

人工リーフ建設に伴う地形変化

清水琢三*・今井澄夫**・寺田賢二***

1. ま え が き

人工リーフは、砂浜の景観を損なうことなく海岸侵食を防ぐことができるため、近年、従来の離岸堤に代わって砂浜海岸の保全にしばしば用いられるようになってきた。人工リーフの波浪低減効果については現地調査に基づく検討がいくつか報告されているものの（例えば、浜口ら、1988）、その大半が建設途中であることもあって人工リーフ背後の海浜地形の海岸保全効果については実測値に基づき十分確認されていないのが現状である。

そこで本研究では、新潟県柏崎市荒浜海岸における人工リーフ建設に伴う地形変化を深淺測量データに基づき明らかにするとともに、人工リーフ周辺の波、流れに関する現地観測と3次元海浜変形モデルによる数値シミュレーションにより人工リーフの効果について検討した。

2. 検討対象地点の概要

検討対象地点は、図-1に示すように、東京電力株式会社柏崎刈羽原子力発電所専用港湾の南側約500mの間である。水深6m以浅は海底地形コンターが複雑で、沿岸砂州が発達しているが、それより水深の深いところでは等深線がまっすぐでしかも汀線に平行であり、海底勾配は約1/100である。底質の中央粒径は0.1~0.2mmである。

12月から2月にかけての冬季の荒天期には、毎年、3m以上の高波浪が頻繁にしかも繰り返して来襲し、年間最大有義波高は毎年5~6mに達する。そのため海岸侵食が徐々に進み、検討区域の南側海岸では離岸堤群が建設されている。検討対象地点では、平均潮位差が約0.5mと小さく安定した波浪低減効果が期待されること、ならびに景観にも配慮し、

人工リーフを海岸保全工として採用した。

図-1に示すように、人工リーフ2基と突堤1基から成る海岸保全施設が計画され、1989年から1990年にかけて建設された。最初の年に、まず長さ90mの突堤と長さ150m、幅50mのリーフが夏期の静穏期に建設された。冬期の高波浪期には建設途中における海岸保全対策工の影響を監視するとともに、その効果を確認するため、現地観測を実施した。その結果を踏まえ、第二年度には、導流堤と突堤に沿いの局所的な洗掘を防ぎ、堤体の安定性を保つために長さ40mの新しいリーフ2基が建設された。さらに北側の人工リーフが長さ160mに延長され、3つの開口部の幅を40mとした。

3. 人工リーフ建設に伴う地形変化

人工リーフ建設に伴う海浜地形変化について、建設前後を通して年2回の割合で得られている深淺測量データを解析することによって検討した。図-2は、海底地形の等深線の比較を示している。なお、水深の基準は柏崎地点のL.W.L.にほぼ一致する東京湾中等水位（T.P.）である。建設前の1986年4月から1989年4月の期間には、

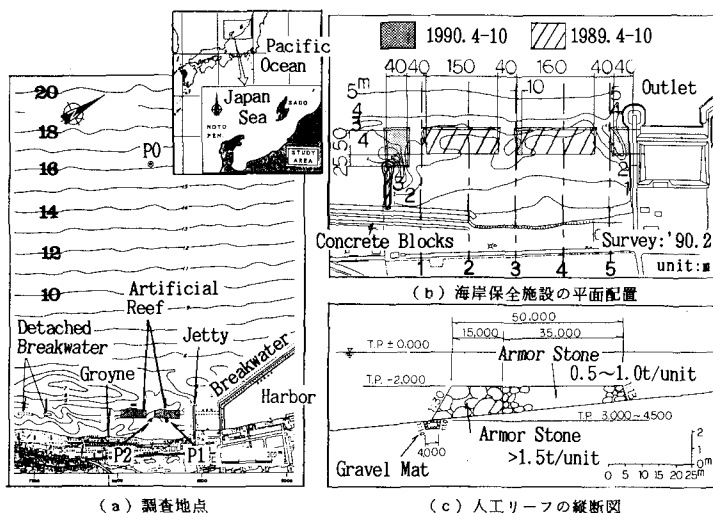


図-1 検討対象地点

* 正会員 工修 五洋建設(株) 土木設計部
 ** 正会員 東京電力(株) 常陸那珂火力建設所
 *** 正会員 工博 東京電力(株) 原子力建設部

全般的な等深線の後退が生じているのに対して、1989年から1992年の最近3年間の間にリーフ背後域で全般的に等深線が前進している。

図-3は建設後の縦断地形変化を示したものである。図-2に示したように、水深4m以浅の海岸付近ではリーフ間の開口部の測線3でさえも顕著な堆積を示している。しかしながら、水深4~6mのリーフ前面ではかなりの侵食が生じている。これはリーフによる反射ならびに碎波の影響であると考えられる。

