

RC平板形セグメントのセグメント幅に関する研究

On the bending behaviour of the RC-flat type segment
with large width taking into account of the splice effect

石田 智朗*, 中筋 智之**, 奥津 大**, 村上 博智***, 小泉 淳****

Tomoaki ISHIDA, Tomoyuki NAKASUJI, Masaru OKUTSU, Hiroto MURAKAMI and Atsushi KOIZUMI

Recently, The width of the segment used the shield tunneling method tends to become wider. When the segment rings are jointed staggeringly, the shearing force generated by the splice effect will act on the longitudinal joint bolt. The bending stress generated by this shearing force is deemed to increase and concentrate on the end of the segment according to the increase of the width of the segment.

The object of this study is to analyze the relationship between the width of the segment and the distribution of the bending stress experimentally, by using four types (width 300, 400, 500, 600mm) of flat-type RC segment models.

Through this experiment, we found that the increase of the segment-width causes the concentration of the bending stress at the end of the segment. Therefore when designate the segment wider than 1200mm, it is necessary to examine this increase of the bending stress and consider the effective countermeasure.

Keywords : shield tunnel, RC segment, splice effect, width of a segment, stress distribution

1. はじめに

シールド工事に用いられるセグメントの幅は、従来、一般的に 90cm~100cmであったが、これは主として製作上および施工上の要求からであり、力学的検討に裏付けられたものではないようである。近年、シールドトンネルの施工効率の向上、防水上弱点となりやすい継目延長の減少、経済性などを考慮し、セグメント幅を110cm~150cmに拡大する傾向がある。

一般に、セグメント幅を広くすると、外力に対しては、拡幅された分だけセグメント耐力を増加させれば対応できるのに対して、隣接するセグメントの添接効果を期待してセグメントリングを千鳥組する場合には、リング継手からの拘束力をセグメント幅全体にわたって均等に配分できるかどうか問題となる。RC平板形セグメントでは、リング継手近傍のコンクリートや鉄筋が大きな力を分担し、セグメント幅方向の中央付近のコンクリートや鉄筋があまり大きな力を分担しない可能性が考えられ、この場合には従来とは違った配筋を行うなど何らかの対策を考える必要がある。また、セグメント幅を拡大すると、千鳥組によって生じる隣接リングからの変形拘束力がリング継手を介してセグメントの幅方向に十分に伝達されるかどうか問題となる。

本論文は、千鳥組されたRC平板形セグメントを想定して、幅の異なる4種類の供試体を用い、リング継ぎボルトのせん断力によって発生する曲げ応力度がセグメント幅方向にどのように分布するかを実験的に調べ、セグメント幅の拡大と曲げ応力度の分布との関係について検討を加えたものである。

* 正会員 工修 日本国土開発株式会社 技術本部 土木部

** 学生員 早稲田大学大学院 理工学研究科

*** 正会員 早稲田大学 理工学部 土木工学科

**** 正会員 工博 早稲田大学 理工学部 土木工学科

2. 実験概要

2.1 供試体および実験ケース

実験には、外径600mmのシールド工用標準セグメント(C 65)を参考に、縮尺約1/3になるように定めた幅300mmの供試体を基本として、幅400mm・500mm・600mmの供試体をそれぞれ2体、計8体用いた。図-1に供試体寸法を、図-2に継手形状を、図-3に配筋を示す。

鉄筋はD 6(SD345)を使用し、鉄筋比を実物と一致させているが、高さは必要なかぶりを確保するため12cmとした。使用したコンクリートの配合を表-1に、管理供試体強度試験結果を表-2にそれぞれ示す。

