

せん断キーを有するセグメント継手の力学特性

DYNAMICAL CHARACTERISTICS OF SEGMENT JOINT WITH SHEARING KEY

三戸 憲二¹⁾・今田 徹²⁾・山崎良一²⁾・野本 寿³⁾・山崎 宏³⁾

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

Wing segments are developed aiming the efficient moment transfer at the joints of shield lining to maintain necessary lining stiffness in very soft ground where enough passive pressure is not mobilized, and to reduce the cost of joints. In developing wing segments full-scale loading tests have been conducted.

The test results show that combination of the shearing stiffness and the overhang length of the segment joint could attain sufficient moment transfer at joints. Unlike ordinary segments, the number and size of bolts could be reduced in very soft ground because the moment transfer by bolts is not significant.

Key Words: shield lining, segment joint, shearing key, high ring stiffness

1. はじめに

近年、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、建設コストの更なる低減が求められている。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、そのコストは継手構造の占める割合が大きい。従来の矩形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みで補っているが、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。

そこで、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。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(ホゾ)を設けることで、せん断剛性による曲げモーメントの伝達を合理的に図れる構造を考案し、軟弱地盤においても軽構造の継手で十分な耐力と剛性を有する「ウイングセグメント」を開発した¹⁾。本論文では、ウイングセグメント継手の力学的特性について述べる。

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 ϕ 5,300mm、幅1,200mm、厚さ250mm、6分割)を対象としたものである。

2. 基本構造と構造的特徴

2.1 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

1) 正会員 西松建設(株) 土木設計部 設計課

2) 正会員 東京都立大学 工学部 土木工学科

3) 正会員 西松建設(株) 技術研究所 技術部

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³⁾。

2.2 継手構造

ウイングセグメントは、曲げが卓越するような地盤条件ではボルト式等の継手構造で、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リング耐力および剛性の確保が可能である。特に曲げが卓越する条件では、筆者らが開発した「プレセット鍛造ボルト式継手」³⁾の採用は、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を避けられることから、構造的に有効である。

3. 継手の曲げモーメント伝達機構

3.1 曲げモーメント伝達機構

ウイングセグメントにおける、セグメント継手の曲げモーメント伝達機構を図-2に示す。セグメント継手に作用する曲げモーメント(M)は、継手面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、 M_w は、ホゾのせん断抵抗力とウイング長によって負担する曲げモーメント($M_s = S_j \times L$)と、 M_b との和となる。

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

ここに、 M ：継手に作用する曲げモーメント

M_b ：継手面が負担する曲げモーメント($= d_b M$)

M_w ：ウイング部付け根で負担する曲げモーメント($= d_w M$)

M_s ：ホゾのせん断抵抗力とウイング長によって負担する曲げモーメント($= S_j L = d_s M$)

S_j ：ホゾのせん断抵抗力

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

したがって、 M に対し、 M_s と $2M_b$ との合計で抵抗するので、 M_s の分担を大きく取ることにより、ボルトの負担が軽減され、継手の軽構造化が図れる。

これらの理論的な解析は、図-3に示すようにウイング部を片持ち梁として、それらが互いに向かい合った状態で、回転バネとせん断バネで接合されている「添え梁モデル」で行った。

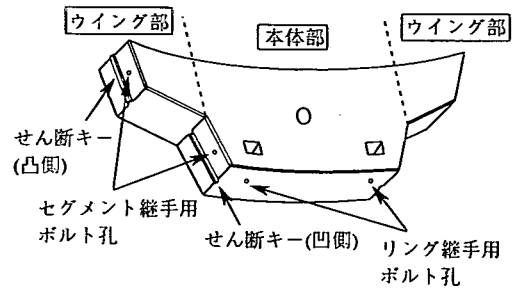
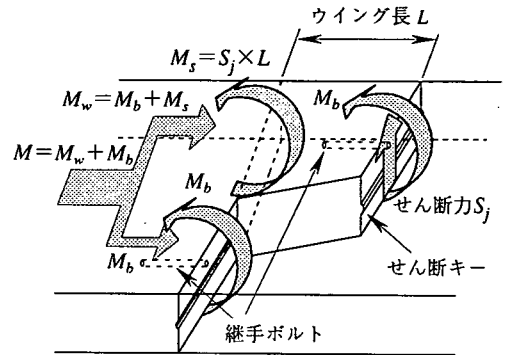


