

繰返し载荷を受ける構造物・地盤系の流動変形の解析

A study on lateral flow deformation of ground-structure system under cyclic loading conditions and its analysis

北海道大学大学院 工学研究科 ○正 員 横浜勝司(Shoji Yokohama)
 北海道大学大学院 工学研究科 フェロー 三浦清一(Seichi Miura)

1. まえがき

繰返し载荷を受ける構造物・地盤系では、構造物を介して伝達された外力によって地盤内に側方流動型の進行的な大変形が発生する。それ故、構造物・地盤系の安定性が急激に低下する。例えば、平穩時の波や設計波高より小さい波浪等のような、いわゆる永久荷重を繰返し受けることによって、上部構造物が滑動、沈下、傾斜、埋没等の被災を受けるという報告が数多くされている。そこで、荷重を繰返し受ける地盤の側方流動挙動に及ぼす影響を調べることは重要である。

本研究では、単純な载荷条件にある砂地盤の変形挙動について考察する。その結果を基に簡易な変形解析法を提案する。提案した解析法の妥当性を示すために、幾つかの解析例を示している。

2. 解析方法

本研究では地盤の変形挙動を、二次元平面ひずみ条件での有限要素解析により求めた。図1は要素分割を示している。要素数630、節点数2009である。なお解析範囲は長さ2,000mm、深さ400mmであり、試験で用いた模型地盤と同サイズとしている^{1), 2)}。構造物の幅および高さは100mmである。

境界条件として、地盤の底面および左右側面では鉛直および水平方向変位が発生しないように固定端とした。構造物は剛体モデルとしている。また構造物と地盤との接触面にジョイント要素を設定し、構造物・地盤間でのすべりの発生を許容している。ここでジョイント要素の剛性は地盤の弾性係数と同じとしている。さらに、地盤を完全排水条件と仮定した。

本解析で用いた要素は8節点長方形要素であり、Gaussの積分点は4点である。また、有限要素の離散化にはGalerkin法を用いている。

地盤は弾完全塑性体とし、降伏関数 F と塑性ポテンシャル関数 Ψ に基づく解析を行った。弾塑性解析では、土の全ひずみ増分ベクトル $\{d\varepsilon\}$ を、以下のように弾性ひずみ増分と塑性ひずみ増分の和として計算する。

$$\{d\varepsilon\} = \{d\varepsilon^e\} + \{d\varepsilon^p\} = [D_e]^{-1} \{d\sigma\} + \lambda \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial \{\sigma\}} \quad (1)$$

なお、後述する繰返し载荷条件下での解析では、剛性マトリクス $[D_e]$ の弾性係数を繰返し载荷回数 N_c の関数とし、 N_c の増加に伴う弾性係数の変化を考慮した解析を

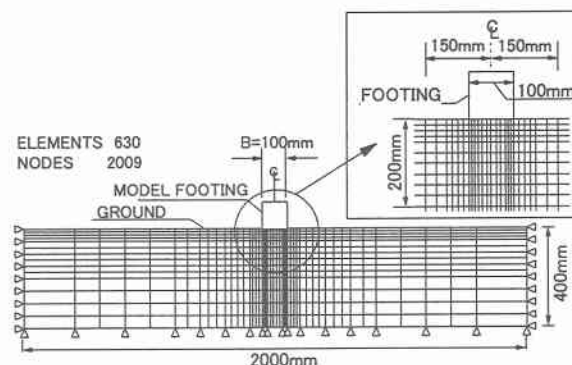


図1 有限要素分割

可能とした。以上の関係を基に弾塑性状態の応力増分-ひずみ増分関係を定式化し解析を進めた。

本解析では Mohr-Coulomb の破壊規準式による弾塑性解析を試みているので、二次元平面ひずみ条件下では、降伏関数 F と塑性ポテンシャル関数 Ψ は以下のように表現される。

$$F = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \phi - c \cdot \cos \phi \quad (2)$$

$$\Psi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \phi - c \cdot \cos \phi \quad (3)$$

ここで σ_1 、 σ_3 はそれぞれ土要素に作用する最大および最小主応力、 c は粘着力、 ϕ は内部摩擦角である。 ϕ はダイレイタンシー角であって、本解析では $\phi \neq \phi$ とした非関連流動則を用いている。ここでは完全塑性平衡条件を前提としているため、ダイレイタンシー角 ϕ を0として解析を進めた。

