

強潮流下における大型構造物用の 洗掘防止材料に関する研究

本州四国連絡橋公団 第一建設局 正会員 高澤 勳
同 上 鈴木 幹啓
同 上 阿部 明弘

1. はじめに

流水中に設置される構造物周辺の局所洗掘防止対策としては、洗掘を受ける領域の底質を被覆保護する工法が最も一般的に採用され、捨石被覆工がその代表である。しかし強潮流が作用する海域に建設される大型構造物等の周辺の捨石被覆工においては、所要の捨石寸法が大型化するため、捨石間隙中からの底質の吸い出し等によりその効果が十分発揮されない恐れがある。本報は、強潮流下の大型構造物周辺においても十分な洗掘防止効果を有する被覆材料の設計及びその特性に関する現地実験について報告するものである。

2. 新しい洗掘防止材料の必要性

1) 洗掘防止対策

強い潮流が作用し、海底質が厚い堆積層からなる海域に大型構造物を設置すると、図-1に示すように構造物周辺に生じる複雑な水流の乱れによって局所洗掘現象が発生する。

局所洗掘現象に支配的な水流の乱れとは、構造物周辺に発生する馬蹄型渦と加速流であると言われている。洗掘防止対策を講じていない場合の局所洗掘は、流れに対して構造物の前方側面、即ち、加速流の剥離地点で急速に発達し、その後、馬蹄型渦成長とともに構造物の前面側へ拡大していき、最終的には前面で逆円錐形の最大洗掘深を生じさせる。¹⁾

一方、筆者らが実施した捨石被覆工の水理模型実験によると、捨石被覆工の施工範囲が狭い場合（例えば、 $L = 0.3D$ 、 L ：捨石被覆工の幅、 D ：構造物の直径）

構造物前面及び側面の被覆範囲内の洗掘は防止できるが、剥離した馬蹄型渦が加速流によって運搬される経路上の捨石被覆工端部に洗掘孔の発生が認められた。これは構造物側面で剥離し、流下する馬蹄型渦が強い保存性を有することによるためと考えられ、捨石被覆工の施工範囲の決定に当たっての留意点を示唆している。

強潮流下に建設される構造物の局所洗掘を防止するためには、まず構造物形状を流線型に近づけて、水流の乱れを少なくすることが考えられるが、流向が一定せず、迎え角が生じる場合にはかえって逆効果となることもあるので、そのような場合には、次のいずれかの対策が必要である。

- ① 流況改善のための付帯構造物を取りつけ、構造物周辺の加速流及び馬蹄型渦を制御することにより洗掘を発生させる力を抑制する。
- ② 洗掘を受ける領域の底質を被覆保護する。

①の方法には、構造物にリングプレート²⁾、フィン、ディンプル等を取り付ける方法が提案されており、洗掘深度を低減させる効果が認められるものがあるものの、現時点では根本的な解決策は見い出されていない。

②の方法には、底質をコンクリート、アスファルトマット等で被覆し完全に遮水する方法と、強潮流によっても掃流されない重量を有する捨石により被覆する方法がある。完全被覆工は圧力の集中が生じやすく、また

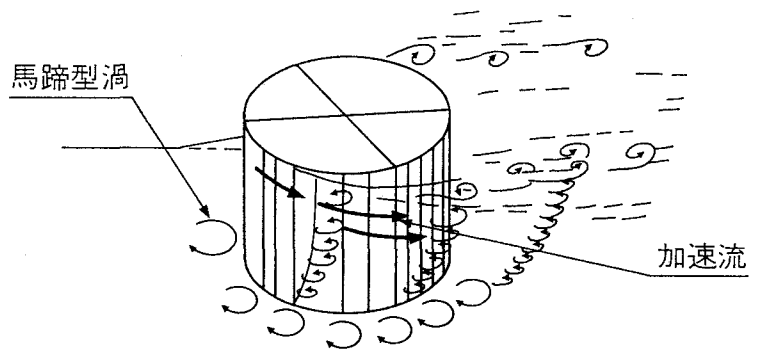


図-1 構造物周辺の流れの模式図

被覆工端部に洗掘孔が生じた場合、被覆工に追従性がないためにその発達を抑制できない上、破損した場合の補修が困難な欠点を有しており、捨石被覆工が採用される場合が多い。