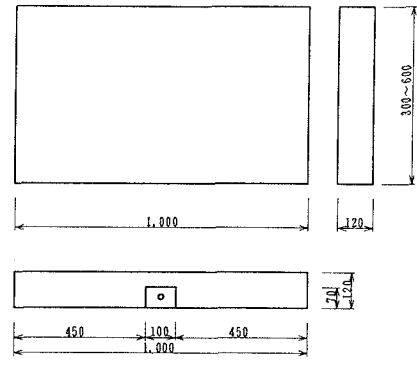


図-1 供試体寸法図

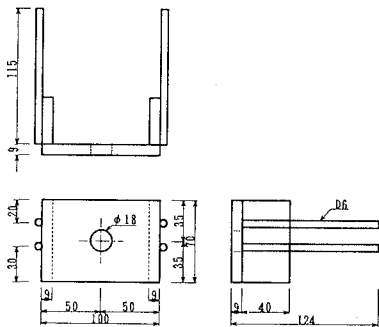


図-2 継手形状

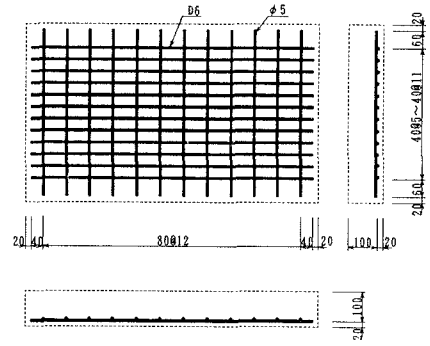


図-3 配筋図

表-1 コンクリート配合表

セメント (kg)	水 (kg)	W / C (%)	粗骨材 (kg)	細骨材 砂 (kg)	砕砂 (kg)	高性能 AE減水剤 (kg)
508	175	34.5	934	446	304	10.16

表-2 管理供試体強度試験結果

コンクリート	
圧縮強度 (kgf/cm ²)	605.8
曲げ引張強度 (kgf/cm ²)	48.1
弾性係数 (kgf/cm ²)	2.99×10 ⁵
ポアソン比	0.194
鉄筋	
破断強度 (kgf/cm ²)	6436.2
弾性係数 (kgf/cm ²)	2.01×10 ⁵

2.2 載荷方法

添接効果に応じてリング継ぎボルトに発生するせん断力が、セグメントをモデル化した供試体に直接作用することを想定して、供試体にボルト(M16, 8.8)で固定した荷重板上にH形鋼を渡し、その中央で油圧ジャッキを用いて載荷を行った。図-4に載荷状況を示す。各ケースにおける荷重ピッチは、ひび割れ発生前は50kgfピッチ、ひび割れ発生後は100kgfピッチとし、供試体が破壊に至るまで載荷を行った。

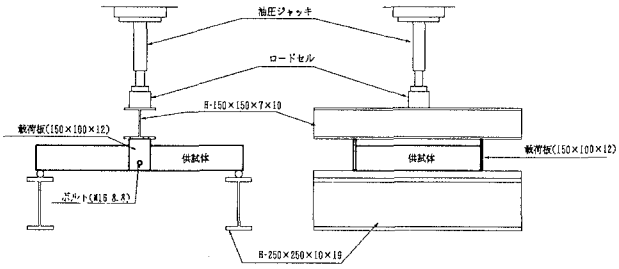


図-4 載荷状況図

2.3 計測方法および項目

各荷重段階ごとに、スパン中央のたわみと供試体の両端の変位を変位計を用いて計測した。また、スパン

中央、 載荷点と支点の中央断面においてコンクリートと鉄筋のひずみをワイヤストレーンゲージを用いて計測している。 図-5に変位測定位置を、 図-6、 図-7にひずみ測定位置をそれぞれ示す。 また、 表-3は各ケースの計測項目および測定点数を示したものである。

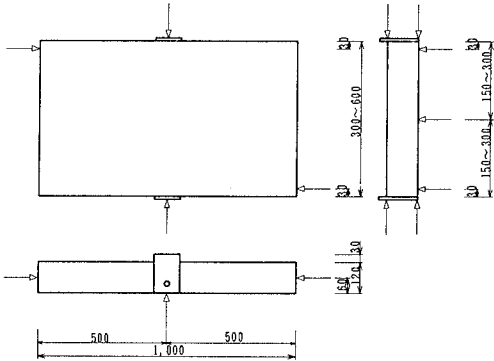


図-5 変位測定位置

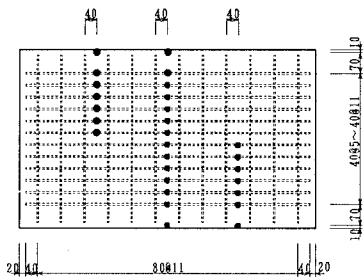


図-6 ひずみ測定位置(コンクリート)