3. 载荷方法および変形量の定義

本研究では、繰返し载荷条件下にある構造物・地盤系の基礎的な変形特性を調べるために、繰返し中心载荷試験(Cyclic central loading test, CCL)および繰返し交互载荷試験(Cyclic alternate loading test, CAL)が行われた(図2参照)。繰返し中心载荷試験では、構造物の中心線上に荷重を周期4秒で繰返し作用させている。

一方、繰返し交互载荷試験では、構造物の上部2地点で荷重を繰返し载荷させている。繰返し荷重の周期は4秒である。いずれの载荷方法においても、周期を2~20秒に変えた予備実験を行い地盤の強度に変化が無いことが確認されている²⁾。

図3は構造物・地盤系の変形状態を模式的に示している。設置されている変位計により測定される鉛直方向の左右の変位量より、幾何学的関係から模型構造物の左右

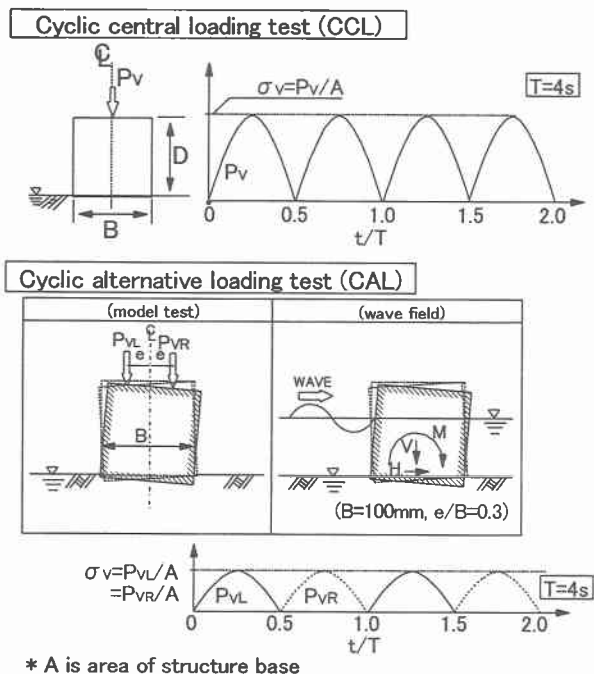


図2 荷重方法(CCL, CAL)

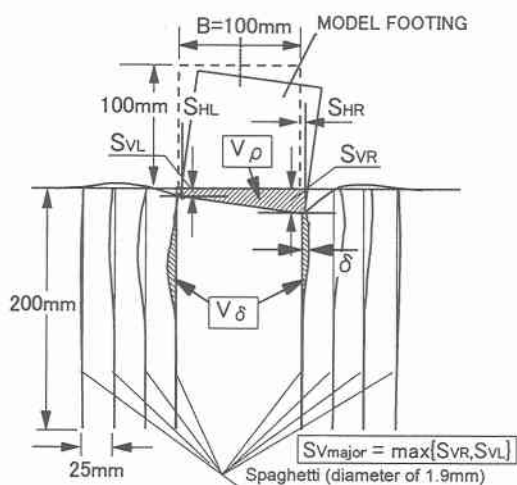


図3 構造物・地盤系の変形量の定義

の沈下量 S_{vL} , S_{vR} を算出し、左右の卓越した方を S_{vmajor} と定義している。

本研究では、構造物の沈下の進行に伴って発生するスパゲッティの変形量を測定することによって地盤内の変形を調べている。その変形量を地盤内水平変位量として評価した。

構造物の沈下に伴う地盤の流動変形を定量化するために、図2中の斜線部で示されるように、構造物下部両端において地盤が側方に変形した部分の単位奥行き当りの体積を側方流動土量 V_δ (mm^3/mm)、構造物が沈下した部分の単位奥行き当りの体積を沈下土量 V_ρ (mm^3/mm) と定義した。それぞれ、地盤内水平変位量 δ および構造物の沈下量を基に算出されるものである。さらに、構造物の沈下に対する地盤の流動変形の程度を示すために、側方流動土量と沈下土量の比(土量比 V_δ/V_ρ) を求め、構造物・地盤系の変形評価を行っている。これらの指標を用いて変

