

海水の圧縮性を考慮した水中トンネルの地震応答解析

山崎 晶* ・ 森田知志* ・ 山下俊彦**
 水野雄三*** ・ 黒崎和保****

1. はじめに

著者らは水中に緊張係留される水中トンネルの上下方向地震動に対する応答解析手法の提案を行った。(山崎, 1993a)これは、非圧縮流体のポテンシャル理論に基づく境界積分法により水中トンネルの流体力係数を求めて、これに重複反射波理論から求まる地震動による海底と海水の運動を組合せ、運動方程式を作り応答解析を行うものである。この方法は、トンネルの流体力係数を求める際には非圧縮流体を仮定しているが、重複反射波理論で海水圧縮性を近似的に考慮したものである。一方、水中トンネルの計画が検討されている各プロジェクトでの最大水深は、噴火湾で100 m、メッシナ海峡で350 m、ジブラルタル海峡で270 mなどと非常に深いため、地震時の海洋構造物の応答解析(田中, 1983; 清川ら, 1990)によると、海水の圧縮性が流体力特性に大きな影響を持つことが予想される。

以上のような背景から、本研究では圧縮流体のポテンシャル理論に基づく境界積分法によりトンネル中央の2次元状態での水中トンネルの付加質量係数・減衰係数および海底振動で生じる海水を伝搬する疎密波による流体力を求め、これを用いた地震応答解析手法を提案する。この際、境界積分法の解析で最も重要となるグリーン関数の特異点の処理を、非圧縮流体のグリーン関数で提案された方法を適用して行った。また、既往の圧縮流体の境界積分法の解析で行われていなかった解析手法の妥当性の検証を、ダムの動水圧について求まる厳密解との比較により行った。そして、水中トンネルの諸元を用いた解析により、水中トンネルの流体力特性や地震応答特性に与える流体圧縮性の影響を検討した。

2. 理論解析

2.1 流体場の基礎方程式と境界条件

図-1のように水深が一定 h の海域に、任意形状の2次元構造物が存在するケースを考える。ここで、地震に

より角周波数 ω で海底の上下運動が生じると、これによる流体運動のため構造物に外力が生じ、構造物の運動が起こる。ここに、「①流体は圧縮性を有するが、非粘性・渦なしとする。②地震動および構造物の運動は微小とする。③地震により海底は上下方向に一樣に振動する。④水面での表面波の発生は無視できる。」なる仮定を採用し、時間変動項 $e^{-i\omega t}$ を省略すると、場の流体運動は以下の速度ポテンシャル ϕ で表される。

$$\phi = \phi_0 + \phi_D + \phi_R \dots\dots\dots(1)$$

ただし、 ϕ_0 : 構造物がない状態での海底振動で生じる入射波ポテンシャル、 ϕ_D : 入射波の回折・散乱によるポテンシャル、 ϕ_R : 構造物の振動で生じる放射波のポテンシャル、であり、 ϕ は以下の条件を満たす。

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} + k^2 \phi = 0 \dots\dots\dots(2)$$

$$\phi = 0 \quad \text{on } S_F \dots\dots\dots(3)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = v_0 \quad \text{on } S_B \dots\dots\dots(4)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = v_l \quad \text{on } S_V \dots\dots\dots(5)$$

ただし、 $k = \omega/c$ 、 c : 水中の音波の伝搬速度、 v_0 : 海底の上下方向振動の速度振幅、 v_l : 構造物表面での外向き法線方向速度振幅 ($l=1\sim 3$)、 $\partial/\partial n$: 浮体表面の外向き法線方向微分、とする。入射波ポテンシャルは、式(2)、(3)、(4)を満たすので、以下のように求まる。

$$\phi_0 = \frac{v_0}{k} \frac{\sin kz}{\cos kh} \dots\dots\dots(6)$$

ここで、地震動の波長が海水運動および構造物の運動

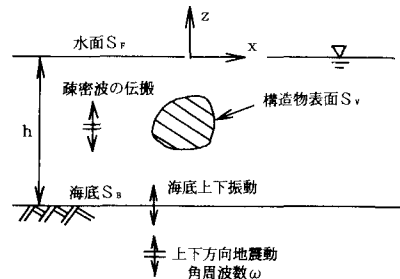


図-1 記号の定義

* 正会員 工修 (株)熊谷組技術研究所
 ** 正会員 工博 北海道大学助教授 工学部土木工学科
 *** 正会員 北海道開発局開発土木研究所
 **** 正会員 工修 (株)間組技術研究所