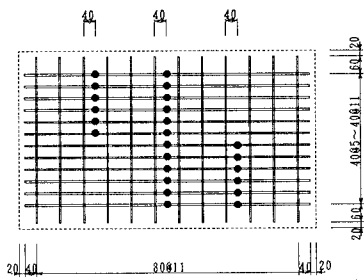


図-7 ひずみ測定位置(鉄筋)

表-3 計測項目および測定点数

	300mm	400mm	500mm	600mm
スパン中央たわみ	3	3	3	3
継手板変位	4	4	4	4
端面変位	2	2	2	2
コンクリート圧縮側	18	22	28	32
ひずみ引張側	10	12	16	18
鉄筋ひずみ	12	16	20	24

3. 実験結果および考察

3.1 ひび割れ発生状況および破壊状況

各ケースともひび割れ発生状況はほぼ同様であり、 継手板の先端近傍で発生した初期ひび割れが、 荷重の増加とともに進行し、 供試体底面の中央部でつながるというものであった。 また、 供試体側面の継手板上部から横方向に発生したひび割れは、 荷重の増加とともに徐々に斜め下方へ伸び、 供試体引張縁に到達し、 継手部周辺のコンクリートに剝離が生じ、 最終的には継手部が抜け落ち、 破壊に至るものであった。 ひび割れ発生状況の一例を図-8に示す。 また、 各ケースにおけるひび割れ発生荷重および破壊荷重を表-4に示す。

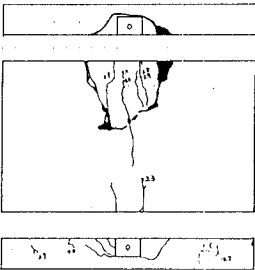


図-8 ひび割れ発生状況図

表-4 ひび割れ発生荷重および破壊荷重 (kgf)

	初期ひび割れ発生位置	初期ひび割れ発生荷重	継手板上部横方向ひび割れ発生荷重	破壊状況	破壊荷重
300mm(A)	継手板下	803.3	2900	継手抜落	4162
300mm(B)	継手板下	856.6	2600	継手抜落	3890
400mm(A)	継手板下	1396.5	4300	継手抜落	4800
400mm(B)	継手板下	1249.9	4200	継手抜落	5276
500mm(A)	継手板下	1616.5	5000	継手抜落	5609
500mm(B)	下面中央	1449.9	4800	継手抜落	5586
600mm(A)	継手板下	1699.8	5200	継手抜落	5779
600mm(B)	継手板下	1656.5	5000	継手抜落	6885

3.2 荷重とたわみとの関係

図-9に荷重とたわみとの関係の一例を示す。 図中の○印は実験値を、 一点鎖線と二点鎖線はそれぞれ全幅有効とした場合のひび割れ発生前と発生後の計算値を、 点線は有効幅を考慮した場合の計算値を示している。 荷重とたわみとの関係は、 各ケースともほぼ同様の傾向を示し、 ひび割れ発生前は荷重の増加にともない

たわみは直線的に増加するが、ひび割れ発生後は荷重の増加とともに徐々に非線形的な増加を示し、塑性領域に入ると、最終的に破壊に至る。継手位置のたわみと供試体中央部のたわみとを比較すると、ひび割れ発生前は、表-5に示すように各ケースで多少異なっているが、継手位置のたわみが中央部のたわみに対して若干大きくなる傾向が認められた。このことから、セグメント幅方向にも曲げが発生していることがわかり、みかけ上のセグメントの主断面方向の曲げ剛性は、セグメント幅全幅にわたって有効ではなく、変形に対する有効幅が存在すると想定される。実験結果を基に各ケースにおける有効幅の計算を行った結果を表-6に示す。有効幅は、荷重－たわみ曲線において、ひび割れ発生前と発生後の直線区間をそれぞれ最小2乗法を用いて求めた直線の傾きと供試体幅を変化させてRC理論により求めた値とが一致したときの幅とした。この表から、変形に対するセグメントの有効幅は、セグメント全幅の60%～40%とセグメント幅が広くなるにつれ狭くなる傾向が見られる。また、有効幅と継手ボックス端部からアンカー筋先端までの長さ(124mm)とを比較すると、その割合は74%～99%となり、セグメント幅が広がるとアンカー筋先端部までの長さに変形に対して有効であることがわかった。

