

シールド洞道のリング継手の地震時挙動

Dynamic Behaviors of Ring Joint of Shield Tunnels during Earthquakes

田 村 重四郎*・桑 原 弘 昌**・鈴 木 猛 康***

Choshiro TAMURA, Hiromasa KUWABARA and Takeyasu SUZUKI

1. は じ め に

シールド洞道の地震時挙動のメカニズムを明らかにするため、横浜市内に建設された地中送電用シールド洞道(外径 5100 mm, RCセグメント)において地震観測を実施している。現在までに、昭和 59 年 9 月 14 日長野県西部地震(M=6.8, 観測地点における地表の最大加速度 12 gal), 昭和 60 年 10 月 4 日千葉・茨城県境で発生した地震(M=6.1, 同 53 gal)などで、周辺地盤の加速度、洞道のひずみが記録された。

ここでは特に、シールド洞道のリング継手の挙動に注目し観測記録に基づいて考察を行ったので報告する。

2. シールド洞道の覆工構造

シールド洞道の覆工は、シールド機による掘削の直後に地山を直接支持して所定の内空を保持する一次覆工と、その後その内側をコンクリートでライニングする二次覆工とに分けられる。一次覆工の施工には、シールドの内部で、数個に分割された鉄筋コンクリート製または鋼製等のセグメントと呼ばれるブロックを、ボルトでリング状に組み立てながら各リングを洞道軸方向に結合させていく方法をとることが多い(図 1)。このようにして建設されるシールド洞道は、剛性の高い多数の部材を継ぎ、組み合わせた構造体であるといえることができる。

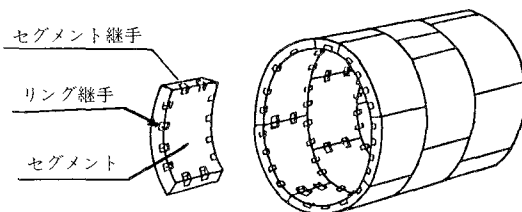


図 1 シールドトンネルの覆工構造

*東京大学生産技術研究所 第 1 部

**研究生 東京電力株式会社

***受託研究員 ㈱熊谷組

シールド洞道の軸方向の剛性を評価する方法として、圧縮に対してはセグメントのみが抵抗し、引張に対しては、各リングを結合するリング継手とセグメントとをそれぞれ等価なバネに置きかえ、これをつないで一様な直列バネとして等価な剛性を算出する方法がある。

3. 地震観測の概要

(1) シールド洞道の諸元

本シールド洞道の諸元は次のとおりである。

- ①セグメントリング 外径: 5100 mm,
内径: 4550 mm, 分割数: 6
- ②セグメント 桁高: 275 mm, 幅: 900 mm
- ③ボルト M 24 (10.9 T), 21 本/Ring

(2) 地形

観測地付近は、図 2 に示すように溺れ谷地形をなしていて幅約 80 m で南北に長い沖積地盤であり、洞道はこの地形を斜めに横断している。図 3 は当該シールド洞道の軸線に沿う縦断面図である。当該地域の表層は、最大厚さ約 20 m の N 値 0 ~ 2 の比較的均一な沖積粘性土層で、その下は N 値 50 以上の土丹層になっている。P S 検層によれば、沖積粘土層および土丹層で、せん断弾性波の伝播速度はそれぞれ約 110 m/sec および 750 m/sec である。

(3) 測定

洞道の測定断面は、図 3 の A ~ E の 5 断面で、A ~ D の各断面は沖積層内、E 断面は土丹層内にそれぞれ位置する。各断面には、セグメントリングの左右側壁(セグメント部)にゲージ長 50 cm の軸方向ひずみ計、および断面の変形を測定するためにトンネル内面円周方向に取り付けたゲージ長 50 cm のひずみ計が設置されているが、D 断面にはさらに、リング継手を中間に挟むように設定された 2 点間(以下ジョイント部と呼ぶ)の平均変形を測定するため同様のひずみ計が設置されている。また、地盤の挙動を把握するために、土丹層および沖積層に加速度計が配置されている。

