

浅海域における自動車道路用 水中トンネルの開発

DEVELOPMENT OF SUBMERGED FLOATING TUNNELS
FOR AUTOMOBILE ROAD IN SHALLOW WATER

藤田良一¹・三上 隆²・

桑島隆一³・高橋正夫⁴・柳沼利信⁵

Ryoichi FUJITA, Takashi MIKAMI,

Ryuichi KUWAJIMA, Masao TAKAHASHI, Toshinobu YAGINUMA

¹ 正会員 工修 水中トンネル研究調査会 (〒060-0807 札幌市北区北7条西2丁目)

² 正会員 工博 北海道大学教授 (〒060-0813 札幌市北区北13条西8丁目)

³ 正会員 工修 北海道開発局 開発監理部 (〒060-8511 札幌市北区北8条西2丁目)

⁴ 正会員 北海道開発局 室蘭開発建設部 (〒051-8524 室蘭市入江町1番地14)

⁵ 正会員 水中トンネル研究調査会 (〒060-0807 札幌市北区北7条西2丁目)

The Hokkaido development bureau is planning the access road for the offshore artificial island of Oinaoshi fishing port in Hokkaido Muroran City. The Society Submerged Floating Tunnel Technology Research have studied on the access road using Submerged Floating tunnel (SFT) technology. It is possible to design and to construct the access road for Oinaoshi. The extension of the underwater part of this SFT is about 300 m, the basic specifications are 2-lanes road for automobile and pavement.

This paper describes the development process for fixed type SFT for automobile road in shallow water. The structure of this SFT is rectangular reinforced concrete hulls supported by steel piles. And each hulls have buoyancy. In case of the fixed structure in water, the wave force which acts on hulls must be evaluated right. In this development, it is evaluating right the wave force which acts on hulls using the technique that the irregularity and the non-linear-ness of the wave, too, can be evaluated.

Key Words : *Submerged floating tunnels, shallow water, road tunnel ,design and construction methods, fixed structure in water, RC hull*

1. はじめに

北海道開発局室蘭開発建設部は、北海道室蘭市内の追直漁港（第3種漁港）で、Mランド計画の一環として沖合人工島の整備を進めている。この沖合人工島へのアクセス連絡施設の基本仕様は、2車線の道路に遊歩道を併設したものである。

アクセス連絡施設として、当初、斜張橋等のランドマーク性の高い橋梁案が検討されていた。しかし、沖合人工島建設地点の周辺で、複数のはやぶさが営巣していることが判明し、環境団体等から、橋梁案の見直しが要求されたため、鋼桁式橋梁の検討が行われた。

水中トンネル研究調査会で、アクセス連絡施設としての水中トンネルに関する予備概略検討を

行った結果、追直漁港の条件でも、水中トンネルが技術的に可能であり、コスト的にも妥当な施設が出来ることが判明した。¹⁾

この水中トンネルの構造は、若干の浮力を有する複数の鉄筋コンクリート製矩形函体を、摩擦杭で支持するものである。

追直漁港沖合人工島へのアクセス連絡施設の構造型式を選定するために、鋼桁式橋梁案と水中トンネル案の比較検討が行われることになった。この比較検討で、具体的な与条件に基づいて、基本仕様を満足する水中トンネルの基本設計を実施した。この論文では、浅海域における自動車用水中トンネルの一連の検討結果を報告する。図-1は、追直漁港沖合人工島とアクセス連絡施設の配置を示したものである。

