

# 論文 ジャッキ推力に対するほぞ付きセグメントの支圧耐力に関する実験的研究

中嶋健治\*1 武藤雅俊\*2 林光俊\*3 小泉淳\*4

要旨：ほぞ付きセグメントは従来のRCセグメントと異なり、リング継手が凹凸ほぞのかみ合わせで構成されているため、ジャッキ推力作用時のほぞ凸部に対する支圧の検討が重要となる。そこで、ほぞ付きセグメントの一部を取り出した形状の試験体を製作し、ほぞ幅、鉄筋の有無および鉄筋量をパラメータとした支圧実験を行った。その結果、ほぞ付きセグメントの支圧耐力・割裂引張力・ひび割れ状況および破壊性状などの力学的性能が確認された。

キーワード：ほぞ付きセグメント、ジャッキ推力、リング継手、支圧、割裂

## 1. はじめに

ほぞ付きセグメントは施工性や経済性に優れていることから、欧州では施工実績も多くRCセグメントの主流となってきている。また、国内でも地下鉄やガス導管のシールド工事において導入が検討され、実用化のための各種の性能確認実験が実施されている [1]、[2]。

従来の標準型RCセグメントのリング継手は一般にボルト接合であるが、ほぞ付きセグメントのリング継手は凹凸ほぞのかみ合わせで構成されている。このほぞ付きセグメントはシールドジャッキ使用時にほぞの凸部に推力が作用し、従来の標準型RCセグメントに比べ載荷面が局部的となるので、特にセグメント厚が小さい場合は支圧に対する検討が重要となる。今後のシールドトンネルの大深度化等にもなうジャッキ推力の増加を考慮するならば、汎用性のある合理的な設計法の確立が急務である。

すでに、実物大のセグメントにジャッキ装備推力を載荷する実験が行われており、作用荷重レベルでの安全性は確認されている [2]。本研究では、その破壊性状や終局耐力を確認するために支圧実験を実施した。

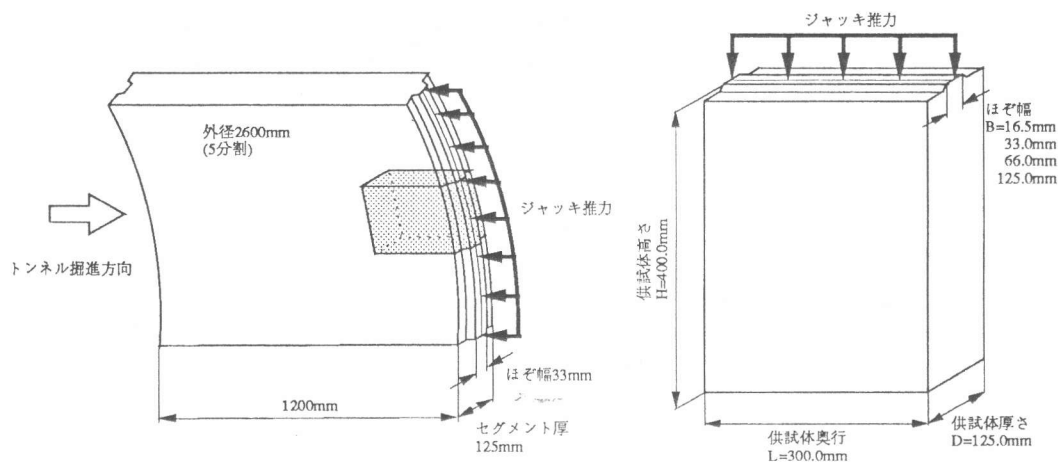


図-1 試験体の形状および寸法

\*1 不動建設(株) 技術開発本部中央研究所, 工修 (正会員)

\*2 不動建設(株) 土木事業本部計画部

\*3 東京ガス(株) 導管技術開発センター

\*4 早稲田大学教授 理工学部土木工学科, 工博 (正会員)

