

II-23 波力測定による多孔壁の抗力係数および質量係数の推定

室蘭工業大学 正会員 近藤淑郎
室蘭工業大学 学生会員 佐藤隆一

1. まえがき

近年、海岸保全、港湾内外の静穏維持及び港内の海水汚濁の緩和の為に特殊防波堤の開発、研究がなされ様々の機会にその成果が発表されその施工例¹⁾も多い。特に多孔壁型消波堤はその代表例であり、多くの実験的、理論的研究がなされている²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾。筆者の1人も複数の多孔壁型透水壁の組み合わせにも適用できる理論⁶⁾を発表し実験による検討を重ねてきた。しかし理論値の算定にあたっては多孔壁への波浪作用時の消波機能、消波効果等の特性を示している抵抗係数、質量係数をどのように決定するかが大きな問題となる。筆者らは特に質量係数の推定法について、運動方程式を用いる方法⁷⁾、波高分布による方法⁸⁾を試み考察してきたがまだ満足する段階にはいたっていない。そこで波力を決定するのに用いられる抗力係数と質量係数は上述の抵抗係数、質量係数と比例関係にあることに注目し円柱構造物と同様に多孔壁に作用する波力を測定することにより波力に関する抗力係数、質量係数を求めてみた。

従来円柱構造物に作用する波力算定については主としてMorison式⁹⁾¹⁰⁾を用いて進められ、両係数の決定方法は、(1). 周期内の2定点から決定する (2). 最小二乗法により全体の波力と理論波力の差が最も小さくなるよう決定する¹¹⁾ (3). 実測波力を各時間ごとに正確に表現するよう決定する¹²⁾ 等の方法がある。また水平水粒子速度、加速度の表示式は一般的には有限振幅波理論が用いられている¹³⁾。しかし今回は部分重複波を対象とする為波力算定式に用いる波動理論は微小振幅波理論とし、抗力係数、質量係数の決定には(3)のAl-Kazilyの方法を模して行い、その結果について考察を行った。

2. 波力算定式および解析方法

1). 波力算定式

多孔壁構造物に作用する全波力は揚力が働かないとするとMorisonが提案した抗力と慣性力の線型和として次式で表わされる。

$$F_{\text{total}} = F_D(t) + F_I(t) = C_D(t) f_D(t) + C_M(t) f_I(t) \quad \dots (1)$$

$$F_D(t) = C_D(t) \int_{-h}^{\eta} \rho \frac{U|U|}{2} dA \quad \dots (2)$$

$$F_I(t) = C_M(t) \int_{-h}^{\eta} \rho \dot{U} dV \quad \dots (3)$$

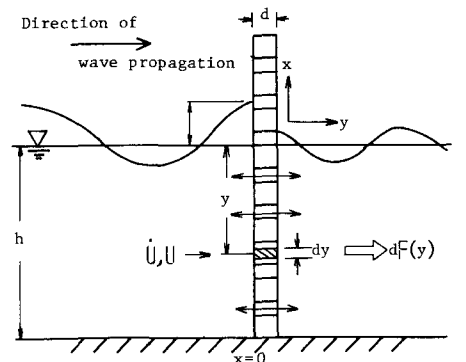


FIG.1 DEFINITION SKETCH AND COORDINATE SYSTEM

ここで dA , dV は水深方向の積分を容易にする為には多孔壁前面の面積を円柱列に換算した単位面積及び単位体積であり抗力係数 C_D 質量係数 C_M は水深方向には変化しないと仮定した。多孔壁透過堤では円柱等の孤立構造物とは異なり反射波を無視することはできないので(2)(3) 式中の水平水粒子速度 U , 水平水粒子加速度 $\dot{U}$ は微小振幅波理論により部分重複波を考えて求めた。 A_I =入射波振幅, A_R =反射波振幅, $k=2\pi/\lambda$, $\sigma=2\pi/T$ とし位相を無視すると多孔壁前面での波形, 水平水粒子速度及び加速度は次式で表わされる。

