

(149) 二次覆工を有するシールドトンネルの縦断方向の耐震設計法

東京湾横断道路株式会社 元山 宏
 同上 三木 克彦
 同上 ○林 光俊
 ㈩オリエンタルコンサルタンツ 田中 努

1. はじめに

一般にシールドトンネルは、一次覆工のみでは本来可撓性に富む構造物であるが、二次覆工を設けると一次覆工だけの状態に比べて剛性が著しく高まり、耐震性を検討する場合の剛性評価方法と耐震性の照査と経済性の確保に苦慮しているのが現状である。

東京湾横断道路では、重量付加と防水のために40cm厚の二次覆工を設ける必要があり、上記の問題に対処するため、実験と種々の耐震検討を重ねてきた。その結果、①設計地震動レベルでは二次覆工にひびわれが発生すること、②ひびわれ部の鉄筋のばね作用がみかけの自由長という概念で説明できること、③トンネル剛性が変化しても地盤変位の伝達率がほとんど変化しないこと等が確認できた。筆者らはこれらの成果に基づき、トンネル縦断方向については二次覆工を構造補助部材と考える設計思想を提案するとともに、単純かつ合理的で汎用性のある耐震設計法をとりまとめることができたので、以下に報告する。

2. 東京湾横断道路シールドトンネルの構造と実施している実験および設計検討

東京湾横断道路は、川崎と木更津を結ぶ延長約15kmの道路であるが、その内の大型船舶の航行の多い川崎側の9.5kmをシールドトンネルとしている。本トンネルの断面は高速道路2車線を確保するために、外径14mと過去に例のない大断面となっている(図-1参照)。使用するセグメントは鉄筋コンクリート平板形セグメントを基本とし、幅1.5m長さ3.5m厚さ65cmで、1ピースの重量は約10tという大型のものである。リング継手は耐震設計上、M36程度のボルトによる継手を1断面45箇所と想定して検討を進めている。二次覆工は、厚さ40cmで、トンネル軸方向には後述の理由でD16-ctc150、内外各1段程度の配筋を必要としている。

本トンネルの耐震設計のために、種々の状態に対する覆工剛性の評価方法や覆工歪の集中の可能性、覆工間の付着や二次覆工ひびわれ部の鉄筋の挙動などの解析検討を行い、さらに、建設省土木研究所との共同研究により覆工の部分モデルに対する軸方向載荷実験を行っている。また、本トンネルを対象とした民間研究グループの実験や解析もあり、これらも参考になるところが大きい。