## 2. 実験内容

試験体は、ジャッキ推力が作用するリング継手の一部を取り出した形状とした。図-1に試験体の形状および寸法を示し、表-1に実験ケース一覧を示す。ほぞ部の支圧応力度とコンクリート表面ひずみおよび鉄筋ひずみ分布、ひび割れ性状、破壊性状などの構造特性を比較検討するため、ほぞ(上部)の幅、鉄筋の有無および鉄筋量をパラメータとし、載荷重、コンクリート表面のひずみ、鉄筋のひずみおよび鉛直・水平変位について計測を行った。ここで、鉄筋比( $p$ )は、試験体中央縦断面での割裂補強筋(配力筋を含む)の断面積とコンクリート断面積の比を用いている。図-2に測定位置を示す。試験体は各ケース2体製作し、1体は従来の支圧実験方法と同様に上下端面を超速硬セメントペーストによりキャッピングを施して載荷板との一体化を図り、もう1体については施工時の状況を考慮して、スプレッターのゴムシートを上端面に挟んで載荷を行った。図-3に載荷方法を示し、表-2に早強ボルトランドセメントを用いたコンクリートの配合および硬化したコンクリートの性能を示す。

表-1 実験ケース一覧

ケース	鉄筋の有無	ほぞ幅 B (mm)			鉄筋比 $p$ (%)			
		125 (無し)	66	33*	16.5	0.00 (無筋)	0.21 (D6)	0.48* (D10)
1	無筋		○			○		
2				○		○		
3					○	○		
4		○				○		
5	有筋		○				○	
6				○			○	
7					○		○	
8		○					○	
9				○			○	
10				○				○

\* 基本ケース

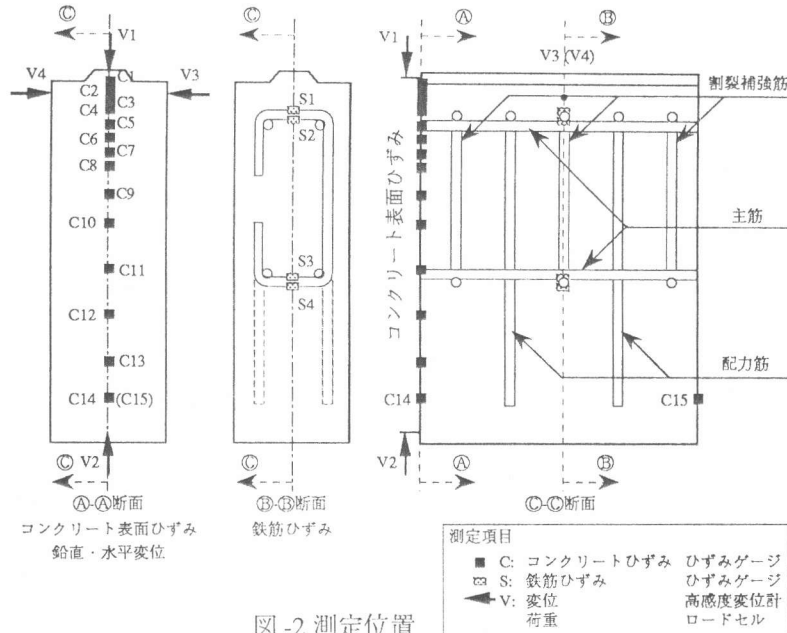


図-2 測定位置

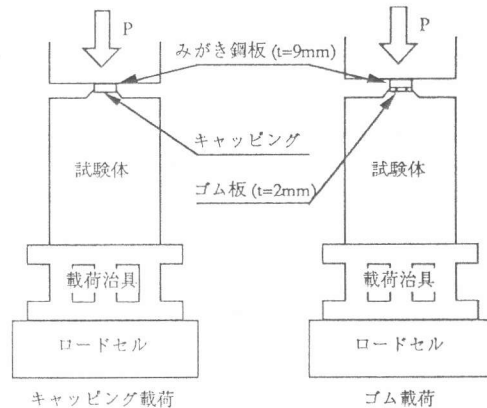


図-3 載荷方法

表-2 コンクリートの配合および硬化したコンクリートの性能

配合			設計基準強度	硬化したコンクリートの性能 (kgf/cm <sup>2</sup> ) 材齢7日		
水セメント比 (%)	粗骨材最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	$f_{ck}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	目標圧縮強度	引張強度	静弾性係数
42	15	12±1.5	480	555	42.8	3.34×10 <sup>5</sup>

### 3. 実験結果

表-3 実験結果一覧

表-3に実験結果一覧を示す。ここでひび割れ発生時支圧応力度 ( $\sigma_{cr}$ ) と破壊時支圧応力度 ( $\sigma_u$ ) は、載荷重をほぞ上端部面積で除して求めた。

