表

材 料	強度特性 (kgf/cm ²)	
コンクリート	設計基準強度	$\sigma_{ck}=480$
	許容圧縮応力度	$\sigma_{ca}=170$
	許容せん断応力度	$\tau_{ca}=5.5$
鉄筋 (SD345)	降伏点応力度	$\sigma_{sy}=3,500$
	許容圧縮応力度	$\sigma_{sa}=2,000$
	許容引張応力度	$\sigma_{sa}=2,000$
ボルト (10.9)	降伏点応力度	$\sigma_{sy}=9,000$
	許容引張応力度	$\sigma_{sa}=3,000$

表－２ セグメント断面比較表

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



図－８ 継手曲げ試験要図

(2) part-2 (設計軸力下)

一方のウイング部を切断した2体の供試体をボルトにより締結し、支承スパン4.22m、載荷スパン0.90mの2点集中載荷両端可動で行った。軸力は支承どうしをφ36のPC鋼棒で接続することにより導入した。

3-3 試験結果

試験結果を表－３に示す。結果の整理に当たっては、part-1では、PC鋼棒の塑性化により最終耐力が確認できなかったこと、part-2では、導入した軸力の関係で破壊に至らなかったことから、そのときのボルトや鉄筋のひずみの増加から最終耐力を計算した。その結果、Part-1では最終耐力の設計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を満足していたこと、part-2では許容値から求めた最終耐力の安全率を上回っていたことが確認できた。このことから、ウイングセグメントは千鳥組みされた従来形セグメント継手と同等以上の継手耐力を有していると評価することができた。

また、計測データを基に継手部およびウイング付け根の抵抗モーメントを算出し、下式により正規化し、ボルト等の曲げモーメント分担率を求めた。

$$d_b = M_b / (M_b + M_w) \quad (8)$$

$$d_w = 1.0 - d_b \quad (9)$$

$$d_s = d_w - d_b \quad (10)$$

計算にあたって、継手部においてはボルトの初期締結

表－３ 継手曲げ試験結果

	part-1 (低軸力下)		part-2 (設計軸力下)	
	計算値	実験値	計算値	実験値
軸力 (tf/m)	1.33		37.5	
曲げモーメント (tfm/m)	許容値	6.01	9.25	—
	破壊時	14.8	18.2	19.3*
安全率	2.46	2.72	1.96	2.09

*終了時のボルトのひずみから、破壊時の曲げモーメントを算出したものである。

力による継手面の軸圧縮を考慮し、載荷荷重による目開きの判定を行った。目開き前は全断面有効、目開き後はコンクリートの引張部を無視した。ウイング部付け根においては、鉄筋のひずみからひずみ分布を求め、軸力と等しくなるようにコンクリートの引張力を考慮した断面で算出した。

その結果、図－９のように載荷初期段階においてはボルトの初期締結力の影響でボルトの分担率が大きくでているが、載荷途中からはほぼ一定値に落ちついており、設計曲げモーメントを超えてからは約0.2と従来の継手の半分以上の負担となっていることが確認された。