$$\eta = A_I \cos(kx - \sigma t) + A_R \cos(kx + \sigma t) \quad \dots (4)$$

$$U = (A_I - A_R) \frac{\sigma \cosh k(h+y)}{\sinh k(h+y)} \cos kx \cos \sigma t + (A_I + A_R) \frac{\sigma^2 \cosh k(h+y)}{\sinh k(h+y)} \sin kx \sin \sigma t \quad \dots (5)$$

$$\dot{U} = -(A_I - A_R) \frac{\sigma^2 \cosh k(h+y)}{\sinh k(h+y)} \cos kx \sin \sigma t + (A_I + A_R) \frac{\sigma^2 \cosh k(h+y)}{\sinh k(h+y)} \sin kx \cos \sigma t \quad \dots (6)$$

$\lambda = 0$ として式(5), (6)を式(1), (2), (3)に代入し整理すると全波力として次式を得る。

$$F_{total} = \frac{rC_0kh}{2}B(1-\lambda)\frac{(a_1-a_2)^2}{\sinh 2kh}\left[\frac{1}{2kh}\sinh 2kh\left(1+\frac{\eta}{k}\right)+\left(1+\frac{\eta}{k}\right)\right]\cos \omega t[\cos \omega t]-rC_M B(1-\lambda)d\frac{(a_1-a_2)}{\cosh kh}\left[\sinh kh\left(1+\frac{\eta}{k}\right)\right]\sin \omega t \cdots (7)$$

上式中 r は水の単位体積重量, B は構造物幅, d は多孔壁厚, λ は空隙率である。

2). 抗力係数 C_D , 質量係数 C_M の算定方法

ここでは C_D, C_M が水深に関しては一定であるとし, 実測による波力と多孔壁前面水位の時間-波形記録を一定時間間隔 Δt で読み取りその波力が各時間で(7)式と一致するように次の方法によって両係数を求めた。任意時間 t および微小時間 Δt 後に多孔壁に作用する波力は各々次式で表わされる。

$$F_{measure}(t) = C_D(t) \cdot f_D(t) + C_M(t) \cdot f_M(t) \cdots (8)$$

$$F_{measure}(t+\Delta t) = C_D(t+\Delta t) \cdot f_D(t+\Delta t) + C_M(t+\Delta t) \cdot f_M(t+\Delta t) \cdots (9)$$

C_D, C_M が Δt 間でほとんど変化しないと考え $C_D(t), C_M(t)$ と $C_D(t+\Delta t), C_M(t+\Delta t)$ を各々 $C_D(t+\Delta t/2), C_M(t+\Delta t/2)$ に近似する。この両係数を式(8),(9)に代入し連立方程式を解くと次式の解が得られる。

$$C_D(t+\frac{\Delta t}{2}) = \frac{F_M(t+\Delta t) \cdot f_M(t) - F_M(t) \cdot f_M(t+\Delta t)}{f_D(t+\Delta t) \cdot f_M(t) - f_D(t) \cdot f_M(t+\Delta t)} \cdots (10)$$

$$C_M(t+\frac{\Delta t}{2}) = \frac{F_M(t+\Delta t) \cdot f_D(t) - F_M(t) \cdot f_D(t+\Delta t)}{f_D(t) \cdot f_M(t+\Delta t) - f_D(t+\Delta t) \cdot f_M(t)} \cdots (11)$$

