

# (141) シールドトンネルの耐震性及び覆工条件の影響に関する模型載荷実験

建設省 土木研究所 正員 川 島 一 彦  
 東京湾横断道路(株) 元 山 宏  
 同 上 正員 林 光 俊  
 ○大成建設(株) 正員 志 波 由 紀 夫

## 1. はじめに

シールドトンネルの覆工が長手方向の地震力を受けた場合の挙動は、覆工構造の条件によって異なるものと考えられる。このような観点から、覆工条件の違いがシールドトンネルの長手方向の地震時挙動(破壊性状、耐力、変形性能等)に及ぼす影響を調べるため、リング継手方式および二次覆工条件を種々変えた覆工模型について、トンネル軸方向の交番載荷実験を実施した。本文では、実験の概要と結果を報告するとともに、以前実施した同様の実験で得られた結果<sup>1)</sup>との違いについて述べる。

## 2. 実験概要

実験ケースとしては、リング継手方式として以下の3種類を選んだほか、二次覆工の有無、二次覆工鉄筋量の違い、およびセグメント~二次覆工間のジベル筋の有無による影響を調べるため、表-1に示す8ケースとした。

### ①ダクタイル金具・通常ワッシャー方式

図-1に示すダクタイル(FCD50)金具と通常のメタルワッシャー(厚さ6mm)を用いた方式である。継ぎボルトにはM18(強度区分8.8)を使用した。

### ②ダクタイル金具・弾性ワッシャー方式

継手金具とボルトは①と同じものであるが、弾性係数が鋼の約1/100の弾性ワッシャー(エポキシ樹脂を主体とした合成樹脂をワッシャー状に成形したものを)、図-2に示すように2枚のメタルワッシャーの間に入れた方式である。弾性ワッシャーの機械的性質は、弾性係数 $2.09 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ 、

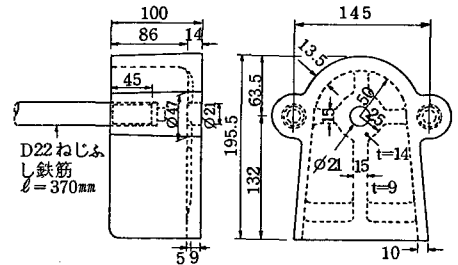


図-1 ダクタイル金具

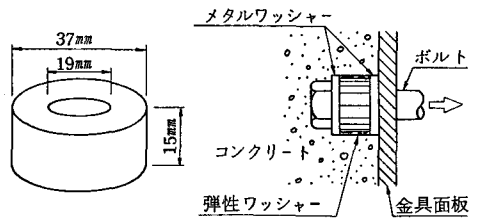


図-2 弾性ワッシャー

表-1 実験ケースおよび実験結果概要

ケース No.	リング継手方式	二次覆工	二次覆工の条件				実験結果							
			軸方向鉄筋	ジベル筋	コンクリート引張強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	クラック発生荷重 (ton)	降伏耐力 (ton)	降伏変位 (mm)	終局耐力 (ton)	終局変位 (mm)	B:ボルト W:ワッシャー R:二次覆工鉄筋 A:金具アンカー	割線変位 1mm	剛性変位 5mm	
1	ダクタイル金具	なし	-----	-----	-----	---	15*	6*	17.6	19.2	B破断	8.7	2.8	
2		あり	D19×4本(SD35)	D10×24本	24.0	23.1	59.8	8.65	64.9	19.4	B破断	28.2	9.7	
3	通常ワッシャー方式	なし	-----	-----	-----	---	24.5	15.8	0.44	33.0	18.3	B破断	22.0	5.6
4		あり	D19×4本(SD35)	なし	24.0	22.1	59.7	8.79	64.0	21.7	B破断	27.5	9.3	
5	ダクタイル金具 弾性ワッシャー方式	なし	-----	-----	-----	---	14*	11*	18.8	55.3	W, B破断	5.1	2.0	
6		あり	D19×4本(SD35)	なし	24.0	16.1	56.5	8.85	64.4	36.4	W, B破断	24.0	8.1	
7	長尺送りボルト 方式	なし	-----	-----	-----	---	16*	9*	18.3	23.2	B破断	5.9	2.3	
8		あり	D19×4本(SD35)	なし	24.0	16.1	59.4	8.71	65.6	23.4	B破断	24.7	8.6	
参考文献1)	ビルトアップ金具 方式	なし***	-----	-----	-----	---	6.9*	5.5*	9.3	66.0	A破断	3.6	1.3	
		あり	D13×3本(SD30)	D13×24本	33.2	17.9	21.5	1.2	33.0	81.9**	R, B破断	21.3	4.5	