2) 吸い出し洗掘防止フィルター

強い流れの中に設置された構造物の周辺においては、加速流及び馬蹄型渦を含む複雑な乱れを伴った流水によって変動揚圧成分が底質に作用している。

細粒分を含む底質を捨石被覆工によって保護する場合、捨石間隙中から底質が吸い出し洗掘を受ける可能性がある。吸い出し洗掘は河川橋脚に洗掘防止工としてブロック積み工法を採用した場合などに見られることがあり、強潮流下に設置される大型構造物周辺の捨石被覆工においても、所要の捨石寸法が大型化（水理模型実験によると7kt潮流下では1 $\sim$ 石、9kt潮流下では2 $\sim$ 石が必要）するため、同様の現象の発生が予想される。

吸い出し洗掘は洗掘現象の中でも最も複雑なメカニズムを有しているため、その理論的解明に至っていないとともに、水理模型実験においても底質細粒分の模型化等に実験技術上の限界があるため取り扱いが困難な現象である。

吸い出し洗掘現象を防止する方法としては、河川において粗粒化現象によって生じたアーモークートが下層の細粒分の流出を抑制するのと同様に、吸い出し洗掘の対象である底質材をより粒径の大きな砂礫等で順次被覆する方法が有効と考えられる。即ち、図-2に示すように細粒の底質の上層にアーモークートに該当する砂礫等を設置しさらにその上層に捨石被覆工を施工することによって対策が可能となる。このアーモークートに該当する砂礫等を吸い出し洗掘防止フィルターと呼ぶこととする。フィルター材の粒径が小さすぎるとフィルター自体が捨石の間隙から吸い出される可能性があり、また底質粒径に対して大きすぎるとフィルター材の間隙から底質が吸い出されることとなる。

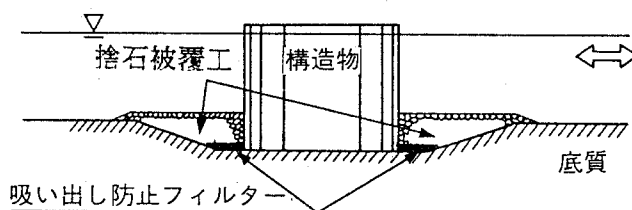


図-2 洗掘防止工の概念図

3. 網袋式洗掘防止工（フィルターユニット）の設計

1) フィルター粒径

図-3に示すように、均一で球形の粒子が単層でおかれている場合を考えると、底質がフィルターの空隙を物理的に通過できない粒径の比（移動阻止限界粒径比）は(1)式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} r/R &= 0.414 \quad (\text{Aの配置の場合}) \\ r/R &= 0.155 \quad (\text{Bの配置の場合}) \end{aligned} \right\} (1)$$

現実には不均一な粒子が何層にも重なっているため(1)式を適用することはできないが一つの目安を示している。

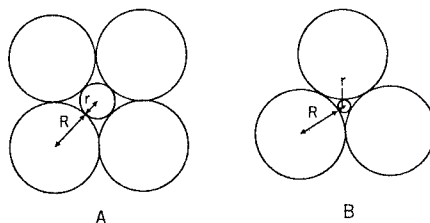


図-3 底質の移動阻止限界粒径比

フィルターの設計基準については、従来からテルツァギ（Terzaghi）³⁾らによって研究され、安定性、透水性、均一性、厚さ等について、いくつかの基準が提案されている。その一例を下記に示す。

$$(\text{安定性基準}) \quad D_{50f} < 3 \sim 5 D_{50b} \quad (2)$$

$$(\text{透水性基準}) \quad D_{15f} > 4 \sim 5 D_{15b} \quad (3)$$

$$(\text{均一性基準}) \quad D_{50f} < 25 D_{50b} \quad (4)$$

ここに、 D_{50} 、 D_{15} : 累加百分率50%及び15%に対応する粒径、 f : フィルター、 b : 底質

グラウ (Graauw) らは、フィルター内の流速にかかわらず、底質粒子がフィルター材を通過しないという原理で決定されている従来の設計基準では不十分であるとし、底質粒子が移動を開始する動水勾配 (I cr) と底質の特性、フィルター材の特性及び流れの形態に関する実験的研究を行っている。また、(2) 式の係数に関して往復流に対しては3を採用すべきであると述べている。

