

非線形波動場を対象とした自由波制御型無反射造波法

大山 巧*・土田 充**・川口 隆***・鈴木志人****

1. はじめに

水槽底面で鉛直振動流を与える造波法（合田，1964）は，無反射型造波が容易に行える点に最大の特長があり，最近では造波効率の向上も試みられている（田中ら，1993）．特に，造波板を用いたピストン型やフラップ型造波装置における反射波吸収が線形理論に基づいているのに対して（川口，1986；平口ら，1988），この方法の造波原理は数値波動水槽（大山・灘岡，1991）における造波ソースと類似しているため，造波孔の背後に消波装置を設けておけば非線形不規則波に対する反射波吸収効果も期待できる．

このように，鉛直振動流方式の造波水路では，反射率の大きい模型を対象にした非線形不規則波の実験も基本的に可能であるが，通常は線形の造波理論が用いられているため，波高の大きい非線形波動領域の実験では発生波形がかなり乱れてしまうという工学上重要な問題が残されていた．このような波形の乱れの原因は，造波時に寄生的に発生する高次の自由波（寄生自由波と称する）によるものである．

ピストン型やフラップ型造波装置に関しては，2次ストークス波の造波理論が Madsen（1971）および Flick and Guza（1980）などにより導かれており，さらに不規則波中の拘束長周期波の造波については Barthel et al.（1983），Sand et al.（1985），池野・田中（1995），寛田・水口（1996）などにより行われている．しかしながら，上述のように，これらの装置で非線形波の反射波吸収を行うことは困難である．したがって，例えば，拘束長周期波を対象にした不規則波実験では，反射波が造波板に到達する前に計測を終了しなければならず，かなり長い水路を必要としていた（池野・田中，1995）．

そこで本研究では，鉛直振動流方式の無反射型造波装置を対象に，寄生自由波を相殺するための自由波（制御自由波と称する）を基本波動成分とともに造波する無反射型の造波法を提案し，数値解析および実際の実験水路

を用いて本造波法の性能を検証する．

2. 自由波制御型造波法の基本原理と数値モデルによる検証

（1）自由波制御の考え方と造波法

ここでは簡単のため，弱非線形規則波を対象に自由波制御の基本的考え方を述べる．図-1の概念図に示されるように，水槽内で角振動数 ω の正弦波外力を与えて波高の比較的大きな波を造波させると，基本周波数成分 (a_0) のほかに， 2ω の振動数を持つ拘束波 (a_B) とそれに寄生する自由波 (a_F) が発生する．しかし，拘束波が基本周波数成分と同じ位相速度で伝播するのに対して，寄生自由波はこれよりも遅い位相速度を持つため，波の伝播に伴う位相干渉により水路内に形成される波形はかなり乱れることになる．

そこで本造波法では，図-1に破線で示している，寄生自由波と同じ振幅と振動数で逆の位相を持つ自由波（制御自由波と称する）を基本波動成分とともに造波することにより，これら自由波間の相殺効果を利用して，結果的に基本波動成分と拘束波成分から構成される非線形保存波（図-1）を発生しようとするものである．なお，ピストン型やフラップ型などの流速制御形式の造波装置で

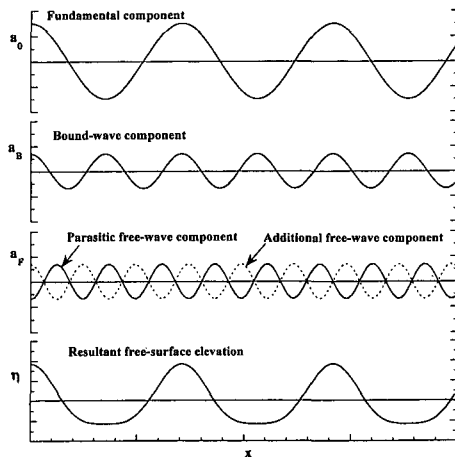


図-1 自由波制御の基本的考え方の概念図

* 正会員 工博 清水建設(株)技術研究所環境技術研究部
 ** 正会員 工修 清水建設(株)技術研究所環境技術研究部
 *** 正会員 三井造船(株)メカトロ・システム事業部
 **** 三井造船(株)メカトロ・システム事業部