に比べて十分大きい場合、波浪時の浮体解析で行われるように、問題を構造物平衡状態における回折・散乱問題(diffraction問題)と静止流体中で構造物が運動する場合の発散波問題(radiation問題)に分離することができ、線形性を考慮すると、 ϕ_D および ϕ_R は、式(2)(3)(7)を満たし、式(8)のみ異なる問題の解となる。

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{on } S_B \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} = g_0 = \begin{cases} \frac{\partial \phi_0}{\partial n} = -n_z v_0 \frac{\cos kz}{\cos kh} = g_D & (\text{for } \phi_D) \\ = v_i = -i\omega n_z = g_R & (\text{for } \phi_R) \end{cases} \quad \text{on } S_V \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし、上下方向地震動を受ける水中トンネルを考え、radiation問題においては構造物は上下方向の単位振幅変位の動揺のみ生じるとし、 n_z は構造物表面の外向き単位法線ベクトルの z 成分とする。

2.2 グリーン関数による定式化

流体圧縮性を考慮したグリーン関数は、清川ら(1990)により以下のように求められている。

$$G(x, z; \xi, \zeta) = \sum_{n=1}^s G_{1n} + \sum_{n=3}^{\infty} G_{2n} \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$G_{1n} = \frac{i}{\lambda_n h} \sin k_n z \sin k_n \xi e^{i\lambda_n |x-\xi|} \quad \dots\dots\dots (10)$$

$$G_{2n} = \frac{1}{\lambda_n h} \sin k_n z \sin k_n \xi e^{-\lambda_n |x-\xi|} \quad \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 $k_n = (n-1/2)\pi/h$ ($n=1, 2, 3, \dots$)、 $\lambda_n^2 = k^2 - k_n^2$ 、 $\lambda_n^2 = k_n^2 - k^2$ 、 s は $\lambda_n^2 = k_n^2 - k^2$ の右辺が正である最大の n 、とする。このとき、グリーンの公式を用いると、点 $P=(\xi, \zeta)$ 、 $Q=(x, z)$ を構造物表面上の点として、 ϕ に関する次の積分方程式が求まる。

$$\frac{1}{2}\phi(P) = \int_{S_V} \left\{ \phi(Q) \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n} - G(P, Q) g_0(Q) \right\} dS \quad \dots\dots\dots (12)$$

ただし、積分を行う領域 S_V から点 Q は除外することとし、 g_0 は式(8)に従うとする。構造物表面 S_V を N 個の要素に分割し、この要素上の ϕ および g_0 を要素中央点($P=P_i, Q=P_j$)での値で代表させると、式(12)は $i=1 \sim N$ として次の離散化した方程式となる。

$$-\frac{1}{2}\phi(P_i) + \sum_{j=1}^N \phi(P_j) \beta_{ij} = \sum_{j=1}^N g_0(P_j) \alpha_{ij} \quad \dots\dots (13)$$

$$\alpha_{ij} = \int_{\Delta S_j} G(P, Q) dS \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$\beta_{ij} = \int_{\Delta S_j} \frac{\partial G(P, Q)}{\partial n} dS \quad \dots\dots\dots (15)$$

式(13)で $\alpha_{ij}, \beta_{ij}, g_0$ は計算できるため ϕ_D, ϕ_R が求まり、構造物表面に作用する変動圧力が $\Delta p = i\rho\omega\phi$ と算定される。これより、疎密波により構造物が受ける z 方向

の流体力 F_D や、構造物の上下動による付加質量係数、減衰係数 m_z, N_z が計算できる。

2.3 グリーン関数の計算方法

中村ら(1982)は非圧縮流体のグリーン関数の計算を効率的に行い、かつ特異点処理を行う方法を示している。ここでは、この方法を圧縮流体のグリーン関数に適用して効率的に式(14)、(15)を計算する方法を述べる。 n が十分大きい場合は、

$$\lambda_n \doteq k_n = \frac{2n-1}{2} \frac{\pi}{h} \quad \dots\dots\dots (16)$$