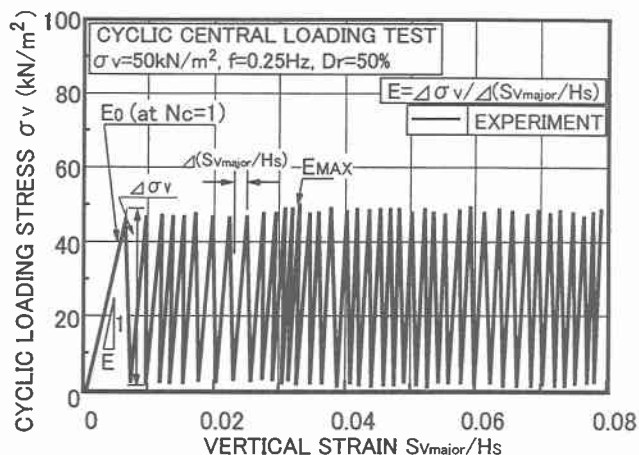


図4 荷重応力-鉛直ひずみ関係(CCL)

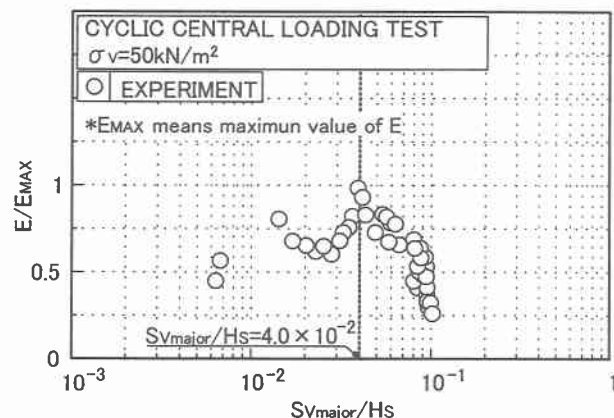


図5 構造物・地盤系の剛性変化特性(CCL)

形挙動の評価を行っている。

4. 結果と考察

4.1 繰返し中心荷重試験(CCL)での変形挙動

繰返し荷重を受ける構造物・地盤系の変形挙動の基本的な特性を調べるために、図4は模型試験(CCL)で得られた実測の荷重応力 σ_v (荷重 P_v を構造物底面積で除した値) と構造物の沈下量を地盤の初期厚さ H_s (400mm) で正規化した鉛直ひずみ S_{vmajor}/H_s の関係を示している。繰返し荷重応力は 50kN/m^2 、地盤の相対密度は50%である。

図より、繰返し荷重が継続されるのに伴い、鉛直ひずみ S_{vmajor}/H_s の残留量が変化していることが分かる。このような変形挙動を評価するために、荷重時での荷重応力増加量 $\Delta\sigma_v$ と鉛直ひずみ増分 $\Delta S_{vmajor}/H_s$ の比を地盤の剛性と定義する(図4参照)。繰返し回数 $N_c=1$ 時での剛性を E_0 、荷重中の剛性の最大値を E_{MAX} とする。

繰返し荷重を受ける地盤の剛性変化特性を調べるために、剛性 E を E_{MAX} で正規化した剛性比 E/E_{MAX} と繰返し回数 N_c の関係を図5に示す。これより、鉛直ひずみの増加に伴い地盤の剛性は一度増加するが、鉛直ひずみ S_{vmajor}/H_s が0.04に達した後、剛性比が急激に低下する挙動が見られた。