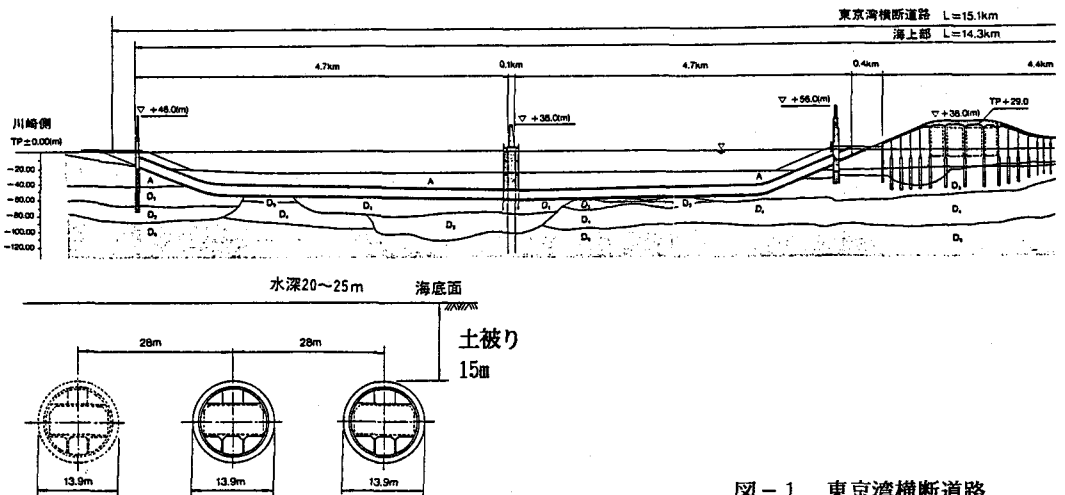


図-1 東京湾横断道路
シールドトンネルの構造

3. 二次覆工に発生するひびわれとトンネル縦断方向の剛性

シールドトンネルは多数のセグメントと継手で構成され、二次覆工を有する場合には、一次覆工と二次覆工との付着強度や、二次覆工コンクリートに生じたひびわれによるこの部分の鉄筋のばね作用が影響するなど、全体の剛性評価は難しい問題となっている。筆者らは、このような非線形の複雑な挙動について、土木研究所と共同で軸方向の載荷実験を行って把握するとともに、非線形ばねとジョイント要素からなるモデルを用いて解析的にも検討し、実験時の挙動や測定値との比較により、ほぼ次のような挙動になることがわかった。ただし、以下の挙動は、二次覆工の鉄筋量・コンクリート強度・リング継手の剛性等により微妙に変化するものである。

二次覆工にひびわれが生じるまでは、コンクリートが引張りに抵抗する。しかし、 $\sigma_{ck} = 240 \text{ kg/cm}^2$ の二次覆工のコンクリートが引張り強度に達する歪は、 1×10^{-4} 未満であるのに対し、設計荷重レベルの地震時には、本トンネルの場合、トンネル軸方向の地盤の歪が 2×10^{-4} 前後になると想定されることから、地震時にはひびわれが生じているものと考えられる。ひびわれが生じると、付着の切れた部分の鉄筋がばね作用をする。異形鉄筋の付着特性は、鉄筋節部のコンクリートに亀裂を生じながら滑り、より大きな付着力を生み出すものであるから、実際に付着強度に達する部分は極少ないものの、比較的長い「みかけの自由長」を持つ。二次覆工のひびわれは、まずリング継手近傍に生じ、つづいて他の位置にも発生する。リング継手以外の位置にひびわれが生じると、ほとんど同時に覆工間の付着が切れてずれ始める。その後、二次覆工鉄筋がリング継手の降伏が生じる。

このような覆工の変化に伴い、トンネル軸方向の剛性は大きく変化する。覆工の部分モデルの載荷実験から得られた荷重～変位曲線を図-2に示す。同図の1リングの伸びが2mm程度までの勾配の変化は、二次覆工のひびわれと覆工間の剥離の増加によるところが大きく、鋼材の降伏によるものではない。同図の各変位を受けたときの覆工の剛性は除荷時に測定される剛性であり、割線剛性にほぼ等しい。この引張剛性(EA)の変化を図-3のようになる。二次覆工のあるトンネルの剛性は、初期には非常に大きいものの、ひびわれや覆工間の剥離、鉄筋のばね作用により、変位の増加に伴って急激に低下し、その後は一次覆工のみの剛性に漸近することが分かる。

