

膜体構造物における衝撃張力の発生メカニズムに関する 基礎的研究

青 木 伸 一*・岡 野 聡**

1. ま え が き

近年, オイルフェンスや汚濁防止膜が, 波浪条件の厳しい海域で使用されることが多くなるとともに, 曳航ケーブルや係留策等が破断する事故が発生し, これら海洋膜体構造物の設計法の見直しが求められている。青木ら (1998) がすでに指摘しているように, これまでは, フレキシブルな膜体構造物の設計に対しても剛な構造物の設計法を援用してきたため, これらの構造物は多くの場合過大な設計になっていることが多い。しかしながら, オイルフェンスや垂下式汚濁防止膜のように緩係留された膜体構造物については, 場合によっては過小設計となっていることも考えられる。実際, 波・流れ中でオイルフェンス等の張力測定実験を行うと, 膜体が弛緩した状態から波の作用により緊張する際に非常に大きな張力が衝撃的に発生し (榎木ら, 1990; 田端ら, 1999), これが設計上の限界値を与える場合が多い。これはフレキシブルな膜体構造物に特有の現象であり, 剛な構造物として取り扱う従来設計法ではこのような衝撃力は考慮できない。

榎木ら (1991) および Sawaragi et al. (1992) は, 衝撃張力を付加質量の考えをもとにモデル化しているが, 対象とした構造形式が複雑であったため, モデルの検証が十分行われていない。またこのモデルは数値計算を含むため, あまり実用的ではない。一方, 田端ら (1999) は, 垂下式汚濁防止膜について, 実際の展張形式で実験を行い, 衝撃張力を考慮した簡便な設計法を提案しているが, 構造形式が変わった場合に実験定数をどのように決定するかが問題であろう。特に, 拘束力の強いボトムテンション形式のオイルフェンスや, 膜下部を係留するような汚濁防止膜については, さらに検討が必要である。このように, 衝撃張力については, 構造形式や外力条件によって特性の違いや結果のばらつきが大きく, 定量的な評価が難しいだけでなく, その発生メカニズムがはっきりしないために, モデル化しにくいといった問題点がある。できるだけ簡便で実用的な設計法を確立するため

には, ある程度思いきったモデル化が必要ではあるが, 物理現象に対する理解を深めておくことがまず重要であろう。本研究は, 流れの中を流れとともに移動する物体 (剛体および膜体) がその運動を係留策によって急に阻止されたときに生じる流体力について, 極めて単純化した模型実験でその特徴を明らかにするとともに, 簡単な数学モデルを用いて衝撃張力の発生メカニズムとその特性について検討するものである。

2. 水理模型実験

(1) 実験装置および方法

模型実験は, 一様流を発生させることのできる小型回流水槽 (パーソナルタンク, 西日本流体技研製) を用いて行った。回流水槽には, 幅 30 cm, 深さ 20 cm の開水路部分が 60 cm あり, インバーターによって流量を変化させることができる。この開水路部の上流端部に, 図-1 に示すように, 張力計 (SSK 社製) を介して 1 本の係留策を取り付け, 係留策の先端に風状に抵抗体 (アルミ平板あるいは透水性の小さな化学繊維製の薄布) を取り付けた。なおアルミ平板については, 水中重量がほぼゼロとなるように, 上部に発砲スチロールの小さなフロートを付けた。係留策をたるませた状態で水面上に抵抗体を持ち上げた後, 一様流中に落とし込むと, 抵抗体は流れによって押し流され, 係留策が緊張して静止する。実験では, この一連の操作を, 各実験ケースについて 5 回程度繰り返し行い, この間の係留策の張力を, サンプリング周波数 800 Hz でパソコンに記録した。

(2) 実験条件

アルミ平板 (厚さ 0.5 mm) については, 1 辺 5 cm お

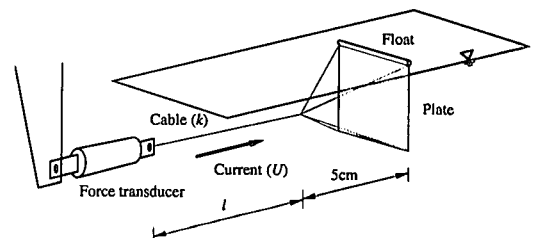


図-1 実験に用いた抵抗体と張力計の設置状況

* 正会員 工博 豊橋技術科学大学助教授 建設工学系
** 工修 滋賀県

よび7 cmの2種類の正方形板および5 cm×10 cm (横長)の長方形板を, 薄布 (厚さ0.064 mm) については, 1辺5 cmと7 cmの2種類の正方形のものをを用いた。流速は, 20~60 cm/sの範囲で数種類変化させた。また, 係留策長 (15 cmと20 cm), 係留策の径および材質 (ナイロン製の釣糸およびゴムひも) を変化させることによって, 係留策のバネ定数を数種類変化させた。また, 抵抗体を落とし込む位置や係留策の設置深さを変えた実験も比較のために行った。