このような剛性変化挙動のメカニズムについて考察する(図6参照)。地盤の剛性が増加している場合は、構造

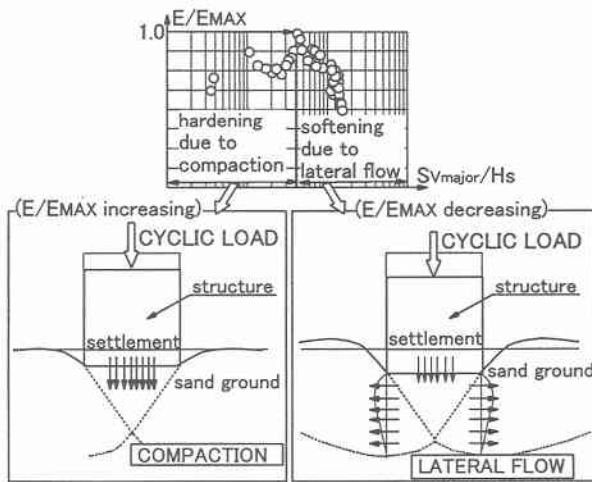


図6 剛性変化と地盤内変形挙動の関係

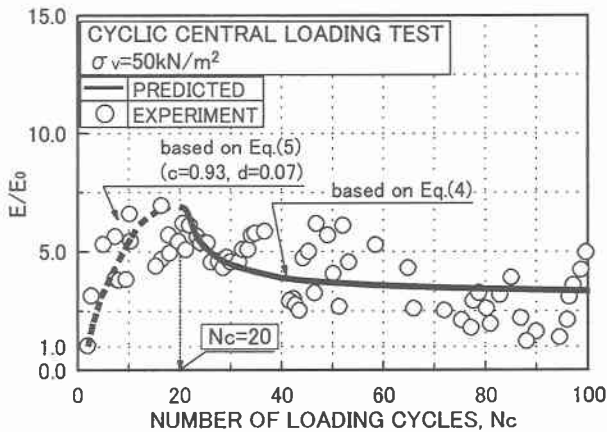


図7 剛性変化挙動の推定(CCL)

物下部および周辺地盤での締固め効果による地盤の硬化挙動が誘発されているようである。さらに繰返し載荷が継続されると、地盤内では側方への流動変形が卓越して発生するため、地盤が軟化する挙動を示したものと考えられる。

そこで地盤の剛性低下を再現可能とするために、剛性比 E/E_{MAX} と鉛直ひずみ S_{vmajor}/H_s の間に以下のような関係が成立つと仮定する²⁾。

(剛性低下)

$$E/E_{MAX} = \frac{1}{1 + (S_{vmajor}/H_s)/(S_{vmajor}/H_s)_{0.5}} \quad (4)$$

(剛性増加)

$$E/E_0 = \frac{N_c}{c + d \cdot N_c} \quad (5)$$

ここで $(S_{vmajor}/H_s)_{0.5}$ は $E/E_{MAX}=0.5$ のときの鉛直ひずみである。また c, d は硬化挙動に関するパラメータである¹⁾。

式(4)および(5)の妥当性を調べるために、CCL における剛性比 E/E_0 と繰返し回数 N_c との関係を図7に示している。なお c, d および $(S_{vmajor}/H_s)_{0.5}$ は模型実験での結果より、それぞれ 0.93, 0.07 および 0.09 とし、本ケースでは、 N_c が 20 回に至るまでの間で地盤の硬化挙動、それ

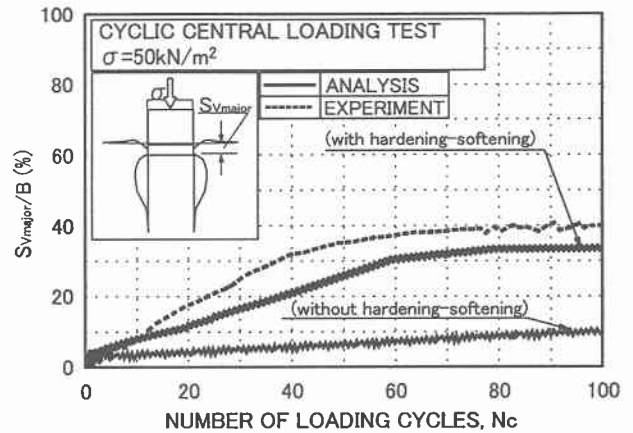


図8 沈下量比 S_{vmajor}/B と繰返し回数 N_c の関係(CCL)

以降で剛性低下の現象が見られていることより、 $N_c=20$ を境界として式(4)および(5)を適用した。

図より式(4)、(5)による剛性変化の推定は実測の変化特性を表現可能のようである。そこで、式(4)および(5)のように示された剛性 E を地盤の弾性係数として弾塑性解析で用いられる剛性マトリクスに代入し、地盤の剛性変化挙動を考慮した変形解析を試みる。

4.2 地盤の剛性変化を考慮した変形解析(CCL)

