

III-137 小口径シールドトンネルの現場 載荷実験

東京都立大学工学部	正員	山本 稔
東京都交通局高速電車建設本部	"	速藤浩三
"	"	岩田一昭
佐藤工業(株)技術研究部	"	石橋時男
"	"	○ 小嶋啓市

1. まえがき

シールドセグメントの力学的挙動およびその破壊耐力については地上における実験が現在まで数多くなされており、一応の結論が得られている。しかし実際の地山内における状態は今だに推測の域を出ないのが現状である。

今回幸いにも、実物トンネルにおいて現場 載荷実験を行ない、地山内でのセグメント覆工の力学的挙動を調査する好機にめぐまれたので、その実験結果を報告する。

2. 実験概要

実験は昭和45年11月に、図-1に示す都営地下鉄白山工区シールド工事現場内において、水抜き先進導坑として施工されたパイ

ロットトンネル内で実施した。実験を行った地点の土質はN=20~25の締った洪積世の青灰色砂質シルト層である。載荷にあたっては、図-2に示すように35t用センターホールジャッキ2本と $\phi 33$ mm PC鋼棒2本を組合せて容量70tとし、セグメントリングを内側に引張ることにより載荷した。使用したセグメントは図-3に示す形状のスチールセグメントである。このセグメントに以下に示す2種類の加工を行い実験を行った。

(1) リング実験-I (セグメント継手溶接)

各セグメントのセグメント継手部分の主桁に150mm $\times$ 90mm $\times$ 12mmの添接板を当て、溶接したもの(図-4参照)

(2) リング実験-II (セグメント継手ボルト締め)

各セグメントのセグメント継手部分をボルト締めしたもの(図-5参照)

実験の際の他リングの影響を取り除くため、隣接リングの主桁

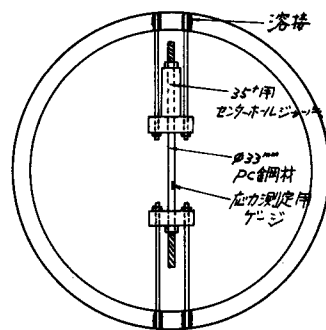
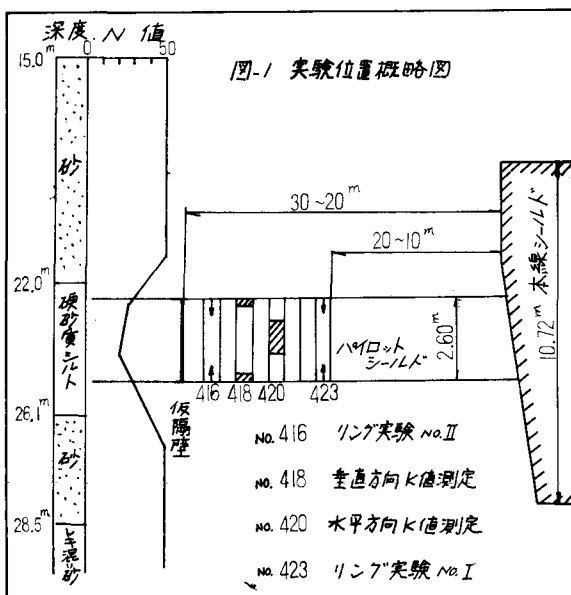


図-2 載荷装置概略図

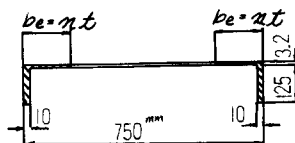


図-3 セグメントの形状

部分を切断し、実験用リングを独立な構造体とした。測定項目はリングに作用する応力と変位の測定である。図-4、5に示すように、応力の測定にはひずみゲージを、変位の測定には自動ダイヤルゲージを用いた。

リング実験-Iでは、荷重重として $P=4$ tずつ増加させて行つた。荷重重3 8.5 tに達したとき、リングの下部荷重点の主桁外側と、そこから左右30°点の主桁内側の3点で座屈が発生し、荷重を増加させることが出来なくなつたので、実験を終了した。

リング実験-IIでは、荷重重として $P=2$ tずつ増加させた。荷重重3 4.8 tに達したとき、リングの上下各荷重点から左右30°点の4点で実験-Iと同様の座屈が発生し、実験を終了した。