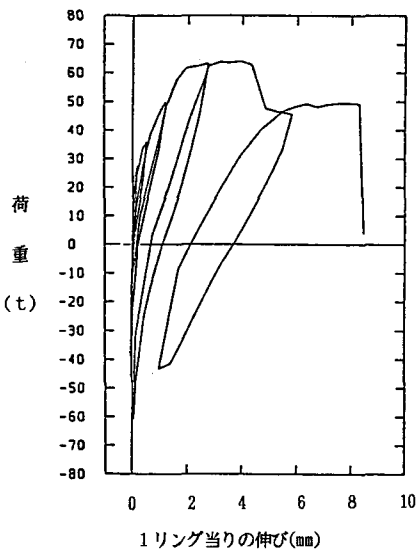


図-2 覆工の部分モデルの載荷実験から得られた荷重～変位曲線

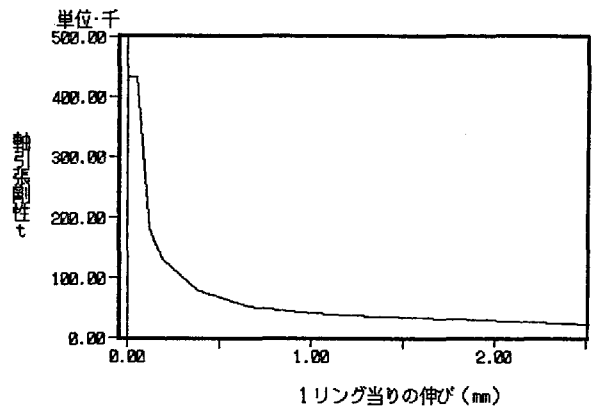


図-3 引張剛性(EA)の変化

4. 歪の伝達率と覆工各部の応力

東京湾横断道路におけるトンネルの耐震設計は、応答変位法によることを基本とし、地震応答解析により照査を行っている。これらはいずれも広義の応答変位法に基づいており、トンネル覆工を弾性支承上の梁としてモデル化し、地盤の応答変位を支承である地盤ばねに作用させて、覆工に生じる応力を解析する方法である。この方法では、トンネルの剛性と地盤ばねの剛性の大小関係により、トンネル覆工に生じる歪や断面力が変化することになる。

一般に「シールドトンネルの歪≒地盤の歪」と言われるが、これまでのトンネルは、中小口径で二次覆工のないものが多く、東京湾中央部に比べると比較的硬い地盤中に建設されており、本トンネルはそのような条件の外に位置するため、改めて検討を行った。

本トンネルの海底平坦部の平均的な地盤条件に対して応答変位法を用いて、地盤歪の伝達率を計算すると、前述のような覆工の変化に応じて、表-1のようになった。

表-1 剛性と歪の伝達率

覆工の条件・状態	剛性 (EA) (t)	歪の伝達率 α	軸引張力 (t)
① 二次覆工のひびわれ無し	6.5×10^7	0.85	11100
② 二次覆工のひびわれあり	1.5×10^7	0.96	2900
③ 一次覆工のみ	5.0×10^6	0.99	990

表-1より、二次覆工にひびわれがない状態①では、伝達率は、一次覆工のみの場合③に比べて小さいが、ひびわれが生じる状態②と③とはほとんど変わらないことが分かる。しかし、剛性の大小により算定される軸力には大きな差が生じる。

さて、本トンネルでは複雑なトンネル覆工の挙動を解析的に把握できるように、非線形ばねとジョイント要素からなる図-4のような解析モデルを作成し、実験値をかなりの精度でシミュレートできた。このモデルを用いて表-1のような状態の場合に覆工を構成する各部材の応力を調べると、表-2のようになった。

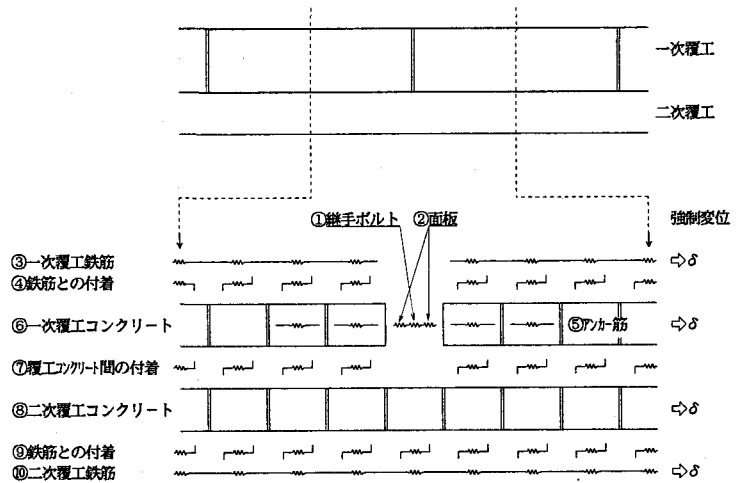


図-4 覆工非線形の解析モデル

表-2 覆工を構成する各部材の軸引張力 (t)

覆工の条件・状態	一次覆工		二次覆工	
	リング継手	セグメントコンクリート	鉄筋	コンクリート
① 二次覆工のひびわれ無し	880	2010 *	420	9800
② 二次覆工のひびわれあり	940	1530 *	1960	1370 *
③ 一次覆工のみ	990	990 *	—	—

注：*印はセグメント中央部、他は継手部の値

表-2より、リング継手に生じる引張力は、二次覆工に発生するひびわれが少ないほど小さく、その変動率は小さいことがわかる。しかし、セグメントコンクリートに生じる引張力は、逆に二次覆工に発生するひびわれが少ないほど大きくなる。また、二次覆工に全くひび割れが発生していない状態(表-2の①)では、覆工全体の軸力の大半を二次覆工が負担している。