図-1 ウイングセグメントピース基本構造図



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

図-2 せん断力による曲げモーメントの伝達

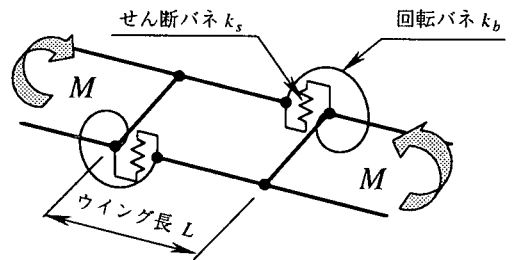


図-3 添え梁モデル

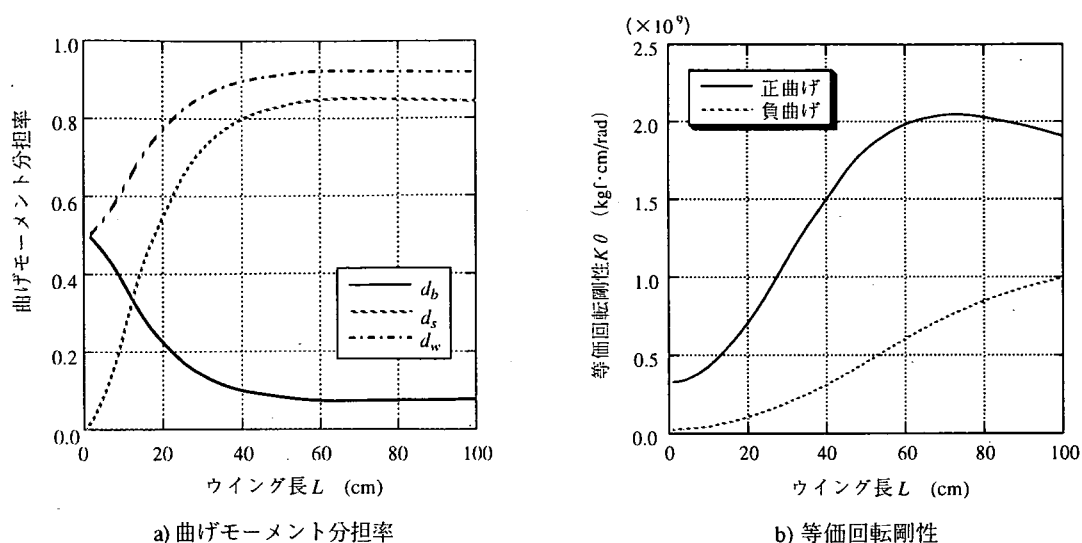


図-4 ウイング長 (L) の感度解析

3.2 「添え梁モデル」によるウイング長の決定

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シールドジャッキの配置等を考慮すると、 L の効果が発揮される最小の長さとしなければならない。

解析の結果、図-4に示すように、ウイング長が60cmを超えると曲げモーメントの分担率および継手全体の等価回転剛性ともに変化が小さくなり、ウイング長として60cm確保すれば十分な効果が得られることが示された。このため、実物大セグメント載荷試験では、ウイング長60cmを採用することとした。

4. 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耐力と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を行った^{2),4),5)}。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。

なお、ウイングセグメントでは、ホゾのせん断抵抗力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。

4.1 試験項目とその目的

(1) せん断キーせん断試験

継手面せん断キーのせん断バネ、せん断耐力を確認することを目的とした。軸力は継手曲げ試験、および既に行ったリング載荷試験に準じて、セグメント幅あたり45.0tf、セグメント継手面あたり22.5tfとした。