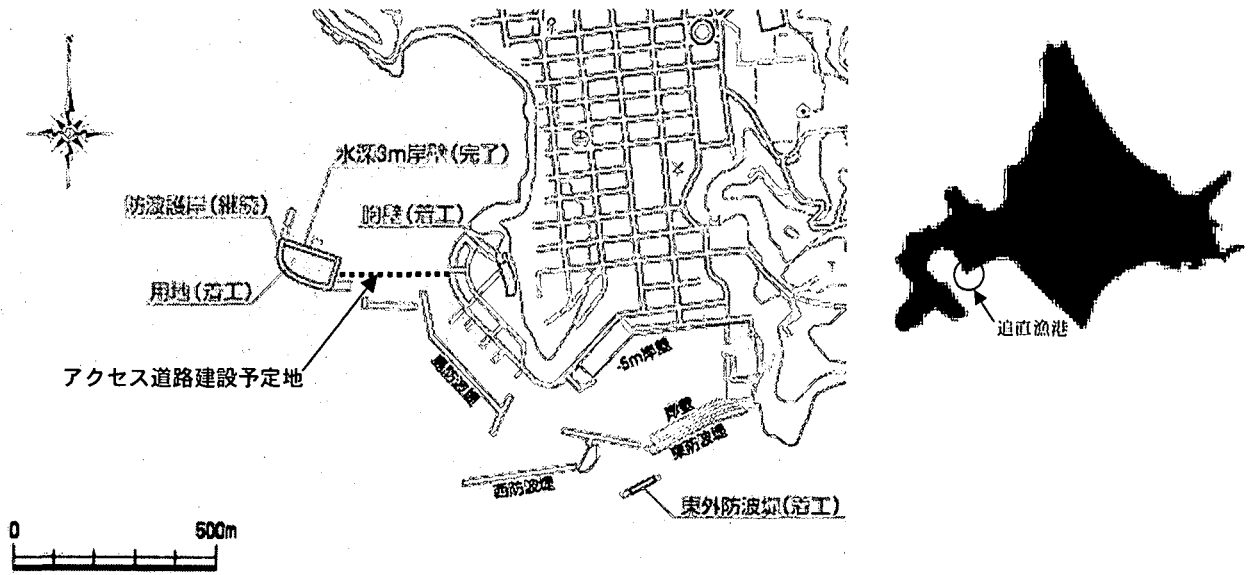


図-1 追直漁港施設配置図

2. 施設の検討条件

当該道路は、道路計画上の必要な機能、安全性等を確保するため、下記に示すように、道路構造令における道路種級区分を設定した。図-2は、今回提案する水中トンネル部の標準断面を示したものである。

(1) 道路規格

- a) 種級区分 : 3種4級(2車線)
- b) 設計速度 : $V = 40\text{km/h}$
- c) 計画交通量 : 500~1,500台/日
- d) 幅員構成 : 水中トンネルの内空断面の幅員構成は以下の通りとする。(路肩+車線+路肩+歩道+中央分離帯+歩道分離壁)
 $W = 0.50 + 5.50 + 0.50 + 2.00 + 0.80 + 0.30 = 9.60\text{m}$
- e) 建築限界 : 水中トンネル車道部の建築限界高は $H = 4.5\text{m}$ とする。
- f) 展望遊歩道 : 水中トンネルの歩道の一部に、海中を観察することのできる観察窓を設ける。
- g) その他 : 水中トンネル本体歩道部の下部を、共同溝として利用することが可能である。

(2) 線形条件

追直漁港の人工島アクセス施設は、新港側から、水中トンネル部を経て、人工島側に至る線形条件となる。水中トンネル部の延長は、約300mとなる。最大の縦断勾配を6%として計画する。新港側と人工島間の航路条件として、船舶の航行位置での水深5mを確保することになる。

(3) 地盤条件

過年度のボーリング調査結果を基に、地盤条件を設定した。人工島側では砂質土層が20m程度厚く堆積しており、以深に基盤である凝灰角礫岩が存在する。新港島側に近づくにつれて、基盤層の上面位置は浅くなり、砂質土層は急激に薄くなる。代わりに、砂礫層が堆積している。砂質土層は、海底面付近のN値が30以下の層と、N値30以上の厚さ3

~5mの層とに分けられる。水中トンネルの杭基礎の杭長は、主に鉛直支持力の引き抜き抵抗によって決まるため、この基盤層である凝灰角礫岩の上面位置を精度良く推定する必要がある。