5. 提案するトンネル縦断方向の耐震設計法

これまで述べたように、二次覆工を有するシールドトンネルの軸方向の剛性評価はかなり難しいものの、定性的には一次覆工のみの場合に比べ、剛性は高くなりトンネル全体の発生断面力は増加するが、リング継手の目開き量を二次覆工が抑制する結果、リング継手の発生断面力は減少し（その変動量は小さい）、その反面セグメント本体の発生断面力は増加することが判明した。

これに基づき、次のような耐震設計上の割り切りをして、設計を行う方法を考案した。

(a)一次覆工の設計

リング継手は、一次覆工のみの剛性により断面力を算出して、応力度の照査を行う。セグメント本体は、リング継手位置では二次覆工にひびわれが生じると考えるが、セグメントと二次覆工は一体として挙動するものとして剛性評価を行い、応力度の照査を行う。（図-5参照）

(b)二次覆工の設計

トンネル軸方向については、二次覆工を構造補助部材と考える。軸方向の鉄筋は、二次覆工コンクリートの引張強度の20～30%増の抵抗力を持つようを配筋し、すべて連結させるものとする。

①二次覆工の鉄筋量の設定理由： 二次覆工にひびわれが発生しても、コンクリート強度の20～30%増の配筋をしておけば、二次覆工に入るひびわれを分散できる。

②二次覆工鉄筋を連続させる理由： 剛性を低下させるためや施工性から鉄筋を連続しない構造とした場合、鉄筋が不連続となった箇所の一次覆工に応力が集中する（例えば9mごとの施工目地を不連続とした場合、一次覆工のみの状態に比べて不連続箇所のリング継手は隣の6カ所のリング継手の変形量を負担することになる）可能性がある。従って、一次覆工への予想外の応力集中を避けるため、二次覆工は一樣部材になるよう鉄筋を連続させる。

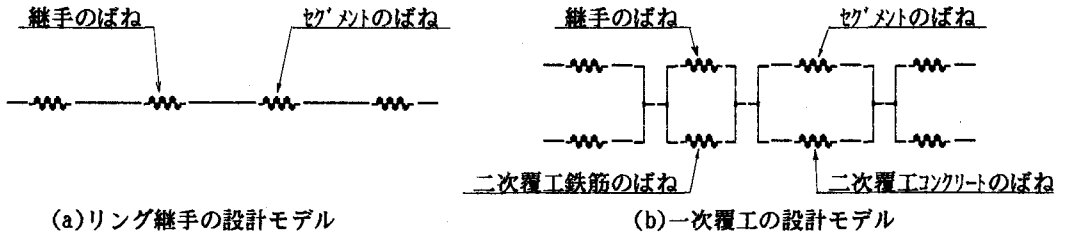


図-5 設計モデル

6. おわりに

一般に鉄筋コンクリート構造物の設計は、コンクリート全断面有効の剛性評価を行い、発生する応力に抵抗できる配筋を行うが、地中のトンネルは橋梁のような自重に起因する軸方向の破壊の進行はなく、また、基本的には構造主部材は一次覆工であることから、本方法を用いても安全性を損なうことはなく、経済的な設計ができるものとする。

最後に、「東京湾横断道路シールドトンネル検討会」の東京都立大学教授の今田委員長、東洋大学助教授の小泉委員、建設省土木研究所耐震研究室長の川島委員をはじめとする各委員の方々に終始貴重な助言をいただいたことを記し、深く感謝の意を表します。

【参考文献】

◆①マッシュパなコンクリート中の異形鉄筋の付着モデル，周礼良・二羽淳一郎・岡村甫，第2回構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集，1983.10 ◆②シールドトンネルの軸方向特性のモデル化について，小泉淳・村上博智・西野健三，土木学会論文集第394号/Ⅲ-9，1988.6 ◆③シールドトンネルの耐震性に関する研究-（その5）軸方向正負交番荷重を受けるシールドトンネル模型の載荷実験-，川島一彦・杉田秀樹・加納尚史，土木研究所資料No.2649，S 63.7