#### 3.1 ひび割れ発生時応力度および破壊時支圧応力度

図-4にひび割れ発生時支圧応力度および破壊時支圧応力度と円柱供試体の圧縮強度との比 ( $\sigma_{cr}/\sigma_{c7}$ ,  $\sigma_u/\sigma_{c7}$ ) とほぞ幅の関係を示す。無筋コンクリートの場合および鉄筋コンク

ケース	載荷方法	鉄筋の有無	鉄筋比 p (%)	ほぞ幅 B (mm)	コンクリート圧縮強度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	ひび割れ		破壊	
						Pcr (tf)	$\sigma_{cr}$ (kgf/cm <sup>2</sup> )	Pu (tf)	$\sigma_u$ (kgf/cm <sup>2</sup> )
1	ゴム載荷	無	—	66	571	80.0	404.0	94.1	475.3
2			—	33	571	60.0	606.1	62.7	633.3
3			—	16.5	571	47.3	955.6	47.8	965.7
4			—	125	571	165.2	440.5	165.2	440.5
5		有	0.475	66	590	76.0	383.8	105.8	534.3
6			0.475	33	590	62.0	626.3	84.8	856.6
7			0.475	16.5	590	47.4	957.6	57.4	1159.6
8			0.475	125	590	174.9	466.4	174.9	466.4
9			0.211	33	590	60.0	606.1	84.7	855.6
10			0.845	33	590	60.0	606.1	92.8	937.4
1	キャッピング載荷	無	—	66	571	85.0	429.3	110.0	555.6
2			—	33	571	64.0	646.5	75.1	758.6
3			—	16.5	571	45.0	909.1	57.9	1169.7
4			—	125	571	175.9	469.1	175.9	469.1
5		有	0.475	66	570	79.3	400.5	122.7	619.7
6			0.475	33	570	59.0	596.0	96.3	972.7
7			0.475	16.5	570	51.0	1030.3	73.5	1484.8
8			0.475	125	570	178.5	476.0	178.5	476.0
9			0.211	33	570	53.0	535.4	103.6	1046.5
10			0.845	33	570	73.0	737.4	107.2	1082.8

リートの場合ともほぞ幅が小さくなるに従い  $\sigma_u/\sigma_{c7}$  が増加したが、同じほぞ幅では無筋コンクリートの場合に比べて鉄筋コンクリートの場合が2~29%大きくなった。また、 $\sigma_{cr}/\sigma_{c7}$  は鉄筋の有無による差異は認められなかった。図-5に載荷条件を変えた場合の  $\sigma_u/\sigma_{c7}$  とほぞ幅の関係を示す。鉄筋の有無に関わらずキャッピング載荷の場合が2~28%大きくなった。図-6に  $\sigma_u/\sigma_{c7}$  と鉄筋比 (p) の関係を示す。ばらつきはあるものの p が大きくなるにともない  $\sigma_u/\sigma_{c7}$  の増加が認められた。

#### 3.2 破壊時支圧応力度とほぞ幅の関係

図-7に破壊時支圧応力度と円柱供試体の圧縮強度との比 ( $\sigma_u/\sigma_{c7}$ ) と、支圧分布面積と支圧面積との比 ( $A/A_0$ ) の関係を、土木学会の設計基準式 [3] および六車の実験式 [4] とあわせて示す。

