

地下鉄トンネルの地震時挙動観測

OBSERVATION OF EARTHQUAKE RESPONSE OF SUBWAY TUNNELS

藤木育雄*・中島 信*・大塚 努**・小坂彰洋***

Ikuro FUJIKI, Makoto NAKAJIMA, Tsutomu OTSUKA and Akihiro KOSAKA

Observation of earthquake response of subway tunnels has been carried out by Teito Rapid Transit Authority since 1976. By some analyses using the accumulated records, the following facts are found. 1) The motion of the surrounding soil affects strongly the behavior of subway tunnels. The influence of dynamic characteristics of tunnels is small. 2) The difference between the acceleration of tunnels and that of ground surface varies according to geologies. 3) In shield tunnels, the tangential strain of the diagonally upper part (45 degrees from the crown) is larger than that of the side part, the axial strain of ring joints is larger than that of segments.

Keywords: earthquake, subway, acceleration, strain, box-section tunnel, shield tunnel

1. まえがき

帝都高速度交通営団（以下営団）では、昭和51年より継続して、地下鉄トンネルおよびトンネル周辺地盤の地震時挙動観測を行っている。この観測において、関東近県を震源とするマグニチュード6～7程度の地震を数多く観測しており、それらの観測記録から地震時の地下鉄トンネルの挙動について少しずつ明らかになってきている。本稿では、その結果の概要を報告する。

2. 観測の概要

地震観測は、現在、下町低地4箇所および山手2箇所の合計6カ所で行っている。各観測位置を図-1に、観測地点の地質と計測機器の設置深さを図-2に示す。山手に位置する広尾および乃木坂では、ほぼトンネル敷設深さ（G.L.-10～20m）で基盤面に達しているのに対し、下町低地に位置する深川および新木場においては、基盤面はG.L.-70m付近と深くっており、そのレベルまで軟弱な土層が続いている。東陽町、砂町については、深部までの地質データがないが、立地からみて深川および新木場とほぼ同様と考えられる。

また、観測項目はトンネル周辺地盤の加速度ならびに地震に応答して発生するトンネルの加速度および歪みである。ただし、深川および新木場は地盤加速度だけの測定となっている。各計測機器の設置状況の例を

* 正会員 帝都高速度交通営団建設本部技術開発担当
** " 工事部11号線住吉工事所
*** " 設計部設計第二課

図-3に示す。

なお、トンネル内の観測を行っている4カ所のトンネル形式は、砂町、広尾が2線部箱形トンネル、東陽町、乃木坂が単線シールドトンネル（ $\phi 6.5\text{m}$; 箱形セグメント）となっている。

3. 観測結果

昭和57年度から平成5年度までの12年間に営団で観測された地震のうち、東京の震度がⅢ以上と発表されたものは70である。ここでは、その観測データを基に検討を行った。ただし、地下鉄構内という特殊条件下のため作動頻度が計器毎に異なり、測定数が十分では無いと思われる箇所もある。なお、以下の文章において、加速度（歪み）と記すときは、各地震時に各々の計器が記録した加速度（歪み）の最大値を指す。

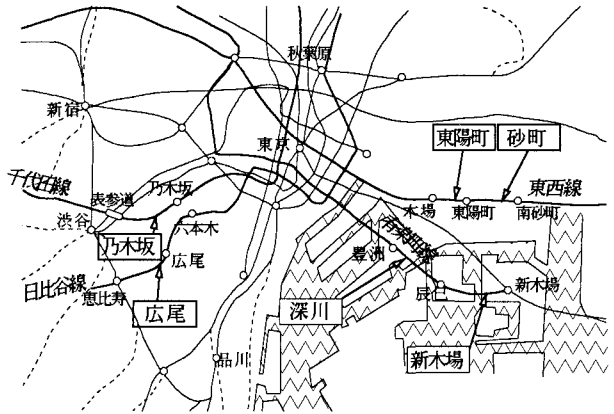


図-1 地下鉄路線網および地震観測位置

3-1 トンネル内外の加速度の比較

トンネル周辺地盤の加速度とトンネルの応答加速度との関係を図-4に示す。周辺地盤の加速度は、トンネルとほぼ同じ深度の測定値を用いた（図-2参照）。

砂町においては、トンネルの加速度の方がやや大きく、他の3箇所では、地盤の加速度の方が若干大きくなっているが、全般的には、トンネル内外の加速度はほぼ同じである。また、図は省略するが、個々の地震