以上から、ウイングセグメントは継手が目開きしてからせん断キーの効果が発揮され、ボルトの負担を低減させていると同時に、継手の耐力を向上させていることが確認できた。

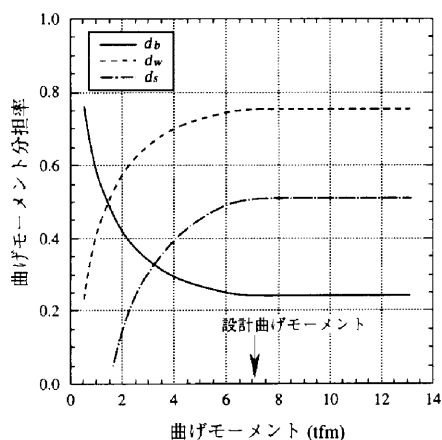


図-9 曲げモーメント分担率の変化

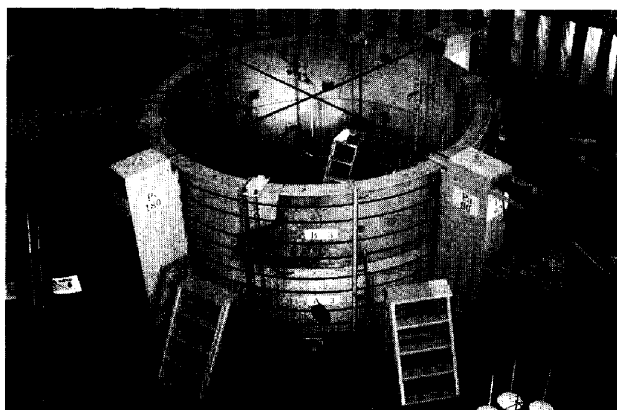


写真-1 リング載荷試験状況

§ 4. リング載荷試験

実応力レベルでのウイングセグメントの挙動を確認することを目的としてリング載荷試験を行った。なお、使用材料および供試体は継手曲げ試験で使用したものと同様である。

4-1 試驗方法

試験方法は図-10および写真-1に示すとおりであるが、セグメントリング外周に巻き付けたアンボンドPC鋼線を緊張することで軸力を導入し、リング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。また、ウイングセグメントはイモ継ぎの状態でもリング剛性が高いことを確認するため、単独リングおよび2リングイモ継ぎの状態でも試験を実施した。

(1) part-1 および part-3

鉛直荷重を本体部中央に、水平荷重を継手部に載荷する試験とした。

(2) part-2

鉛直荷重を継手部に、水平荷重を本体部中央に載荷する試験とした。

軸力と載荷のパターンを表-4に示す。case-1からcase-4においては設計荷重まで載荷し、case-5に関して

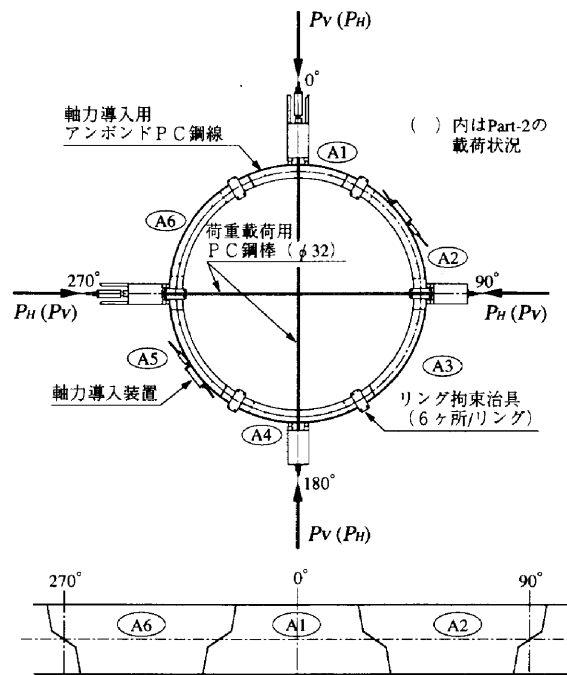


図-10 リング載荷試験概要

は破壊に至るまで載荷し、最終耐力を確認した。

4-2 試驗結果

(1) 最終耐力

最終耐力を確認したcase-5についての結果をまとめたものを表-5に示す。破壊形態は、3種類の各試験とも設計どおり正曲げ最大位置における曲げ破壊となっており、継手部が弱点とはならなかった。試験終了時の安全率は、従来形セグメントの千鳥組リングを対象とした安全率を上回り、単独リングおよびイモ継ぎの状態でも、十分なリング耐力を有していることが確認された。このうち、せん断キーの補強を行い継手のせん断剛性を高めたpart-3では、同一条件で載荷したpart-1に比べ最終耐力が向上し、その有効性が確認された。

(2) リングの変形

載荷荷重と鉛直方向内空変位の関係を図-11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るにも関わらず、単独リングおよび2リングイモ継ぎの状態でも、設計荷重レベルにおいて、はり-バネモデルによる従来形千鳥組リングと同等のリング剛性を有している。セグメント継手がトンネル円周方向に段違いになっていることと、せん断キーによる曲げモーメントの伝達が有効に働いていることが、リング剛性を向上させたと考えられる。また、part-1とpart-3の挙動が一致していることから、従来のように添接効果を期待しなくてもよく、リング継手の省略も可能であることも示唆された。

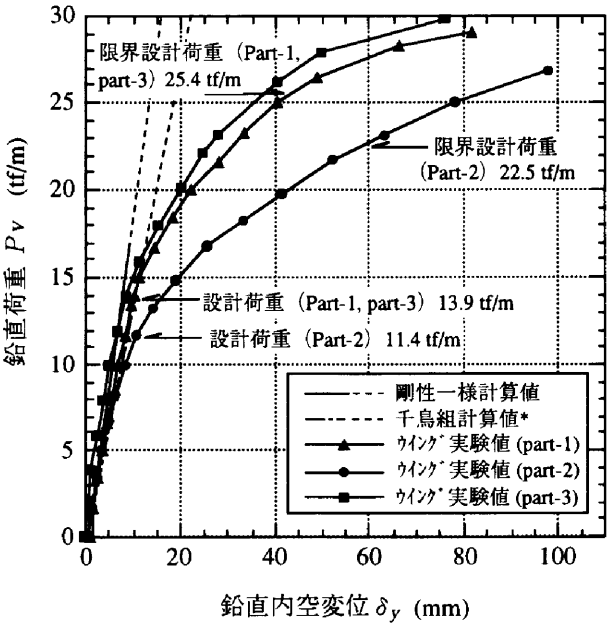
(3) 曲げモーメントの分布

表ー４ リング載荷試験ケース

試験ケース	軸力 (tf/m)	$P_v:P_H$	最終荷重
case-1	54.2	1: 0.9	設計荷重まで
case-2		1: 0.7	
case-3		1: 0.9	
case-4	37.5	1: 0.7	破壊荷重まで
case-5		1: 0	