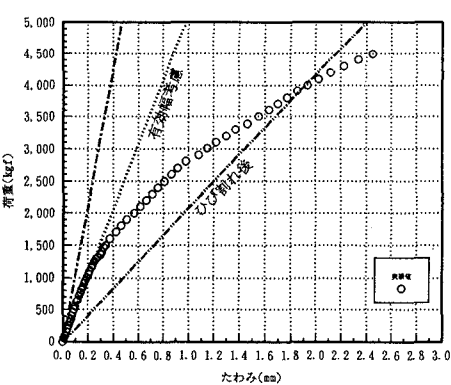


図-9 荷重とたわみの関係

表-5 継手位置および供試体中央部のたわみ

	継手位置 (mm)	中央部 (mm)	継手位置／中央部 (%)
300mm(A)	0.129	0.118	109
300mm(B)	0.118	0.118	100
400mm(A)	0.096	0.095	101
400mm(B)	0.113	0.115	98
500mm(A)	0.135	0.132	102
500mm(B)	0.094	0.090	104
600mm(A)	0.085	0.079	108
600mm(B)	0.152	0.116	131

表-6 有効幅

ケース	実測幅 (mm)	有効幅 (mm)	有幅／実幅 (%)	有効幅／(継手ボックス +アンカー筋)×2 (%)
300 mm	307	184	60	74
400 mm	401	196	49	79
500 mm	500	235	47	95
600 mm	596	246	41	99

3・3 スパン中央における幅方向のひずみ分布

各ケースにおけるひび割れ発生前およびひび割れ発生後の幅方向のひずみ分布を図-10～図-13に示す。図中の○印は圧縮側コンクリートの実験値を、△印は引張側コンクリートの実験値を、□印は引張側鉄筋の実験値を示しており、点線は圧縮側コンクリートの計算値を、一点鎖線は引張側コンクリートの計算値を、二点鎖線は引張側鉄筋の計算値を示している。実験値は、荷重－ひずみ曲線におけるひび割れ発生前後の直線区間をそれぞれ最小2乗した結果を用い、ひび割れ発生前は荷重600kgf、ひび割れ発生後は荷重3200kgfに換算した場合の値である。また、計算値は、供試体断面を一樣断面としてRC理論により求めた値である。表-7にひび割れ発生前のひずみ測定位置における実験値と計算値との比較を示す。

(a) 圧縮側コンクリートのひずみ分布

圧縮側コンクリートのひずみ分布には、ひび割れの影響が直接及ばないため、各ケースともひび割れ発生前と後のひずみ分布は、ほぼ同じ形状である。

圧縮側コンクリートのひずみ分布は、継手ボックスより内側では、全ケースともほぼ様な分布を示しており、計算値とおおむね一致した値となっている。しかし、継手ボックス付近の圧縮側コンクリートのひずみ分布の傾向は供試体によって異なり、幅300mmと幅400mmでは実験値が計算値より25%～40%程度大きな値となっているが、幅500mmと幅600mmでは実験値と計算値とはほぼ一致した値を示している。

(b) 引張側コンクリートのひずみ分布

ひび割れ発生前の引張側コンクリートのひずみ分布は、各ケースとも継手ボックスとその近傍では変形を拘束され、端部に向かってひずみが減少するが、これより内側ではほぼ様な分布を示している。また、実験値と計算値とを比較すると、各ケースとも継手ボックス近傍では、実験値は計算値の14%~50%程度のひずみを示し、継手ボックスより内側では実験値と計算値とはほぼ一致した値となっている。

