

I-443

水中トンネルの鉛直方向地震動に関する加振応答実験

(株)熊谷組 技術研究所

北海道大学 工学部

北海道開発局 開発土木研究所

北海道電力(株) 総合研究所

(株)間組 技術研究所

正員 古川 敦

正員 山下 俊彦

正員 水野 雄三

正員 峯田 稔

正員 黒崎 和保

1. はじめに

水中に緊張係留方式で設置される水中トンネルは新しい海峡横断の手段として注目されているが、地震に対する検討は世界的にも殆どなされていない。鉛直方向地震動に対して水中トンネルは、海底の振動が係留索を伝わって作用する外力の他に、海底の鉛直方向振動によって生じる海水運動に伴う流体力が作用する。一方、海底が水平に振動する水平動では海水の運動は起こらず、これによる流体力は作用しない。流体力を考慮した鉛直地震動に対する応答解析手法は山崎ら^{1) 2)}により開発されており、本実験では開発された解析手法の妥当性を振動台を用いた模型実験によって検証した。

2. 実験概要

実験はスケール1/72.3のフルード則に従い、水深100m・トンネル天端水深30m・トンネル外径 $\phi 23\text{m}$ の実機を想定して行った。また、トンネル模型の比重および係留索の径を変化させ、比重2ケース・係留索径2ケースの組み合わせによる計4ケースについて、以下に示す自由動揺試験と加振試験を行った。なお、結果については全て比重0.50・係留索（1本当たり）バネ定数3.81mm/kgfのケースのみ示した。

2. 1 自由動揺試験

ベッセル（水槽）内に上記係留ワイヤによりトンネル模型を係留させ、ワイヤを介した重りにより鉛直方向の強制変位を与え、ワイヤを切断することによって自由動揺させる。その図を図-1に示す。模型内部に取り付けた加速度計の減衰振動波形により系の固有振動数・バネ定数・構造減衰定数を求めた。

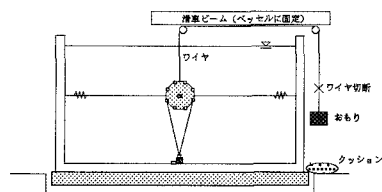
2. 2 加振試験

ベッセル内にトンネル模型を係留し、振動台により鉛直方向に加振する。その図を図-2に示す。加振は正弦波($f=3\sim 20\text{Hz}$, $10\sim 50\text{gal}$)および模擬地震波で行い、トンネル模型の鉛直方向加速度・係留索張力の応答値を測定した。

3. 実験結果および考察

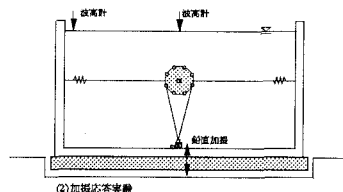
3. 1 自由動揺試験

減衰定数 h は、自由動揺試験で得られた減衰振動波形のピーク振幅 Z_m より、対数減衰率 δ を用いれば次式により求まる。



(1)自由動揺試験（加振なし）

図-1 自由動揺試験概要図



(2)加振応答試験

図-2 加振試験概要図

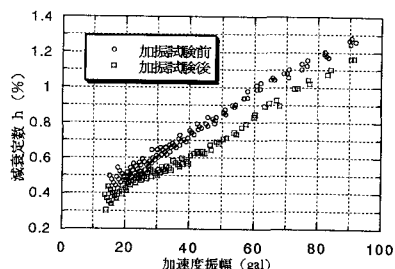


図-3 減衰定数と加速度振幅

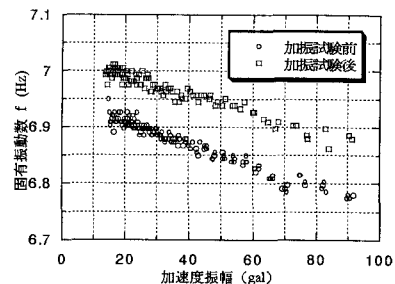


図-4 固有振動数と加速度振幅

$$\delta = 1/n \cdot \ln(Z_m/Z_{m+n}) = 2\pi h/\sqrt{1-h^2}$$

これらの結果を図-3、4に示す。これより、減衰定数および固有振動数は加速度振幅に比例または反比例していることが判る。また、自由動揺試験は次に述べる加振試験の直前と直後に行ったが、加振を行うことによって系の特性も変化している。