図-4は1986年4月の汀線位置を基準に汀線変化を示したものである。建設前は汀線の後退傾向が、建設開始後はリーフ背後ならびに開口部ともに堆積傾向が全般的にみられる。このように汀線位置の回復は明らかであり、このことから海岸保全工としての人工リーフの有効性が確認される。しかしながら、図-1の等深線にみられるように、建設中に導流堤や突堤沿いならびに開口部の局所的な洗掘については、十分注意を払う必要がある。

4. 人工リーフの海岸保全効果

4.1 現地調査

1年目の工事終了後の冬期の高波浪来襲期の1991年2月から3月にかけての約1カ月間、波・流れに関する現地調査を実施した。入射波は水深16mのP0地点で超音波波高計と電磁流速計を用いて観測した。人工リーフ背後のP1地点とリーフ開口部のP2地点では水圧センサー付きの電磁流速計を用いて波と流れを測定した。サンプリング間隔0.5sで10分間の測定を2時間毎に実施した。波の遡上高調査として調査期間中に14回、測線上にポールを立て、ビデオカメラによる撮影を行った。また、2組のトランシットを用いてフロートを追跡することにより流況パターンの観測も行った。調査期間中にはおよそ有義波高3mの高波浪が3回来襲した。

(1) 波高の低減

図-5(a)はP0地点の有義波高とP1およびP2の有義波高の関係を示している。実線は、リーフがなかった場合の1/100勾配海岸におけるP1、P2と同一の水深における計算有義波高を示している。実線で表される有義波高は、周期を入射波高1mに対して6秒、4mに対して9秒と波高に比例して変化させて合田(1975)の碎波変形モデルの簡略式により評価した。リーフ背後の地点P1では、主としてリーフ上での碎波により、また捨石部の透過性の影響もあって入射波高が大きくなるほど波高の減衰が顕著になり、一定値に収束する傾向を示す。開