(2) 継手曲げ試験

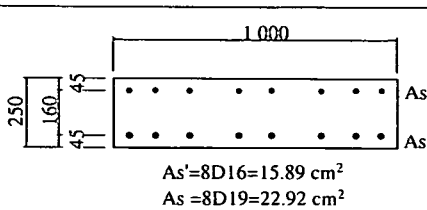
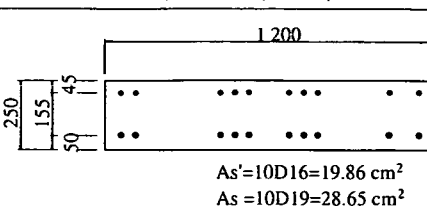
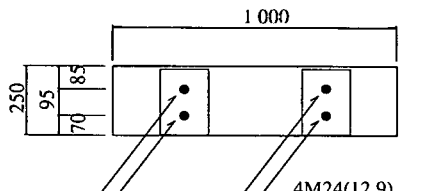
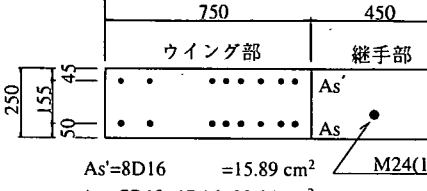
継手面に設けられたせん断キーによる曲げモーメントの伝達機構の確認と、継手の耐力および剛性を確認することを目的とした。ウイングセグメントは継手の回転バネとせん断バネの組み合わせで曲げモーメントを伝達するが、後述のように回転バネは軸力によって大きく影響を受けること(5.1.(3)参照)から、ウイングセグメント継手の力学特性を確認するためには、実応力レベルで継手の挙動を確認する必要がある。そこで、リング載荷試験に代わる簡易な試験方法として、軸力を導入した継手曲げ試験を実施した。

4.2 せん断キーせん断試験

(1) 試験方法

試験方法の概要を図-5に示す。試験は図-6に示すせん断キー形状に対して行い、正曲げと負曲げに対

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	 $As' = 8D16 = 15.89 \text{ cm}^2$ $As = 8D19 = 22.92 \text{ cm}^2$	 $As' = 10D16 = 19.86 \text{ cm}^2$ $As = 10D19 = 28.65 \text{ cm}^2$
継手部	 $4M24(12.9)$	 $As' = 8D16 = 15.89 \text{ cm}^2$ $As = 7D19 + 1D16 = 22.04 \text{ cm}^2$

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－5の下方）へ変位する方向を示す。

(2) 試験結果

1) セン断耐力

各ケースの試験結果を表－3に示す。破壊形態は、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。

最終耐力は、負曲げでは中央供試体の上側に曲げ圧縮によるクラックが早い段階で発生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、せん断キーは十分なせん断耐力を有していることが確認されたと言える。

2) セン断剛性

載荷荷重とせん断変形の関係を図－7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。継手周辺のクラックは許容荷重付近で発生しているが、せん断剛性はこれらの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、実測値のせん断剛性は、継手面に作用するせん断力をせん断補強筋のみで負担すると仮定したときの補強筋の伸び量から算出しているが、実測値のせん断剛性はこの値を上回っている。ホゾの効果で継手面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、設計値は安全側の設定となっていることがこの結果より確認された。