図8は解析および実験で得られた構造物の沈下量を構造物幅 B で正規化した沈下量比 S_{vmajor}/B と繰返し回数 N_c との関係を示している。なお、前述のように地盤の内部摩擦角 ϕ は 35° 、ポアソン比 ν は 0.3、 $E_p=3000\text{kN/m}^2$ として解析を行っている。ここで繰返し回数は実測の沈下量の収束傾向が見られる $N_c=100$ 回を基準として解析を行った。また本解析の妥当性を検討するために、図中には地盤の剛性変化を考慮しない解析結果も併記している。

図より、剛性変化を考慮した解析結果は実測の沈下量を若干過小評価済みであるが、その傾向を良く再現しているようである。一方、剛性変化を考慮しない解析結果は実測値より非常に小さなひずみを推定している。このことより、構造物・地盤系の変形解析には地盤の剛性変化を考慮することが必須である。

地盤の側方流動変形特性について調べるために、土量比 V_δ/V_p について検討を行った。図9は、模型試験および解析で得られた土量比 V_δ/V_p と繰返し回数 N_c の関係を示す。実験値では繰返し回数 N_c の増加に伴って土量比 V_δ/V_p が増加し、0.7程度の値に収束する傾向にある。また解析値においても、繰返し回数 N_c の増加に伴い土量比 V_δ/V_p が急増し、その後一定値に収束する傾向にあることが見られる。

以上のように、解析値と実験値の一致度が比較的良好なことから、本解析法は繰返し中心載荷を受ける構造物・地盤系の側方流動挙動の評価に有効であることが示された。

4.3 提案した解析法の適用例(CAL)

提案した解析法が、波浪場のような載荷条件下の地盤の変形挙動予測に関して適用可能か調べるために、繰返

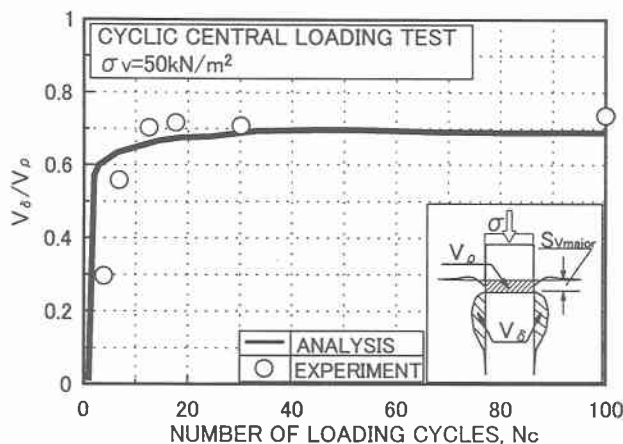


図9 土量比 V_δ/V_p の変化挙動(CCL)

し載荷試験(CAL)に対する解析を試みた。地盤の相対密度 $Dr=50\%$ 、載荷応力 σ_v は 20kN/m^2 のケースである。内部摩擦角、ポアソン比はCCLでの解析と同じとした。また式(4)、(5)中の剛性変化に関する定数は、 $c=0.88$ 、 $d=0.12$ および $(S_{vmajor}/H_s)_{0.5}=0.07$ とした¹⁾。ここでは繰返し回数は100回までとして解析を進めた。

図10はCAL試験および本解析で得られた沈下量比 S_{vmajor}/B と繰返し回数 N_c の関係を示している。これより、解析は実測の傾向を若干過小評価しているが、沈下量比 S_{vmajor}/B の初期の増加率や N_c の増加に伴う沈下量比の収束傾向は再現できているようである。

次に、地盤内の側方変形挙動について調べる。図11は $S_{vmajor}/B=5\%$ での実測および解析による地盤内側方変位量を示している。これより、構造物左右端点の下部における地盤内側方変位量に関して、解析は実測値を若干過小評価のみである。このように、本解析は地盤内側方変位量の流動的な発生挙動を完全には再現できていない。

さらに、地盤内の全体的な側方流動挙動を調べるために、図12に土量比 V_δ/V_p と繰返し回数 N_c の関係を示した。解析値が $N_c=20$ から V_δ/V_p が0.6に収束し実測値を若干過小評価のみである。このことから、側方流動変形挙動を詳細に評価するためには、地盤の剛性変化以外の要因を明らかにする必要があると考えられる。