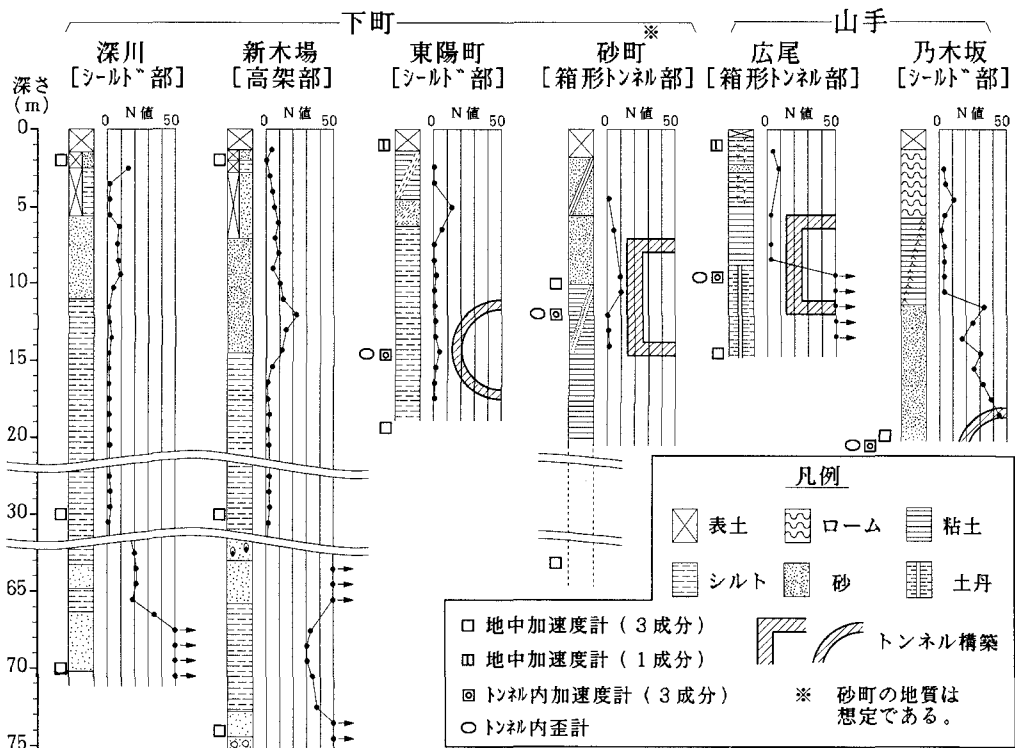
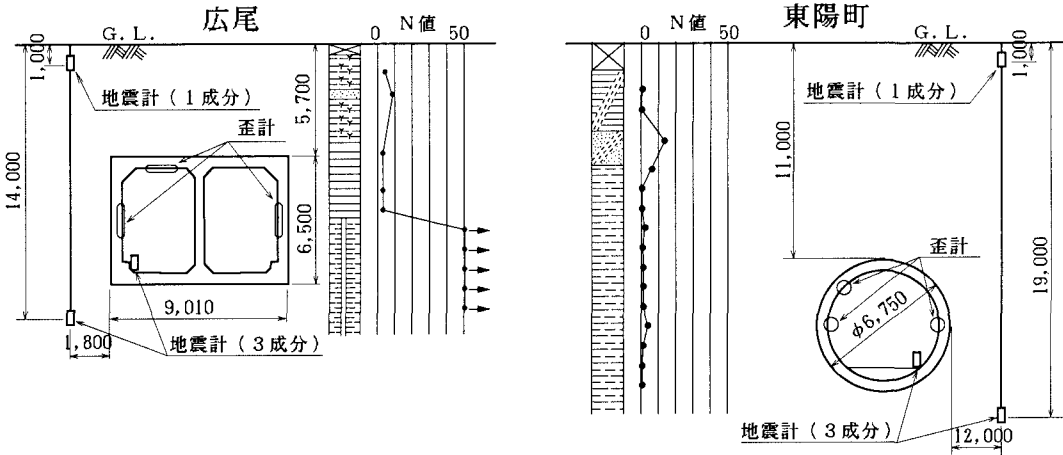