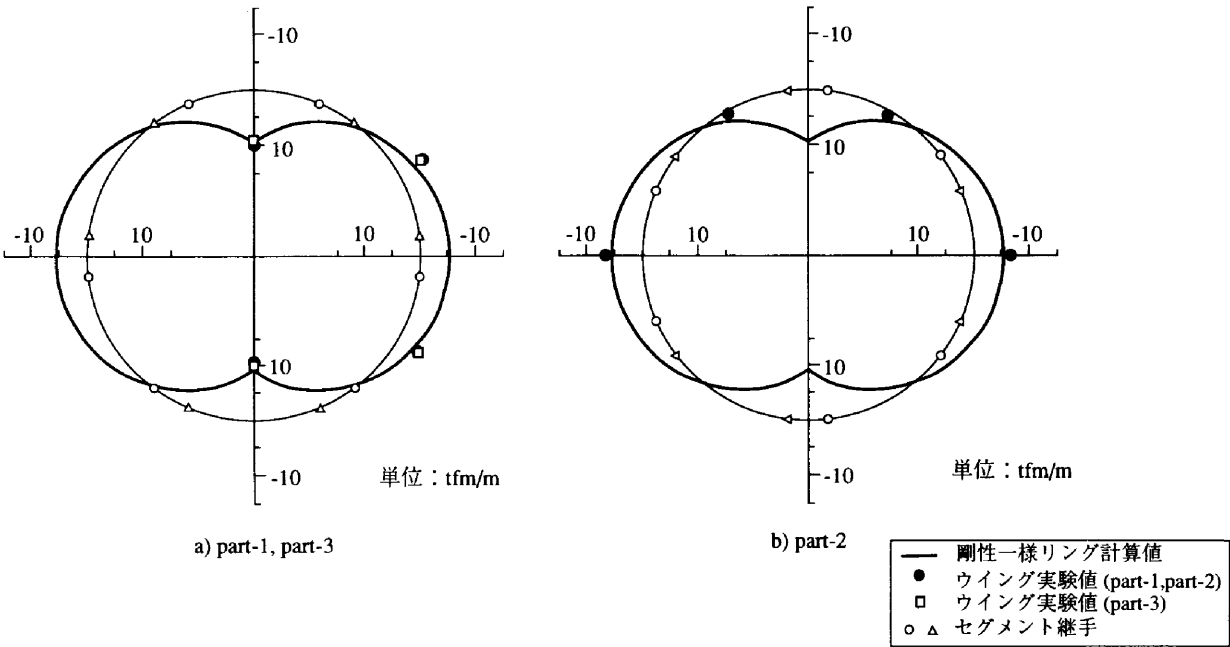
表ー５ リング載荷試験結果

		part-1	part-2	part-3
正曲げ最大位置		本体	継手	本体
計算値	設計荷重 P_a (tf/m)	13.9	11.4	13.9
	許容モーメント M_a (tfm/m)	11.2	9.25	11.2
	終局モーメント M_{ru} (tfm/m)	20.4	18.2	20.4
	安全率 F_s	1.83	1.97	1.83
実験値	最終耐力 (tfm/m)	21.3	21.6	24.8
	安全率 F_s	1.90	2.34	2.22



*：千鳥組された従来形セグメントリングのはりーバネモデル計算値を示す。

図ー11 載荷荷重と内空変位の関係



図ー12 曲げモーメント分布図 (case-5)

鉄筋のひずみ計測値から算出した設計荷重時の本体部の曲げモーメントの分布を、図ー12に示す。これから、ウイングセグメントリングの曲げモーメントは、剛性一様リングと同等の分布をしていることが判り、ウイングセグメントは剛性一様リングとして設計できることが確認された。