(4) 潮位

L. W. L ±0.00 m
H. W. L +1.50 m

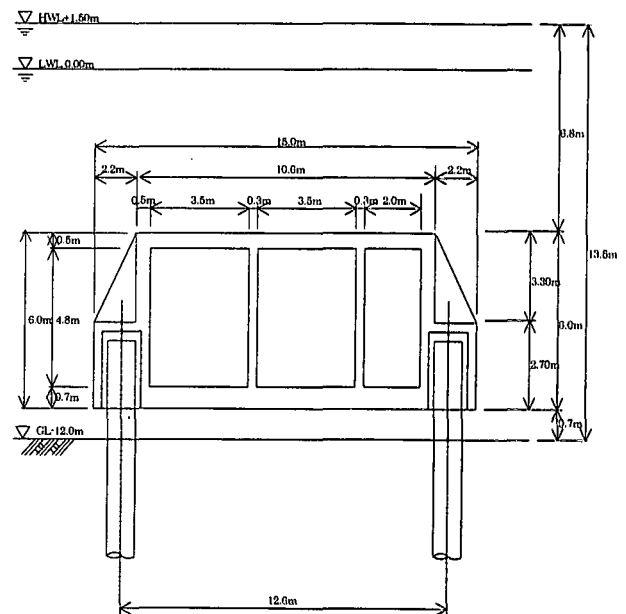


図-2 水中トンネルの標準断面

3. 設計波浪

室蘭市追直漁港の設計波浪条件に関しては、下記の4現象を明らかにするために、事前調査、波浪観測・越波観測等の現地調査、波浪推算等の解析・検討が行われ、新しい波浪条件が設定された²⁾。

- ①現港地区での港内攪乱原因の解明
- ②新港地区の静穏度
- ③人工島への越波・波しぶき
- ④連絡橋への波の打上げ

現地8地点の波浪観測の結果を基に、追直漁港の立地条件や波浪条件に適した手法の検討を行った。観測された現地波浪の再現性を検証し、追直漁港の30年確率波として、表-1に示す沖波波高が設定された。

表-1 設計波浪 (m, 秒)

波向	SE	SSE	S	SSW	SW
波高	7.3	7.0	5.9	5.8	6.3
周期	11.0	10.8	10.1	10.0	10.4

最終的には、追直漁港に最も適したモデル、すなわち、沖合の観測地点に襲撃する30年確率の波浪を、「エネルギー平衡方程式」で算出し、換算沖波波高とした。その後の波浪変形を考慮し、島防波堤（傾斜堤）と開口部までに到達する波浪を「エネルギー平衡方程式」で算出する。アクセス施設建設予定海域での波浪は、島防波堤（傾斜堤）からの回折と透過、及び、開口部からの回折を考慮できる「高山の方法」を用いて推算している。このようにして、表-2にある、アクセス施設建設予定海域での設計波浪が設定された。ここで、図-3に示すように、領域①は新港側、領域②は航路横断部、領域③は港口部に相当し、港口部での設計波高を基に、過年度に提案されている方法で低減させたものである。

表-2 設計波浪 (波向: SW)

領域	領域①	領域②	領域③
最高波高	2.5m	4.1m	5.8m
有義波高	1.4m	2.3m	3.3m
周期	10.4秒	10.4秒	10.4秒

注) 周期は、有義波の周期である。

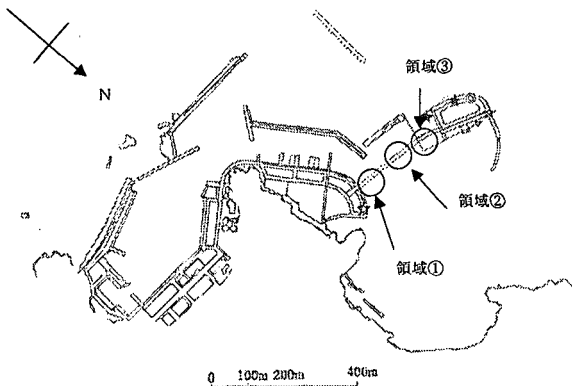


図-3 水中トンネル建設海域の領域

4. 波力の影響

海洋構造物を設計する場合、作用する波力を合理的に評価することは極めて重要である。防波堤や岸壁のように、波力に関する実験結果や、観測結果が既に多く存在する構造形式については、設計波圧公式が整備されている。しかしながら、構造形式として例が少ない場合や、複雑な水理現象を伴う場合には、何らかの方法を用いて、波圧・波力の評価をする必要がある。

波圧の評価方法としては、水理模型実験による方法と数値解析による方法とに大別することができる。水理模型実験による方法は、適切な実験方法を選べば、精度良く波圧を評価することができ、一般的に最も信頼できる波圧波力の評価方法である。数値解析による方法は、簡便であるため手軽に行えるが、基礎となる数学モデルの適用性の限界を超えると、解析結果に対する信頼性が無くなる恐れがある。