は造波板の有限振幅性に対応した自由波成分も発生するが(例えば Sand et al., 1985), 鉛直振動流型造波装置は流量制御であるためピストンの有限振幅性の影響はない。本研究では, Mei (1988) が示したように, 寄生自由波は拘束波と同じ振幅を持ち, 造波孔位置では逆位相になっていると仮定する。したがって, 結果的には拘束波と同じ振幅で造波孔位置で同位相となる制御自由波を発生させればよいことになる。この仮定は長波近似に基づくものであり, 短周期波に対しては必ずしも厳密な取り扱いではない。ただし, 基本波動成分が短周期波の場合には, 拘束波や寄生自由波の振幅自体が相対的に小さくなることから, 制御自由波の振幅と位相の与え方に厳密性がなくても実用的には問題がないと考えられる。

上記の基本原理は不規則波に対しても適用できるので, ここでは 1 次オーダーの水面変動量 $\zeta^{(1)}$ が N 個の周波数成分の和として,

$$\zeta^{(1)} = \sum_{i=1}^N a_i \cos(k_i x - \omega_i t + \varepsilon_i) \quad \dots\dots\dots (1)$$

と与えられる場合のピストン変位について具体的に示す。ここで, $a_i, k_i, \omega_i, \varepsilon_i$ は成分波の振幅, 波数, 角振動数, 初期位相である。ストークス波流の摂動解を適用すれば, 制御自由波 $\zeta^{(2)}$ は, 各成分波の和の波, 差の波に対応した拘束波成分と同様の振幅, 周波数, 初期位相を持ち波数(波速)のみが異なるものとして以下のように表せる。

$$\begin{aligned} \zeta^{(2)} = & \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N a_i a_j \eta_{ij}^+ \cos[k_{ij}^+ x - (\omega_i + \omega_j)t + (\varepsilon_i + \varepsilon_j)] \\ & + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N a_i a_j \eta_{ij}^- \cos[k_{ij}^- x - (\omega_i - \omega_j)t \\ & + (\varepsilon_i - \varepsilon_j)] \quad \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

ここで,

$$\eta_{ij}^{\pm} = \frac{1}{4g} \left[4(\omega_i \pm \omega_j) \phi_{ij}^{\pm} + 2\omega_j^2 \pm \omega_i \omega_j - \frac{g^2 k_i k_j}{\omega_i \omega_j} \right] \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\begin{aligned} \phi_{ij}^{\pm} = & \pm \left[\frac{g^2 k_i^2}{\omega_j} - \omega_j^3 + (g^2 k_i k_j \mp \omega_i^2 \omega_j^2) \left(\frac{1}{\omega_i} \pm \frac{1}{\omega_j} \right) \right] \\ & / 2[(\omega_i \pm \omega_j)^2 - g(k_i \pm k_j) \tanh(k_i \pm k_j)h] \quad \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

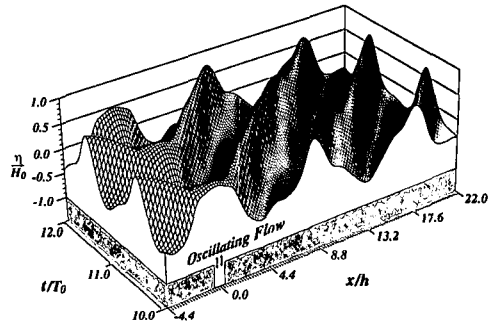
$$k_{ij}^{\pm} \tanh k_{ij}^{\pm} h = \frac{(\omega_i \pm \omega_j)^2}{g} \quad \dots\dots\dots (5)$$

したがって, 水路底面の造波孔(縦溝孔)の中に鉛直方向に運動するピストンを設ける場合には, ピストン変位 e が以下のように与えられる。

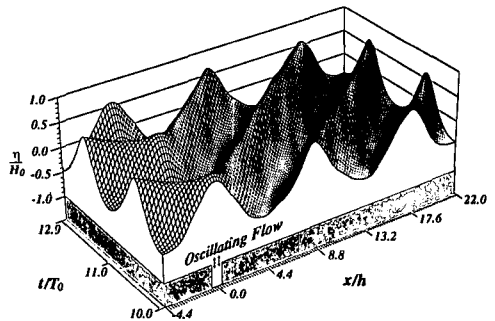
$$e = e^{(1)} + e^{(2)} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$e^{(1)} = \sum_{i=1}^N \frac{a_i}{E(k_i)} \sin(\omega_i t - \varepsilon_i) \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$e^{(2)} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{a_i a_j \eta_{ij}^{\pm}}{E(k_{ij}^{\pm})} \sin[(\omega_i + \omega_j)t - (\varepsilon_i + \varepsilon_j)]$$