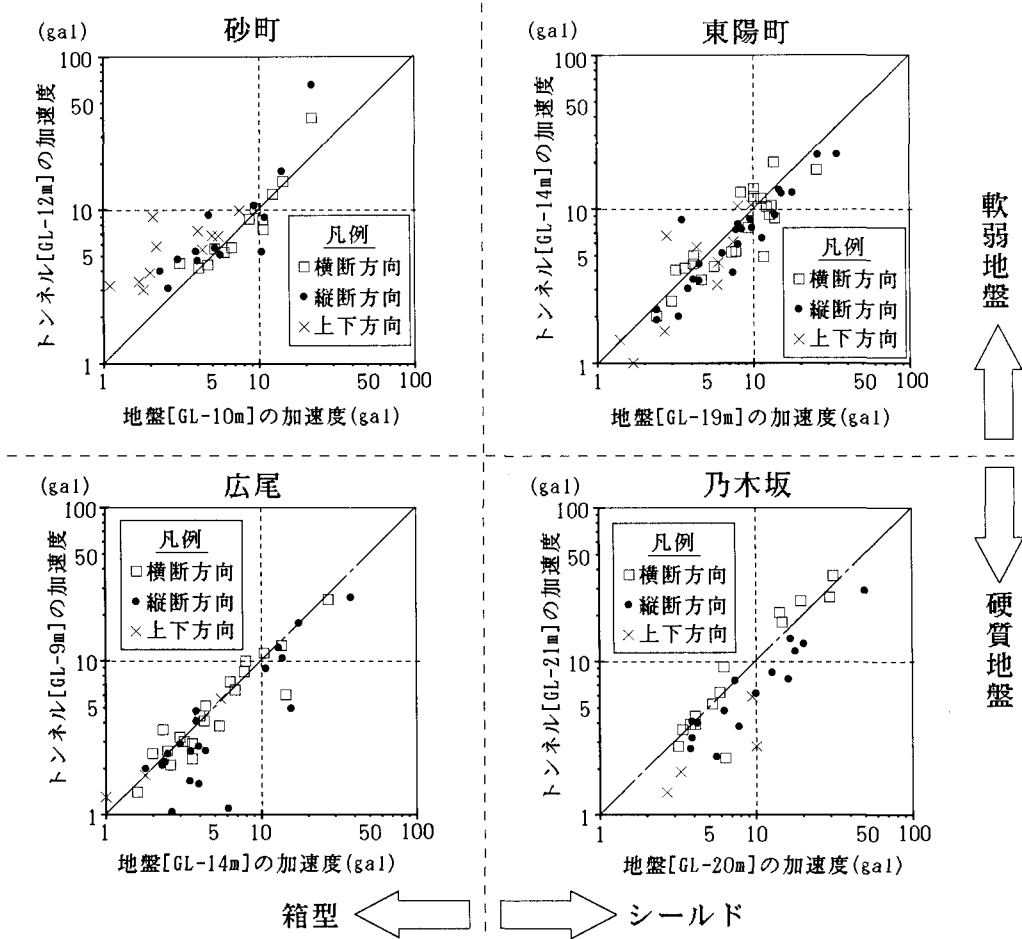
図-2 各観測地における地質とトンネル・計測機器の位置及び種類

におけるトンネル内外の加速度波形は良く類似している。

これらのことから、地下鉄トンネルは地盤とほぼ一体となって振動しており、トンネル自体の振動特性による影響や、地質及びトンネル形式の差異による影響は少ないことが明らかになった。



図－3 計測機器の設置状況（広尾および東陽町）



図－4 トンネル周辺地盤の加速度とトンネルの応答加速度

3-2 地表とトンネルの加速度の比較

東陽町（下町）および広尾（山手）における地表とトンネルの加速度の関係を図-5に、また、下町と山手における深さと地盤加速度との関係を図-6に示す。

広尾では、地表の加速度がトンネル加速度の2倍程度になっている。一方、東陽町では、全般的にみて地表加速度の方がトンネル加速度より大きいものの、その差は小さい。地表加速度は、基盤の加速度に対し、下町で2～4倍、山手で1～4倍であり、下町と山手で大きな差はなかった。東陽町では、基盤までの深さに比べトンネルが浅いため、地表とトンネルの加速度に差が出なかったものと考えられる。