2) フィルターユニットの構造及び特徴

構造物設置地点での底質の中央粒径 (D_{50b}) を20mmとすると、フィルター材の中央粒径 (D_{50f}) は(2)式から60mm～100mm程度の礫となる。

一方、強潮流下に設置される大型構造物周辺の流れに対して移動しないためには、捨石寸法を大きくする必要がある。例えば、7ktの潮流下では捨石の重量が約1 $\times$ (粒径 900mm) 以上必要であり、粒径が100mm程度の礫をフィルターとして設置しても、そのままでは強潮流によって掃流され散逸してしまう。そこでフィルターの機能を保ちつつ、しかも強潮流にも掃流されない材料として、網袋式洗掘防止工 (フィルターユニット: F. U.) を設計した。

F. U. は、化学繊維製の網を袋状に加工し、枠ロープにより補強したものの中に礫を50%～80%程度緩く詰めた構造であり、洗掘防止工として次の特徴を有している。

- ① 底質の粒径に合わせて中詰材の粒径を選定することができるので、施工条件に適した吸い出し洗掘防止フィルターを製作することができる。
- ② 柔らかな網袋の中に礫を緩く詰めた構造であるため、可撓性に富み、地盤及び構造物と隙間なく設置することができる。また、F. U. 相互の密着性もよい。
- ③ 施工条件に合わせて任意の大きさ、形状のF. U. が製作可能であるので、作業性がよく、きめこまかな洗掘防止対策が可能である。
- ④ 構造物に取り付けて設置すれば、構造物の着底と同時に柔構造を有するF. U. が構造物の脚部に均一に広がり、地盤と密着してすみやかに洗掘防止効果を発揮する。また、仮設構造物の場合には、F. U. を構造物にとりつけた状態で保持することにより、構造物の撤去と同時に撤去することができる。
- ⑤ 取扱い及び製作が容易であるので、迅速な施工が可能であり、経済性にも優れている。

4. 現地実験結果

1) 強度及び地盤の不陸への追従性に関する実験

写真-1にF. U. の製作状況を示す。

枠ロープにより補強された網袋の内部に礫を投入後、上部に取り付けた吊りロープを利用して網袋の口を閉じることができる。

F. U. を吸い出し洗掘防止フィルターとして構造物周辺に設置する方法としては構造物に取り付けて沈設する方法、クラブによる方法、クレーンによる方法、底開バージによる方法等が考えられる。クラブや底開バージによる方法を採用する場合、落下速度が大きいため着底時に網袋が破損し中の礫が飛び出してしまう恐れがある。またF. U. が不陸のある底面に追従するかの確認が必要である。

このため陸上で約5mの高さから網袋容積1 m^3 、礫充填率70%のF. U. を落下させて実験を行った。実験の結果、網袋に破損はなく、落下後も十分な強度を有していることが確認された。また、F. U. が地盤の不陸によくなじむことが明らかになった。



写真-1 F.U.の製作状況

2) F. U. の洗掘防止効果に関する現地実験
 高さ4 m、長さ10 m、幅6 mの構造物2基のうち、1基には写真-2のようにF. U. を取り付け、残る1基は無対策のままとし約4ヶ月間、水深約45 m、最大潮流速 6.5kt、底質が砂礫層の海底に設置し、構造物周辺の局所洗掘状況を調査した。なお底質の中央粒径 (D_{50b}) は20mmであり、フィルター材には、40~80mm及び50~150mmの2種類の碎石も用いた。

F. U. は構造物設置後、吊りロープを切断することにより図-4に示すように構造物の周辺を幅2 m、高さ1 mで被覆した。

無対策の構造物周辺の洗掘現象の進行状況を図-5に示す。構造物設置の15日後には、構造物の両端部で約30cm程度の局所洗掘が発生し、その後も徐々に洗掘現象が進行していることがわかる。

