

直立防波堤への衝撃波力の算定方法の提案

Violent Wave Impact on Vertical Wall using Pressure-Impulse Theory

Nguyen Danh Thao¹・高木泰士²・柴山知也³

Nguyen Danh Thao, Hiroshi TAKAGI, Tomoya SHIBAYAMA

Breaking waves on coastal structures produce impulse pressures that are high in magnitude and short in duration, compared with pressures exerted by non-breaking waves. The present study is concerned with a theoretical approach, which is based on the momentum impulse, to simulate the impact pressures on a vertical wall. The theoretical impact pressures are determined using varied velocity before impact process. The velocity field in the vicinity of structure is calculated by LES model including turbulence. The necessary coefficient λ^* to evaluate impulse pressures is tentatively obtained through a comparison between the laboratory tests and the numerical results. The computational results using the coefficient obtained show time-histories of pressure with nonlinearity rather than linearity considered ever.

1. はじめに

波力は海岸構造物の設計に際して最も重要な外力である。特に、直立式や傾斜式の防波堤前面で発生する衝撃碎波においては、非碎波時の波圧と比較して、極めて強大な圧力が瞬間的に作用して、防波堤に甚大な被害を及ぼす可能性がある。現在のわが国の防波堤の設計においては、衝撃碎波型の波圧が発生しないよう防波堤断面に熟慮を凝らすことが重要視されており、一般的にはこの衝撃碎波圧を対象外力として防波堤が設計されることはほとんどない。しかし、時として波高相当分の動水圧の数十倍にも及ぶ衝撃碎波圧が防波堤に作用する可能性は完全には否定できず、衝撃碎波圧の問題は依然工学的にも重要なテーマである。

衝撃碎波圧に関する研究は、Bagnold(1939)の研究にはじまり、これまで数多くの研究者により取り組まれてきた。Wagge and Maxwell(1970)は、実験結果に基づいて衝撃碎波圧を著しい碎波圧 (significant impact pressures) と通常の碎波圧 (ordinary impact pressures) の2タイプに分類して議論を行い、両者とも波形勾配に依存することを指摘した。また、Hattori et al.(1994)は、衝突直前の wave front がほぼ垂直で若干の気泡を混入した状態で直立部へ衝突する条件が最も顕著な衝撃碎波圧を発生させることを実験により明らかにしている。その他、Kirkgoz(1995)、Wood et al.(2000)などの研究においても、wave front がほぼ垂直な状況において顕著な衝撃碎波圧が発生することが確認されている。

一方、Kirkgoz and Mamak (2004) は、領域内の圧力インパルス境界要素法により解く方法で衝撃碎波圧を算出し、実験結果との比較を行っている。しかし、ここでの数値計算においては運動量の計算で使用する水塊の流速として波速等の代表値を仮定している。しかし、実際には衝突直前の水塊の流速は、水深方向に変化し、また時間的にも複雑に変化するため、衝撃碎波圧の波圧分布は時間的・空間的に一様ではない。そこで、本研究では3次元 LES モデルを使用して、防波堤前面の流速場を詳細に評価して、水理模型実験の結果との比較を通じて、流速場の時間的・空間的な変動を考慮した衝撃碎波圧係数の算定手法の提案を試みる。

2. 3次元 LES を用いた防波堤前面流速場の評価

流速場の解析には、Wijayarathna・Okayasu (2000) の3次元のナビエ・ストークス方程式を対象とした LES モデルを使用した。解析は、比較的規模の大きい渦に対してはフィルターにより広帯域化したナビエ・ストークス方程式を直接解くことにより求め、それ以下の規模の渦 (格子スケールよりも小さな渦) に対しては Sub-grid scale (SGS) モデルを適用して間接的に解く。以下に数値解析モデルの概要を示す。

流体解析の基礎方程式は、以下に示す空間平均化が施された連続式およびナビエ・ストークスの方程式である。

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \dots \dots \dots (1)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij}) + g_i \dots \dots \dots (2)$$

ここで、 $\bar{u}_i$ は空間平均化された i 方向成分の平均流速、 t は時間、 ρ は流体密度、 $\bar{p}$ は平均圧力、 g_i は重力加速度、 τ_{ij} は SGS 応力項であり次式で表される。