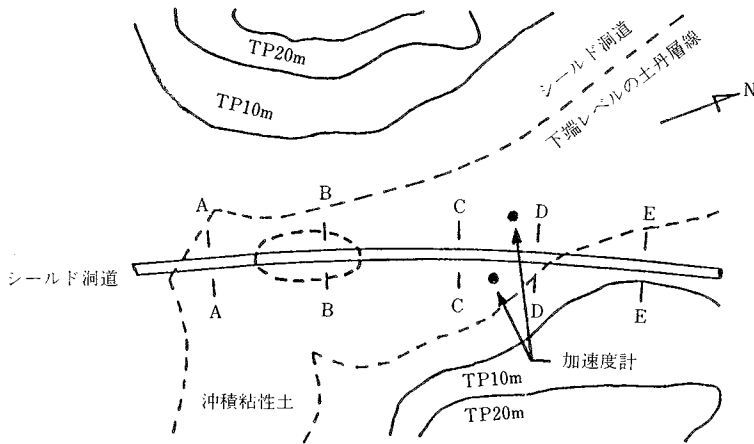


図2 平面図

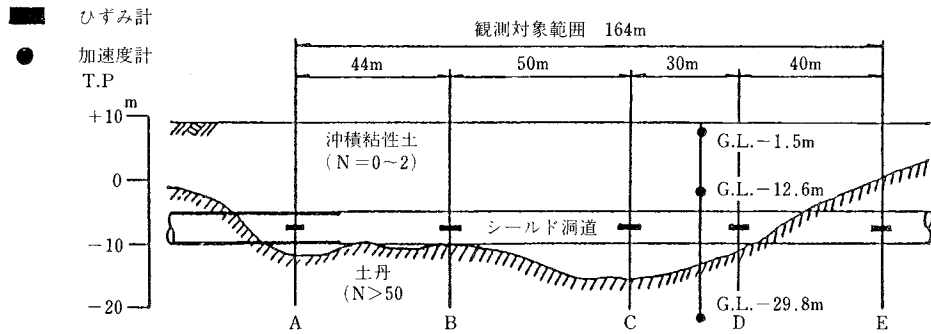


図3 縦断面図

4. リング継手(軸方向)の地震時の挙動

(1)地震観測結果

図4は、千葉・茨城県境で発生した地震の際得られたひずみ記録で、D断面の同一測定位置におけるセグメント部およびジョイント部の軸方向ひずみの波形を並べて示したものである。2つの波形は、幾何学的に相似しており、かつ位相も同じであることが認められる。本測定位置に相対する側壁における同種の2つの波形についても、同様な性質があることが確認されている。

D断面の各部位の最大ひずみは、地震動の主要動部ではほぼ同時刻に発生している。そこで、この時刻における左右側壁のひずみの平均値すなわち軸ひずみを求め、比較したのが表1である。前述のようにジョイント部の軸ひずみにはリング継手の変形とセグメントの変形が含まれている。そこで、この部分のセグメントの変形がセグメント部の変形と同値であるとして、1

個所のリング継手の変形量 δ_j とセグメント1ヶ当りの変形量 δ_{SG} を分離し、その倍率 δ_j/δ_{SG} を求めて併せて表に示してある。

昭和59年9月14日長野県西部地震で得られた記録および、昭和58年8月8日神奈川・山梨県境で発生したM6.0の地震の記録についても同様の手順で整理した結果が表に示されている。表よりひずみで3~5倍、変形量で1~2倍程度リング継手の変形がセグメントに比べて優勢であることがわかった。これらの値は、地震動の強さを考慮して評価する必要がある。

(2)数値計算

地震時におけるリング継手の変形を明らかにするため、観測を行っているシールド洞道を、セグメント(SG)~ボルト(B)~地盤(S)系としてモデル化し、その変形特性を有限要素法で検討した。トンネル軸と半径を含む2つの面で解析対象断面を切り出し、平面変形条件の下で、軸方向に一定の変位を与えて、セグメントおよび周辺地盤の変形状態を計算した。図5に

表1 観測されたリング継手・セグメントのひずみと変形

地震名 (震央位置)	マグニチュード	震央距離 (km)	① セグメント部の 最大軸ひずみ (μ)	② ジョイント部の 最大軸ひずみ (μ)	② ① ひずみ倍率	③ セグメントの 変形量 δ_{sc} (cm)	④ リング継手の 変形量 δ_j (cm)	④ ③ 変形量の倍率
千葉茨城 県境	6.1	61	3.96	12.53	3.2	3.56×10^{-4}	4.26×10^{-4}	1.2
昭和 59 年 長野県西部 地震	6.8	200	4.75	20.43	4.3	4.28×10^{-4}	5.90×10^{-4}	1.4
昭和 58 年 8 月 8 日 神奈川・ 山梨県境	6.0	60	4.15	21.53	5.2	3.74×10^{-4}	8.72×10^{-4}	2.3