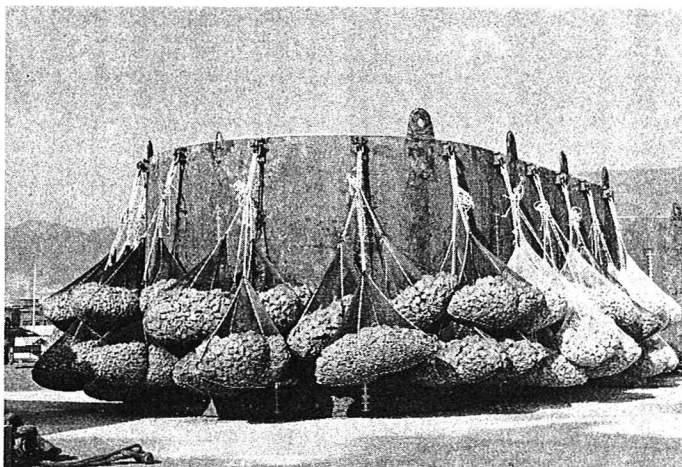


写真-2 構造物へのF.U.の取り付け状況

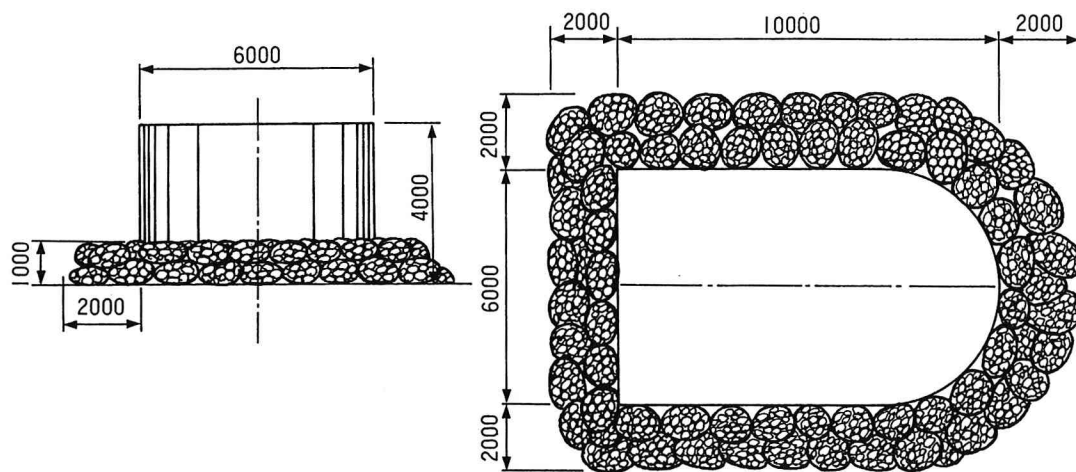


図-4 構造物周辺のF.U.の被覆状況

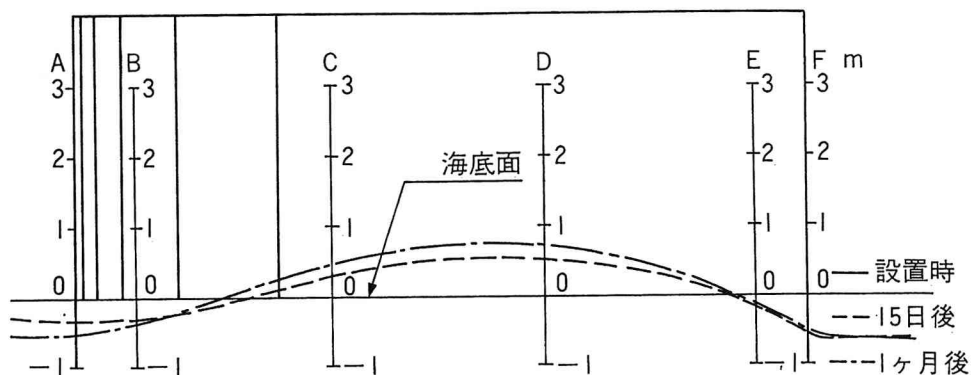


図-5 無対策の構造物周辺の局所洗掘現象の進行状況

構造物を設置して約50日後の無対策の構造物周辺の地形変化の状況を、図-6に示す。洗掘防止工を施さない構造物は強い往復方向の潮流の作用により、構造物の両端が洗掘域となり30cm～50cmの局所洗掘を生じている。また、構造物の中央部分に堆積域が発生している。

一方、F. U. を取り付け、洗掘防止工を施した構造物において、F. U. 天端高の変化を測定したところ、図-7に示すようにほとんど変化が見られず、吸い出し洗掘の発生は見られなかった。

