

京都大学工学部 学生員

○内田晴登

京都大学工学研究科 正会員 Freddy Duran Cardenas

京都大学工学研究科 正会員

清野純史

1. はじめに

近年、極端気象による集中豪雨が増えており、洪水が起りやすくなっている。洪水が起らないように治水を行うためには、既存の河川の幅を広げる、あるいは新しい河川を掘るなどの方法がある。しかし、都市部では建物が非常に密集しているため、地下の空間を有効に使う治水施設として地下河川トンネルが多数建設されている。また、地下河川は都市部の軟弱な地盤中に建設する必要があることから、多くがシールドトンネル方式を採用している。

このようなシールドトンネルはトンネル内の水より地震時に動水圧を受けるが、地震時挙動を研究する際に内水圧の影響まで考慮した事例は多くない。そこで本研究では、シールドトンネルの断面方向に地震波を入力し、2次元有限要素法を用いた動的解析によりトンネル内に水が存在する場合としない場合のトンネルの地震時挙動を予測し、内水圧が地震時にトンネルに与える影響を検討することを目的としている。

2. トンネルの動的解析のためのモデル化

(a) 地盤とトンネルのモデル

シールドトンネル内の内水圧による影響に着目するため多層地盤とはせず、 $80 \times 30\text{m}$ の一様な地盤とし、深さ 10m に直径 6m のトンネルを設置する。また特にトンネル周辺地盤への影響を細かく見るためトンネル周辺の $10 \times 10\text{m}$ を三角形メッシュで分割し、他の部分は四角形メッシュで分割する。地盤の境界条件に関しては底面を固定境界し、側面はすべて鉛直固定、水平自由とする。また、トンネル覆工は線形弾性はり要素で構成し、その他の地盤についても線形弾性体と仮定し、地盤と構造物は完全に固着しているものとして扱った。

(b) 解析に用いた地震波

入力地震波として、兵庫県南部地震の神戸海洋気象台で観測された加速度時刻歴の水平成分(NS)の 25 秒

間を取り出したものを用いる。この地震波を地盤—トンネル水平方向に入力し、入力基盤面とする。

(c) トンネル内の内水圧のモデル化

水に接する構造物は地震時に動水圧を受ける。この地震時動水圧の作用は構造物の加速度の大きさに比例して作用する慣性力の作用と、自由水面がある場合に水面が自由振動を起こした際に生じる力の作用とがある。一般に、慣性力の作用は水面の自由振動による力の作用に対し非常に大きくなるため、本研究では慣性力の作用のみを考慮して、動水圧を求める。

水がシールドトンネルの半分の高さまで入ったモデルを仮定し、水面中央を原点として水平方向に x 軸、鉛直下方に y 軸をとる。水の入ったトンネルの加速度が x 方向に a 増加した時、水は慣性によって $-a$ なる慣性力をうける。水にはその他に重力が働いているので、外力の x 成分 $X=-a$ 、外力の y 成分 $Y=g$ となる。よって

$$dp = \rho(-adx + gdy) \quad (1)$$

となり、 ρ は密度である。

水面が直線であると仮定して(1)を積分すると、

$$p = \rho(-ax + gy) \quad (2)$$

ここで、水表面の y を特に y_w と記すと $y=y_w$ では $p=0$ より、水面形は次式で表わされる。

$$y_w = \frac{a}{g} x \quad (3)$$

水面の傾斜角は $\tan \theta = a/g$ となり、水面は $\theta = \tan^{-1} a/g$ 傾きが增加する。

上記のようにシールドトンネルの加速度から水面形と動水圧を時刻ごとに計算し、その時刻で水面以下にある節点に対し、鉛直方向上向き、水平方向右向きを正とし荷重を加える。

またシールドトンネルが満水の場合は自由水面を持たないため、水平方向の動水圧荷重に関しては上記と同様に常時の静水圧荷重にシールドトンネル内の水の地震時慣性力を加算することによって求め、また鉛直

方向の動水圧荷重に関してはシールドトンネル内の水の自重によって求め、各節点に分布荷重として加える。

本研究では、解析により応答を出力するために外力(地震動によるトンネル、地盤の慣性力+内水圧荷重)を入力しなければならない。つまり応答が出力されるより先に内水圧を計算しなければならないため、内水圧を求めるために用いる加速度として、水が入っているケースでのシールドトンネルの加速度応答を用いることができない。そこで、内水圧を求めるための加速度としてトンネル内に水が存在しないケースでのトンネルの加速度応答を用いる。