1 M.Eng. 横浜国立大学大学院学生 工学府社会空間システム学専攻
2 正会員 修(工) 横浜国立大学特別研究教員 大学院環境情報研究院
3 フェロー 工博 横浜国立大学教授 大学院工学研究院

$$\tau_{ij} = \overline{u_i' u_j'} = (\overline{u_i u_j} - \overline{u_i} \overline{u_j}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

SGS 応力項は、基礎方程式に間接的に取り込まれる小規模の渦の影響を評価する項であり、式(2)により乱流構造の全体を表現するためには、小規模渦の局所的な流れや過去の履歴を適切に表現できる必要がある。現在までのところ、このSGS 応力項の評価法として、いくつかの方法が提案されている。Wijayaratna・Okayasu (2000) では最も一般的な Smagorinsky モデル使用している。その他条件については、Nguyen et al. (2006) を参照されたい。

3. 衝撃砕波圧の評価

(1) 運動量・力積関係に基づく衝撃砕波圧の評価

通常、衝撃砕波圧の定式化は、次式の運動量と力積の関係式を出発点とする。

$$\int_0^{t_d} F dt = \int_{v_b}^0 M dv \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 F は力、 M は水塊の質量、 t_d は衝撃砕波圧の継続時間、 v_b は水塊衝突時の流速である。

Blackmore and Hewson (1984) は、水塊の質量 M が衝撃砕波圧の継続時間中で一定値をとると仮定して以下の式を使用した。

$$\int_{v_b}^0 M dv = \rho \cdot Vol \cdot C_b \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 ρ は密度、 Vol は水塊の体積、 C_b は波速であり、 Vol は更に有効長 l_a を使用して次式で表現できるとした。

$$Vol = H_b \times l_a \quad \dots\dots\dots (6)$$

H_b は衝突直前の波高、 l_a は波形勾配の関数で表現される係数 K^* と波長 L_b を用いて、次式の形で表現した。

$$l_a = K^* \times L_b \quad \dots\dots\dots (7)$$

本研究では、式(5)における波速 C_b を使用せず、代わりに LES から計算される流速 u_b を使用する。その結果、式(4)の右辺は次式のようにまとめられる。

$$\int_{v_b}^0 M dv = K^* \cdot \rho \cdot H_b \cdot L_b \cdot u_b \quad \dots\dots\dots (8)$$

次に、式(4)の左辺に関しては、一定面積 A の衝撃作用面を考え、また圧力の時間変化が線形的であると仮定すると、衝撃砕波圧発生時のピーク値 p_i とピークに至るまでの時間(立ち上がり時間) t_r を使って次式で表現できる。但し、ここでは、波圧波形を三角形分布と考えて、継続時間が $t_d = 2t_r$ で表現できると仮定する。

$$\int_0^{t_d} F dt = 2 \int_0^{t_r} \frac{p_i}{t_r} \cdot A \cdot t dt$$

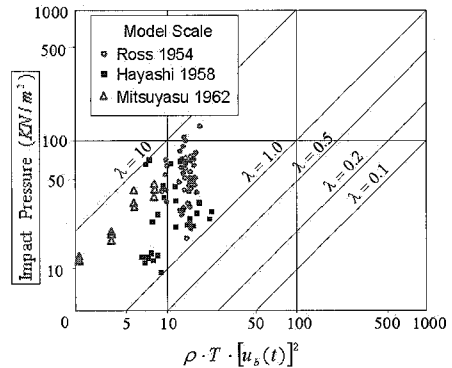


図-1 衝撃砕波圧の算定係数 λ
(Blackmore and Hewson, 1984 に情報を加えて作成)

$$= p_i \cdot t_r \cdot A \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここで、作用面積 A は衝突直前の波高 H_b と単位幅の積で表されるとすると、式(4)の左辺は次式でまとめられる。

$$\int_0^{t_d} F dt = p_i \cdot t_r \cdot H_b \quad \dots\dots\dots (10)$$

結局、式(4)は以下のように展開され、ピーク波圧 p_i を計算することができる。

$$p_i = \frac{K^*}{t_r} \cdot \rho \cdot L_b \cdot u_b = \lambda' \cdot \rho \cdot L_b \cdot u_b \quad \dots\dots\dots (11)$$