観測結果から、地表とトンネルとの加速度の差は、地質、表層厚さとトンネル位置との関係によって大きく異なることが明らかとなった。

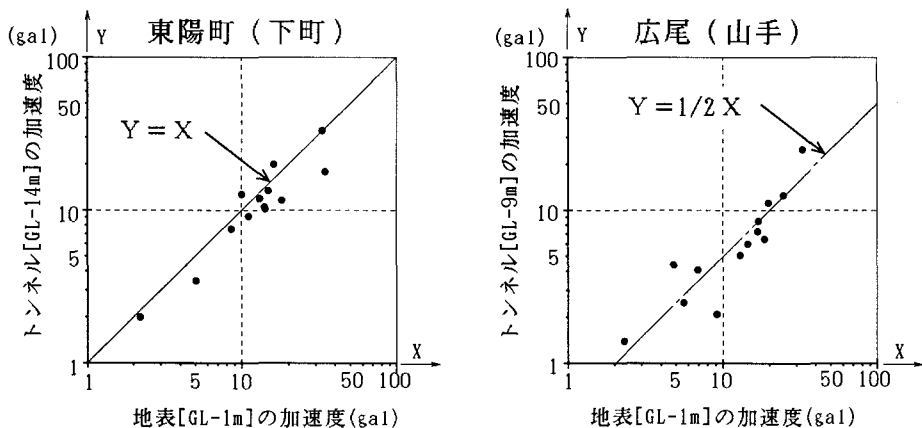


図-5 地表の加速度とトンネルの加速度（トンネル横断方向成分）

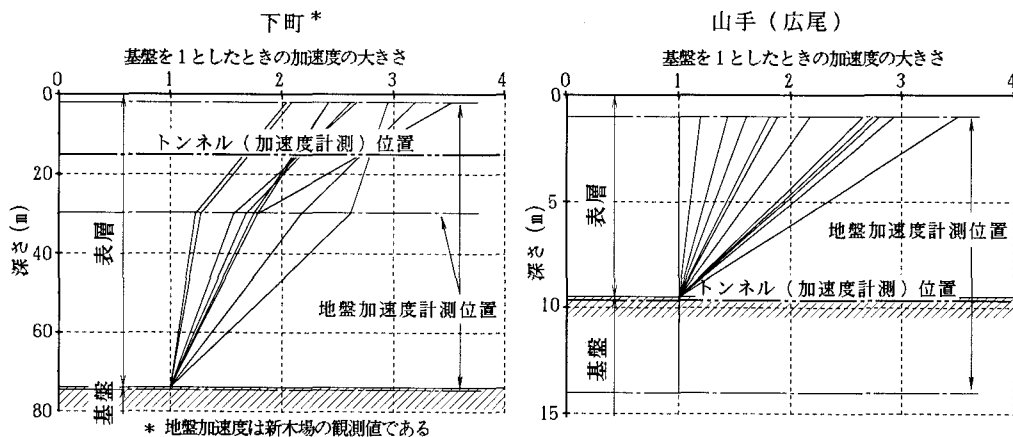


図-6 深さと地盤加速度（観測値より抜粋）

3-3 箱形トンネルの歪み

箱形トンネルにおける、上床と側壁の歪みの関係を図-7に示す。

砂町では、横断方向の歪みは上床の方が大きく、縦断方向の歪みは側壁の方が大きい傾向がみられる。なお、上床と側壁の歪みの比は概ね1：3以内となっている。広尾では、上床と側壁の歪みの間に有意な大小関係は無いように思われ、その比はほぼ1：2以内に納まっている。