3. 関連試験

荷重実験に使用したセグメントリングの性状と地山の特性を把握するために以下の試験を行つた。

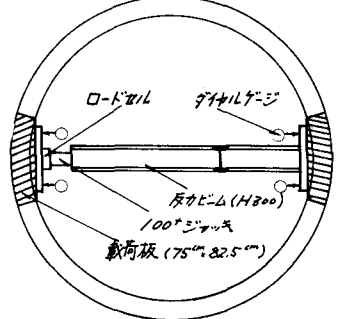
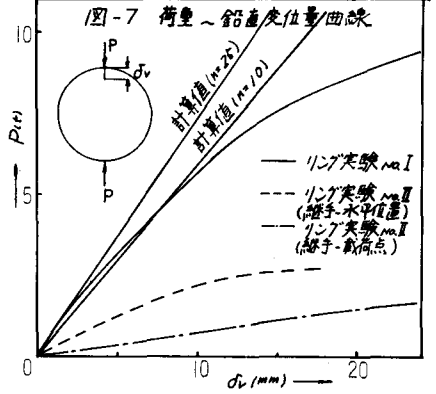
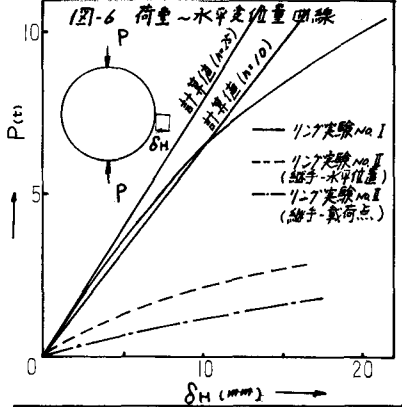
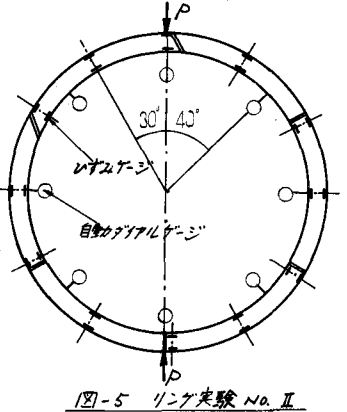
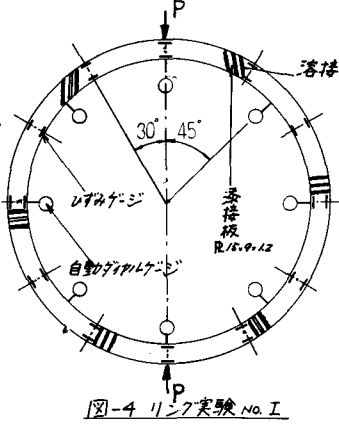
(1) セグメント単体曲げ試験

セグメント単体曲げ試験結果より、許容応力度 $\sigma=1400$ Kg/cm²付近におけるセグメントスキンプレーットの有効幅 $b_e=nt$ は $n=25$ 程度となる。

(2) 地上におけるリング試験

リングとしての特性を知るために、トンネル内実験と同様な加工を行つたセグメントリングについて、地上で荷重実験を行つた。試験結果を図-6、7に示す。リング試験-Iでは、曲げモーメントから有効幅を求めると、セグメントの中央付近では $n=40$ 以上、端部は $n=5\sim10$ 程度と求まる。また、荷重～変位量曲線によると、荷重の小さい内は、スキンプレーットの有効幅が $n=25$ 程度の曲げ剛性を示している。しかし、荷重の増加と共に有効幅は減少の傾向を示し、長期許容応力度付近($P=2.4$ t)では $n=20$ となる。

リング試験-IIにおいては、リング全体の曲げ剛性がリング試験-Iに比較して非常に低下している。リング試験-Iにおける許容荷重 $P=2.4$ tのときの変位量を基準にして、



リング試験Ⅱの曲げ剛性有効率 η を求めると、水平位置に継手がくる場合は $\eta \div 35\%$ 、
 載荷点に継手がくる場合は、 $\eta \div 7.6 \sim 15.2\%$ となる。