F. U. を取り付けした構造物を設置して約50日後の構造物周辺の地形の状態を図-8に示す。F. U. の端部に10cm～20cmの小さな洗掘孔が見られる以外は、F. U. によって被覆された底質は、洗掘から守られ安定している。図-5及び図-6と図-7及び図-8の比較から、F. U. が吸い出し洗掘も含めた構造物周辺の局所洗掘に対して顕著な防止効果を有することが認められる。なお、本実験からはF. U. 中詰材の粒径の違いによる差異は確認できなかった。

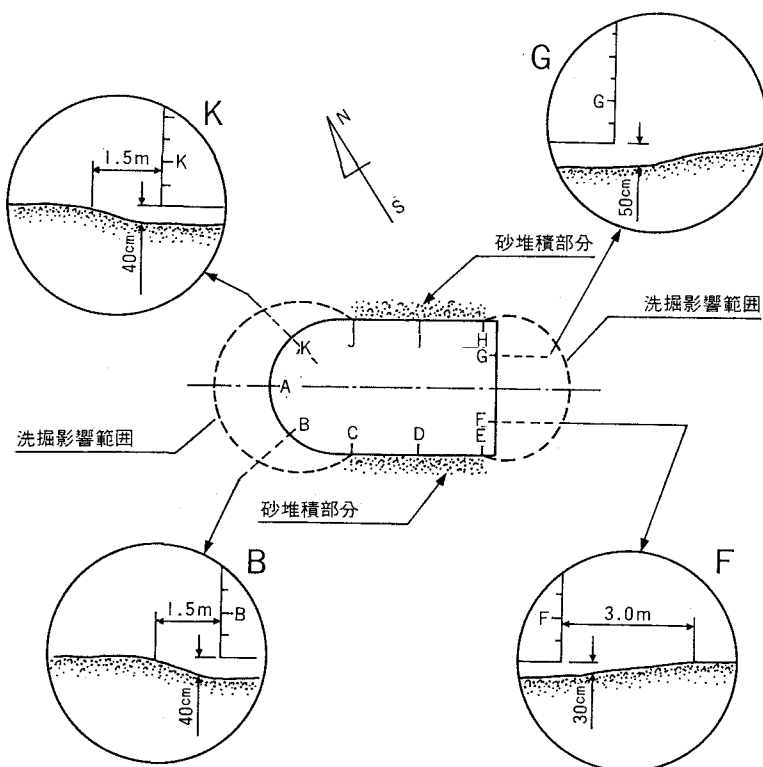


図-6 無対策の構造物周辺の地形変化

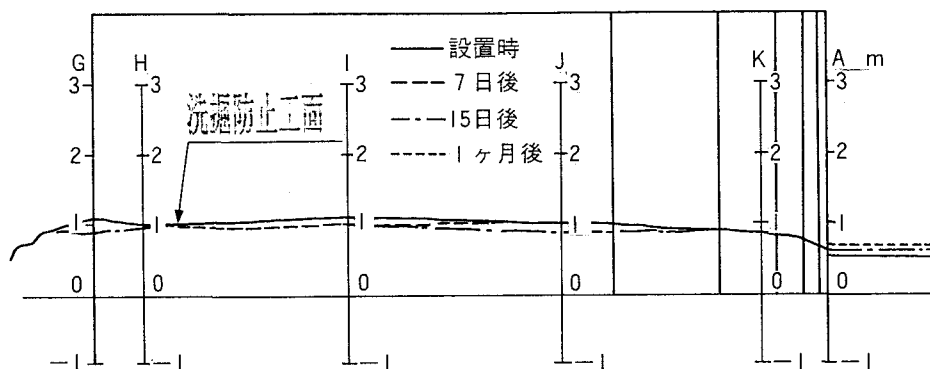


図-7 構造物に取り付けたF.U.の天端高の変化状況

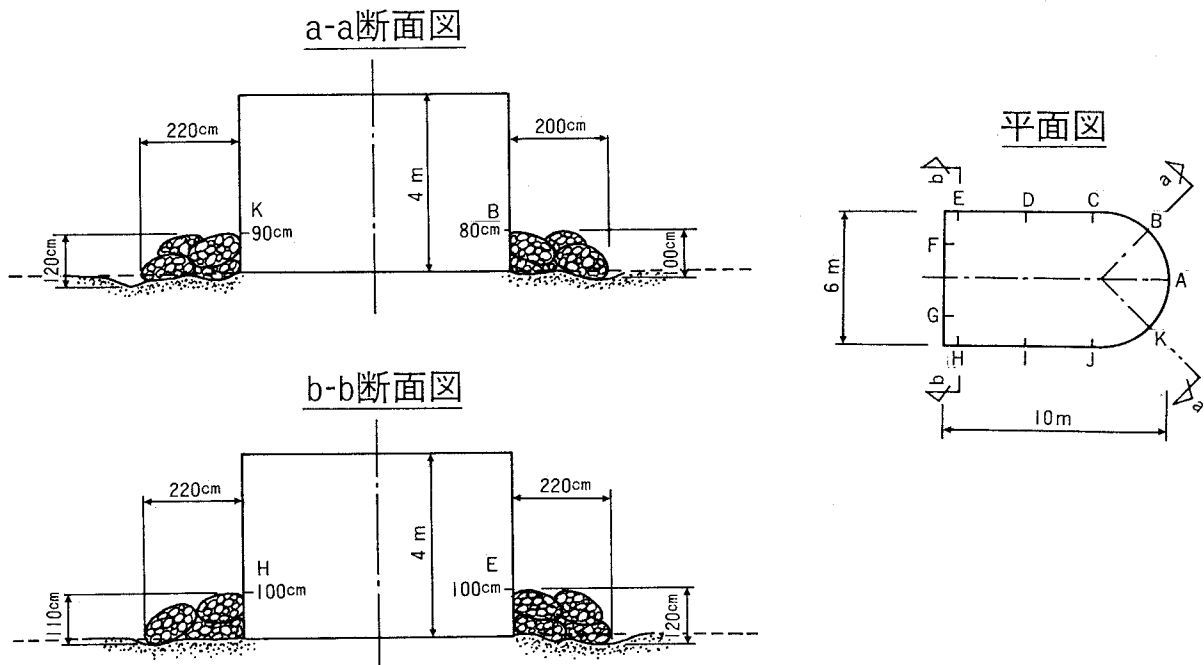


図-8 F.U.を取り付けた構造物周辺の地形変化

5. フィルターユニットの応用

F. U. は大型構造物の洗掘防止工として、大粒径の捨石と組合わせ、底質の吸い出し洗掘防止工用のフィルターとして開発されたものである。しかし、3. 2)に示すように多くの優れた特徴を有しているため、単独でも水中基礎の洗掘防止工、河川・海岸構造物の根固め、裏込め工等として極めて広い応用性を有するものと考えられる。

6. ま と め

本研究によって得られた成果をまとめると次のとおりである。

- ① 強い流れの中に設置される大型構造物の洗掘防止対策として捨石被覆工を採用する場合、所要の捨石寸法が大型化するため、底質の吸い出し洗掘の恐れがある。これを防止するためには、底質と捨石との間にフィルター層を設けるのが有効である。
- ② フィルターの機能を保ちつつ、強潮流にも掃流されない材料としてフィルターユニットを設計した。F. U. は任意の大きさ、形状で製作可能であり、可撓性、密着性等優れた特徴を有している。
- ③ 現地実験によって、F. U. の強度、地盤の不陸への追従性及び顕著な洗掘防止効果が確認された。
- ④ F. U. は河川・海岸構造物の根固め工等として、広い応用性を有している。

おわりに、本研究の実施にあたっては、大阪大学工学部 榎木亨教授、出口一郎助教授より多くの御指導、御助言をいただいた。深く感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) 中川博次, 鈴木幸一 ; 橋脚による局所洗掘深の予測に関する研究, 京大防災研年報, 第17号B, 1974
- 2) 吉川秀夫, 福岡捷二, 岩間汎, 曾小川久貴 ; 橋脚の洗掘ならびにその防止に関する考察, 土木学会・論文報告集, 第194号, 1971. 10
- 3) Terzaghi, K and Peck, R. B; Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd ed. Wiley -Interscience, 1967.
- 4) Graauw A. de, T. van der Meulen, M. van der Does de Bye.; Design Criteria for Granular Filters. De -lft Hydraulics Laboration no. 287, January 1983.