上記の式にも $t, t+\Delta t$ における f_D, f_M と実測による $F_M(t), F_M(t+\Delta t)$ を代入することにより時間 t までの C_D, C_M の近似値を決定することができる。なお微小時間 Δt の取り方によって C_D, C_M の値が大きく作用されと考えられるがここでは読みとり時間間隔 Δt は $T=0.7\text{sec}$ で 0.05sec $T=0.8\text{sec} \sim 2.2\text{sec}$ では $\Delta t=0.10\text{sec}$ であり $\Delta t=\Delta t$ とすることは精度上できないので t と $t+\Delta t$ での波力, 水位の時間記録から $\Delta t/5$ の値を線型補正し $\Delta t=\Delta t/5$ として解析を行った。また解析には有効時間内の2波を用いた。 t の算定は記録紙の送り速度より換算し水位が上昇し静水面に交わった時刻 $t=-T/4$ その後下降し再び静水面と交わった時刻 $t=T/4$ の中間時刻を $t=0$ と定めた。なお抗力は自乗された水平水粒子速度に関しての水深方向の積分によって表わされることを考慮し水平水粒子速度および Reynolds 数, Keulegan Carpenter 数は次式で定義した。

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dy / (h+m)}, Re = U_{rms} \phi / \nu, KC = U_{rms} T / d \cdots (12)$$

式中 ϕ は孔径, d 多孔壁厚, T 周期, ν 動粘性係数である。

3. 実験装置及び方法

実験は長さ18.0m, 幅0.4m, 高さ1.0mの片面ガラス張りの2次元造波水槽を用いて行い。造波機の前12.6mの位置に波力検出計を設置した。この装置はFig. 2に示すように壁厚30.0mm, 高さ600.0mm, 幅400.0mmのアクリル板に孔径40.0mmの孔を配置し空隙率を34%とした多孔壁をL形鋼で補強し装置全体の固有振動周期, 減衰定数等の振動特性の均一化を計ったものである。波力測定アーム部は30mm×9mmの断面を有する平鋼でありアーム上端部は合計4ヶ所固定してあり検出計全体として片持梁構造としてある。アーム1本につきその表裏には20.0cm間隔で120Ω, ゲージファクター2.10のストレインゲージが貼ってあり荷重をモーメントとして検出しブリッジ回路の不平衡電

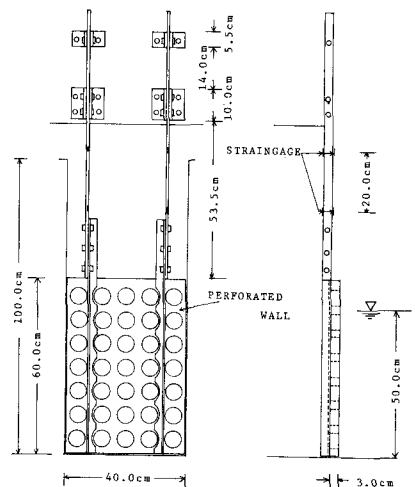


FIG.2 EXPERIMENTAL APPARATUS

流として動歪計を通じビジグラフに記録させた。多孔壁前面水位は多孔壁より1cm沖側に設置した容量式波高計により同時に記録した。入射波振幅 A_i 、反射波振幅 A_r は多孔壁の沖側に配置した2台の可動台に取りつけた容量式波高計を用いHealyの方法で決定した。なお本実験は $T=0.7\text{sec} \sim 2.2\text{sec}$ の8種を用い波高は約1.0cmから7.0cmの範囲で行った。

4. 実験結果及び解析結果

1). 周期的外力に対する応答特性⁽⁴⁾

波力等の時間の関数で作用し短い時間間隔で急激に変化する力が働く場合にはこれらの力に対する応答を考慮した測定系でなければならない。そこでFig. 2に示すような波力検出計では減衰自由振動の振幅は一定の減衰比で減少するのが特徴でありこのことを利用して波力検出計に衝撃力を作用させその測定系の特性を空気中と水中について調べた。今回の実験は外力が周期的に作用する場合を扱っているので式(13)の正弦力が作用すると考えると最大変位と作用外力の比は式(14)で示される。

$$F(t) = F_p \sin\left(\frac{\pi}{T}t\right) \quad \dots (13)$$

$$\frac{\chi_{\max}}{F_p} = \frac{1}{\sqrt{\left[1 + \left(\frac{T_n}{2T}\right)^2\right]^2 + \beta^2 \left(\frac{T_n}{T}\right)^2}} \quad \dots (14)$$