(a) 自由波制御を行わない場合



(b) 自由波制御を行う場合

図-2 規則波造波に対する時空間波形の解析結果
($T_0 \sqrt{g/h} = 9.39$, $H_0/h = 0.2$, $B/h = 0.8$)

$$\begin{aligned} & + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N \frac{a_i a_j \eta_{ij}^-}{E(k_{ij}^-)} \sin[(\omega_i - \omega_j)t - (\varepsilon_i - \varepsilon_j)] \\ & \quad \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

ここで, $E(k)$ は造波効率であり, 合田 (1964) の理論解を用いれば次のように表せる。

$$E(k) = \frac{4 \sinh kh \sin(kB/2)}{2kh + \sinh 2kh} \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし, h は造波孔位置での水深, B は造波孔の幅である。なお, 造波孔とピストン部の断面積が異なる場合には, 流量フラックスが等しくなるように, 断面積比からピストン変位を換算すればよい。

(2) 数値波動水槽による自由波制御効果の検証

まず, 非線形波動場を対象とした数値波動水槽(大山ら, 1991)を用いて, 本造波法の基本的考え方を検証した。図-2 は, $T_0 \sqrt{g/h} = 9.39$, $H_0/h = 0.2$ (T_0, H_0 : 入射波の周期と波高)の波浪条件に対して, $B/h = 0.8$ の幅を持つ造波孔からの振動流により規則波を発生させた場合の時空間波形を示したものである。 $x/h = 0$ に中点をもつ造波孔から発生した波は x の正と負の方向にそれぞれ伝播する。なお, 図には示していないが, 水路両端(x/h が ± 4.4 よりも小さい部分と 22.0 よりも大きい部分)には数値消波フィルターを設けてある。

図-2(a)に示されるように、線形理論に基づいて単に正弦波的に振動流を与えた場合には、水路内では分裂波形が顕著に現れる。この場合、基本成分よりも波速が遅い寄生自由波の波峰が明確に認められ、それが発生波形を乱す原因になっていることがわかる。これに対して、自由波制御を行った本造波法では、このような寄生自由波の発生がほぼ完全に抑制されており、水路内には非線形保存波が形成されている。

3. 実験水路への適用

(1) 実験水路と実験条件

図-3に示される実験水路を用いて、線形理論に基づいて振動流を与える場合（従来型造波法と称する）と自由波制御型造波法を用いる場合の造波性能の比較を行った。水深 h は 30 cm、造波孔の幅 B は 20 cm であり、塩化ビニール製の連通管により造波孔とピストンシリンダーが連結してある（図-3）。シリンダーの内径は 59.2 cm であり、ピストンは ± 10 cm 以内の変位振幅で運動が可能である。シリンダー部を鉛直に設けたのは、静水圧の差による偏心加重をピストンに作用させないためである。また造波孔部分は、振動流に伴う剥離渦の影響をできるだけ抑えるため、図-3に示されるようなノズル形とした。

実験では、 $T_0\sqrt{g/h}=9.14$ の規則波、および非線形不規則波への応用を念頭に置いた 2 成分波 ($\omega_1\sqrt{h/g}=0.601$, $\omega_2\sqrt{h/g}=0.773$) を造波させた。また、規則波のケースについては、本造波装置の反射波吸収性能の確認のため、水路片側に鉛直反射板を置いた場合についても実験を

行った。

基本周波数成分および制御自由波成分に対する造波効率 E については、造波孔での剥離渦などの影響も予想されたため、式 (9) の理論解ではなく予備実験により求められた値を用いた。予備実験では、各自由波成分の振動数に対して正弦波振動流を与え、造波孔から 1 m 離れた位置で測定した水面波形から基本周波数成分を FFT により抽出し、その振幅とピストンの変位振幅の比を造波効率とした。ただし、結果的には式 (9) の理論解とかなり良い一致を示した。