3. 実験結果

(1) 張力の時系列特性

図-2は, 2種類の異なる流速に対する張力の時系列を, アルミ平板と薄布 (以下単に「板」および「膜」と呼ぶ) のケースで比較して示したものである。まず, 板については, 係留策が緊張した瞬間から0.1 s程度の間に大きな張力が発生し, その後一定値に落ち着いている。張力の最大値は, 流速が大きいほど大きくなっている。一方, 膜については, 流速が大きい場合には衝撃的な張力を示すが, その大きさは板に比べてかなり小さい。また流速が小さくなると, 衝撃的なピークは見られなくなっている。

図-3は係留策のバネ定数の違いによる影響をみたものである。小さなバネ定数, すなわち係留策が伸びやすくなると張力のピーク値は減少しバネ定数が2桁程度小さなゴムひもでは衝撃的なピークは消えている。ただし, 定常力はほぼ同一である。

図-4は, 板のケースについて, 板の形状を変化させた場合 (7×7と5×10)の張力を比較したものである。ただし, 板の面積はほぼ同一である。図より, 喫水深の大きな7 cm×7 cmの板では, 張力のピーク値はやや大きくなり, 逆に定常力はやや小さくなっているが, 大きな違いはみられない。

(2) 衝撃力と定常力

図-2~4では, 張力の時系列からその特性を定性的に見た。ここでは, 張力の代表値として, 張力が最大値を示した後に現われるほぼ定常な張力 (時間平均値として定義, 以下「定常力」と呼ぶ), および最大値から定常力を差し引いたもの (以下「衝撃力」と呼ぶ) を取り上げてそれらの特性を論じる。なお, 定常力については, 通常の一様流中での抗力としてとらえられる。

図-5は, 板のケースについて, 張力の代表値と流速の関係を示したものである。これより, 衝撃力は流速の1乗に, 定常力は流速の2乗に比例して変化することがわかる。また, 板のサイズによる違いをみると, 衝撃力と定常力ではその比率が異なり, 板面積が2倍になることにより, 衝撃力は約3.1倍, 定常力は約2.5倍になってい

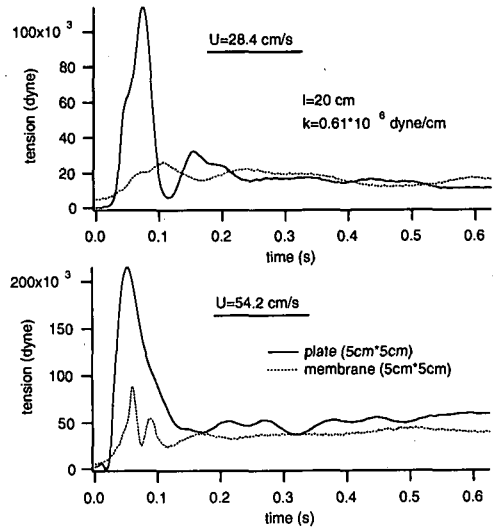


図-2 張力の時系列 (流速および板と膜の違い)

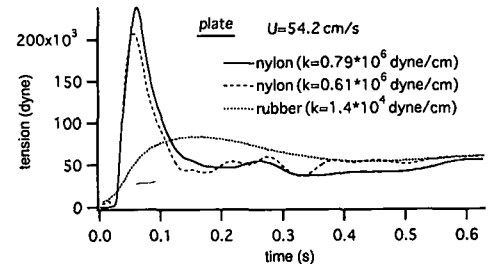


図-3 係留策のバネ定数の影響

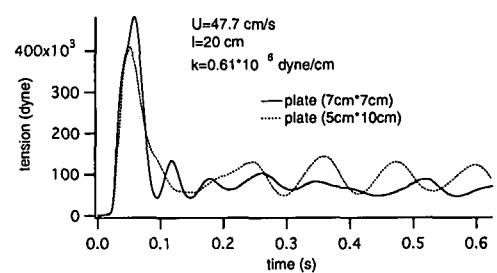


図-4 板の形状の違いによる張力の変化

る。

図-6は, 大きさの等しい板と膜について比較したものである。膜については, 衝撃力についても流速の2乗に比例する傾向が現われており, 板と異なった特性を示している。また, 定常力については, 流速の大きい範囲で膜の方が板よりも小さくなっているが, これは, 流れによって膜がしぼむことにより, 実質的な受圧面積が減少するため, 膜に及ぼす定常力の特徴である。