4.3 継手曲げ試験

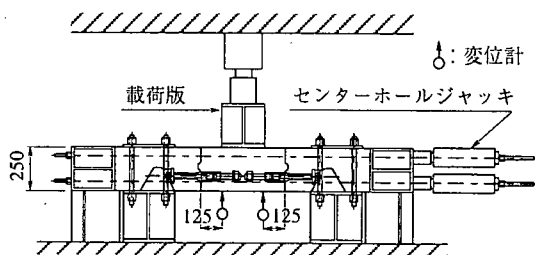
(1) 試験方法

試験方法の概要を図－8に示す。載荷方法は、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

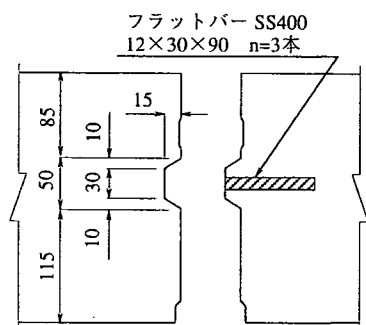
表－2 使用材料一覧表

材 料	強度特性／単位：kgf/cm ²	
コンクリート	設計基準強度	$\sigma_{ck} = 480 (480)$
	許容圧縮応力度	$\sigma_{ca} = 170 (180)$
	許容せん断応力度	$\tau_{ca} = 5.5 (7.4)$
鉄 筋 (SD345)	降伏点応力度	$\sigma_{sy} = 3,500 (3,500)$
	許容圧縮応力度	$\sigma_{sa} = 2,000 (2,000)$
	許容引張応力度	$\sigma_{sa} = 2,000 (2,000)$
ボルト (10.9)	降伏点応力度	$\sigma_{sy} = 9,000 (9,000)$
	許容引張応力度	$\sigma_{sa} = 3,000 (3,800)$

()内の数値は、トンネル標準設計方書（平成8年度版）を示す。



図－5 セン断キーせん断試験 試験装置概要図



注) 凸側で寸法表示のないケースは、凹側と同じ寸法である。

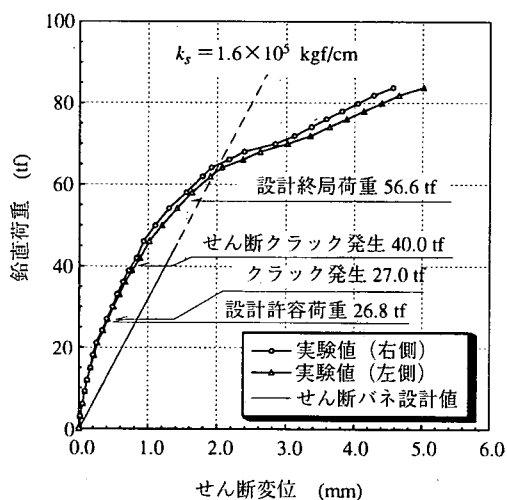
図-6 セン断キー形状図

表-3 セン断キーせん断試験結果

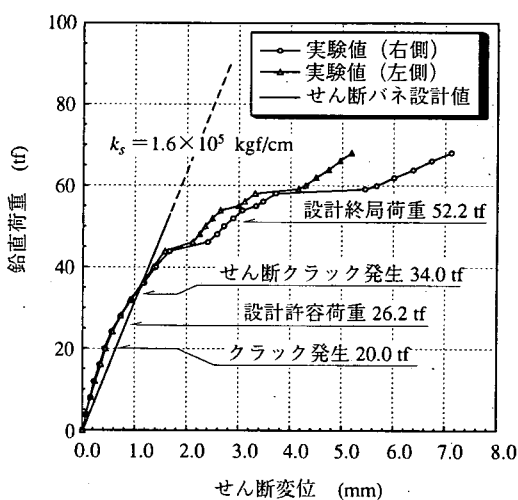
		正曲げ	負曲げ
設計値	許容荷重(tf)	26.8	26.2
	終局荷重(tf)	56.6	52.2
	安全率 F_s	2.11	1.99
実験値	破壊荷重(tf)	85.9	68.3
	安全率 F_s	3.21	2.61

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 ($F = 2 \mu N = 2 \times 0.5 \times 22.5 = 22.5 \text{tf}$) を考慮していない。



a) 正曲げ



b) 負曲げ

図-7 セン断キーせん断試験 セン断変位

うに、許容荷重を越えてからは軸力を一定にして、曲げモーメントを増加させるように载荷した。許容荷重時の断面力は、既に行ったリング载荷試験において破壊まで载荷した試験ケース ($P_v : P_H = 1 : 0$)²⁾に合わせ、軸力 37.5tf/m、曲げモーメント 9.25tfm/m とした。

(2) 試験結果

1) 強度特性

破壊モードは、目開きに伴う背面側コンクリートの圧壊であった。表-4に試験結果一覧表を示す。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継手部の設計耐力を示している。継手曲げ試験で、両設計値(表-4 注)参照)と同等の継手耐力が得られたことから、以下の知見が得られた。なお、許容レベルではボルト締結力により継手面が目開きしにくいから、継手の回転バネが大きくホゾの効果が少ないことから、継手面目開き後の終局状態で継手耐力を評価した。