\*: 明確な降伏点ではなく、剛性低下の変化が比較的大きい点の概略値。

\*\*: 二次覆工鉄筋破断時の変位。ボルト破断時の変位は105.3mm。

\*\*\*: ボルトボックスはモルタル詰めしていない。剛性は継手1か所当たりの値を5か所当たりに換算した。

降伏耐力 $1106\text{kgf}/\text{cm}^2$ (ワッシャー総体としては $8.76\text{ton}$ )、圧縮強度 $1662\text{kgf}/\text{cm}^2$ (同 $13.17\text{ton}$ )である。

### ③長尺送りボルト方式

金具は用いず、図-3に示すように、ボルトボックス間のアゴ部分のコンクリート(厚さ $400\text{mm}$ )を長尺ボルトで直接締め付ける方式である。ボルトには、ひずみ計測の都合上、M20(強度区分8.8)を溝切り加工して断面積をM18に合わせたものを使用した。ワッシャーとしては、通常のメタルワッシャー(厚さ $6\text{mm}$ )のほか、ボルトボックスの支圧部を保護するためのラージワッシャー( $120\text{mm}$ 角、厚さ $14\text{mm}$ )を併用した。

供試体は、シールドトンネル覆工からリング継手1か所の分担幅をトンネル長手方向に切り出した状態をモデル化したもので、長さ $90\text{cm}$ のセグメント模型6ピースを5個のリング継手により接合した。二次覆工のある

供試体は、図-4に示すように、この上部に所定の配筋を行ってコンクリートを打設し、一体化したものである。なお、二次覆工の施工を前提に、二次覆工のない供試体ではボルトボックスをモルタルで充填した。

供試体への載荷は、セグメント・二次覆工とも一端を固定し他端に加力装置を連結して、変位制御で正負交番の軸力を静的に載荷した。加力中心は、二次覆工のない場合はボルト軸位置、二次覆工のある場合はセグメントと二次覆工の境目とした。写真-1に載荷実験の状況を示す。

## 3. 実験結果

### 3.1 リング継手のみの場合(ケース1,5,7)

実験結果の概要は以下のとおりである。なお、数値データは表-1に示した。

(1) 図-5に荷重~供試体変位の履歴ループの包絡線を示す。圧縮側の変形は極めて小さいため、引張側のみ示した。3種類の継手方式を引張剛性の大きい順に並べると、①ダクタイトル金具・通常ワッシャー方式、②長尺送りボルト方式、③ダクタイトル金具・弾性ワッシャー方式、となる。変形能(ボルトの破断変位)は、この順に小さい。