(3) 地盤反力係数の測定

地盤反力係数の測定には次のような載荷板を作成し行つた。図-8に示すセグメント1ピースの立リブ3個分を切出し、その内にコンクリートを打設する。これに鋼製板を当て、
 75cm×82.5cmの載荷板を作成し、平板載荷試験を行つた。この測定結果によると、トンネル載荷実験地点の水平地盤反力係数は $K=20 \text{ Kg/cm}$ である。なお、裏込めが十分入っていない地点では $K=10 \text{ Kg/cm}$ 程度の値が得られている。

4. 実験結果及び考察

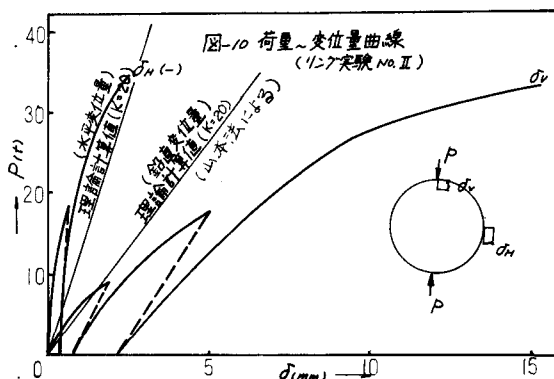
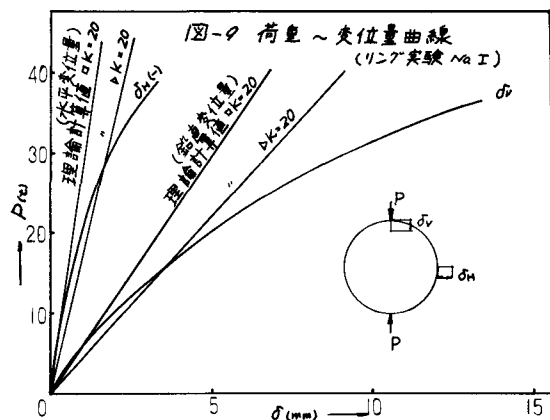
剛性一樣リングとしての計算と、多ヒンジリングとしての計算を行ない、それぞれ継手溶接リングと、継手ボルト締めリングの実験結果に対比させた。剛性一樣リングとしての計算は、地盤反力を三角形分布とする慣用計算法の外に、地山の拘束効果が大きい事を考えて、等分布反力とする場合の計算も合せて行なつた。又リングを16角形よりなる骨組みと考え、弾性地盤上のはりとしての解析も行つた。多ヒンジリングとしては、山本らの方法により解いた。またソ連の方法や、反力出現角度を変化させた計算および接線力を考慮した計算も合せて行つた。

リング実験から得られた荷重～変位量、曲げモーメントの関係を図-9～14に示す。また載荷重10tのときの、変位量、曲げモーメントの測定値と理論計算値との比較を表-1に示す。これを見ると、セグメント継手溶接リングでは、反力出現角度を $\phi=90^\circ \sim 120^\circ$ とした等分布地盤反力形による計算値が実測値とかなりよい近似を示している。また $\phi=90^\circ$ とした弾性地盤上の円環としての計算値は $\theta=90^\circ$ 点の曲げモーメント以外で実測値とかなりよい近似を示す。

継手ボルト締めリングは継手部の曲げモーメントは0でありしかも継手溶接リングに比べ、変位と $\theta=30^\circ$ 点の曲げモーメントは若干大きくなっている。これは多ヒンジリングとしての特色を明確に表わしている。理論値と対比すると、変位および頂点軸力は、かなりよい一致を示すが、 $\theta=30^\circ$ 点90°点の曲げモーメントと軸力は、すべて測定値の方が小さ目である。これは各種計算検討結果より

分布形	$K(\text{kg/cm})$	$\phi(^{\circ})$	$M_{90}(\text{t-m})$	比率%	$\delta_H(\text{mm})$	比率%	$\delta_V(\text{mm})$	比率%
等分布	20	120	1.53	122	0.32	106	1.50	84
・	20	90	1.64	131	0.34	113	1.68	94
三角形	20	90	1.83	146	0.58	193	2.25	126
弾性地盤上の円環	20	90	1.40	112	0.35	116	1.69	95
実験値			1.22	100	0.30	100	1.78	100