上式のうち、波長 L_b 及び u_b は LES 数値計算の結果より抽出して使用すればよい。 $\lambda' (= K^*/t_r)$ は、現地観測や水理模型実験の結果より定める補正定数であり、Blackmore and Hewson (1984) は、過去のデータを再整理して、図-1 の推定図表を提案している。但し、図-1 で求める経験定数 λ は式(11)における λ' と $\lambda = 2 \cdot \lambda'$ の関係となっている。

本研究では、式(11)の形式を参考にして、流速の鉛直方向変化と時間変化を考慮した新たな方法に基づいて衝撃砕波圧 $p(t, z)$ の評価を試みる。まず、式(11)の流速を u_b に代えて、 $u(t, z)$ のような時間と鉛直位置の関数として表現する。この $u(t, z)$ は、防波堤直前の各点で LES の計算結果より求まる水平流速を使用する。また、水平流速の時間変化と空間変化を考慮したため、式(11)の波長 L_b も時間的・空間的に変化する関数に置き換える必要がある。これには、LES の結果から求まる空間波形より各時点・各地点の波長を読み取り、使用することが可能である。しかし、実際には砕波時の防波堤前面の空間波形は極めて複雑に変化するため、時々刻々の波長変化を正確に把握することは流速値の評価ほど容易ではない。そこで、本研究では L_b は全ての時間において衝突直前の波長を使用することとし、その代わりに λ^* という立ち上がり時間 t_r の関数で表される新たな衝

撃砕波圧係数を使用して、運動量の積分値に矛盾が生じないように調整する。この結果、式 (11) に代えて、流速場の時間的・空間的な変動を考慮した衝撃砕波圧の評価式として次式が導かれる。

$$p(t, z) = \lambda^*(t_r) \cdot \rho \cdot L_b \cdot u(t, z) \cdots \cdots (12)$$

(2) 衝撃砕波圧係数 λ^*

上記で提案した衝撃砕波圧の評価法を確立するためには、補正係数 λ^* を実験や現地調査の結果に基づいて明らかにしておく必要がある。すなわち、式 (12) を次のように変形して、実験や観測データをもとに λ^* を求めればよい。

$$\lambda^*(t_r) = p(t, z) / \rho \cdot L_b \cdot u(t, z) \cdots \cdots (13)$$

しかし、構造物近傍の流速値は空間的・時間的に極めて鋭敏に変化し、また衝撃砕波作用時の気泡混入が計測データに及ぼす悪影響も無視できないこと等により正確なデータを実験や観測より得ることは容易ではない。

従って、ここでは式 (13) の流速データに関しては、LES による計算結果より求めた数値を代わりに使用することとする。このような取り扱いをすることで、結局、補正係数 λ^* は、LES と実測値の間の較正值の役割を持つことになる。

4. 水理実験に基づく衝撃砕波圧係数 λ^* の評価

(1) 実験方法

ダム破壊方式により 2 次元水槽内に長波（孤立波）を発生させ、水槽片側に設置したケーソン模型に衝撃的な砕波圧を強制的に作用させた。波圧は、ケーソン前面に設置した 3 個のひずみ変換式圧力計を使用し、周波数 50 Hz で同時サンプリングした。

図-2 に実験水槽の概略図を示す。左側の貯水槽内に所定の高さまで水を張り、人力により一気にゲートを引き上げることで、人為的に長波を発生させた。捨石マウンド上のケーソン模型は衝撃砕波の作用で滑動しないように十分な重量を確保した。

(2) 衝撃砕波圧係数 λ^* の評価手法

実験で得られた圧力値と LES により計算された流速 u と砕波直前の波長 L_b を用いて、式 (13) により λ^* を算出する。ここで、 λ^* は立ち上がり時間 t_r の関数であり、流速 u と波長 L_b が同一であっても、 t_r が大きいほど衝撃砕波圧が小さくなっていく効果を表すための係数である。従って、本来実験結果から得られる t_r ごとに λ^* の数値を評価すべきであるが、圧力計のサンプリング周波数が 50 Hz と比較的粗かったため、図-3 に示す通り個々の圧力の時間波形より立ち上がり時間 t_r を明瞭に判別するには至らなかった。そのため、ここでは t_r による衝撃砕波圧係数 λ^* の変化を考慮せず、フィッティング操作による平均的な λ^* 値の算定を試みる。従って、取り扱いとして厳密性に欠けるが、本研究の主目的である衝撃砕波圧係数の算定手法を提示する上では支障はない。