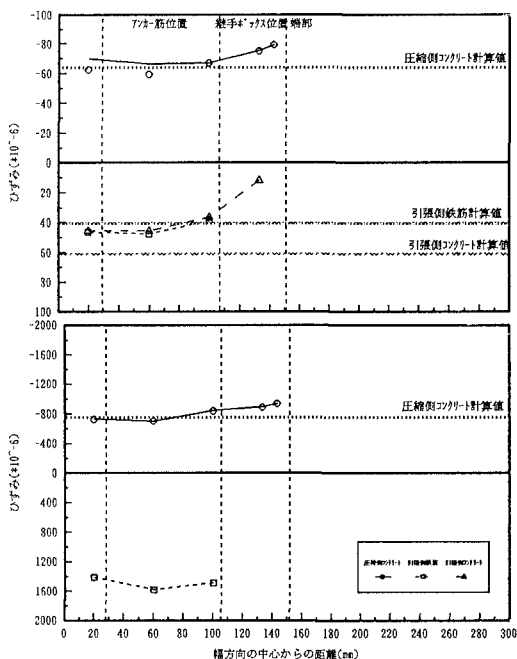


図-1-0 幅方向のひずみ分布 (幅300mm)
(上段: ひび割れ発生前, 下段: ひび割れ発生後)

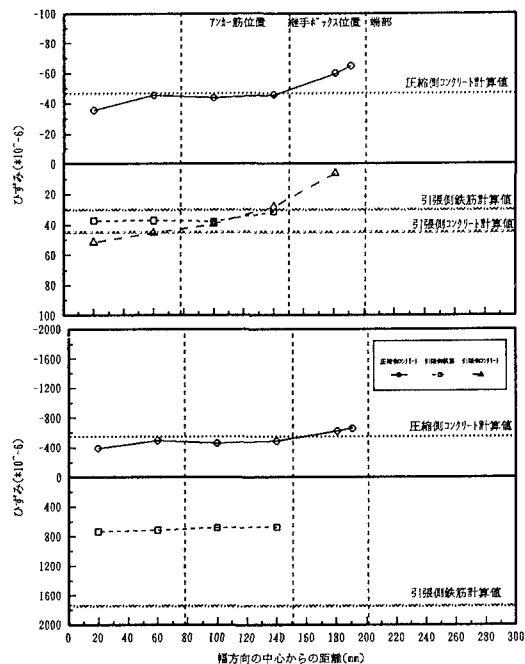


図-1-1 幅方向のひずみ分布 (幅400mm)
(上段: ひび割れ発生前, 下段: ひび割れ発生後)

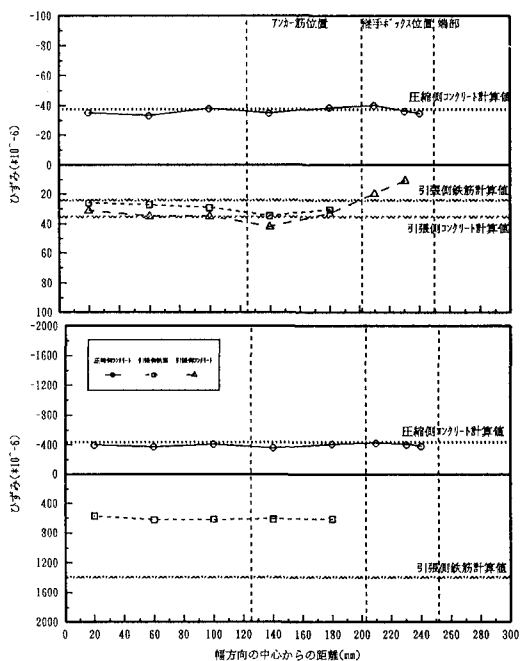


図-1-2 幅方向のひずみ分布 (幅500mm)
(上段: ひび割れ発生前, 下段: ひび割れ発生後)