3. 地震時動水圧を考慮した解析

地盤とトンネルのモデルに対し、シールドトンネルの中が空の状態、水が半分の高さまで入っている状態、満水の状態をそれぞれケース 1、ケース 2、ケース 3 とする。この 3 つのケースの解析結果を比較することにより、地震時に内水圧がシールドトンネルの挙動にどのような影響を及ぼすかを検討する。

(a)地盤への影響

内水圧が地盤へ与える影響を見るために、トンネル周辺地盤の最大せん断ひずみの分布図を図 1 に示す。3 ケースとも同様の分布となっており、トンネル直下部でもっとも大きな値をとっているが、水位が変わったことによる変化は非常に小さい。

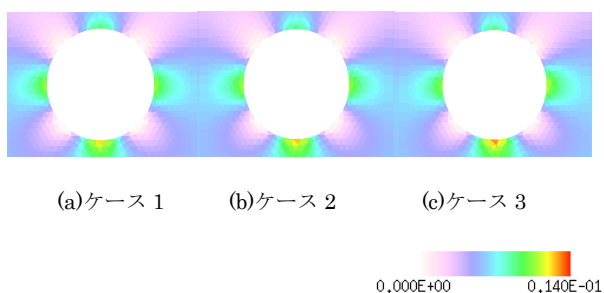


図 1 最大せん断ひずみ分布図

(b)トンネルへの影響

トンネルへの影響を見るためにトンネル上下端の水平方向相対変位の時刻歴を見ると、3 ケースとも 12.34(sec)で上下端の水平方向変位差が最も大きくなっており、全時刻歴でほとんど差はなかった。また、この時のシールドトンネル全体の曲げモーメントを見るため、トンネル内側に圧縮がおこるような曲げを正

としてトンネル断面の曲げモーメント図を図 2 に示す。(a)はケース 1 とケース 2 を比較したもの、(b)はケース 1 とケース 3 を比較したものである。図から分かるように、ケース 2 ではケース 1 と比べてもほとんど変化は見られない。また、ケース 3 ではケース 1 と比べ、全体的に正の曲げモーメントも負の曲げモーメントも共に値が大きくなっているのが分かる。しかし、変化は非常に小さい。

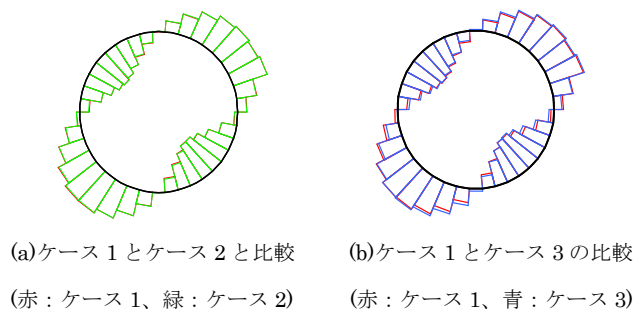


図 2 曲げモーメント比較図

4. 結論

シールドトンネルの内水圧を考えた結果、今回の解析において見られた影響は、水位が上がるにつれトンネル周辺地盤の最大せん断ひずみが大きくなる、また満水の時にセグメントに生じる曲げモーメントが全体的に大きくなるというものであったが、その変化はともに非常に小さいものであった。本研究では、地震時の内水圧荷重をトンネル内の水の地震時慣性力を考慮することによって算出し、トンネル内面に分布荷重として加えることで解析を行ったが、トンネル内の水の重量は周辺地盤に作用する重量よりも小さいため周辺地盤の地震時挙動による影響が支配的となりこのような結果となったと考えられる。またシールドトンネルは他のトンネルに比べ、覆工が肉厚であることもこのような結果となった一因と考えられる。

これより、シールドトンネル内の水はシールドトンネルの地震時挙動に関してほとんど影響しないということが分かった。しかし本研究では、トンネル内の水とトンネルのセグメントとの相互関係などといったトンネル内の水の地震時挙動を再現する上でまだ十分とは言えないため、今後さらなる検討が必要であると考えられる。