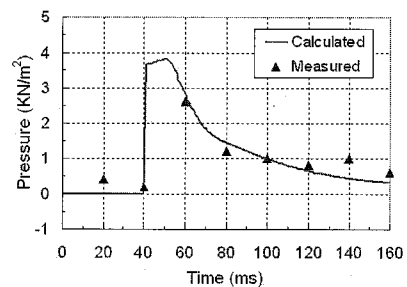


図-3 圧力時間波形の計算値と実測値の比較例

(3) 衝撃砕波圧係数 λ^* の算定結果

図-4～図-6 は、実験より得られた圧力値（横軸）と λ^* の設定値をそれぞれ 1, 3, 5 と設定した場合の数値計算より求まる圧力値（縦軸）の比較である。3 ケースの中では、 $\lambda^* = 3$ のときに実験値との適合性が平均的に最も高い。

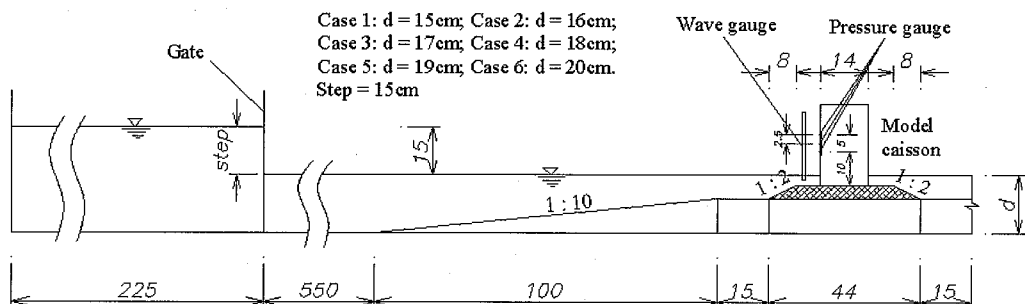
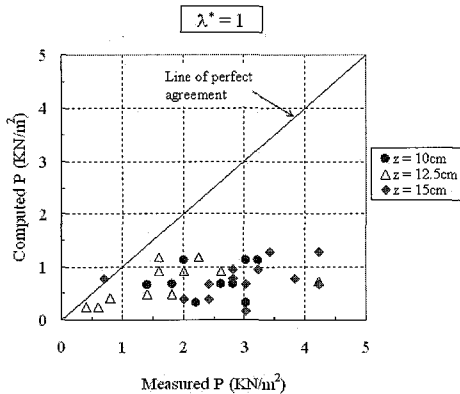
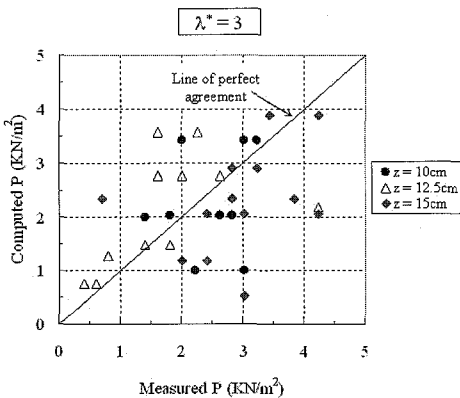
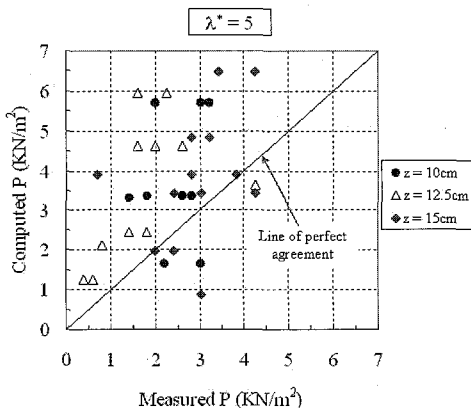