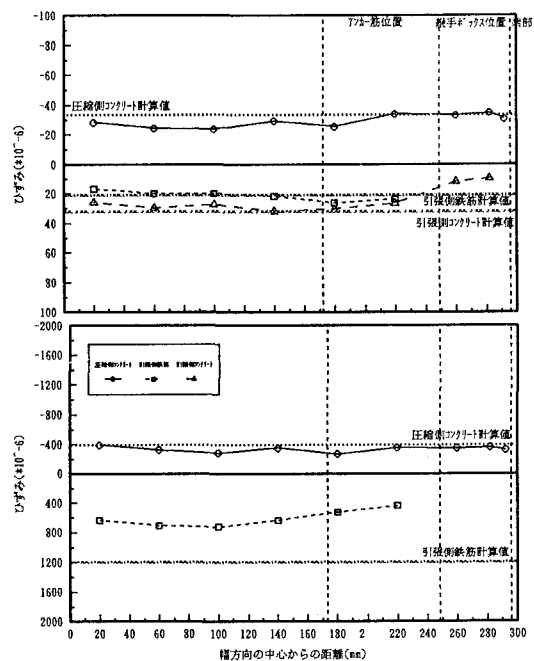


図-1-3 幅方向のひずみ分布 (幅600mm)
(上段: ひび割れ発生前, 下段: ひび割れ発生後)

(c) 引張側鉄筋のひずみ分布

引張側鉄筋のひずみ分布は、ひび割れ発生前と後で傾向が異なる。ひび割れ発生前は、継手ボックス付近で変形が拘束されるため、ひずみが小さくなっている。また、ボルトに作用した力をアンカー筋が供試体中心方向に伝達するため、供試体中心からアンカー筋位置部分にかけてひずみは若干増加する傾向が見られる。実験値と計算値とを比較すると、各ケースともアンカー筋位置で実験値は計算値より10%~20%程度大きな値を示しているが、全体的にみると実験値と計算値とはほぼ一致している。ひび割れ発生後は、幅が同じ供試体間でもひずみ分布は異なり、ひずみのばらつきもひび割れ発生前に比べて大きい。これは、鉄筋のひずみがひび割れの発生する位置やひび割れ幅に影響を受けるためと考えられる。実験値と計算値とを比較すると、各ケースとも実験値は計算値の40%~60%程度となっている。

表-7 実験値と計算値の比較（ひび割れ発生前）

ケース	中心からの距離 (mm)	圧縮側コンクリート			引張側コンクリート			引張側鉄筋		
		実験値 $\times 10^{-6}$	計算値 $\times 10^{-6}$	比率 %	実験値 $\times 10^{-6}$	計算値 $\times 10^{-6}$	比率 %	実験値 $\times 10^{-6}$	計算値 $\times 10^{-6}$	比率 %
300	140	-79.3		124						
	130	-75.3		118	11.7		19			
	100	-66.9		105	36.5		60	38.8		95
	60	-59.3		93	45.5		74	47.5		117
	20	-62.6		98	45.6		75	46.4		114
400	190	-64.6		139						
	180	-59.7		128	6.2		14			
	140	-45.7		98	28.3		63	31.5		105
	100	-43.8		94	39.6		86	38.0		126
	60	-45.6		98	45.4		102	37.2		124
500	240	-34.8		93						
	230	-36.4		98	10.8		30			
	210	-40.2		108	19.7		55			
	180	-38.7		104	33.1		92	30.6		127
	140	-35.0		94	41.9		117	34.6		144
600	100	-38.1		102	34.8		97	29.1		121
	60	-33.2		89	35.1		98	27.2		113
	20	-35.1		94	31.1		87	25.9		107
	290	-30.8		92						
	280	-34.7		104	9.6		30			
600	260	-33.3		100	11.9		37			
	220	-33.8		102	26.6		83	23.8		112
	180	-25.5		77	30.4		95	26.2		124
	140	-29.2		88	32.0		100	21.7		102
	100	-23.8		71	27.4		86	19.9		94
600	60	-24.5		74	29.6		93	20.1		95
	20	-28.3		85	25.9		81	16.9		80

3.4 幅方向の曲げモーメントの分布

幅方向の曲げモーメントは、供試体をワイヤストレーンゲージの位置を中心とした幅40mmの断面に分割し、ひび割れ発生前の荷重代表値600kgfにおける圧縮側コンクリート、引張側コンクリートおよび引張側鉄筋のひずみを直線回帰し、その断面の中立軸位置を求め、分割した各小断面が分担する単位幅あたりの曲げモーメントとして求めた。なお、最端部の主鉄筋を含む断面の幅は、継手ボックスの先端までとし、継手ボックスを含む断面（幅49mm）を一つの独立した小断面としている。また、継手ボックスに近い端部では、その断面に発生する曲げモーメントの計算値と、実験値から求めた小断面が分担する単位幅あたりの曲げモーメントの和との差分を継手ボックス区間の断面の分担する曲げモーメントとした。各ケースにおける幅方向の曲げモーメントの分布を図-14~図-17に示す。図中の○印は実験値を、点線は計算値を示している。なお、計算値は供試体断面を一樣断面としてRC理論に基づいて求めた曲げモーメントである。