上式で T は外力の半周期で T_n は固有振動周期、 β は減衰定数である。(14)式にTable.1に示した波力測定系の応答特性の実験値を用いて共振曲線を描くと実験に用いた周期の範囲内では $\chi_{\max}/F_p$ と時間遅れは周期に無関係に1に漸近しこの結果この波力検出計は作用外力を忠実に再現するといえることができる。

TABLE.1 RESPONSE CHARACTERISTICS

	δ	β	T_n	f_n
空中時	0.105	0.0167	0.125	8.0
水深41.3cm時	0.078	0.0124	0.060	16.7

δ : 減衰定数

T_n : 固有周期

β : 減衰定数

f_n : 固有振動数

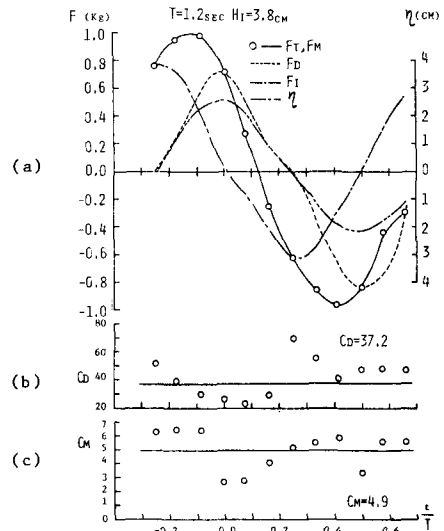


FIG.3 EXAMPLE OF VARIATION OF FORCE, C_D AND C_M DURING A WAVE CYCLE

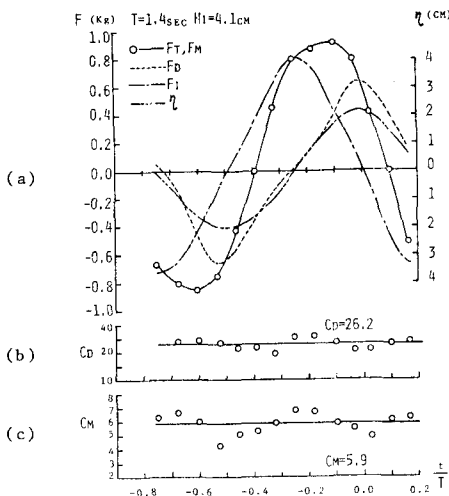


FIG.4 EXAMPLE OF VARIATION OF FORCE, C_D AND C_M DURING A WAVE CYCLE

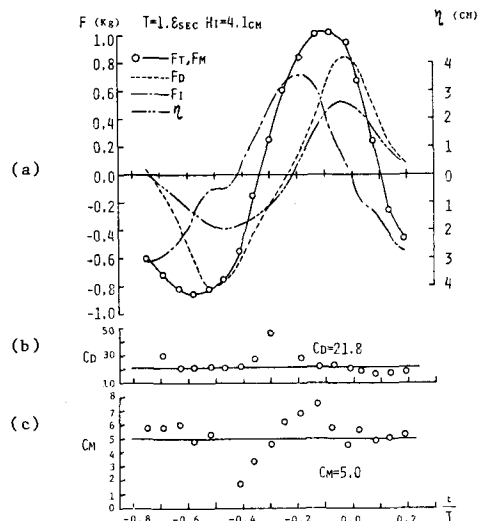


FIG.5 EXAMPLE OF VARIATION OF FORCE, C_D AND C_M DURING A WAVE CYCLE

2). 実測波力と理論波力

Fig. 3, 4, 5の(a) は実測の波力, 多孔壁前面水位と理論波力の時間変化を示している。なお理論による波力の各成分の値は各測定時間と同時刻の部分でしか計算されていないがそれらの変化を示す為図中にあるような各線で結んである。