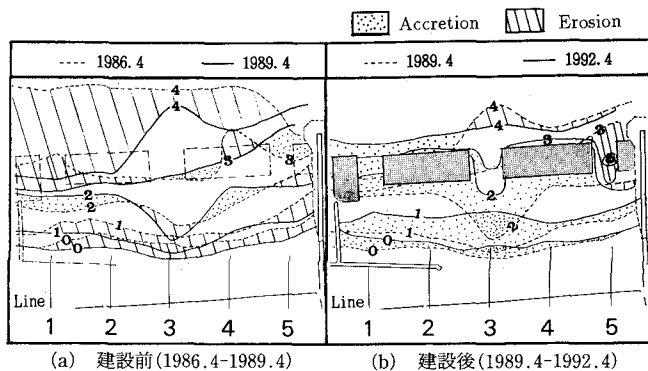


図-2 等深線比較図

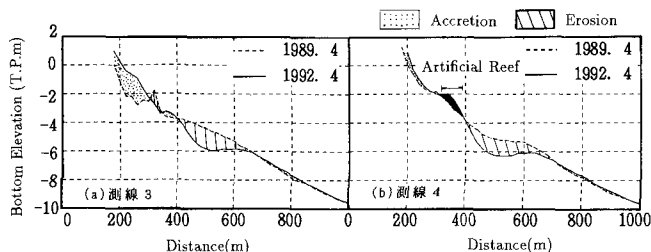


図-3 縦断地形変化

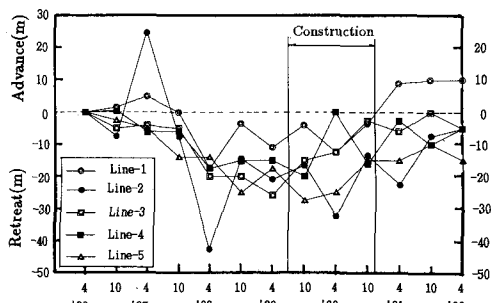


図-4 汀線位置の経時変化

口部のP2地点では、P1地点よりも波高が大きいが、入射波高が1m以上になると波高減衰が顕著になる。

人工リーフの透過率をリーフ後端部での波高のリーフがなかった場合の波高に対する比として定義した。P1地点における透過率 K_t と相対水深 h/H_0 の関係を図-5(b)に示す。 H_0 はP0地点の入射有義波高であり、 h はリーフ天端上の水深である。透過率は相対水深が小さくなると小さくなるが、リーフがない場合でも碎波による波高減衰が生じるため0.5程度でほぼ一定になる。

(2) 波の遡上高の減少

図-6は、ハントの式にならない相対遡上高 R/H_0' とイリバーレン数 I_r の関係を示したものである。換算沖波波高 H_0' は $K_t \times H_0$ で定義し、 $I_r = \tan \beta / \sqrt{H_0'/L_0}$ である。

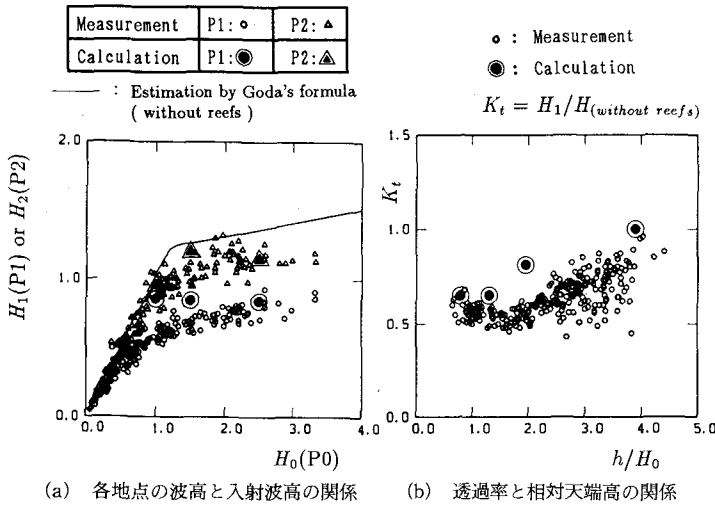


図-5 リーフによる波浪変化

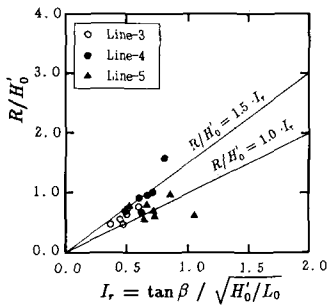


図-6 波の打ち上げ高

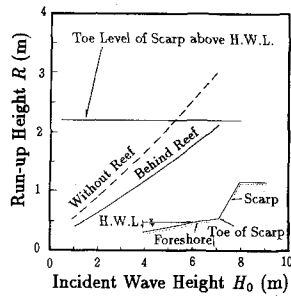


図-7 リーフによる遡上高の低減

R は遡上高、 $\tan \beta$ は海底勾配、 L_0 は深海での波長である。透過率 K_t は図-5(b)に示した実測の関係に基づき決定した。入射波高1m以上のデータだけが図示されている。データはややばらついているが、比例関係がみられ、比例係数は1.0~1.5である。この関係は波の遡上高が透過率の平方根に比例することを示している。したがって、人工リーフの建設に伴って透過率が0.5になると、遡上高は約30%減少する。

図-7はリーフ背後の前浜の遡上高の推定値とリーフがない場合の推定値を比較した結果である。浜崖の法尻の高さも図中に示されている。遡上高は、前浜勾配1/20、比例係数1.5、リーフ背後の透過率0.5の条件で図-6に示した関係式により評価した。周期は、入射波高1mのときの6秒から7mのときの12秒まで波高に比例して変化させた。リーフがない場合には、入射波高が5m以上になると遡上高が浜崖の法尻に達するが、リーフ背後では、およそ100年確率波に相当する入射波高が7mになっても浜崖の法尻に達することはない。このように遡上高の減少は、前浜および浜崖の侵食を防止する上で