(2) いずれの継手方式でも、ボルトが破断した。

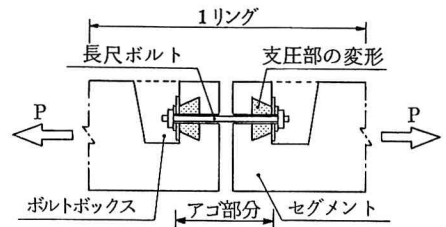


図-3 長尺送りボルト方式

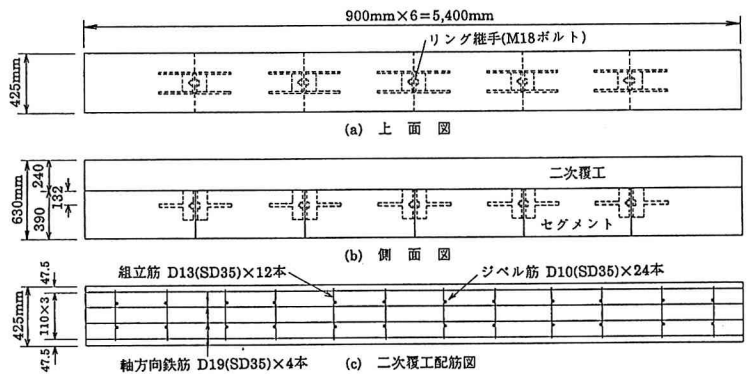


図-4 供試体概要図(ケース2)

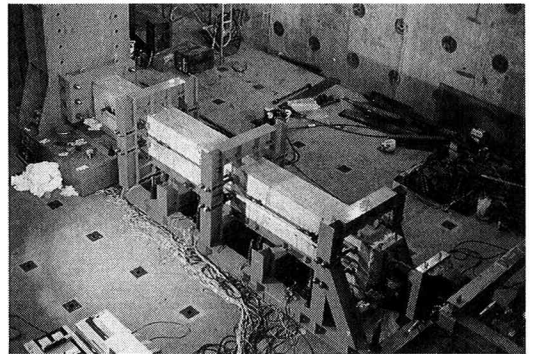


写真-1 載荷実験の状況

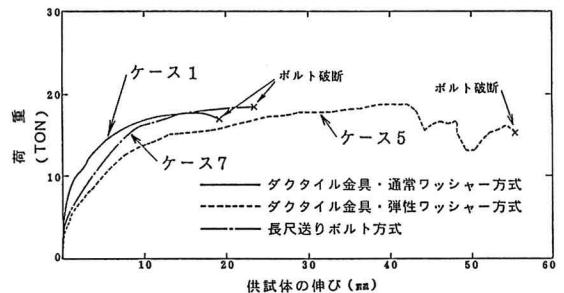


図-5 載荷履歴ループの包絡線(二次覆工なし)

長尺送りボルト方式のボルトボックス部分を含め、セグメントコンクリートにはクラック等の損傷は見られなかった。

(3) 図-6に示すビルトアップ金具を対象とした既往の実験<sup>1)</sup>では、金具面板が『く』の字形もしくは円錐台形に大きく変形したのに対し、ダクタイト金具の面板は、通常ワッシャー方式・弾性ワッシャー方式とも、ボルト破断までに降伏したものの大きな変形は生じなかった。このほか、表-1に見られるように、2種類の金具で耐力、変形能、剛性に大きな違いがある。これについては、今回用いたダクタイト金具は面

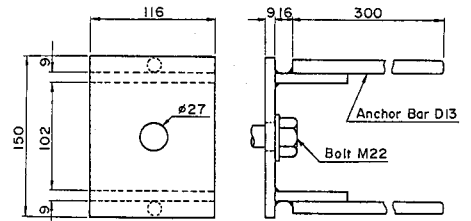


図-6 ビルトアップ金具方式<sup>1)</sup>

板の3辺が固定された形であるため、2辺固定型のビルトアップ金具に比較して面板の耐力と剛性が大きく、その結果、金具の破壊よりもボルトの破断が先となって変形能が小さくなった、と考えることができる。

(4) ダクタイト金具・弾性ワッシャー方式では、弾性ワッシャーも圧壊した。ただし、実験結果からみた弾性ワッシャーの耐力は、前記の機械的性質から推定される値よりも大きくなっている。これは、弾性ワッシャーがコンクリート中に埋め込まれており、その側方変形が拘束されたためと考えられる。同じ理由により、弾性ワッシャー単体の剛性も計算上の値より大きくなっている。この点は、この継手方式の設計に際して留意すべきことである。