3). 抗力係数 C_D , 質量係数 C_M の時間変化

Fig. 3, 4, 5の(b), (c)は前述の方法により得られた C_D と C_M の時間変化を示したものである。両係数とも時間変動し円柱の解析結果⁽¹⁰⁾⁽¹⁵⁾と同様に C_D は $t/T=0.25, 0.75$ でピークをとる変動を示した。しかし C_M も0.25づつ C_D の変動とずれてピークが出現していることが認められさらにこれらの変動が(a)に示した抗力と慣性力の各成分の変化に対応していることからこれらの原因は抗力あるいは慣性力が卓越している領域では各々 C_M と C_D の計算精度が低下することが主な原因で変動が起こると考えられる。特に C_D に対しての影響が大であると思われる。従ってこれらの時間変動の平均値 $\bar{C}_D$, $\bar{C}_M$ はこの部分を除いて求めたものである。この考え方で求めた平均値 $\bar{C}_D$, $\bar{C}_M$ は図中に示してあるがそれらの値は各々抗力, 慣性力が卓越している領域で決定された C_D , C_M に近い値をもっている。又その近傍では各係数の値は安定しているといえる。

4). 抗力係数 C_D とRe数の関係

Fig. 6には時間変動する C_D の平均値をRe数で整理した結果を示した。ただし前述のように精度上の理由から $t/T=0.25, 0.75$ に対応する値は除いてある。実験波の制約の為に $150 < Re < 1100$ 程度の範囲内での値しか得られていないが筆者らの行った定常流での抵抗係数の実験結果⁷⁾によるとRe数に対して抵抗係数が一定値に近づくつまり乱流項の影響が卓越してくるのは $Re \geq 2000$ であり今回の実験範囲はRe数に反比例する層流の影響領域であると思われる。図中に示した線は今回の実験値の上限, 下限, 中間値により決定した近似式によるものである。なお C_D をKC数で整理してみたが明確な関係は得られなかった。これは円柱の実験結果で渦のスケールが小さい層流域ではRe数により整理され渦が大きくなるとKC数によく対応することが示されている⁽⁵⁾が本実験の範囲が層流域である為Re数の方がよく整理されたと思われる。

6). 質量係数 C_M と比水深 h/L の関係

筆者らが行った波高を一定とした波高分布による質量係数の推定値からは h/L との一意的な関係が予想された。そこでここでも同様に C_M を h/L で整理してみたのがFig. 7である。ただしKC数をパラメータとし $KC < 0.18$ と $KC \geq 0.18$ の2つに大別してある。これによると全体的傾向として C_M は h/L が小さいほど大きな値をとるようであり波高分布による推定法と同様な傾向を示している。しかしその傾向はKC数によっても左右されると思われる。なお波高分布により推定した領域は $KC \geq 0.18$ である。