$\sigma_u/\sigma_{c7}$  は従来の基準式と同様に  $A/A_0$  が大きくなると増加する。ただ

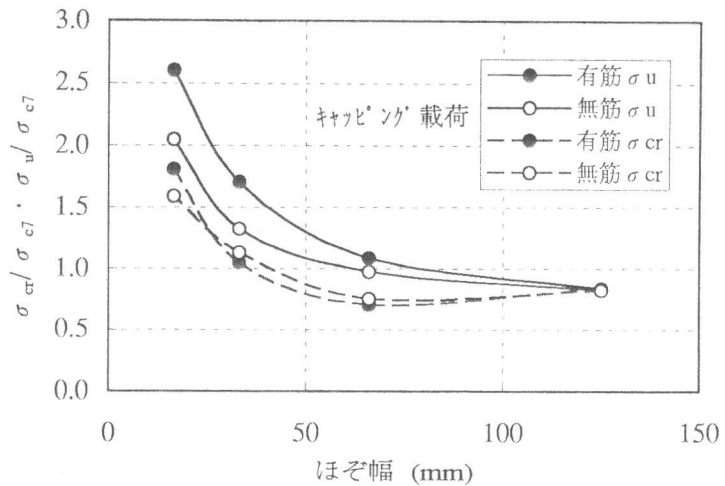


図-4  $\sigma_{cr}/\sigma_{c7}$ ,  $\sigma_u/\sigma_{c7}$  とほぞ幅の関係

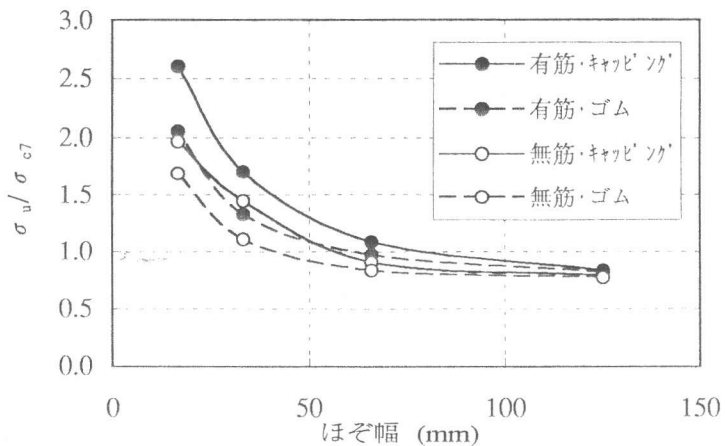


図-5 載荷条件を変えた場合の  $\sigma_u/\sigma_{c7}$  とほぞ幅の関係

し、土木学会の値は設計上  $A/A_a \leq 4$  としているが、実験では  $A/A_a=7.58$  までは  $\sigma_u/\sigma_{c7}$  が増加することが確認された。また、同じ  $A/A_a$  における  $\sigma_u/\sigma_{c7}$  は、無筋コンクリートの場合および鉄筋コンクリートの場合ともに土木学会の設計基準式を下まわった。これはコンクリートの設計基準強度  $f_{ck}$  が土木学会の基準式の適用範囲である  $200 \sim 400 \text{kgf/cm}^2$  に対し  $480 \text{kgf/cm}^2$  とやや高強度であることと、従来の支圧実験が三次元的な載荷を行っており拘束効果が大きいのに比べ、今回の実験では二次元的な載荷であることにより拘束効果が小さかったためと考えられる。図-7で今回の実験値と六車の実験式に着目すると、特にゴム載荷のケースで六車の式(二次元)を下まわっているが、これはほぞ上端面の水平方向の拘束がないためと考えられる。

### 3.3 コンクリートのひずみと支圧応力度との関係

図-8にコンクリート表面の水平方向ひずみ ( $\epsilon_c$ ) の分布の例を、レオンハルトの弾性理論[5]から推定した載荷重  $P=10, 20, 40 \text{tf}$  の時のコンクリートのひずみ分布とあわせて示す。最大水平方向ひずみはほぞ上端面から  $30 \sim 50 \text{mm}$  の位置で生じた。 $\epsilon_c$  がほぼ一定となる位置はほぞ上端面から  $160 \text{mm}$  付近であった。この傾向はすべてのケースについて認められた。無筋コンクリートの場合の  $\epsilon_c$  は理論値から推定したひずみと分布形状が

相似であり、最大水平方向ひずみ発生位置はほぼ理論値と一致した。しかしその大きさは、低荷重時 ( $P=10 \text{tf}$ ) ではほぼ一致したが、荷重が大きくなるに従って実験値の方が大きくなった。こ