3. 2 加振試験

正弦波加振によって得られた水中トンネルの加速度および張力の周波数応答関数を図-5、6に示す。山崎らにより開発された解析手法^{1) 2)}は次式の運動方程式で表され、図中の実線は自由動揺試験で得られた減衰定数・バネ定数を用いて算出した計算値である。

$$\{M + m_v\}\ddot{u} + N_s\dot{u} + N_b(\dot{u} - \dot{W}_B) + F = F_0\dot{W}_T$$

(M : 水中トンネル質量、 m_v : トンネル上下動の付加質量係数、 N_b : トンネル上下動の造形減衰係数、 N_s : 構造減衰係数、 $\ddot{u}$, $\dot{u}$, u : トンネルの加速度・速度・変位、 $\dot{W}_B$: 地震動による海底の速度、 $\dot{W}_T$: トンネルが無い状態で地震動により生じる水中トンネル中心位置での海水の加速度、 F : 係留索からトンネルに作用する力、 F_0 : 海底が単位の加速度で振動した場合にトンネルに作用する流体力)

次に、模擬地震波を用いた加振での結果を図-7に示す。トンネル加速度および係留索張力の両者とも、実験値と計算値の一致度は良好であった。ただし計算値がやや小さめの応答となっているが、これは減衰定数の採用方法による違いと思われる。

4. まとめ

- ①水中トンネルの加速度および係留索張力の周波数応答に関する実験結果は、山崎らの開発した流体力を考慮した解析結果とよく一致した。水中トンネルなどの構造物の地震解析に際しては流体運動を考慮することが、不可欠である。
- ②模擬地震波に対しても実験結果と解析結果の一致度は良好であるが、実験値に比べやや小さめの解析結果となった。解析条件として用いる構造減衰の評価法の確立が必要と思われる。

5. 謝辞

本実験は(財)水中トンネル研究調査会の研究の一環として行われ、特に流体力研究小委員会委員長北海道大学佐伯浩教授には貴重なご指導を戴いた。また、振動台は(財)電力中央研究所我孫子研究所の上下水平2軸振動台を用いて行ったもので、同研究所耐震部岩楯敞広部長および構造部萩原豊主査研究員には終始にわたってご指導を戴いた。ここに感謝の意を表します。

6. 参考文献

- 1) 山崎ら：上下方向地震時に対する水中トンネルの応答特性、海洋開発論文集、Vol. 9、pp. 331～336、1993
- 2) 山崎ら：水中トンネルの上下方向地震動に対する応答、第22回地震工学研究発表会講演概要、pp. 579～582、1993

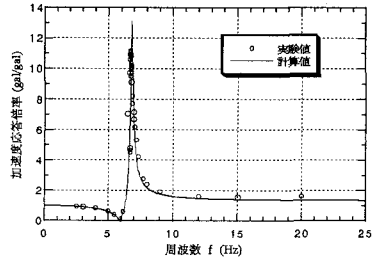


図-5 加速度周波数応答

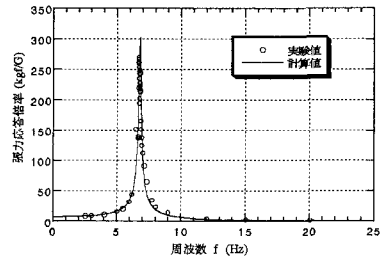


図-6 張力周波数応答

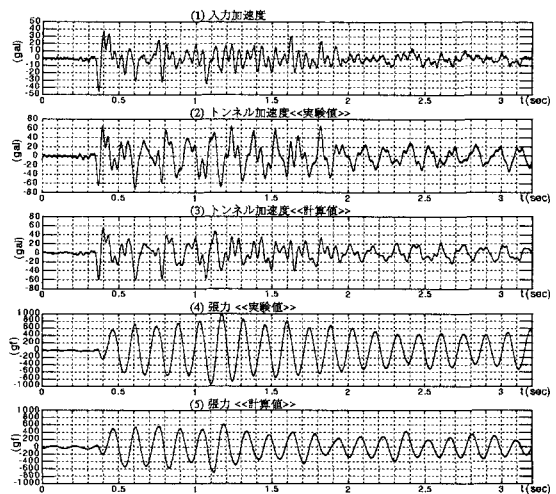


図-7 模擬地震波加振時刻歴