全般的にみて、箱形トンネルにおける部材の歪み量は 1×10^{-5} 以下と小さい。

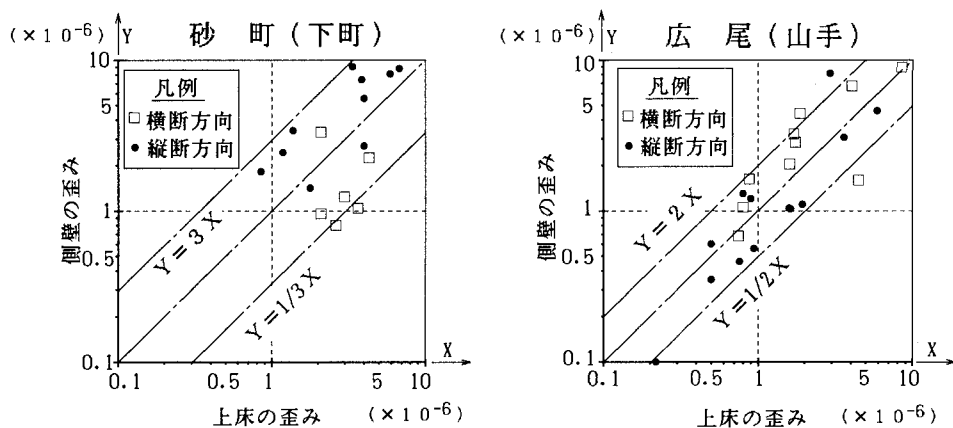


図-7 箱形トンネルにおける上床と側壁の歪み

3-4 シールドトンネルの歪み

シールドトンネルにおける側部（真横）と斜上部（天端から45°の位置）の歪みの関係を図-8に示す。トンネル縦断方向の歪みは側部と斜上部とであまり差が無いのに対し、トンネル横断方向の歪みは側部より斜上部の方が明らかに大きく、概ね2～3倍になっている。

乃木坂シールドで記録された歪み波形の例を図-9に示す。ST-SI-3は側部、ST-SI-7およびST-SI-13はそれぞれ左右斜上部の歪み波形であり、全てトンネル横断方向のものである。ST-SI-3の歪み量は他の2つに比べて小さく、また、ST-SI-7とST-SI-13の位相が逆になっている。

これらのことから、トンネルの横断方向の変形は図-10のように起こっているものと考えられる。

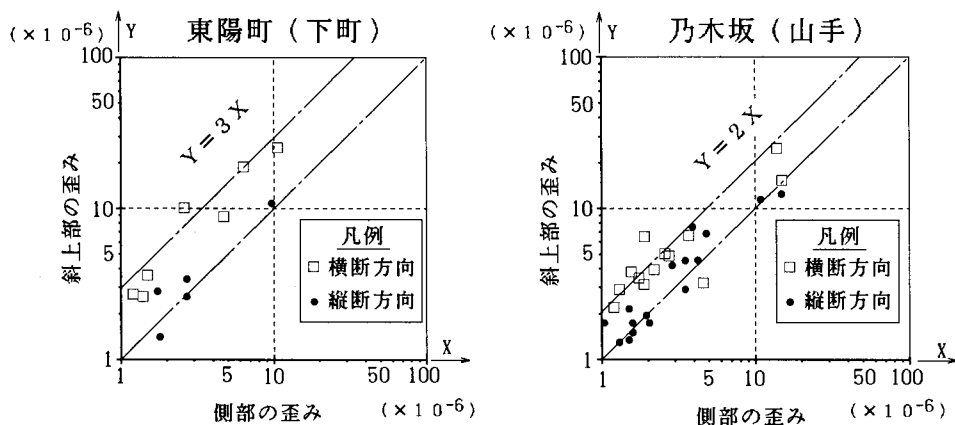


図-8 シールドトンネルにおける側部と斜上部の歪み

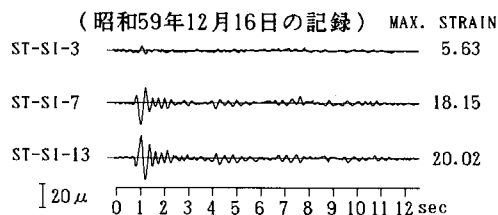


図-9 乃木坂シールドにおける歪み波形の例

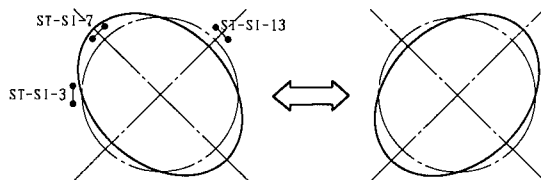


図-10 シールドトンネルの地震時の変形（概念図）

乃木坂シールドにおけるセグメント本体の歪みと継手部（リング間及びピース間）の歪みとの関係を図-11に示す。横断方向については大きな差は無いが、縦断方向については継手部の歪みが大きく、本体部の2～3倍となっている。