(5) 長尺送りボルト方式の引張剛性は、ボルトの変形のみを考えて計算した値よりもやや小さい。これは、ボルト支圧部分のコンクリートの圧縮変形(図-3参照)が無視できない大きさになるためである。この変形は、金具面板およびワッシャーの圧縮性を評価する方法<sup>2)</sup>により、定量的に評価することができる。

### 3.2 二次覆工がある場合(ケース2,3,4,6,8)

実験結果の概要は以下のとおりである。なお、数値データは表-1に示した。

(1) 荷重~供試体変位の履歴ループの包絡線を、図-7に示す。いずれのケースもリング継手のボルトが破断し、二次覆工側は鉄筋が降伏したものの破断には至らなかった。二次覆工にクラックが生じた後は変形が5か所の継手部に分散したため、図-5との比較からわかるように、覆工の変形能(ボルトの破断変位)は二次覆工のない場合と変わらない(例外的にケース6では、ボルト破断直前に二次覆工の鉄筋とコンクリートが分離したため、その影響を受けてボルト破断変位がケース5より小さくなった)。覆工の終局耐力は、ボルトの破断耐力と二次覆工鉄筋の降伏耐力とを合計した値であり、二次覆工鉄筋量の異なるケース3と他の4ケースとに差が現れている。

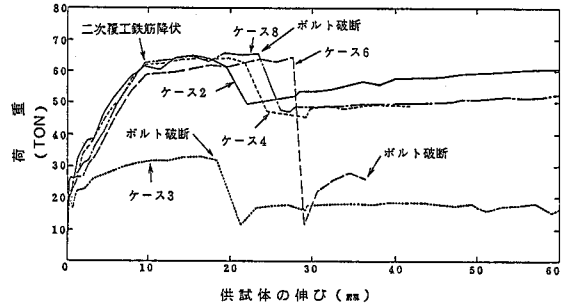


図-7 載荷履歴ループの包絡線(二次覆工あり)

(2) 継手方式別に見た引張剛性は、二次覆工無し(継手のみ)の場合と同じ順序であるが、二次覆工の剛性が相対的に大きいため、相互の差は小さい。

(3) 後述するように、二次覆工には多数のクラックが生じたが、ジベル筋無し(ケース4)では継手部のクラックもそれ以外のクラックも同程度に開いたのに対し、ジベル筋有り(ケース2)では継手部のクラックの方が大きく開き、剛性に若干の差がみられた。

(4) 覆工の破壊は表-2のように進展し、最終的には図-8のような状態となった。これらの表および図には、ビルトアップ金具方式を対象とした既往の実験結果<sup>1)</sup>を比較して示したが、今回の実験結果と次の2点が異なっている。

① 既往の実験では二次覆工のクラックが継手位置だけに発生したが、本実験では継手部以外の位置にも発生し、これと同時にセグメント～二次覆工間の付着切れが生じた。これらの事象は、ケース3では載荷が相当進んでから、その他のケースでは載荷初期に、それぞれ生じた。

これは、二次覆工鉄筋量が多いケースについては、二次覆工に大きな引張応力が発生したことが主たる理由であるが、ケース3も含めると、供試体の断面寸法および二次覆工コンクリートの引張強度の違いにも関係するものと思われる。

② 既往の実験では変位80mm余りで先ず二次覆工鉄筋が破断し、次いでリング継ぎボルトが破断したのに対し、本実験では変位18～36mmでリング継ぎボルトが破断し、二次覆工鉄筋は変位100mmでも破断しなかった。これについては、前述したように、本実験で用いた継手金具の変形能が小さかったことと、多数のクラックが生じセグメントとの付着が切れて、二次覆工の変形能が増大したことが、原因と考えられる。

