

水中浮遊式トンネルの初期設計段階における簡易解析手法の検討

北海道大学大学院工学研究科 学生員 ○佐藤太裕
北海道大学大学院工学研究科 正 員 蟹江俊仁
北海道大学大学院工学研究科 フェロー 三上 隆

1. はじめに

本研究は水中トンネルの初期計画時における構造諸元の決定に必要な情報を，効率良く引き出すための設計手法の提案を目的としている．水中トンネルは変位の小さい従来の構造物と異なり，その重量，係留方式，函体間の連結方法，トンネル両端部での固定方法などによって，発生する変位や断面力などが大きく変化する特性を持っている．このため，構造諸元の仮定とその結果生じる応答変位量や断面力を繰り返しフィードバックしながら，適切と思われる基本構造諸元を設定していくことが初期設計において必要となる．

トンネル縦断方向の全体解析には弾性支承上梁モデルが候補の1つとして挙げられる．しかし水中トンネルは，動揺を許容するという構造特性から，トンネル函体を安定化させる係留索による局所的な離散ばねの影響が小さく，一様分布ばねとして扱うことができる場合も予想される．水中トンネルを初期設計の段階でこのようないわゆる弾性床上梁にモデル化可能であるならば，簡単な理論式により全体挙動の概略把握を行うことができ，初期構造設計の段階における解析モデルとして非常に有効である．このことから著者らはこれまで弾性床上梁との等価性について静的，動的な面から検討を行い，その適用範囲を構造力学的に明らかにしているが^{1), 2)}，さらに本研究では設計の面から有用な情報を得るべく，文献1)，2)の研究で得られた適用条件をもとに，実際に想定した水中トンネルの構造諸元に関してその適用可能性を検討するとともに，トンネル境界の影響が及ぶ範囲に関する考察を行った．

2. 弾性床上梁理論の適用可能性について

本研究では実際に想定される水中トンネルの初期構造設計の手法として，弾性床上梁理論の適用可能性を考える．著者らの行った過去の研究によると，基本

構造諸元，材料条件より得られるパラメータ K が

$$K = \frac{kh^3}{EI} \leq 1.2$$

(k : 係留索によるばね定数, h : 係留索配置間隔, EI : トンネル曲げ剛性)

を満たす場合には弾性床上梁とほぼ等価であることが確認されている．この適用範囲を図-1に示す係留索配置形状を軸方向に等間隔に配置した実際に想定する水中トンネルに当てはめて検討し，その適用可能性を探った．ここではトンネルのヤング率: $E = 2.74 \times 10^{10} [\text{N/m}^2]$ ，係留索のヤング率: $E_l = 2.06 \times 10^{11} [\text{N/m}^2]$ ，水面からのクリアランス 30m の水中トンネルについて，トンネル断面，係留索配置形状，配置間隔，水深 L を支配パラメータとした．図-2，3はその適用範囲を示したものである．TYPE-2 については $\alpha = 30^\circ$ とした．図-2，3とも線より上の領域が弾性床上梁に適用可能となる範囲となる．なおTYPE-1の水平方向の運動については，係留索の水平方向ばね定数が非常に小さいことから，本研究で提案した適用範囲を概ね満たすことが確認された．

3. 境界の影響範囲について

次に弾性床上梁と等価である場合における境界の

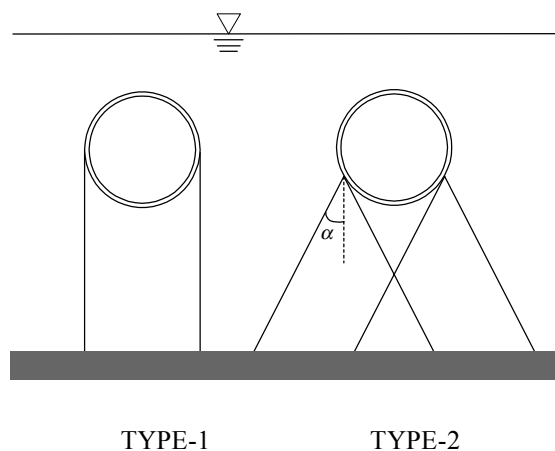


図-1 係留方式

キーワード：水中浮遊式トンネル，初期設計，弾性床上梁

連絡先：060-8628 札幌市北区北13条西8丁目 TEL 011-706-6176 FAX 011-706-6174

影響範囲に関する考察を行う．境界の影響が非常に小さい範囲においては，弾性床上梁は支配微分方程式より得られる特解の性質のみにより応答が決定されと考えることから，影響範囲は初期設計上非常に有効な情報である．このことを図 - 4 に示す弾性床上無限長梁に集中荷重が作用した場合の変形，断面力より検討することとした．集中荷重作用時のたわみ $v(\xi)$ ，たわみ角 $\varphi(\xi)$ ，曲げモーメント $M(\xi)$ ，およびせん断力 $S(\xi)$ についてはそれぞれ次式が導かれる．