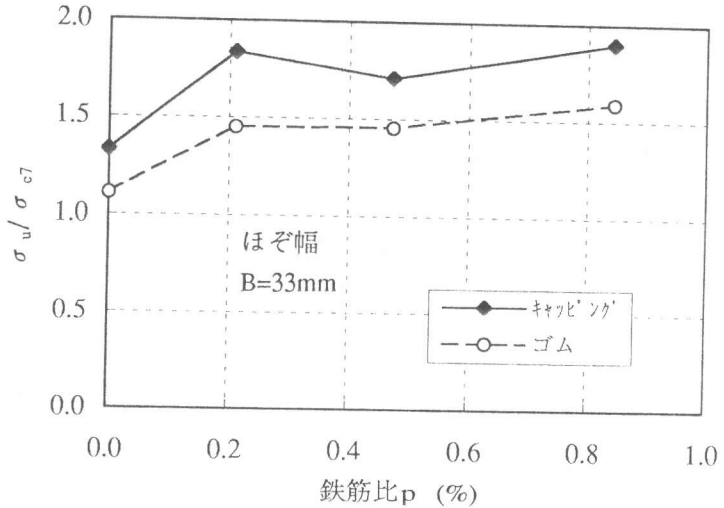


図-6  $\sigma_u/\sigma_{c7}$  と鉄筋比の関係

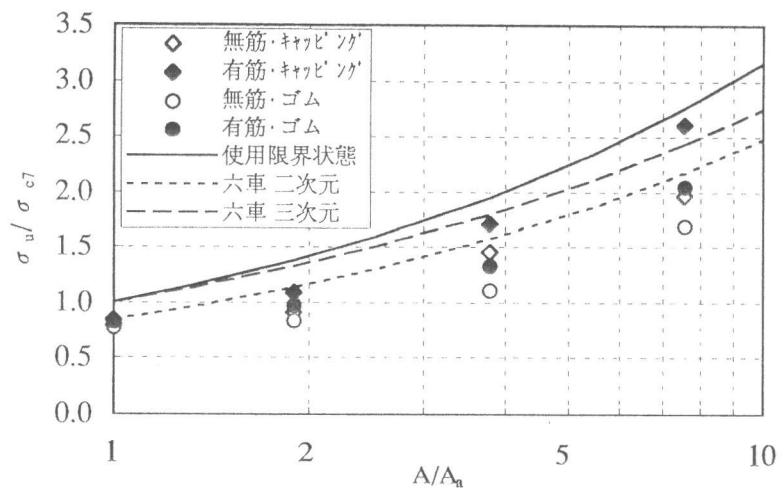


図-7  $\sigma_u/\sigma_{c7}$  と  $A/A_a$  の関係

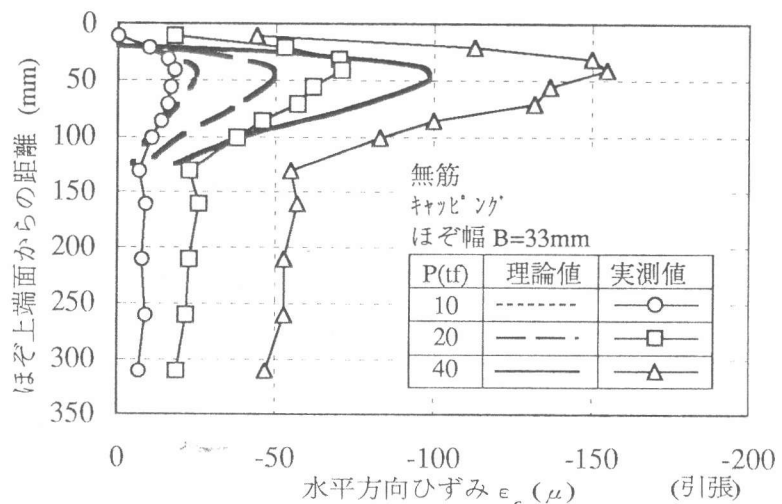


図-8 コンクリート表面の水平方向ひずみの分布

これは理論値が弾性理論を基にしているのに対し、実験値には塑性ひずみが含まれているためであると考えられる。

### 3.4 鉄筋ひずみと支圧応力度との関係

図-9に鉄筋ひずみ ( $\epsilon_s$ ) と支圧応力度 ( $\sigma$ ) との関係の一例を示す。同一位置の鉄筋の上面と下面のひずみの値に大きな差があり、かなり曲げが作用していることがわかる。また、上部割裂補強筋の  $\epsilon_s$  は下部割裂補強筋の  $\epsilon_s$  に比べて大きな値を示した。このとき上部割裂補強筋 (上面) の  $\epsilon_s$  はかなり大きな値を示し、支圧応力度の大きな領域では上部割裂補強筋は曲げ降伏していると思われる。