#### 4. まとめ

シールドトンネルの長手方向の耐震性に及ぼす覆工条件の影響について、覆工模型の載荷実験により検討した結果、以下のことがわかった。

- ① 金具方式のリング継手では、金具の種類によって覆工の耐力・変形能、剛性、および破壊形態が異なる。特に、金具面板の2辺が固定されているか、3辺が固定されているかの影響が大きい。
- ② 二次覆工がある場合、リング継手と二次覆工の破壊順序は、それらの変形能によって決まる。本実験のように継手の変形能が二次覆工の変形能よりも小さい場合は、リング継手が先に破壊することとなる。
- ③ 二次覆工の軸方向鉄筋量が多い場合には、二次覆工のひび割れが継手部以外の位置にも生じ、さらに、セグメント～二次覆工間の付着切れが起きやすくなる。

なお、本実験は、東京湾横断道路(株)と建設省土木研究所との共同研究として実施したものである。

#### 参考文献

- 1) 川島・大日方・加納・志波：交番載荷実験に基づくRCシールドセグメントの力学特性、第19回地震工学研究発表会 講演概要、pp.361～364、1987年7月。
- 2) 村上・小泉：シールド工専用セグメントのセグメント継手の挙動について、土木学会論文報告集 第296号、pp.73～86、1980年4月。

表-2 破壊の進展状況の比較 (数値は供試体の変位量)

本実験 ケース2 ダクティル金具 二次覆工鉄筋量=D19×4本	本実験 ケース3 ダクティル金具 二次覆工鉄筋量=D13×3本	既往の実験 <sup>1)</sup> ビルトアップ金具 二次覆工鉄筋量=D13×3本
①二次覆工にクラック発生 (継手位置) 0.18mm	①二次覆工にクラック発生 (継手位置) 0.19mm	①二次覆工にクラック発生 (継手位置) 0.2mm
②二次覆工にクラック発生 (継手部以外の位置)、同時にセグメント～二次覆工間の付着切れ発生 1.58mm	②二次覆工鉄筋降伏 0.44mm ③二次覆工にクラック発生 (継手部以外の位置)、同時にセグメント～二次覆工間の付着切れ発生 11.4mm	②二次覆工鉄筋降伏 1.2mm
③二次覆工鉄筋降伏 8.65mm	④ボルト破断 18.3mm (二次覆工鉄筋は破断せず)	③二次覆工鉄筋破断 81.9mm
④ボルト破断 19.4mm (二次覆工鉄筋は破断せず)		④ボルト破断 105.3mm

ケース4,6,8の破壊の進展状況は、ケース2と同様である

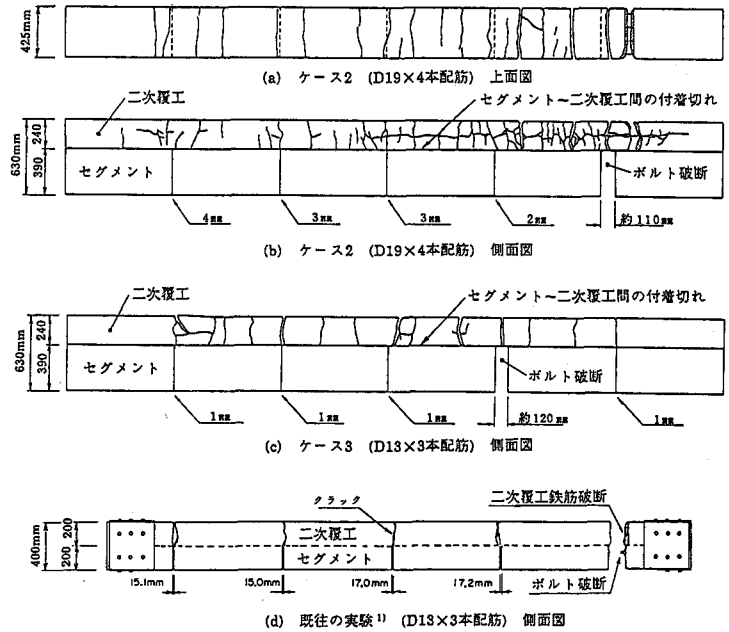


図-8 供試体の破壊状況