有効である。

(3) リーフ周辺の流況

図-8は、有義波高が1.38m(10時)、0.88m(16時)であった3月9日に30秒毎に測定したフロートブイの軌跡を示している。P1およびP2で観測された平均流速ベクトルも併せて図示されている。リーフの両端では循環流が明瞭に観測されている。砕波によって引き起こされた岸向き流速がリーフ上で発生する一方で、開口部ではこの岸向き流れを補償する沖向き流れが発生している。入射波高が2mを越える高波浪時にはリーフ上での岸向き流速は0.3~0.5m/sであるのに対して、開口部での沖向き流速は0.5~0.7m/sである。この強い沖向き流れが開口部での洗掘の主な原因であると

思われる。

4.2 数値シミュレーションによる検討

人工リーフ周辺の波と流れならびに地形変化を3次元海浜変形シミュレーションにより再現することを試み、現地で得られた実測値との比較によりリーフの海岸保全効果について検討した。計算は、4m以浅を1/50勾配、4m以深を1/100勾配と現地海浜を単純にモデル化した海底地形に対して行った。波浪場は、磯部(1986)の砕波モデルによる減衰項を付加したエネルギー平衡方程式に基づく方法を用いた。このモデルの現地適用性は、複雑な海底地形を有する海岸に対して検証されている(清水ら、1992a)。ただし、人工リーフの透水性は考慮されていない。

計算は入射波高0.5、1.0、1.5、2.5mに対して実施したが、一例として有義波高2.5m、有義波周期7.5s、汀線直角入射に対する結果を図-9に示す。

(1) 波浪場

図-9(a)は波浪場の計算結果を示しており、リーフ背後では波高の低減がみられる。P0地点の入射波高とP1

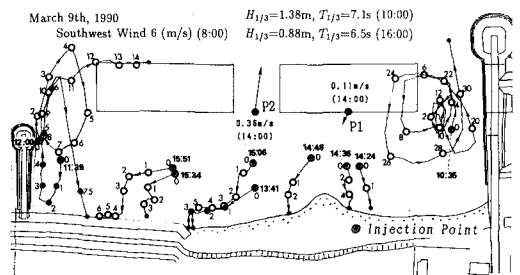


図-8 リーフ周辺の流況

とP2地点の波高の関係は図-5に示されているが、波高2.5mに対しては計算値と実測値の一致は良好である。しかしながら、波高1.0、1.5mのケースでは、リーフ背後のP1地点では計算値がやや波高を過大評価しており、リーフの透水性に起因するエネルギー減衰と透水性による砕波水深の増大がその原因と考えられる。

(2) 流況場

海浜流場を図-9(b)に、また戻り流れを考慮した底層付近の流況場を図-9(c)に示す。戻り流れは、清水ら(1992b)と同様、佐藤ら(1987)の砕波による戻り流れ評価式を用いて流速値を評価し、波の進行方向と逆方向に与えた。さらに海浜流場の計算結果とベクトル合成することにより地形変化にとって重要な底層付近の流況場を評価した。戻り流れ評価式の係数として、清水ら(1992b)は現地海岸で5.6を得たが、限られた条件に対するものであり、海底勾配や砕波形態などによって変化するものと考えられる。そこでDibajniaら(1993)の提案した次式を用いた。

$$U_b = (44\xi_b)(H_{rms}^2/dT) \dots \dots \dots (1)$$

ここに、 U_b ：砕波による戻り流れ、 ξ_b ：砕波点におけるイリバーレン数で波高としては有義波高を用いて評価、 H_{rms} ：自乗平均波高、 d ：水深、 T ：周期である。このとき佐藤らの式の係数は $44\xi_b$ に相当し、今回の計算範囲では6~7であった。海浜流のみの場合も、戻り流れを考慮した場合も、リーフ上での岸向き流れとリーフ間や突堤に沿いの沖向き流れが計算されており、観測された流況パターンをよく再現している。

(3) 地形変化

図-9(d)は、波浪場と戻り流れも考慮した流況場の計算結果を用いて粒径0.16mmに対して田中・首藤(1981)の摩擦則によって評価したシールズ数の平面分布を示している。シールズ数はリーフ上で急激に減衰し、底面剪断応力がリーフ背後でかなり大きく減衰している。パワーモデルの考え方に立った局所漂砂量算定式よれば、移動状態になる砂の体積は過剰底面剪断応力に比例する。したがって、底面剪断応力の減少はリーフ背後の漂砂量の低減を引き起こすことになる。