が成立し、このときの G_{2n} を G_{2n}^∞ と書くと、

$$G_{2n}^\infty = \frac{1}{k_n h} \sin k_n z \sin k_n \xi e^{-k_n |x-\xi|} \quad \dots\dots\dots (17)$$

となる。そして、

$$\Sigma = \frac{\pi}{2h}(z-\zeta) \quad \Delta = \frac{\pi}{2h}(z+\zeta)$$

$$E = \exp\left(-\frac{\pi}{2h}|x-\xi|\right)$$

と書くとき、 G_{2n}^∞ の無限級数和は以下のように求まる。

$$\sum_{n=1}^{\infty} G_{2n}^\infty = x_1 + x_2 \quad \dots\dots\dots (18)$$

$$x_1 = \frac{1}{4\pi} \left[\ln(1+2E \cos \Sigma + E^2) - \ln \frac{(1+2E \cos \Delta + E^2)}{(1-2E \cos \Delta + E^2)} \right] \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$x_2 = -\frac{1}{4\pi} \ln(1-2E \cos \Sigma + E^2) \quad \dots\dots\dots (20)$$

ここで水中トンネルでは、 $z, \zeta \neq 0, -h$ であるので x_1 に特異性はなく、 x_1 の ΔS_j での表面積分は、パネル中央点での x_1 の値に ΔS_j を乗じて求まる。一方、 x_2 は $x=\xi$ かつ $z=\zeta$ で特異性を持ち、この場合は厳密な線積分を行えば、以下のように積分値が求まる。

$$\int_{\Delta S_j} x_2 dS = -\frac{\Delta S_j}{2\pi} \left[\ln \frac{\pi \Delta S_j}{4h} - 1 \right] \quad \dots\dots\dots (21)$$

式(16)が成立する条件を、 $n > NL$ とすると、

$$G = \sum_{n=1}^s G_{1n} + \sum_{n=1}^{\infty} G_{2n}^\infty - \sum_{n=1}^{NL} G_{2n}^\infty + \sum_{n=s+1}^{NL} G_{2n} \quad \dots\dots (22)$$

が成立するので、 α_{ij} が以下のように求まる。

$$\alpha_{ij} = \left\{ \sum_{n=1}^s G_{1n} + x_1 - \sum_{n=1}^{NL} G_{2n}^\infty + \sum_{n=s+1}^{NL} G_{2n} \right\} \Delta S_j \begin{cases} + x_2 \Delta S_j & (i \neq j) \\ \left[-\frac{\Delta S_i}{2\pi} \left[\ln \frac{\pi \Delta S_i}{4h} - 1 \right] \right] & (i = j) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (23)$$

ただし、 G_{1n}, x_1 等の計算では P, Q の座標として、各要素の中央点 P_i, P_j での座標を用いるものとする。

グリーン関数の法線方向微分値の表面積分に関してもこれと同様の計算で特異点の処理ができる。

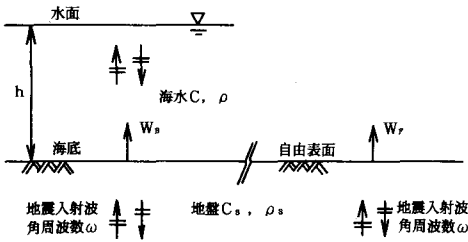


図-2 地震動の伝播

2.4 入力地震動に対する水中トンネルの応答

図-2 に示すような角周波数 ω の P 波が鉛直上向きに水平な海底面に入射する状況を考える。この場合、地盤上に海水層が存在したときの海底面の変位 W_B と、海水層が存在しない場合の自由表面の変位 W_F との関係は、重複反射波理論によると以下のように求められる。

$$\frac{W_B}{W_F} = Z_B = \frac{\cos kh}{\cos kh + i\alpha \sin kh} \dots\dots\dots (24)$$

ここに、 $k = \omega/c$, $\alpha = c\rho/c_s\rho_s$, c, c_s : 海水および地盤中の音波伝搬速度, ρ, ρ_s : 海水および地盤の単位体積質量, とする。地震応答解析でよく行われるように、海水層の影響のない自由表面で地震動の入力を行う。そして、自由表面が、

$$\dot{W}_F = e^{-i\omega t} \dots\dots\dots (25)$$

なる加速度で調和振動した場合の、水中トンネル絶対加速度および係留索変動張力の周波数応答関数を求める。山崎ら (1993b) によると、水深が 300 m 程度の条件では水中トンネル係留索の質量の影響は地震応答解析では無視できるので、係留索をスプリングとして水中トンネルの運動方程式 (単位長さ当たり) は以下ようになる。

$$\{M + m_z\} \ddot{u} + N_z \dot{u} + N_s (u - \dot{W}_B) + k_T (u - W_B) = F_D e^{-i\omega t} \dots\dots\dots (26)$$