(4) 継手の回転バネ

また、実応力レベルでの「添え梁モデル」の妥当性を確認するため、載荷に伴う継手の回転バネを図ー13およ

び以下に示す①～③の各荷重レベル毎に設定し、「添え梁モデル」による継手全体の等価回転剛性と、実験から得られた見かけの回転剛性を比較した。

- ①載荷初期段階であり、軸力により継手面が全断面有効の状態。レオンハルトの回転バネ値⁶⁾を採用。
- ②ボルトが有効に働いている状態。継手形式から求まる、目開き前の回転バネ定数を採用。
- ③継手面が目開きした状態。継手形式から求まる、目開き後の回転バネ定数を採用。

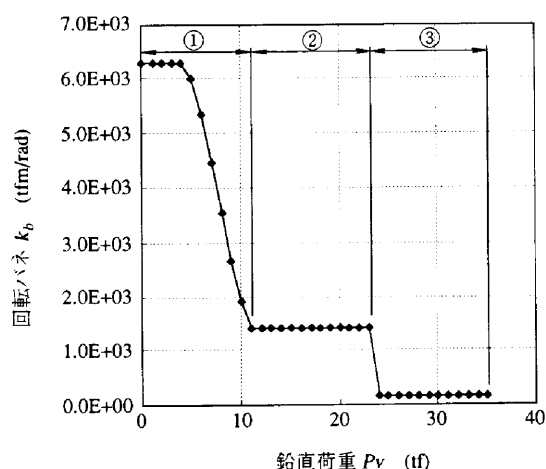


図-13 载荷に伴う継手の回転バネ定数

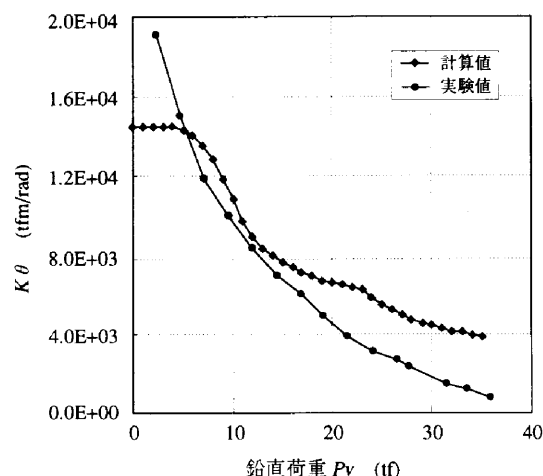


図-14 計算値と実験値の比較（等価回転剛性）

この結果、図-14に示すように、解析値と実験値は良く似た傾向を示しており、解析モデルの妥当性が確認された。

§ 5. おわりに

ウイングセグメントは、軸力の卓越する良質地盤から曲げが卓越する軟弱地盤に至る広範囲の地盤において、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試験から得られた知見を以下にまとめる。

- ①低軸力下のウイングセグメント継手は、「標準セグメント」が推奨している安全率2.5を上回る安全率を確保していることが確認された。
- ②設計軸力下のウイングセグメント継手は、千鳥組みされた従来形継手と同等以上の継手耐力を有していることが確認された。
- ③せん断キーの効果により、設計荷重を超えるとボルトの曲げモーメント分担率が小さくなり、従来形の約40%に低減されることが確認された。
- ④ウイングセグメントは単独リングの状態で、従来形の千鳥組リングと同等のリング耐力、リング剛性を有していることが確認された。
- ⑤曲げモーメントの分布は、剛性一様リングと同等であったことから、ウイングセグメントは剛性一様リングとして設計できることが確認された。
- ⑥解析による計算値と実験値の継手全体の等価回転剛性が良く似た傾向を示したことから、解析モデルである、「添え梁モデル」の妥当性が確認された。

今後は、軸力管理の下で継手曲げ試験を行い、設計軸力下での最終耐力を確認すると共に、実施工に向けて施工面の充実を図る予定である。

最後になりましたが、ウイングセグメントの開発にあたり御指導頂いております、東京都立大学・今田教授、山崎先生、そして载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、野本 寿、坪井広美、山崎 宏：凸形セグメント、(有)プロジェクト・リサーチ主催第40回「シールド工法講習会」テキスト“新しいセグメント”－開発から施工へー、pp.84～104, 1996.
- 2) 山崎 宏、今田 徹、山崎良一、三戸憲二：凸形セグメント実物大载荷試験（その1）－継手曲げ試験－、土木学会第51回年次学術講演概要集Ⅲ－B127, pp.254～255, 1996.
- 3) 三戸憲二、今田 徹、山崎良一、山崎 宏：凸形セグメント実物大载荷試験（その2）－リング载荷試験－、土木学会第51回年次学術講演概要集Ⅲ－B128, pp.256～257, 1996.
- 4) 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回年次学術講演概要集Ⅵ－190, pp.380～381, 1996.
- 5) F.Leonhardt und H.Reimann：“Betongelenke”, Der Bauingenieur, 41, 1966.
- 6) 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.