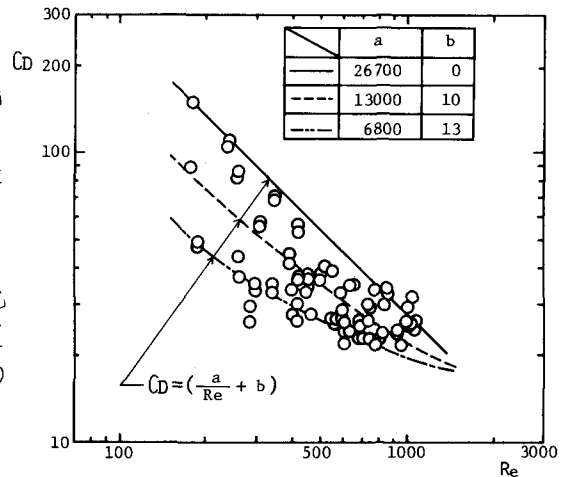


FIG.6 RELATIONS BETWEEN C_D AND REYNOLDS NUMBER

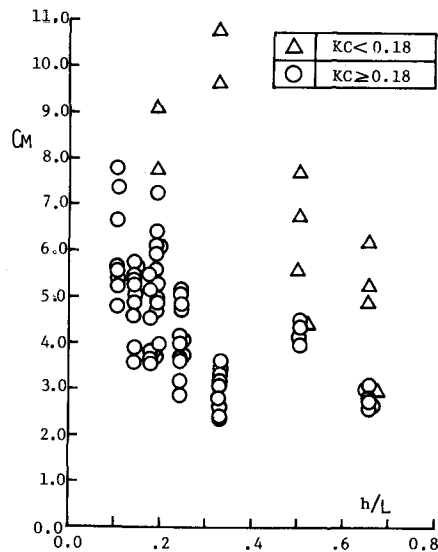


FIG.7 RELATIONS BETWEEN C_M AND h/L

6). 質量係数 C_M と波形勾配 H_1/L の関係

Fig. 8 では渦の発生に密接な関係があるといわれる KC 数によりばらつきが整理された。同様に波形勾配が増大すると渦の発生が著しくなることが考えられ抗力が増大する為 C_M は減少すると考えられる。Fig. 8 では $H_1/L > 0.05$ の値が小さい為確定的ではないが $H_1/L = 0.015$ 付近からゆるやかな勾配を示し一定値へ近づく傾向を示していると思われる。

7). 質量係数 C_M と KC 数の関係

Fig. 9 には h/L によって $h/L < 0.2$, $0.2 \leq h/L < 0.5$, $h/L \geq 0.5$ の3つの領域に大別した C_M と KC 数の関係を図示した。Keulegan Carpenterによれば KC 数は渦の発生機構と密接な関係があり KC 数が小さいほど流れの場が乱れず渦の発生は少ないと指摘している。これらを参考にすると KC 数の小さいほど慣性力が卓越することになり図示のような傾向を示したものと思われる。ただしこの傾向は大別した h/L の各領域ごとのものでありFig. 7 でも示されているように h/L が増大、つまり深水性が大きくなるにつれて C_M は小さくなっていく。

5. あとがき

微小振幅波理論によって位相差が生じない場合の部分重複波を仮定しMorison式にならい波力算定式を誘導し実験波力から水深方向には一定とした抗力係数 C_D 、質量係数 C_M が周期内では時間変化するとしたAl-Kazilyの方法を模して抗力係数 C_D 、質量係数 C_M を算定しその値について検討してみた。その結果多孔壁構造においても円柱等の解析結果とはほぼ同様の傾向を示すことがわかった。しかし時間変動するこれらの両係数の平均値はピークを除いて考えた方がより代表値としては適当であると思われる。整理方法は抗力係数については Re 数で良く整理できた。質量係数 C_M については KC 数が対応するようであるが h/L によってもその値が変化する為さらに検討する必要があるであろう。本解析に用いた波力算定式は位相を考慮していないが位相を加えると水平水粒子速度は大きく加速度は小さくなる。従って本解法による抗力係数 C_D は大きく C_M は小さく算出しているおそれがあるが本実験に用いた構造物は空隙率が34%であり位相による影響は小さいと思われる。今回は微小振幅波理論による水平水粒子速度、水平水粒子加速度の推定が適切であるかについての検討は行えなかった。また構造物の特性である空隙率、孔径、壁厚等の変化に対してどのような挙動を示すかということも興味のある問題である。今後はこれらの事を考えあわせてさらに検討を加える所存であります。

終りに本研究の遂行にあたり終始御指導いただいた河海研究室の藤間聡助教、谷野賢二助手、実験ならびにデータ整理に協力いただいた浅間良則技官、本学4年目学生服部千華寿君、森山啓一君に感謝いたします。