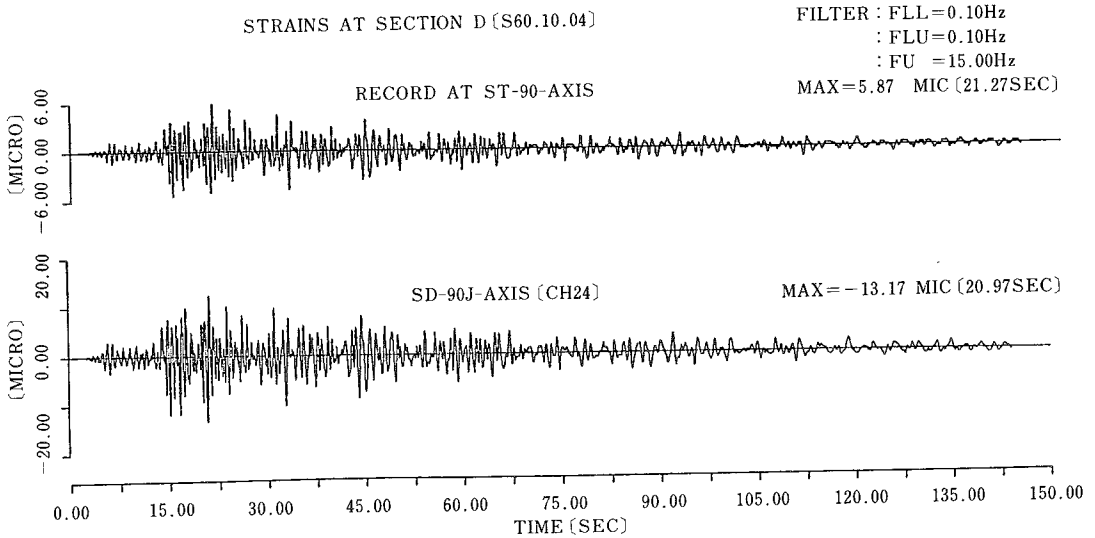


図4 セグメント部およびジョイント部における軸方向ひずみ波形

示すように解析対象部位は、シールド洞道のリング継手を中心にしてその両側にそれぞれリングの半分 (45 cm) の長さを取り、またシールド洞道の内側からセグメント厚 (27.5 cm)、さらに周辺地盤厚さ 50 cm を取り込む矩形とした。なお、ボルトはバネに変換して締結位置に作用させた。裏込めのグラウトは考慮しなかった。圧縮強度が著しく低いこと、確実性に乏しいことから、引張強度が期待できないからである。計算は線形の範囲で実施しているが、試算の結果から非線形の影響はほとんどないことがわかっている。また節点 P については、セグメントと地盤とは結合せず二重節点とし、さらにセグメント内面および地盤の境界を図5のように変位 0 としたのは、試算の結果本解析ではほとんど影響がないことがわかっているからである。

表2 検討したケースと組み合わせ

記号	名称	物性あるいは応力	ケース	
			1	2
SG	セグメント	$E=3.5 \times 10^6$ (kg/cm ²)	○	○
S	地盤	$v_s=100$ (m/sec) に相当	○	○
B	ボルト	$E=2.1 \times 10^6$ (kg/cm ²)	○	○
PB ₁	ボルトにかかる引張力	$\sigma_t=400$ (kg/cm ²)	○	
PB ₂	ボルトにかかる引張力	$\sigma_t=600$ (kg/cm ²)		○