図-10に載荷重と割裂補強筋に発生した引張力との関係の一例を示す。割裂補強筋の引張力は、ひび割れ発生直前まではレオンハルトの割裂引張力の算定式 ( $T=0.25P(1-B/D)$ ) による値の  $1/9 \sim 1/7$  という小さい値を示している。ひび割れ発生後はこの算定式の値にかなり近づくことから、レオンハルトの算定式が安全側の値を示すことが確認され、またひび割れ発生後に鉄筋が有効に働くことが確認された。

### 3.6 ひび割れおよび破壊性状

図-11に主な試験体のひび割れおよび破壊性状のスケッチを示す。無筋コンクリートの場合および鉄筋コンクリートの場合ともに載荷方法にかかわらず、コンクリートの最大水平方向ひずみが発生するほぞ上端面より下方  $30 \sim 50\text{mm}$  で試験体の中心線に沿った縦ひび割れの発生が目視で観察され、これが上下方向に進行した後、試験体

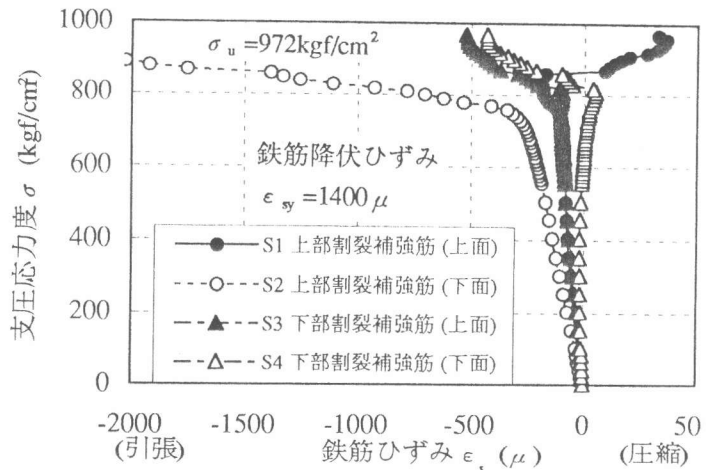


図-9 鉄筋ひずみと支圧応力度との関係

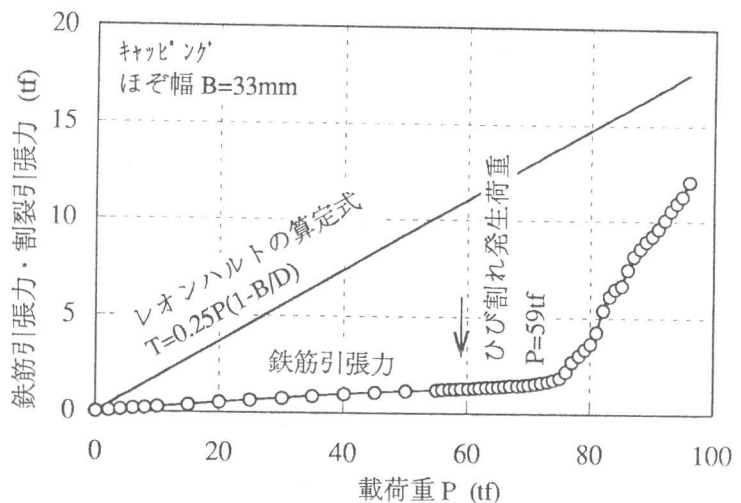
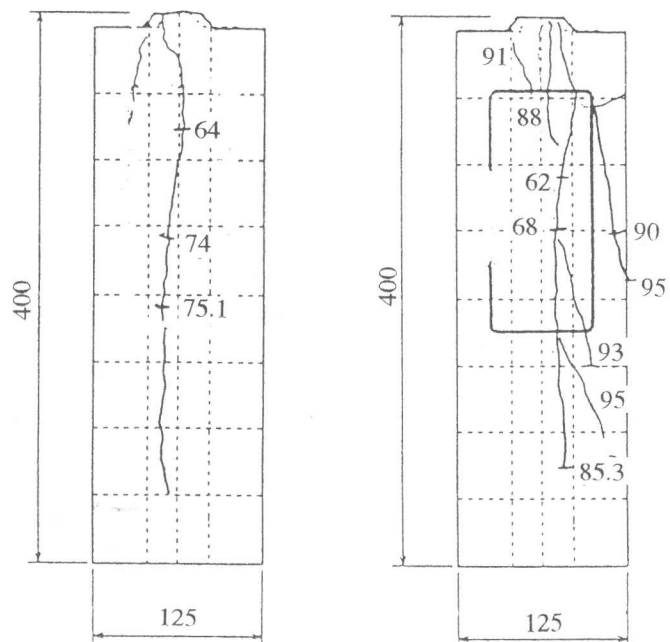