波力評価に関する数値解析方法としては、線形ポテンシャル理論に基づく方法と非線形方程式に基づく方法とに大別される。線形ポテンシャル理論は、任意の形状の海洋構造物に作用する波力を解析できるなどの利点を有する。後者は、ナビエ-ストークスの方程式と連続式を、直接的に数値解析するものが主流である。近年、コンピュータの性能が飛躍的に向上したこともあり、造波水路における水理模型実験を模擬できる「数値波動水路」と呼ばれる手法が注目されている。

本開発では、水中トンネルを対象に、VOF法による「数値波動水路 (CADMAS-SURF)」³⁾を用いて、非線形不規則波波力を求めることとした。

事前に検討した追直漁港における水中トンネルの線形波動場解析結果によれば、潮位が低い場合に、水中構造物に対して最も大きな波力が作用する。したがって、解析ケース数は、図-3に示した領域に対応する3ケースとなる。

解析手順としては、最初に、規則波（領域③での最高波高）を用い、水理模型実験での通過波検定に相当する解析を行い、所定の波が入射していることを確認した後、波力解析を実施しモデルの妥当性を検証する。通過波検定の結果、十分な精度を有することが確認された。図-4は、鉛直波力が最も小さい場合（上向きの力が最大）の解析結果であり、水中トンネル函体周辺の波形と流速場を良く示している。

次に、同様な手順で非線形不規則波解析（有義波高：3.3m、有義波周期：10.4秒）を行い、規則波を作用させた場合と不規則波を作用させた場合の構造物に作用する波力の違いを評価した。

最大波高5.8mの場合、規則波による最大水平波力は0.158MN/mであるのに対して、不規則波の場合は0.148MN/mとなり、6%程度波力が減少している。鉛直波力に対しても同様の傾向があり、約10%波力が減少している。ただし、モーメントについては、数パーセントの減少であった。

図-5は、領域③での水中トンネルに作用する波圧分布の最大値を合成したもので、波高で無次元化してある。

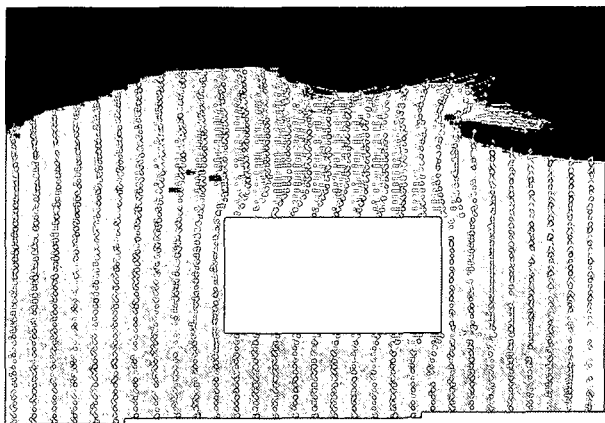


図-4 水中トンネル周辺の波形と流速場

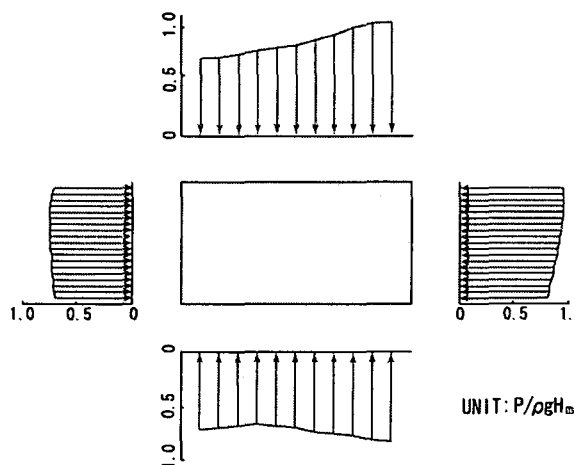


図-5 水中トンネルに作用する最大波圧分布

5. 地震の影響

水中トンネル軸直角方向の検討を行った。杭基礎を持った構造物であるが、海底地盤面と水中トンネル函体との離隔距離は非常に小さく、地震動に対して構造物にあまり振動の増幅が発生しないと見なせるため、震度法を用いて地震の影響を検討する⁴⁾。