図-9(e)は海浜流による漂砂のみによって引き起こされる地形変化を、図-9(f)は海浜流に加え、戻り流れによる漂砂ならびに波による漂砂

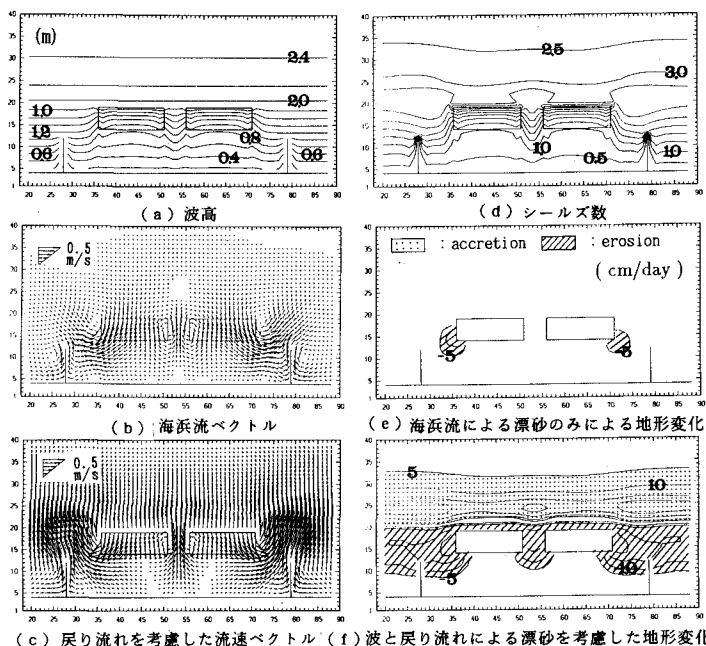


図-9 数値シミュレーション結果の一例 ($H_0=2.5m$)

も考慮して計算した地形変化を示している。漂砂量は渡辺ら(1984)のモデルにより評価したが、波による漂砂はシールズ数0.2~0.5のとき沖向きとした。いずれも開口部における沖向き流れに起因する侵食は計算されており、現地海岸での実測結果と一致している。

従来の離岸堤背後では循環流によって顕著な堆積を、また開口部では極端な侵食が生じるのが通例であるが、リーフ背後では海浜流による顕著な地形変化が生じていない。これは、リーフ背後の波高の小さな領域から開口部の波高の大きな領域に向かう方向に流れが発生するためである。これが一つのリーフの効果である。

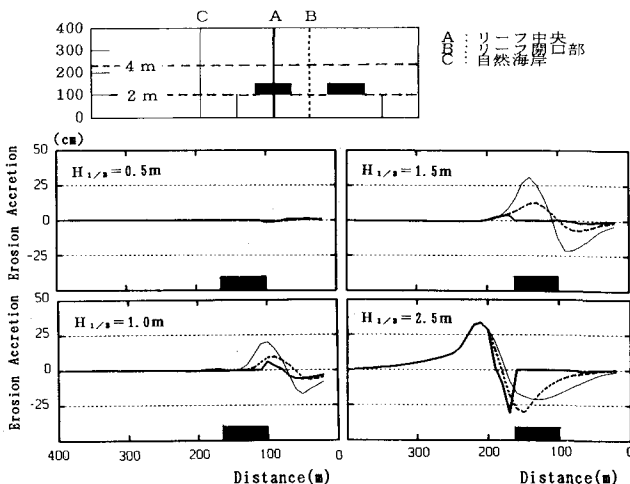


図-10 縦断地形変化の計算結果

また、リーフがない場合には、戻り流れによる冲向き漂砂によって岸側が侵食し、沖合にバーが形成されるが、リーフ背後では波高減衰により戻り流れが弱くなるため、戻り流れによる侵食が開口部を除いて抑えられている。これもまた、リーフの効果である。