(2) 発生波形における自由波制御効果

図-4は、 $H_0/h=0.23$ の規則波の場合について $x/h=3.33, 6.0, 8.67, 11.3$ (x : 造波孔中心からの距離) での時間波形を示したものである。従来型造波に対する波形には、寄生自由波成分に対応した 2 次波峰が明確に現れており、測定位置により主波峰に対する位相が変化していることから基本波動成分とは異なる波速で水路内を伝播していることがわかる。これに対して自由波制御型

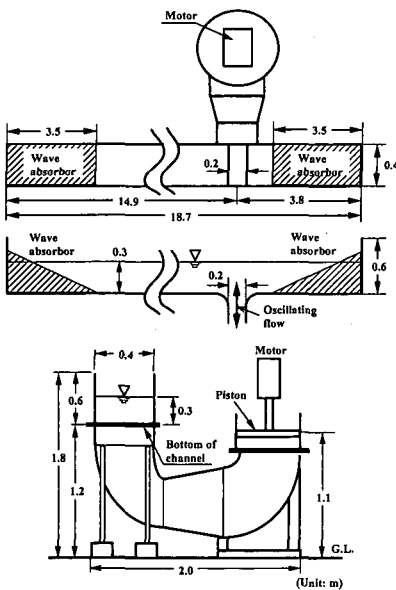
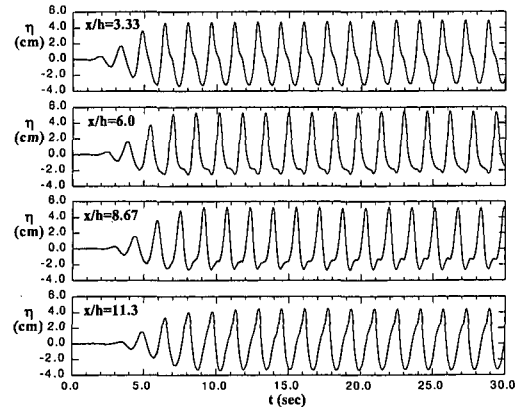
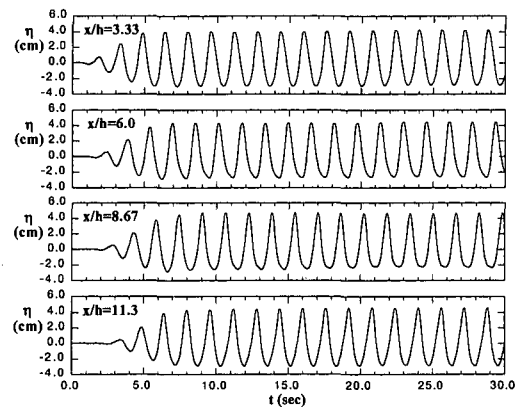