これらの図から、幅方向の曲げモーメントの分布は、各ケースとも同様の傾向を示しており、中央から40mmの区間で最小となり、端部に向かって緩やかに増加し、継手ボックスに近い端部で急激に増加し最大とな

っていることがわかる。また、実験値と計算値とを比較すると、セグメント中央部では、実験値は計算値より約30%程度小さな値となっているのに対して、継手ボックスに近い端部では実験値は計算値より約30%～60%も増加している。この曲げモーメントは、千鳥組によって割増しされる分の曲げモーメントを対象としたものであるから、これらの増減は直接セグメントに発生する曲げモーメントの増減ではない。そこで、曲げモーメントの割増率(ζ)を考え、これらの曲げモーメントの増減分を設計用曲げモーメント $(1+\zeta)M$ と比較することにした。表-8はその結果である。表中、上段は最大発生曲げモーメントを、下段はその設計用曲げモーメントに対する増加率を表したものである。この表をみると、幅400mmのときを除くと、幅が大きくなるに従って、最大発生曲げモーメントが大きくなることがわかる。また、割増率が大きくなると最大発生曲げモーメントの増加率が大きくなり、 $\zeta=0.5$ 、幅600mmでは最大20%にもなっている。現状のセグメント幅(幅300mmに相当)でも増加率は $\zeta=0.1$ で3%、 $\zeta=0.5$ で10%程度となっており、設計上はこの程度の増加が限界と思われる。この結果は、割増率にもよるが、セグメント幅1200mm(幅400mmに相当)以上になれば、その影響を無視できず、端部に鉄筋を集中させたり、端部に太径の鉄筋を配するなど、何らかの対応が必要となることを示している。

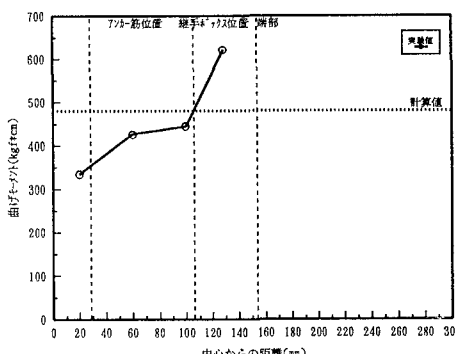


図-14 軸方向の曲げモーメントの分布 (幅300mm)

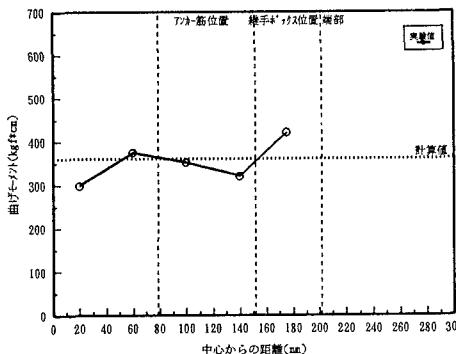


図-15 軸方向の曲げモーメントの分布 (幅400mm)

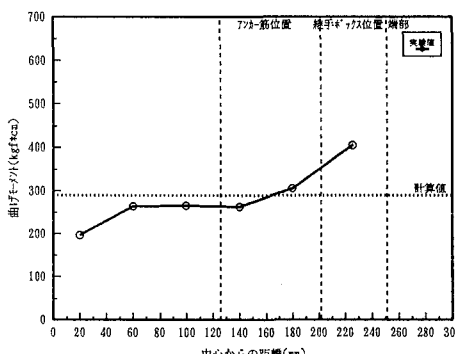


図-16 軸方向の曲げモーメントの分布 (幅500mm)