また、横断方向の歪みと縦断方向の歪みとの関係を図-12に示す。本体部、継手部に関係なく、横断方向の歪みが大きくなっているが、これは、トンネル横断面の方が変形性に富むためと思われる。

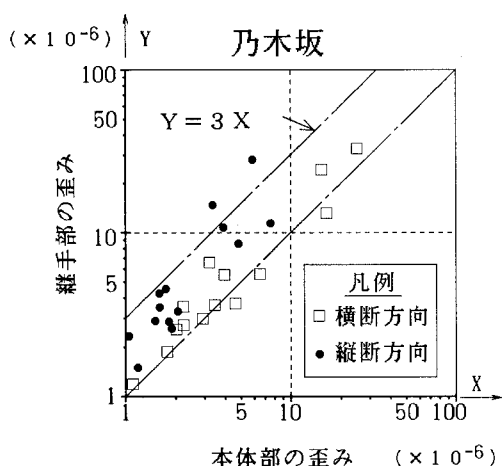


図-11 本体部と継ぎ手部の歪み

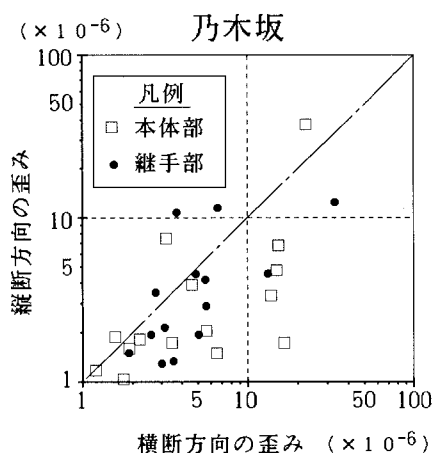


図-12 横断方向と縦断方向の歪み

4. まとめ

観測結果から、地震時の地下鉄トンネルの挙動に関し以下のことが明らかになった。

- ①地下鉄トンネルはそれ自身の振動特性にほとんど影響されず、周辺地盤と一体となって振動している。
 - ②トンネルの加速度は地表面の加速度より小さいことを確認できたが、その程度は地質、表層厚さとトンネル位置との関係に大きく左右される。
 - ③箱形トンネルでは、部位による歪みの相違はあまり明確ではないが、全般的に歪みが小さい。
 - ④シールドトンネルにおいては、トンネル横断方向の歪みは、側部より斜上部（天端から45°の位置）に大きく生じる。また、トンネル縦断方向の歪みは、セグメント本体部よりもリング継手部に大きく発生する。
- なお、本体・継手に関係なく、トンネル横断方向の歪みは縦断方向の歪みよりも大きい。

以上が、現在までの観測結果の概要である。

今後の観測においては、観測システムの改良により歪みデータの充実を図るとともに、測定項目の追加（地盤変位等）や測定箇所の追加（断面変化部等）を計画している。

また、この観測結果は、営団が別途実施している鉄筋コンクリート部材の繰返し載荷試験の結果とともに、耐震設計の評価基準に反映していくつもりである。

おわりにあたり、観測と解析に多大な御指導を頂いている田村重四郎教授並びに小長井一男助教授に対し、改めてお礼を申し上げます。

【参考文献】

- 1) 田村重四郎、岡本舜三、小長井一男：トンネルの地震時の変形（歪）について、第8回地震工学シンポジウム、1990
- 2) 久保慶三郎：地震と土木構造物、鹿島出版会、1981
- 3) 土岐憲三：土木学会編新体系土木工学11. 構造物の耐震解析、技報堂出版(株)、1981