水中にある構造物は、地震時において水による複雑な影響を受ける。壁状構造物や柱状構造物については、道路橋示方書にも地震時動水圧の提案式が規定されているが、今回の水中トンネルのように、杭で支えられた水中構造物については規定がない。

追直漁港の水中トンネルの基礎杭の設計においては、地震による構造物の卓越振動周期が短いことを考慮して、ポテンシャル接続法によって付加質量を求め、設計震度を乗じることによって動水圧合力を計算する。一方、水中トンネル函体の構造設計においては、壁状構造物に作用する動水圧のWestergaard式を準用した。

地震時動水圧の計算は、元九州大学井島武志教授

が開発したポテンシャル接続法（矩形断面2次元、規則波、線形波）を用いて行った。

トンネル軸直角方向の水平振動（スウェイ成分）に対して周波数応答を計算した。計算結果は、付加質量、および、設計震度を乗じて求めた動水圧合力について整理した。

解析に用いる函体断面は、図-6に示すように形状を単純化している。潮位については、事前検討の結果から、高潮位の方が動水圧が大きくなることが明らかになっているため、H. W. L. を検討潮位と考えた。

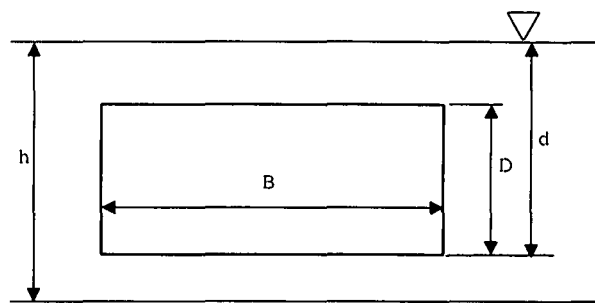


図-6 動水圧の解析モデル

図-7は、設計震度 $k_h = 0.18$ のときの動水圧合力 F_a （単位長さあたりの函体に作用する動水圧力の積分値）の周期応答を示したものである。付加質量との関係は、次式で示される。ここで、 m_a は、付加質量である。

$$F_a = gk_h m_a \quad (\text{N/m})$$

これから、動水圧合力は、振動周期により異なるが、地震による振動が卓越する数秒以下の短い周期の場合には、ほぼ一定値となることから、短い周期における結果を解析結果とした。なお、杭で支持された構造物の固有周期は、1秒以下である。

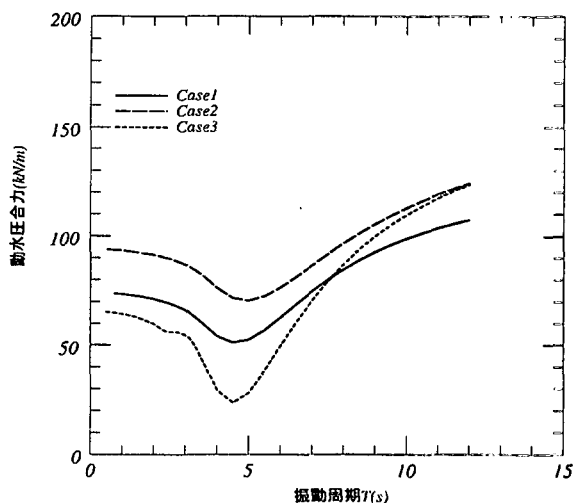


図-7 動水圧合力の周期応答

用させた。

これらの検討の結果、追直漁港の条件でも、当初仮定した鉄筋コンクリート製の矩形函体が成立することが明らかとなった。

鉄筋コンクリート製函体の製作・艀装は、追直漁港周辺のドック等を利用して行う。函体自体は、浮力を有するため、出渠後、建設海域まで曳船にて曳航することが可能である。

水中トンネル函体とその基礎杭は、杭頭結合部への充填コンクリートの打設により一体化されるが、充填コンクリートが硬化するまでの間、函体に作用する水平波力に抵抗できる構造とする必要がある。そこで、仮支承台と水中トンネル基礎杭の一部を利用した施工法を採用した。

建設海域に曳航された函体は、バラスト水を注水し、事前に準備した仮支承台に設置し、鋼管杭を順次打設する。この作業を繰返し、最後に、隣接する函体と函体を接合する。

水中トンネル部の両端は、立坑を介して、新港側と人工島側の道路と接続する。

8. 詳細設計にむけて

追直漁港人工島アクセス施設を水中トンネルで構築する場合、トンネル函体を緊張係留する方式では、函体断面が大きくなり、与えられた条件を満足することができない。このため、本論文で述べたように、鉄筋コンクリート製の矩形函体を鋼管杭で支持する構造を採用することになった。