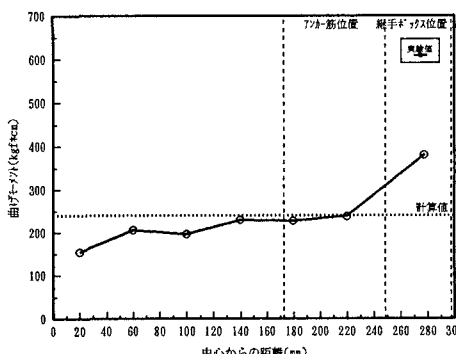


図-17 軸方向の曲げモーメントの分布 (幅600mm)

		表-8 設計用曲げモーメントと最大発生曲げモーメントとの比較			
曲げモーメントの割増し率 ζ	設計用曲げモーメント $(1+\zeta)M$	最大発生曲げモーメント $(1+\alpha)M$			
		幅300mm(900mm)	幅400mm(1200mm)	幅500mm(1500mm)	幅600mm(1800mm)
		増加率 $\alpha=1.30$	増加率 $\alpha=1.20$	増加率 $\alpha=1.40$	増加率 $\alpha=1.60$
0.1	1.1	1.13	1.12	1.14	1.16
		2.7%	1.8%	3.6%	5.5%
0.2	1.2	1.26	1.24	1.28	1.32
		5.0%	3.3%	6.7%	10.0%
0.3	1.3	1.39	1.36	1.42	1.48
		6.9%	4.6%	9.2%	13.8%
0.4	1.4	1.52	1.48	1.56	1.64
		6.6%	5.7%	11.4%	17.1%
0.5	1.5	1.65	1.60	1.70	1.80
		10.0%	6.7%	13.3%	20.0%

($M=1$ とする)

4. 結 論

本研究で得られた知見をまとめると次のとおりである。

- (1) セグメント幅方向の変位は、幅の拡大にともない端部の変位が中央部の変位に比べ大きくなる。
- (2) 変形に対する有効幅が存在し、その有効幅は、セグメント幅が広くなるにつれ狭くなる傾向にある。
- (3) 添接効果によって発生する曲げモーメントのセグメント幅方向の分布は、中央部に比べ端部の方が大きくなる。
- (4) 1200mm(幅400mmに相当)になると、端部の鉄筋径を大きくしたり、配筋間隔を狭くするなどの対応が必要であると考えられる。

5. おわりに

R C平板形セグメントの幅の拡大が、幅方向の応力の分布に与える影響をさらに詳細に検討するためには、以下のことが必要と思われる。

- ①：セグメントの模型は、幅だけでなく高さの比も考慮する。
- ②：幅方向の端部のひずみを知るために継手形状を検討する。
- ③：圧縮側コンクリートの幅方向ひずみおよび配力筋ひずみも計測する。
- ④：載荷方法を検討する。
- ⑤：さらに幅を拡大して実験を行う。
- ⑥：幅400mmに対して再実験を行う。

また、供試体をモデル化するにあたって継手部分はその縮尺を考慮することが難しく、この強度および剛性が実験結果に影響を与えていることは容易に想定できる。今後、これらのことを念頭において実験を進めるとともに、解析的な検討も加えていく予定である。

6. 参考文献

- 1) 助川, 武藤, 中村, 秋山：R Cセグメント巾の拡幅に伴う載荷試験について, 土木学会第46回年次学術講演会概要集, Ⅲ-52, pp126～127, 1991.
- 2) 岩崎, 井口, 小泉, 村上：拡幅にともなう応力度に関する研究, 土木学会第47回年次学術講演会概要集, Ⅲ-9, pp60～61, 1992.
- 3) 岸尾, 伊奈, 杉原, 北嶋：シールドセグメント幅の拡幅について, 土木学会第48回年次学術講演会概要集, Ⅲ-3, pp60～61, 1993.
- 4) 藤木, 中島, 小泉：平板形セグメント幅の拡幅に伴う応力分布について, 土木学会第48回年次学術講演会概要集, Ⅲ-6, pp66～67, 1993.
- 5) 中筋, 奥津, 石田, 小泉, 村上：R C平板形セグメントのセグメント幅に関する研究, 土木学会第49回年次学術講演会概要集, Ⅲ-612, pp1214～1215, 1994.