図-2 実験水槽及び模型防波堤、計測機器配置図

図-4 圧力の実験値と計算値の比較 ($\lambda^*=1$)図-5 圧力の実験値と計算値の比較 ($\lambda^*=3$)図-6 圧力の実験値と計算値の比較 ($\lambda^*=5$)

5. 衝撃碎波圧の試算例

(1) 計算条件

碎波が防波堤前面より若干沖位置で発生するタイプ

(slight early breaking; S.E.B.) と防波堤直前で発生し、衝突面がほぼ垂直なタイプ (perfect breaking; P.B.) の計2ケースの碎波形態について、先の検討より求めた算定値 $\lambda^*=3$ を使用して衝撃碎波圧の試算を行った。

計算条件を以下に示す。

計算領域: case1: 延長 600 cm, 幅 80 cm, 高さ 76 cm

case2: 延長 500 cm, 幅 50 cm, 高さ 48 cm

波浪条件: 入射波高 6 cm, 周期 2 秒

その他: 海底勾配 1/20

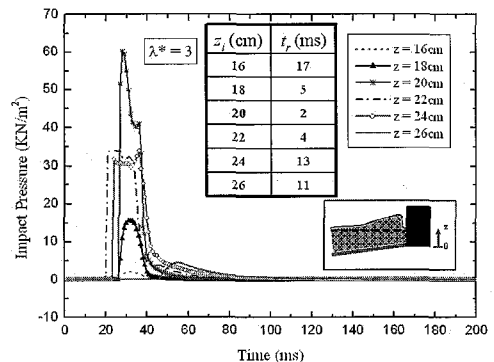
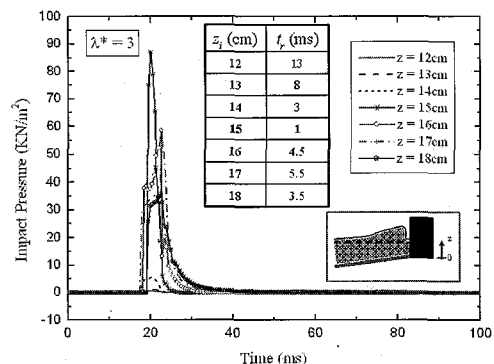
防波堤前面水深 case1: 16 cm, case2: 13 cm

なお、ケースごとに計算領域が異なっているが、これは両タイプの碎波形態をシミュレーションにおいて発生させるために、試行錯誤の上、計算領域を決定しているためである。

(2) 計算結果

図-7, 8 に防波堤前面各地点での作用波圧の時間変化を示す。図中には、各地点の波圧波形から読み取った立ち上がり時間 t_r を併記した。

ケースによらず、波圧の時間変化の形状や最大値は地点ごとに大きく異なる。また、時間変化の形状は、必ず

図-7 波圧時間変化の計算結果 (case1: S.E.B., $\lambda^*=3$)図-8 波圧時間変化の計算結果 (case2: P.B., $\lambda^*=3$)

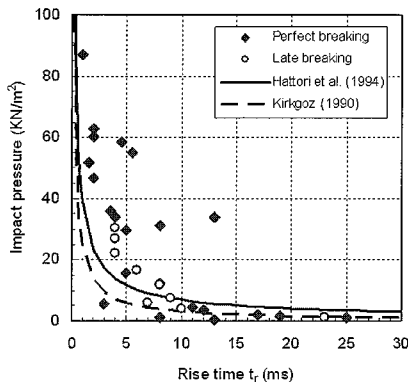


図-9 波圧ピーク値と立ち上がり時間 t_r の関係(計算結果)

しも通常考えられているような三角形パルス状ではなく、ピーク直後に2つ目の圧力の山が出現したり、またピーク近傍に腰掛部を有する形状であったりと、全般的に複雑な形状を呈している。このように複雑な圧力時間変化が計算される最大の理由は、LESを数値計算モデルとして使用したことにより防波堤近傍で発生する複雑な乱れ成分の影響が流速評価の中において適切に考慮されたためと考える。すなわち、流速の乱れ成分の影響により、水塊衝突時の波圧変化は実際には単純な線形ではなく、非線形的な挙動を示すものであり、本手法が複雑な乱れ場にも適用可能なことを示していると考えられる。