ここに、 M : 水中トンネル質量, m_z : ω でのトンネル付加質量係数, N_z : ω でのトンネル流体減衰係数, N_s : 構造減衰係数, k_T : 係留索の上下方向バネ定数, F_D : 疎密波によりトンネルに作用する流体力, \ddot{u}, \dot{u}, u : トンネル絶対加速度, 速度, 変位, である。ここで、式 (24), (25) より \dot{W}_B, W_B が求まり、トンネルの絶対加速度の周波数応答関数を $Z_A(\omega)$ とすれば、 $\ddot{u} = Z_A e^{-i\omega t}$ となり、これらを式 (26) に代入すると $Z_A(\omega)$ が求まる。また、係留索張力の応答についても同様に計算できる。地震動に対する水中トンネルの応答は、①入力地震動の加速度時刻歴をフーリエ変換し各周波数成分 ω でのフーリエ係数 $C(\omega)$ を求め、② $C(\omega)$ に求める応答値の周波数応答関数 (例えば加速度応答を求めるならば、 $Z_A(\omega)$ を乗じ、③これを逆フーリエ変換する、ことにより応答の時刻歴が求まる。

3. 解析手法の妥当性の検討

3.1 地震時ダムの動水圧の厳密解との比較

2次元の無限に長い池の一端に直立した剛体の壁が水平振動する時の動水圧は、流体の圧縮性を考慮した厳密解が畑野 (1949) により示されており、これとの比較により提案した解析手法の検証を行う。畑野の解では水平振動を対象にしているが、これは式 (8) の radiation 問題の場合で n_z を n_x とすればよい。水深 $h=100$ m の場合で比較し、数値解析ではパネルが水面に一致する場合の特異点処理は行っていないので、水面との間に 1 m の隙間を持つ高さ 99 m の矩形没水構造物として計算した。式 (11) で示される海水圧縮性に伴う進行波の発生する加振周波数 20 Hz での鉛直壁に作用する変動圧力振幅とその入力加速度との位相差を図-3 に示す。図より数値解析は厳密解と良好に一致し、提案した数値解析の妥当性が特異点処理方法も含めて確認出来た。

3.2 表面波の影響の検討

提案した解析手法〔解析法①〕では、表面波は無視できるとの仮定を採用している。ここでは表面波を考慮した非圧縮流体の境界積分法〔解析法②〕との比較により地震時解析でのこの仮定の妥当性を検討する。水深 100 m・トンネル口径 23 m・天端水深 30 m (図-5 参考) での付加質量係数の比較を図-4 に示す。解析法②の結果から、周波数が小さい領域では表面波のため付加質量係

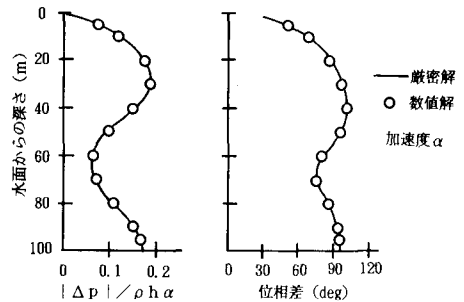


図-3 ダムの動水圧の厳密解との比較

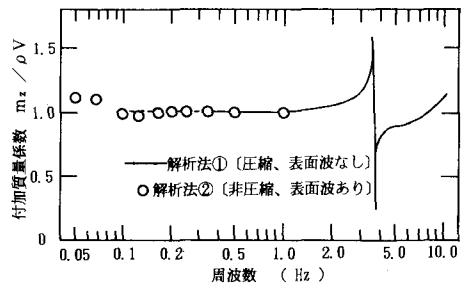


図-4 表面波の影響の検討

数が変化しているが、0.2 Hz 以上では値が周波数に依らず一定となる。またここには示していないが、0.2 Hz 以上では造波減衰はほぼゼロと見なせ、表面波の影響が無視できる。地震の卓越周波数は一般に 1.0 Hz 程度以上のため表面波の影響は無視でき、採用した仮定が妥当なものと考えられる。また、解析法①②の結果は表面波および海水圧縮性の影響のない領域では良く一致しており、これからも提案した解析手法の妥当性の検証ができた。