$$\frac{v(\xi)}{h} = \frac{P\lambda}{2k'h^2} e^{-\lambda\xi} (\cos \lambda\xi + \sin \lambda\xi) = \frac{P_0}{2} f_1(\lambda\xi) \quad (1)$$

$$\varphi(\xi) = -\frac{P\lambda^2}{k'h^2} e^{-\lambda\xi} \sin \lambda\xi = -P_0 \lambda f_2(\lambda\xi) \quad (2)$$

$$\frac{M(\xi)h}{EI} = \frac{P\lambda^3}{k'h^2} e^{-\lambda\xi} (\cos \lambda\xi - \sin \lambda\xi) = P_0 \lambda^2 f_3(\lambda\xi) \quad (3)$$

$$\frac{S(\xi)h^2}{EI} = -\frac{2P\lambda^4}{k'h^2} e^{-\lambda\xi} \cos \lambda\xi = -2P_0 \lambda^3 f_4(\lambda\xi) \quad (4)$$

ここで， $\xi = \frac{x}{h}$ ， $\lambda = \sqrt[4]{\frac{K}{4}}$ ， $P_0 = \frac{P\lambda}{k'h^2}$ なる無次元量で

ありまた $k' = k/h$ である．式(1)から式(4)中の $f_1(\lambda\xi) \sim f_4(\lambda\xi)$ は荷重の影響が及ぶ範囲を示す関数であると考えられる．またここでは示さないが，集中モーメントが作用した場合も同様の関数を用いて変形，断面力を表現できる．この関数の特性についてみると， $f_1(\lambda\xi) \sim f_4(\lambda\xi)$ から荷重の影響は， $\lambda\xi = \pi$ では変形及び断面力は 4.4% 以下， $\lambda\xi = 1.5\pi$ となると 1% 以下になることがわかった．以上よりトンネル端部から ξ が次式を満たす位置の解析は境界の影響を無視して差し支えない．

$$\xi > \frac{\pi}{\lambda} \sim \frac{1.5\pi}{\lambda} = \sqrt[4]{\frac{4\pi^4}{K}} \sim \sqrt[4]{\frac{81\pi^4}{4K}} \quad (5)$$

ここで ξ は座標 x を配置間隔 h で無次元化したものであることから 境界からの係留索軸方向配置数を表す．図 - 5 は式 (5) の影響範囲を図示したもので，図の実線より上の領域に存在する ξ だけ境界から離れた点では境界の影響を無視しうることとなる．

参考文献

- 1) 佐藤太裕，蟹江俊仁，三上 隆：水中浮遊式トンネル解析における等価な弾性床上梁モデルについて，構造工学論文集，Vol.46A，pp.41-49，2000．
- 2) 佐藤太裕，蟹江俊仁，三上 隆：動的問題におけ

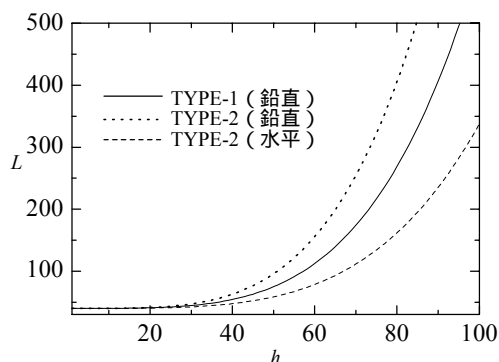


図 - 2 大断面（外径：20m，内径：18m）

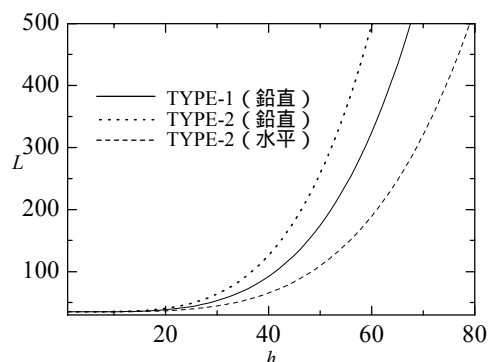


図 - 3 小断面（外径：10m，内径：9m）

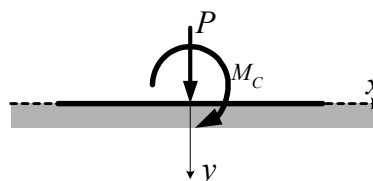


図 - 4 集中荷重及び集中モーメントが作用した弾性床上梁モデル

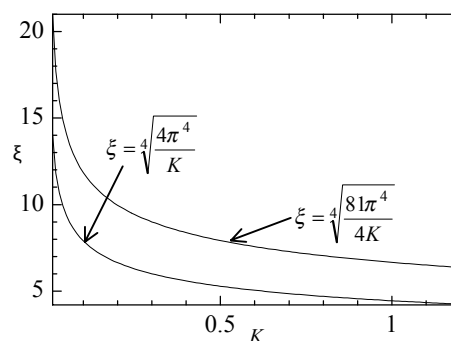


図 - 5 境界の影響範囲

る水中浮遊式トンネルと弾性床上梁の等価性に関する検討，構造工学論文集，Vol.46A，pp.1-8，2001．