- 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耐力を単純合計した設計値と、同等の継手耐力が得られたことから、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

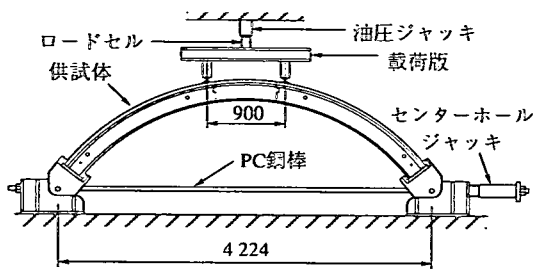


図-8 継手曲げ試験 試験装置概要図

れており、ホゾの効果がクリティカルとなって継手耐力が決まっていなかったことがわかった。

2) リング载荷試験との比較

継手構造の簡略化を図る観点から、代表としてボルトのひずみの変化について、リング载荷試験と比較した結果を図-10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え、リング载荷試験に代わる簡易な試験方法として、本試験方法の妥当性が確認された。

5. 添え梁モデルによる試験結果のシミュレーション

5.1 添え梁モデル諸定数の設定

(1) 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。

(2) せん断バネ k_s

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も最低限確保できるせん断バネをせん断補強筋の伸び量を基に設定した。

(3) ボルトの回転バネ k_b

ウイングセグメントは、ボルトの回転バネ k_b 、せん断バネ 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、軸力を考慮したレオンハルトの式を引用して、ボルトの回転バネを設定した。なお、目開き後の回転バネは、「梁バネモデル」のバネ値計算式に準じて算定した。

5.2 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。

(1) 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。

表4 継手曲げPart-3 試験結果

	設計値	実験値
軸力 (tf/m)	37.5	37.5
曲げモーメント (tfm/m)	許容値	9.25(10.5)
	終局値	18.2 (18.4)
安全率	1.96(1.75)	1.99(1.75)