5. 結論

一連の研究から、以下の結論が導かれた。

- (1) 繰返し中心載荷下にある地盤・構造物系の剛性変化挙動の評価法が示された。これは地盤の沈下・側方流動挙動を把握するために有効である。
- (2) 剛性変化特性を考慮した変形解析法が提案された。本解析法は、波浪場にある構造物が揺り込み沈下を呈する場合の側方流動挙動を評価可能といえる。

参考文献

1) 横浜勝司、三浦清一：波浪力のような繰返し載荷を受ける支持地盤の側方流動変形の推定法、応用力学論文集, Vol.5, pp.473-480, 2002.

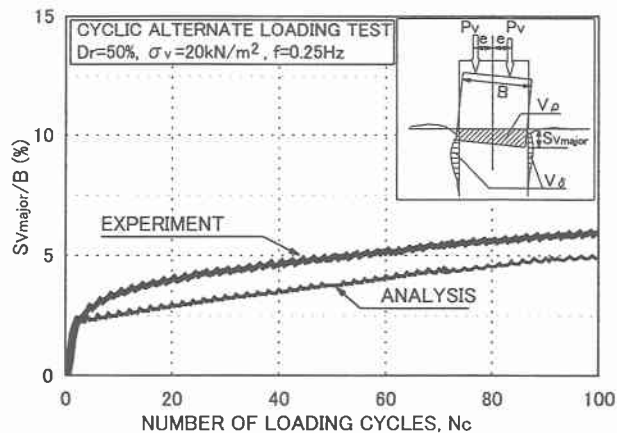


図10 沈下量比 S_{vmajor}/B と繰返し回数 N_c の関係(CAL)

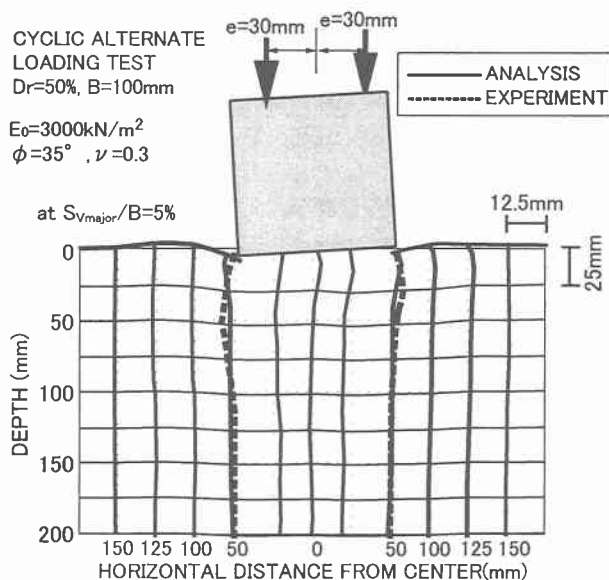


図11 地盤内変形挙動(CAL)

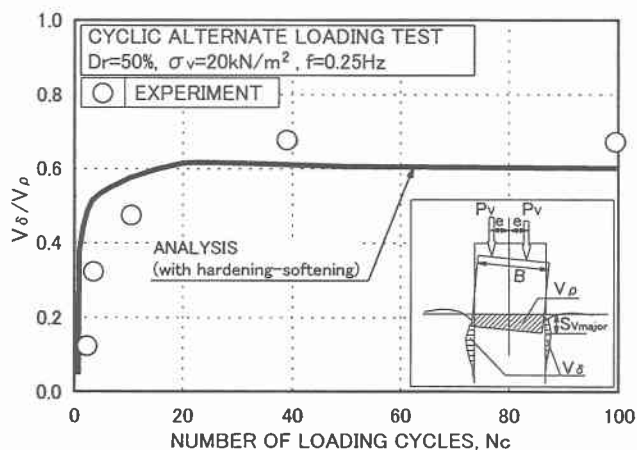


図12 土量比 V_δ/V_p と繰返し回数関係(CAL)

2) 横浜勝司・三浦清一・川村志麻・宮浦征宏：静的及び繰返し荷重を受ける構造物・地盤系の変形挙動と推定法、土木学会論文集 No.715, III-60, pp.263-275, 2002.