図-3 鉛直振動流型造波水路の緒元

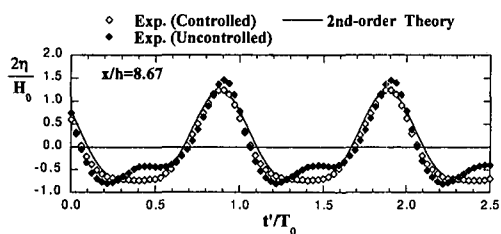


(a) 従来型造波

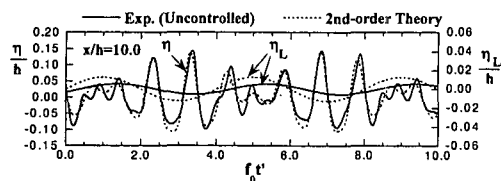


(b) 自由波制御型造波

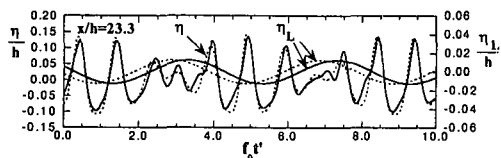
図-4 各位置での時間波形



図—5 規則波に対する実験波形と2次ストークス波理論解の比較

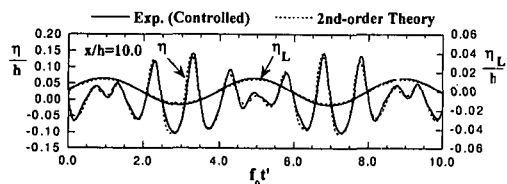


(a) $x/h=10.0$

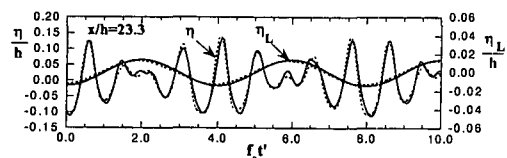


(b) $x/h=23.3$

図—6 2成分波に対する従来型造波の実験波形と2次理論解の比較



(a) $x/h=10.0$



(b) $x/h=23.3$

図—7 2成分波に対する自由波制御型造波の実験波形と2次理論解の比較

造波を行った場合には、このような寄生自由波による波形の乱れは現れず、各位置での波形にはほとんど差がない。図—5には、 $x/h=8.67$ における実験波形と2次ストークス波理論解の比較を示す。この図から、自由波制御型造波により水路内に形成される波形は、ターゲット

とした非線形波動解にほぼ一致したものであることがわかる。

図—6, 7は、 $a_1/h=a_2/h=0.0625$ の2成分波を発生させた場合の $x/h=10.0, 23.3$ における実験波形およびそれらに含まれる長周期成分波(η_L)を2次オーダー理論解と比較したものである。なお、本波浪条件における長周期成分は、平均周波数 f_0 の1/4の周波数を有している。まず、従来型造波(図—6)における個々波の波形に着目してみると、規則波の場合と同様に2次波峰の影響で波形が歪んでおり、波の谷付近や波高の小さい部分では理論解との一致がかなり悪くなっているのがわかる。また、図—6の長周期成分の波形には寄生自由長波の影響も顕著に現れている。すなわち、造波孔に近い $x/h=10.0$ では拘束長波と自由長波が逆位相に近いため長周期成分の振幅は理論解(拘束波解)よりもかなり小さいのに対して、 $x/h=23.3$ では両者の位相差が小さくなるため結果的に長周期成分の振幅が増大している。これに対して、図—7に示されるように、自由波制御型造波法では個々波、長周期成分ともに2次オーダー理論解とかなり良い一致を示しており、高周波数の寄生自由波とともに自由長波の発生も抑えられていることがわかる。したがって、本造波法は拘束長波が問題になる非線形不規則波の実験に対しても、実用上十分に有効であると考えられる。

(3) 反射波吸収性能

図—8には、 $x/h=11.8$ の位置に鉛直反射板を置き、 $T_0/\sqrt{g/h}=9.14$, $H_0/h=0.2$ の規則波を造波した場合の反射板前面($x'/h=0.0$, x' : 反射板からの距離)と $x'/h=5.81$ での実験波形(自由波制御型)を示す。造波直後の過渡的な状態を経て反射板前面に重複波が形成されてから($t>12$ sec)は有意な波形の変化が見られないことから、造波孔および背後の消波装置からの再反射はほとんど起こらないことがわかる。

図—9は、自由波制御型と従来型造波で得られた重複波の実験波形を2次オーダー重複波の理論解と比較したものである。従来型造波の場合、反射板前面位置($x'/h=0$)の波形には左右非対称性が、 $x'/h=5.81$ の波形には2次波峰の影響が顕著に現れているのに対して、自由波制御型造波の場合には理論波形と良好な一致を示している。