4. 水中トンネルの地震応答の検討

図-5 に示す条件で、水中トンネルの地震応答解析を行い、海水圧縮性の影響等を検討する。

4.1 流体力特性

トンネルの付加質量係数・減衰係数および海中を伝搬する疎密波による流体力の周波数による変化を、図-6 に示す。図中の V は水中トンネルの排水量、 α は海底の加速度である。流体圧縮性を無視すれば付加質量係数および疎密波による流体力は周波数に依存しないが、図からこれらの諸元が強い周波数依存性を持つのが分かる。また圧縮性のため疎密波による海水層の 1 次の卓越周波数 3.7 Hz 以上で進行波が発生し、減衰力が生じ、また疎密波による流体力に入力加速度との間に位相差が現れている。流体圧縮性の影響が無視できるのは、周波数が 1.0 Hz 以下の領域に限られている。

4.2 入力加速度に対する周波数応答特性

自由表面での入力加速度に対するトンネル加速度・係留索張力の周波数応答特性を図-7 のように求めた。図には、非圧縮流体の場合の付加質量係数・減衰係数および疎密波による流体力を用いた応答計算結果も示した。圧縮性を考慮した場合としない場合の計算結果は、周波数が 1.0 Hz 以下では一致しているが、これ以外の領域では大きな差異が認められる。図で応答値が 0.8 Hz 付近で増加するのは、この周波数が水中トンネルの上下方向の固有周波数に対応しているためである。

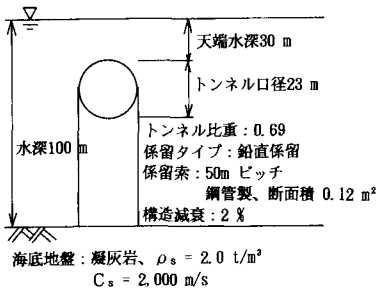


図-5 計算条件

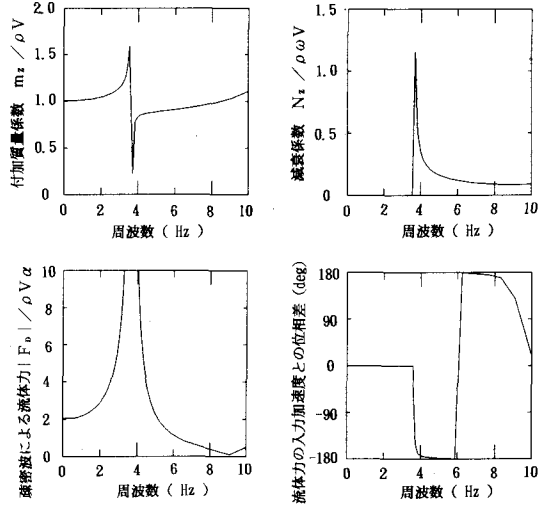


図-6 流体力特性の周波数による変化

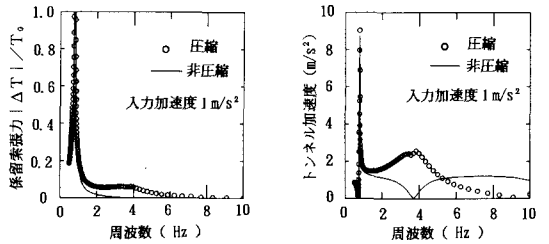


図-7 加速度と係留索張力の周波数応答特性

4.3 地震動に対する応答特性

(社)水中トンネル研究調査会海底土質小委員会(1992)で求められた入力地震動 [最大加速度 120 gal] に対するトンネルの応答を計算した。図-8 に入力地震動の特性を、図-9, 10 にトンネル加速度、係留索張力応答の時刻歴を示す。図では非圧縮条件での流体力の値を用いた計算結果も示した。図から、圧縮性を考慮した結果では海水層の疎密波による 1 次の卓越周波数 3.7 Hz 付近の成分が、加速度・張力応答に顕著に見られ波形が非圧縮の場合と大きく異なっている。また、設計で問題となる応答の最大値については、圧縮性の考慮の有無で有意な差異が生じ、水深 100 m の今回の検討でも圧縮性を考慮する必要があることが分かる。