図-10は、リーフの中央を通る測線(太線)、リーフ開口部を通る測線(破線)ならびに自然海滨(細線)の縦断地形変化の計算結果を示している。ただし、水深変化量は初期地形に対する計算結果を1日間当りに換算しており、地形変化に伴う波浪変化は考慮していない。波高が0.5mのときはリーフを波がそのまま透過するため、3つの差異はなく、リーフ岸側(水深約2m)付近で侵食し、波による砕波点がリーフ岸側端付近になるため、岸向き漂砂により岸側に堆積する。波高が1.0~1.5mのときはリーフ付近で砕波するため、リーフがなければリーフより岸側で顕著に侵食するが、リーフを設置することにより侵食が抑えられる様子が計算されている。波高が2.5mになるとリーフより沖側で砕波するため、リーフを設置した場合でもリーフ前面が侵食して沖側にバーが発達するが、リーフより岸側ではほとんど地形変化が起これない。また、開口部では海浜流による離岸流と砕波による戻り流れにより速い冲向きの流れが生じるため、開口部で顕著な侵食が計算されている。

これらの計算結果の特徴はリーフ建設後の実際の地形変化にも現れており、数値シミュレーションにより定性的にはリーフ建設の効果が説明できると判断される。すなわち、波高の減少は移動状態の砂を減少させるとともに戻り流れを弱めることになり、その結果、侵食性の波浪条件下であっても冲向きの漂砂量を低減することになる。離岸堤は積極的に背後に砂を堆積させる働きをするのに対して、人工リーフは高波浪時の冲向き漂砂を減らし、侵食を抑える働きをする。

しかしながら、実際の海岸では、図-2~4に示したようにリーフ背後では全般的な堆積が生じているが、計算では再現されていない。この全般的な堆積は、高波浪時にリーフ前面で巻上げられた砂が砕波による向岸流によって静穏なリーフ背後に運ばれて生じたのではないかと推定されるが、数値シミュレーションで再現することは困難である。なお、波高4mの計算も実施したが、砕波点がリーフよりもかなり沖側になるとリーフ付近では戻

り流れが小さくなるため、リーフ付近の地形変化としては2.5mのときよりもかえって小さくなった。

5. あとがき

人工リーフ建設に伴う海浜変形について、建設前後の深淺測量データに基づき検討するとともに、その有効性を確認した。波、流れ、遡上高、砂移動ならびに地形変化に対する影響についても、現地観測と数値シミュレーションによって検討した。検討対象海岸は侵食海岸であったが、リーフの建設開始後、リーフ背後で全般的な堆積が生じた。リーフの効果は、波高を減衰させて漂砂量を減少させること、ならびに波の遡上高を減少させて前浜や浜崖の侵食を防ぐことである。人工リーフを適切に配置すれば、リーフ上での砕波に伴い発生する海浜流に起因する漂砂によっては顕著な地形変化が生じないことも人工リーフの効果である。さらに重要な効果は、波高と戻り流れの減少に起因する冲向き漂砂の低減であると考えられる。

施工途上も含めた人工リーフの最適平面配置の設計法の確立や、汀線付近の遡上波による地形変化の定量的評価など今後検討すべき課題も多く残されている。

参 考 文 献

- 磯部雅彦 (1986): 放物型方程式を用いた不規則波の屈折・回折・砕波変形の計算法, 第33回海岸工学講演会論文集, pp. 134-138.
- 合田良實 (1975): 浅海域における波浪の砕波変形, 港研報告, 第14巻, 第3号, pp. 59-106.
- 佐藤慎司・福濱方哉・堀川清司 (1987): 斜面上における不規則波の砕波変形と底面流速に関する実験的研究, 第34回海岸工学講演会論文集, pp. 36-40.
- 清水琢三・鶴飼亮行・原 基久・磯部雅彦 (1992a): 多方向不規則波の屈折・回折・砕波変形計算法の現地適用性, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 181-185.
- 清水琢三・水流正人・渡辺 晃 (1992b): 3次元海浜変形モデルによる長期的な地形変化予測, 海岸工学論文集, 第39巻, pp. 416-420.
- 田中 仁・首藤伸夫 (1980): 波・流れ共存時の底面摩擦に関する実験, 第27回海岸工学講演会論文集, pp. 163-167.
- 浜口達男・宇多高明・井上 力・五十嵐晃・中山 修 (1988): 人工リーフの波浪制御効果に関する現地実験, 第35回海岸工学講演会論文集, pp. 128-132.
- 渡辺 晃・丸山康樹・清水隆夫・柳山 勉 (1984): 構造物設置に伴う三次元海浜変形の数値予測モデル, 第31回海岸工学講演会論文集, pp. 406-410.