以上のように、鉛直振動流方式の自由波制御型造波水路では、造波板方式の水路とは異なり、反射率の大きい模型を対象とした非線形波の実験も容易に行うことができる。

5. おわりに

本研究により得られた結論を以下に示す。

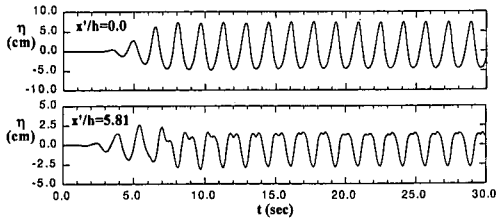
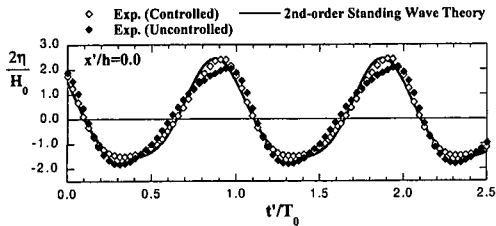
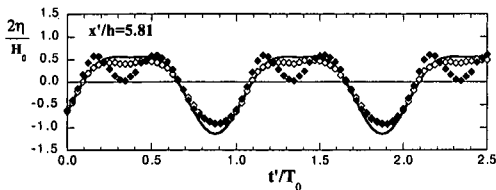
図-8 $x'/h=0.0, 5.81$ での時間波形 (自由波制御型造波)(a) $x'/h=0.0$ (b) $x'/h=5.81$

図-9 重複波形に関する2次オーダー理論解の比較

- 1) 非線形波動場を対象とした鉛直振動流方式の無反射造波法として、寄生自由波の発生を抑えることが可能な自由波制御型の造波法を提案した。この方法は、寄生自由波と同じ振幅の制御自由波を基本波動成分とともに発生させて自由波間の相殺効果を利用するという比較的単純なものであるが、基本周波数の外力のみを与える従来型造波法に比べてその造波性能は非常に高いことが、数値解析と物理実験により検証された。
- 2) 本造波法は高周波数の寄生自由波が問題になる規則波の場合だけではなく、低周波数の自由長波の発生を抑えた非線形不規則波の造波に対しても有効である。

- 3) 鉛直振動流方式の造波装置と背後の消波装置により、非線形波動場に対しても反射波吸収を容易に行うことができ、その性能も実用上は十分である。したがって、造波板を用いたピストン型やフラップ型の造波装置とは異なり、模型からの反射が問題になる非線形波動場の実験も可能である。

なお本研究では、寄生自由波成分の振幅が拘束波成分と同じであり、それらが造波位置で逆位相を有するという長波近似を用いている。物理実験を行った限りでは、この仮定は実用上問題ないと考えられるが、今後は減衰散乱波を含めた非線形干渉を考慮して、寄生自由波成分と拘束波成分間の振幅と位相の関係を理論的に求める予定である。

参考文献

- 池野正明・田中寛好 (1995): 自由長波制御により造波された波群長周期波の浅水・砕波変形と構造物による重複波の特性, 海岸工学論文集, 第42巻, pp. 156-160.
- 大山 巧・灘岡和夫 (1991): 非線形不規則波動場を対象とした数値波動水槽の開発, 土木学会論文集, No. 429, pp. 77-86.
- 寛田博章・水口 俊 (1996): 単一波群による長周期波, 海岸工学論文集, 第43巻, pp. 161-165.
- 川口 隆 (1986): 波面検出及び速度制御を用いた無反射造波方式, 三井造船技報第128巻, pp. 20-24.
- 合田良実 (1964): 鉛直振動流による造波の理論について, 第11回海岸工学講演会論文集, pp. 69-73.
- 田中正博・大山 巧・清川哲志 (1993): 湧き出し吸い込み型の無反射造波装置の造波特性について, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 41-45.
- 平口博丸・鹿島遼一 (1988): 水面波形制御方式による無反射造波機の不規則波実験に対する適用性, 電力中央研究所報告 U 88013, pp. 1-48.
- Barthel, V., E. P. Mansard, S. E. Sand and F. C. Vis (1983): Group bounded long waves in physical models, Ocean Eng., Vol. 10, pp. 261-294.
- Flick, R. E. and R. T. Guza (1980): Paddle generated waves in laboratory channels, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Div., ASCE, Vol. 106, pp. 79-97.
- Madsen, O. S. (1971): On the generation of long waves, J. Geophys. Res., Vol. 76, pp. 8672-8683.
- Mei, C. C. (1989): The applied dynamics of ocean surface waves, World Scientific Publishing, pp. 578-593.
- Sand, S. E. and B. Donslund (1985): Influence of wave board type on bounded long waves, J. Hydraulic Res., Vol. 23, pp. 147-163.