5. おわりに

流体圧縮性を考慮したグリーン関数による境界積分法で流体力を厳密に評価し、これを用いて水中トンネルの地震応答解析手法を提案した。そして、水深 100 m の場合に水中トンネルの諸元を用いた解析を行い、流体力特

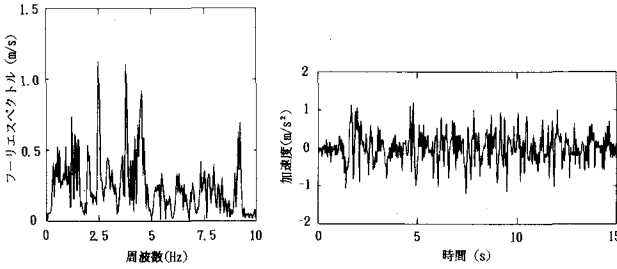


図-8 入力地震動の特性

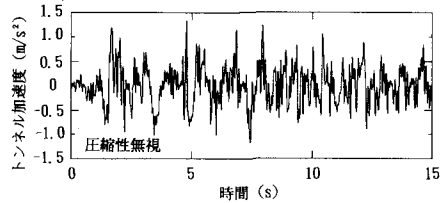
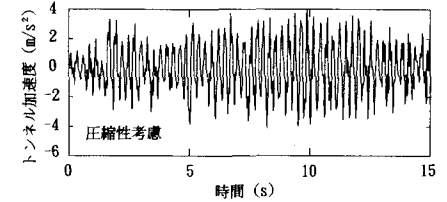


図-9 トンネル加速度応答の時刻歴

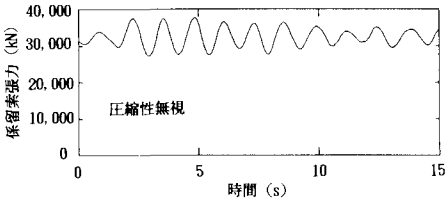
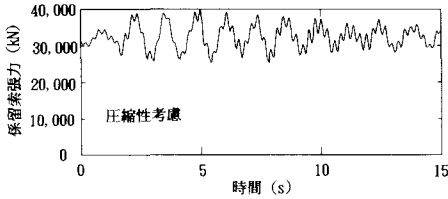


図-10 係留索張力応答の時刻歴

性や地震応答特性に与える海水圧縮性の影響が無視できないことを示した。今後は、海水圧縮性の影響を近似的に考慮した山崎ら(1993a)の方法との比較などを通して水中トンネルの耐震設計手法の確立を計りたい。

本研究を進めるにあたって貴重な御指導・御助言を頂いた(財)電力中央研究所我孫子研究所FBR部萩原豊氏に深く感謝の意を表す。また、本研究は、(社)水中トンネル研究調査会事務局および会員各位を始め、北海道大学、北海道開発局開発土木研究所のご指導、ご理解の

もとに行われた。特に、流体力研究小委員会主査北海道大学佐伯浩教授には貴重な御指導を頂いた。ここに感謝の意を述べさせていただくとともに、流体力研究小委員会参加各社を以下に紹介する。五洋建設、西松建設(以上幹事)、熊谷組、日本国土開発、間組、北海道電力(以上会員、五十音順)。

参 考 文 献

清川哲志ら (1990): 圧縮流体中の任意形状没水構造物に作用する地震時動水圧の解析, 海岸論文集, 第37巻, pp.639-643.
 水中トンネル研究調査会海底土質小委員会 (1992): 噴火湾における設計入力地震動の作成, p. 80.
 田中良弘(1983): 円柱海洋構造物の地震応答解析, 第30回海講論文集, pp. 366-370.
 中村孝幸ら (1982): わき出し分布法を用いた2次元物体まわりの波変形と流体力の解析法, 第29回海講論文集, pp. 462-466.
 畑野 正 (1949): 重力堰堤に作用する地震力の影響(その2) 地震時動水圧の正解, 土木学会論文集, No. 3, pp.173-183.
 山崎 晶ら (1993a): 上下方向地震動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.
 山崎 晶ら (1993b): 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.