図-10 載荷重と鉄筋引張力との関係



無筋コンクリートの場合 鉄筋コンクリートの場合 (D10)  
図-11 ひび割れおよび破壊性状 (キャッピング ぼぞ幅  $B=33\text{mm}$ )

の破壊に至った。特に鉄筋コンクリートの場合では、割裂補強筋に沿って縦ひび割れが進行した後破壊に至っている。

ひび割れおよび破壊性状はほぞ無しのケース以外はすべて割裂破壊であったが、セグメントの内外に貫通するひび割れは発生しなかった。

#### 4. まとめ

今回の破壊性状・終局耐力確認実験により以下のことが確認された。

- ① 無筋コンクリートの場合と鉄筋コンクリートの場合を比べるとひび割れ発生時支圧応力度 ( $\sigma_{cr}$ ) は大差なかったが、破壊時の支圧応力度 ( $\sigma_w$ ) は無筋コンクリートの場合に比べて鉄筋コンクリートの場合の方が大きな値を示した。このことから、鉄筋はひび割れ発生後の支圧耐力の向上に寄与していることが確認された。
- ② 破壊時支圧応力度 ( $\sigma_w$ ) は、すべてのケースで土木学会の設計基準式 (使用限界状態) の値を下回った。特にゴム載荷の場合には六車の二次元の実験式を下まわった。実工事におけるジャッキ推力の載荷条件は二次元かつゴム載荷の場合に近く、またコンクリート強度も高いので、支圧耐力の算定にあたってこれらの条件を考慮する必要がある。
- ③ 水平方向のコンクリートのひずみ分布は、レオンハルトの弾性理論値から推定したひずみと分布形状が相似であり、最大水平方向ひずみ発生位置はほぼ一致した。その値は低荷重時 ( $P=10t$ ) ではほぼ一致したが、荷重が大きくなるに従って実験結果の方が大きな値を示した。これは理論値が弾性理論を基にしているのに対し、実験値には塑性ひずみが含まれているためであると考えられる。
- ④ 上部割裂補強筋には曲げが作用しており、試験体の破壊時には曲げ降伏している。
- ⑤ 割裂補強筋に発生した引張力は、荷重の小さい間はレオンハルトの算定式による割裂引張力の  $1/9 \sim 1/7$  程度となったが、ひび割れ発生後にはこの算定式の値にかなり近づき、鉄筋が有効に働くことが確認された。
- ⑥ ひび割れおよび破壊性状をみると、ほぞ無しのケース以外はすべて割裂破壊となったが、セグメントの内外に貫通するひび割れは発生しなかった。

以上のことから、ほぞ付きセグメントの支圧耐力・割裂引張力・ひび割れおよび破壊性状などの力学的性能が実験的に確認され、合理的な設計法に対する方向性が得られた。今後は、セグメントに偏心荷重が加わった場合などを想定して実験を行い、データを蓄積してゆく予定である。

最後に、この実験を行うに際して御協力いただいた日本シールドエンジニアリング(株)の大塚孝義氏、齊藤正幸氏ならびに関係者の方々に謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 平出亨・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、Vol.25、No.10、pp.21-32、1994.10
- 2) 林光俊・滝本孝哉・齊藤正幸：シールドトンネル用ライニングの力学実験 (その1、その2)、土木学会第49回年次学術講演会講演概要集、第3部 (A)、p.1330-1333、1994.9
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書【平成3年版】設計編、p.18-19、1991.9
- 4) 近藤泰夫・坂静雄：コンクリート工学ハンドブック、朝倉書店、p.301、1971.8
- 5) F.レオンハルト・E.メニッヒ：続鉄筋コンクリートの設計、鹿島出版会、p.56-66、1984.7