注) 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を示す。

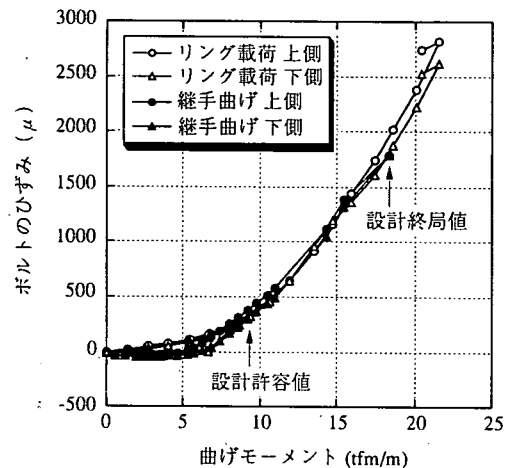


図-9 継手曲げ試験とリング载荷試験の比較

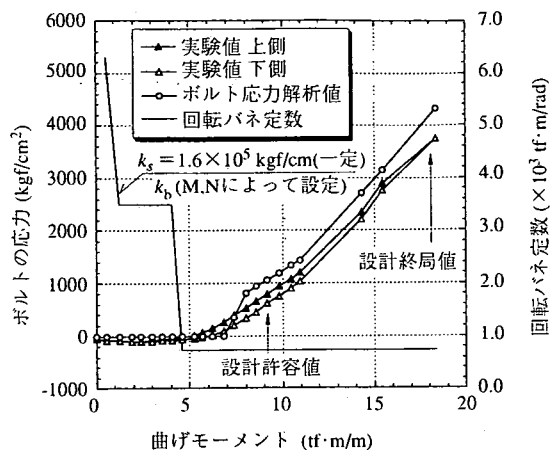


図-10 継手曲げ試験 ボルトの応力

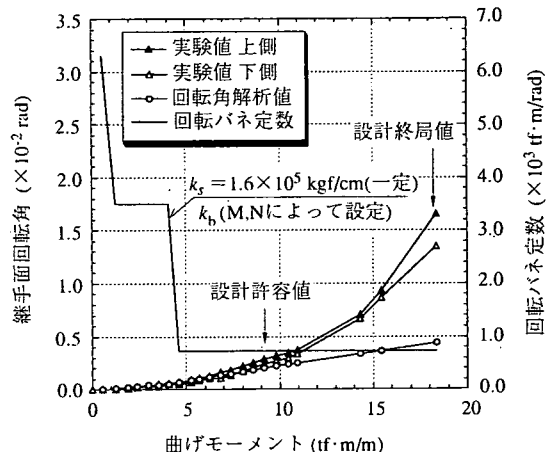


図-11 継手曲げ試験 継手面回転角

(2) 載荷後の応力状態

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，(1) 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 を越えてから 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。

5.3 セン断キーせん断試験

せん断キーせん断試験結果に，添え梁モデルで用いているせん断バネ定数を併記し，図-8に示す。設計せん断バネ定数は，コンクリートのクラック発生後を想定して，せん断補強筋の伸びを基に算出した値であるため，実験値よりも小さめの値となっている (5.1, (2) 参照)。

5.4 継手曲げ試験

継手曲げ試験の試験結果に，添え梁モデル解析値を併記し，図-10～12に示す。

(1) 応力，変形特性

ボルトの応力，継手の回転角いづれも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。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，これはコンクリートのクラック発生に伴う剛性低下の影響と考えられる。

(2) 曲げモーメント分担率

計測データよりウイング部，継手部の抵抗曲げモーメントを算出し正規化した結果，図-12に示す曲げモーメント分担率が得られた。実験値については，載荷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，継手が目開きした状態では継手面の曲げモーメント分担率は2割弱と僅かであり，ホゾが有効に作用していることが分ると同時に，継手構造の軽構造化の可能性が示されたと言える。

また，解析値に比べて実験値の分担率の方が小さいが，これはせん断キーせん断試験結果でも触れているように，安全側にせん断バネ定数設計値を小さめに設定しているためである。

なお，解析値が，載荷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。このことから、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、設計許容値を越えた領域で顕著に発揮されることが分かった。

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

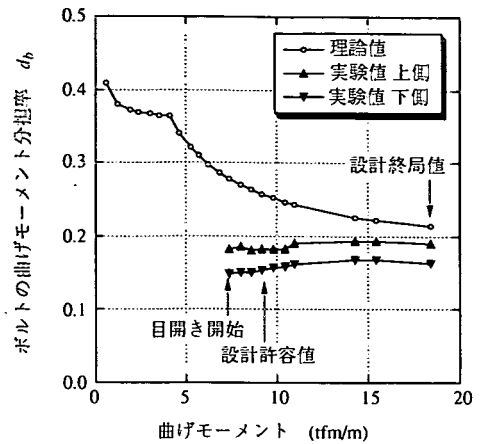


図-12 継手曲げ試験 継手面の曲げモーメント分担率

6. 結 論

添え梁モデルによる解析および実大載荷試験で、得られた知見を以下に示す。

- ① せん断キーせん断試験の結果、せん断補強筋の効果を考慮した設計値で、セグメント継手のせん断変形および耐力が説明できた。
- 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が、同試験で表現されており、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 継手曲げ試験のシミュレーション結果より、添え梁理論式で、ホゾのせん断抵抗力(S) $\times$ ウイング長(L)の効果によるウイングセグメントの力学的特性が説明できた。
- ④ 以上の結果、ウイングセグメントは、せん断剛性による曲げモーメント伝達効果で、従来形よりも継手構造の軽構造化、セグメント幅の拡幅が可能であることが示された。

7. おわりに

実物大載荷試験により、ウイングセグメントは従来形に比べ継手構造の軽構造化が可能で、しかも千鳥組されたセグメント継手と同等以上の剛性と耐力を有していること、またシミュレーション結果から、添え梁モデルが妥当であることが確認された。今後は、実施工に向けて施工面の充実を図っていく予定である。最後に、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) 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)
- 2) 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)
- 3) 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)
- 4) 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回年次学術講演会講演概要集Ⅲ-B121, pp.242 ~ 243 (1997年9月)
- 5) 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)ー軸力導入継手曲げ試験ー, 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)