参考文献

- 1). 岩田, 小山, 小川, 時川: 特殊防波堤の開発, 土木試験所報告 第67号 1977

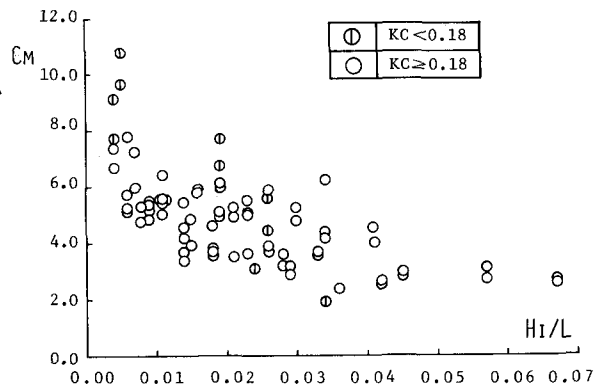


FIG.8 RELATIONS BETWEEN C_M AND H_1/L

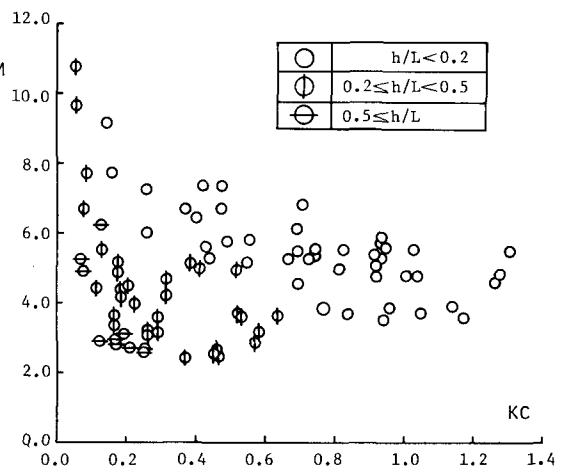


FIG.9 RELATIONS BETWEEN C_M AND KC MODULUS

- 2) 近藤, 佐藤, 小松山: 各種多孔壁防波による波の反射・伝達特性, 土木学会北海道支部論文報告集 第33号
PP157~PP162 1977
- 3) F.L.Terrett, J.D.C.Osorio, G.H.Lean: Model Studies of A perforated Break water, Proc. 11th Conf. on Coastal Eng.,
PP1104~PP1120 1968
- 4) 服部: 多孔壁式防波堤の水理特性, 第18回海岸工学講演会論文集, PP115~PP120 1971
- 5) 岩田: 波の制御構造物, 海岸における波の制御に関する研究, PP19~PP25 1977
- 6) 近藤: 二重透水壁式防波堤の消波理論, 第14回自然災害シンポジウム講演会論文集, PP439~PP442 1977
- 7) 近藤, 佐藤, 高橋: 透水壁型防波堤における透水壁の水理特性の効果, 土木学会北海道支部論文報告集 第
第34号 PP223~PP226 1978
- 8) 近藤, 佐藤: 波浪変形問題における透水壁の質量係数の推定について, 第33回年次学術講演会講演概要集
PP756~PP757 1978
- 9) Morison J.R, J.W.Johnson, M.P.O'Brien: Experimental Studies of Force on Piles, Proc. 4th Conf. on Coastal Eng.,
PP340~PP370 1953
- 10) Ippen, A.T (Ed): Estuary and Hydrodynamics, McGraw-Hill, PP.341~403, 1966
- 11) Chakrabarti, S.K, A.L.Wolbert, W.A.Tam: Wave Force on Vertical Circular Cylinder, Jour. of ASCE, WW2, PP203~PP221
1976
- 12) 林, 重村: 波力算定式中の抗力係数および質量係数の時間的变化について, 第24回海岸工学講演会論文集
PP337~PP341 1977
- 13) 土屋, 山口: 直円柱に作用する全波力について, 土木学会論文報告集, 第227号 PP11~PP21 1974
- 14) 合田: 衝撃荷重の測定について, 港湾技研資料 N033 1967
- 15) R.L.Wiegel: Oceanographical Engineering, Prentice-Hall PP248~PP271. 1964