検討したケースとモデルの組み合わせは、表2に示すとおりであるが、ボルトの締めつけによって働く引

研 究 速 報

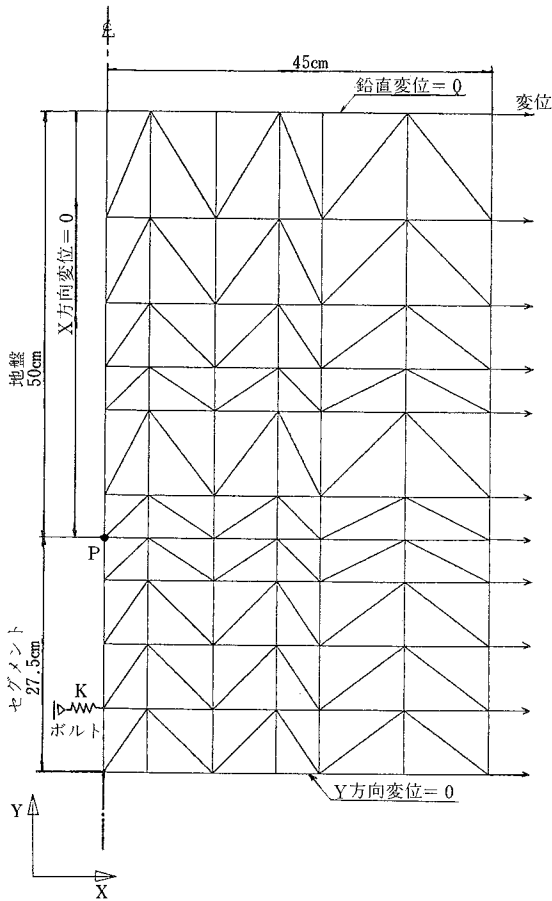


図5 セグメント～ボルト～地盤系モデルの分割図

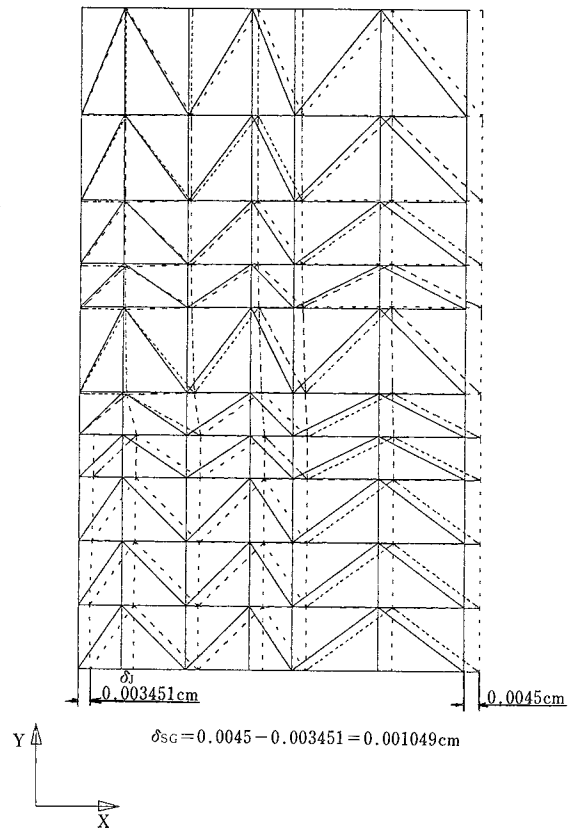


図6 変位図 (ケース1, 地盤ひずみ 10^{-4})

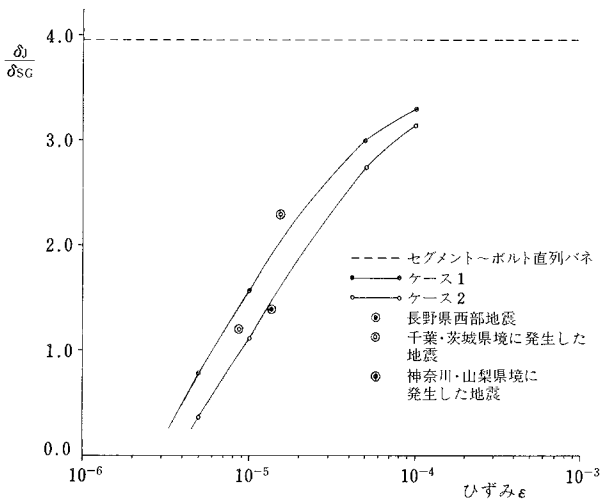


図7 地盤ひずみ (変位) とセグメントの変形量に対するリング継手の変形量の倍率 (δ_b/δ_{sc})

張力を想定した。解析に当っては軸方向すなわち解析断面の両端に、地震時に考えられる地盤のひずみ $10^{-6} \sim 10^{-4}$ に相当する変位を与えた。図6はケース1で 10^{-4} の地盤ひずみを与えた場合の変位図である。図7には地盤ひずみ (変位) とセグメントの変形量に対するリング継手の変形量の倍率 (δ_b/δ_{sc}) とをとってまとめている。図中の点線は、セグメントとボルトを直列バネとしたときの倍率を示すものである。図7には、表1のセグメント部およびジョイント部のひずみから換算した地盤ひずみと変形量の倍率も示してある。ただし、地盤ひずみが 10^{-4} を超えると、ボルトの種類によっては塑性領に入りリング継手の変形量が増加する。

5. ま と め

地震観測から得られた結果と数値解析の結果から、リング継手の地震時の変形メカニズムがほぼ把握された。今後観測と検討を続けていく予定である。

(1986年9月22日受理)