表-1



地盤のリング接線方向の反力のため、側部の軸力が減少すると共に、セグメントの弾性変形による地盤反力の出現のため、曲げモーメントが減少したものと考えられる。

継手溶接リングの地山内における破壊耐力は地上における破壊耐力の約3.5倍であり、継手ボルト締めリングでは約1.7倍であった。継手溶接リングとボルト締めリングの破壊耐力を比較すると、溶接リングの方が約10%強かった。この原因の1つは、継手溶接リングは破壊時に頂点に塑性ヒンジを有する分だけ強いものと考えられる。しかし、地上実験では、継手ボルト締めリングは、溶接リングの約1/5の強度しかなくともかかわらず、地山内では、地盤の拘束効果のため、継手がヒンジに近いボルト締めリングでも、溶接リングに比べ強度が大きく低下することはなかった。

5. 結論

トンネル載荷実験により次のことが明らかになった。

- (1) トンネルは地山の拘束効果がきわめて大きく、継手溶接の剛性一様リングにおいては、反力出現角度 $\theta=90^\circ \sim 120^\circ$ の等分布形が実測値とかなりよく近似している。
- (2) 地山内においては、リングの構造如何にかかわらずほぼ同一の強度を有する。このことはセグメントのリングの強度は地山の強度に強く依存することを示し、リングの構造様式は施工性によって定めるべきことを示唆している。
- (3) 継手ボルト締めリングは、地山内において継手をヒ

ンジとした挙動を示す。従って、剛性一様リングに比べわずかではあるが頂点の抵抗モーメント分だけ強度が低下している。(4) 継手ボルト締めリングの破壊耐力は、リングを剛性一様として解いた設計荷重の約6.3倍であった。従って設計上は曲げ剛性一様なリングとして計算しても安全性は十分確保できる。(5) 今回実験を行なった $N=20 \sim 25$ 程度の締った洪積砂質シルト地盤における中小口径シールドトンネルの設計では少なくとも地盤反力係数 $K=10 \text{ kg/cm}^2$ 程度を採用してもよいと思われる。

なお、今回の実験は、締った洪積砂質シルト地盤内で行なったものであり、軟弱粘土層では、また違ったリングの挙動が生ずるものと思われる。従って、このような地盤においてもトンネル載荷実験を行ない、セグメントリングの挙動を正しく把握することにより、実態にあつたセグメントの設計が可能になることを切望する。

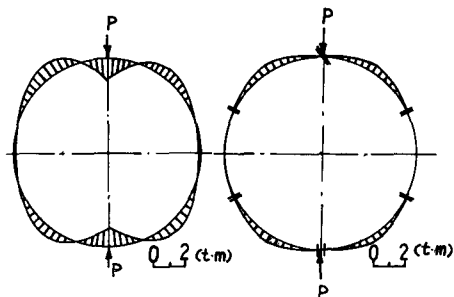
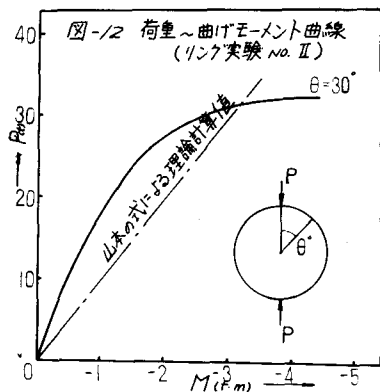
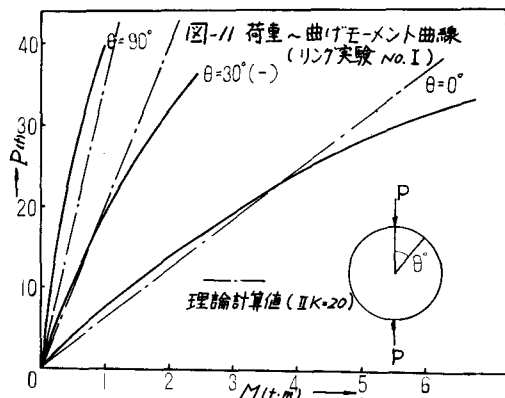


図-13 曲げモーメント分布図 (リング実験 No. I) 図-14 曲げモーメント分布図 (リング実験 No. II)