次に、衝撃碎波圧発生時の波圧ピーク値と立ち上がり時間 t_r の関係性を $\lambda^*=3$ を仮定した31ケースに対して計算を実施した結果を図-9に示す。結果は、Kirkgoz (1990) と Hattori et al. (1994) において提示された平均的な相関曲線と同様、立ち上がり時間 t_r が減少すると急激に碎波圧が上昇する現象を明瞭に表している。なお、前述の通り今回は λ^* の値として、立ち上がり時間 t_r の影響を無視して平均的に求めた数値を使用している。今後 t_r などの詳細な λ^* を定め、その値を使用することで、図-9の各点の分布は t_r の減少に伴ってさらに先鋭化していき、波圧算定精度が一層向上するものと考えられる。

6. 結 論

本研究では、運動量と力積の関係性より求まる衝撃碎波圧の計算を3次元LESの数値モデルを使用して求めた流速を援用して、計算精度の向上を試みるための手法を提案した。

従来の経験的手法との最大の相違は、インパクトの瞬間の流速場を時間的・空間的に固定せず、数値計算より求まる時間的・空間的に変化する流速場を圧力の計算に

使用している点である。防波堤前面で発生する碎波の現象は、乱流成分が顕著に現れる現象の代表例であり、流速の水平成分に及ぼす乱流成分の影響は無視出来ないほどに大きいと考えられる。本手法は、流速場の評価手法として3次元LESを使用したため、防波堤前面での複雑な流速場を適切に評価することができ、その結果、衝撃の算定を行うことができる。

また、後半では本手法を適用する際に必要不可欠となる衝撃碎波圧係数 λ^* を水理模型実験により求める過程を提示した。計測精度やケース数のため、信頼性の高い λ^* の設定値を提案するには至らなかったが、試行的に求めた λ^* を使用して、試計算を行ったところ、流速場の複雑性の反映を意味する時間的・空間的に非線形的な挙動を示す圧力波形の計算結果が得られた。

謝辞：本研究は、独立行政法人日本学術振興会の「アジア・アフリカ学術基盤形成事業」及び五洋建設株式会社からの研究費の一部助成を受けて実施した。ここに記して感謝を表す。また、水理模型実験の実施にあたっては、横浜国立大学博士課程の Miguel Esteban 氏に多大な協力を頂いた。ここに感謝を表す。

参 考 文 献

- Nguyen, D.T., 高木泰士, 柴山知也, 岡安章夫(2006):3次元LESモデルによる傾斜式防波堤周辺の乱流特性の数値的検討, 海岸工学論文集, 第53巻, pp. 751-755.
- Bagnold, R. A. (1939):Interim report on wave-pressure research, Jour. Inst. Civil Engrs., Vol. 12, pp. 202-226.
- Hattori, M., Arami, A. and Yui, T. (1994):Wave impact pressure on vertical walls under breaking waves of various types. Coastal Eng., 22, pp. 79-114.
- Kirkgoz, M.S. (1990):An experimental investigation of a vertical wall response to breaking wave impact. Ocean Eng., 17(4), pp. 379-391.
- Kirkgoz, M.S. (1995):Breaking wave impact on vertical and sloping coastal structures. Ocean Eng., 22(1), pp. 35-48.
- Kirkgoz, M.S. and Mamak, M. (2004):Impulse modeling of wave impact pressures on vertical wall. Ocean Eng., 31, pp. 343-352.
- Weggel, J.R. and Maxwell, W.H. (1970):Numerical model for wave pressure distributions. Proc. ASCE, J. Waterway, Harbors Coastal Eng. Div., WW3: 623-642.
- Wijayarathna, N. and Okayasu, A. (2000):DNS of Wave Transformation, Breaking and Run-up on Sloping Beds, Proc. 4th Int. Conf. on Hydrodynamics, Vol. 2, pp. 527-532.
- Wood, D.J., Peregrine, D.H and Bruce, T. (2000):Wave impact on a wall using pressure-impulse theory. I: Trapped air. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., Vol. 126(4), pp. 182-190.