追直漁港での水中トンネルの技術特性は、没水深（海面から構造物天端までの深さ）を大きくとることが難しい浅海域で、若干の浮力を有する構造物を固定することといえる。

係留された構造物では、波浪に起因する函体の運動を、正確に把握する必要がある。一方、固定された構造物の場合には、函体に作用する波力を正しく評価しなければならない。本研究では、波浪の不規則性と非線形性も評価できる手法を用いて、函体に作用する波力を正しく評価している。また、経済性を追求するために、平面的な波浪条件の相違も考慮している。

また、係留型の構造物の場合、地震動が函体に与える影響を、ほぼ無視することができたが、固定型の構造物では、地震時の影響も検討しなければならない。今回の研究では、ポテンシャル接続法を用いて地震時の外力を算定し、波力との比較検討を行っている。

以上、浅海域の水中トンネルの技術的な特徴をあげ、特に、大きな課題は無いことを述べた。しかし、世界ではじめての構造物となるため、追直漁港人工島のアクセス施設として水中トンネルの詳細設計を行う場合、次の事項を確認するべきといえる。

①航路や投錨禁止海域の表示等、航行船舶自体、投錨等による危険を防止する方策を講じる。

②約300mのトンネル部が、隔壁で分離された二車線道路となるため、この構造の安全性等について関係機関の確認を行う。

③水中トンネルの端部では、没水深が浅くなるため、非線形波力解析の結果では、図-11に示すように、砕波等の現象が生じることが考えられる。したがって、水理模型実験により、砕波等の影響を確認し、詳細設計の外力条件を検討する。

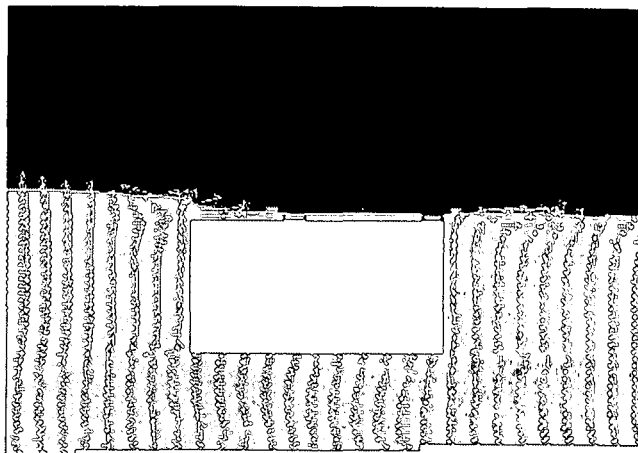


図-11 没水深が小さい場合の波浪変形

- ④水中トンネルを、「両端に立坑を有し、多数の杭で支持された細長い剛体」と考え、地震時の挙動解析を行い、立坑と函体の接合部の構造、可撓継手の位置・数・構造に反映させる。
- ⑤海底地盤の液状化を考慮した基礎杭の検討、および、基礎杭の防食対策の検討を行う。

本研究は、水中トンネル研究調査会の技術推進委員会幹事会と企画委員会幹事会に所属しているメンバーにて、北海道大学の加賀屋誠一教授を座長とする実務検討チームを編成し、水中トンネルの技術に精通した学識経験者・技術者・有識者のご意見を得ながら、検討会を繰り返しつつ、成果を取りまとめたものである。

参考文献

- 1) 室蘭開発建設部：平成13年度 追直漁港沖合人工島アクセス施設検討業務報告書，平成14年3月。
- 2) 室蘭開発建設部：平成13年度 追直漁港静穏度等観測検討業務報告書，平成14年4月。
- 3) (財)沿岸開発技術研究センター：数値波動水路の研究開発 (CADMAS-SURF)，沿岸開発技術ライブラリー，12巻，2001.10。
- 4) (社)日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，平成10年4月。
- 5) 藤田良一，三上隆他：浅海域における水中トンネルの開発，第25回海洋開発シンポジウム論文集，第16巻，pp.263-268，2000。