図-7は, 膜のケースについて, 図-5と同様にサイズの影響をみたものである。膜が大きくなることにより,

衝撃力には流速に線形的に変化する成分が大きく現われてくるようになる。サイズによる違いは、流速が大きくなるにつれて小さくなり、板の場合ほどサイズの影響が顕著に現われないことがわかる。定常力についても同様である。

4. 衝撃張力の発生メカニズムに関する考察

(1) 衝撃張力のモデル化

ここでは、衝撃張力の発生メカニズムについて考えるために、簡単な数学モデルを導入する。図-8に模式的に示すように、バネ定数 k の係留策の端部に取り付けられた抵抗体を質点で置き換え、その質量を m とする。係留策の伸び(抵抗体の変位)を $x(t)$ と表すと、 $x(t)$ に関する微分方程式は、抵抗体の運動方程式より次式のように書くことができる。

$$m\ddot{x} = -kx - M\ddot{x} + C_d \frac{1}{2} \rho A (U - \dot{x})^2 \quad \dots\dots (1)$$

ここに M は付加質量で、抵抗体の運動加速度に比例する流体反力を表す。また、 U は流速、 C_d は抗力係数、 A は板の受圧面積である。(1)式は $N = C_d(1/2)\rho A$ とおくと、次のようにまとめられる。

$$\ddot{x} - \frac{N}{m+M}(U - \dot{x})^2 + \frac{k}{m+M}x = 0 \quad \dots\dots (2)$$

この方程式は、 $t=0$ で $\dot{x}=U$ なる初期条件のもとにRunge-Kutta法などで数値的に解くことができる。ただし、抗力が無視できる場合には、方程式は線形となり、解析解が得られる。このとき、係留策の張力 f は、 $f=kx$ として次式で与えられる。これは、付加質量力のみによる衝撃的な張力を表している。

$$f = U\sqrt{k(m+M)} \sin(\sqrt{k/(m+M)}t) \quad \dots\dots (3)$$

次に、流体力を表す付加質量および抗力係数について考える。平板の付加質量についてはポテンシャル理論から求めることができるが、自由表面を有する流体中での3次元平板の運動については数値計算を用いる必要がある。今回は、厳密ではないが、Meyerhoff (1970)が無限流体中の3次元平板について求めた次式を用いた。ただし、膜のように変形する物体に関する付加質量について

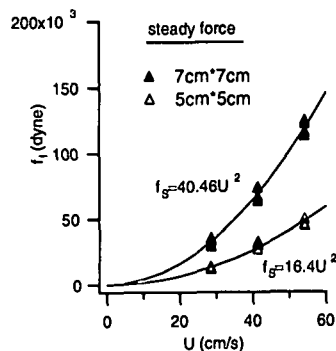
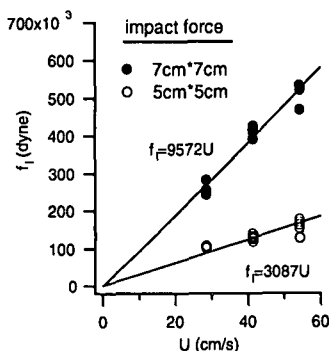


図-5 張力と流速の関係 (1) 一板のサイズの影響

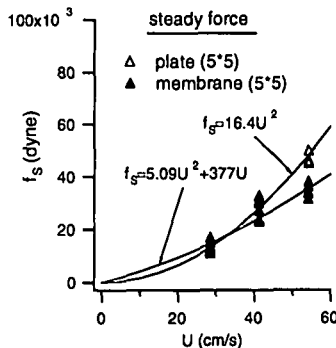
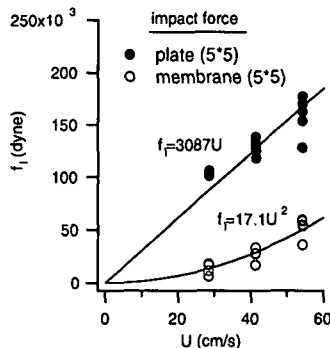


図-6 張力と流速の関係 (2) 一板と膜の違い

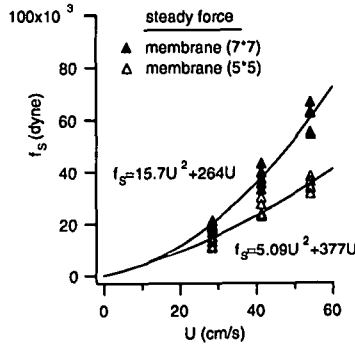
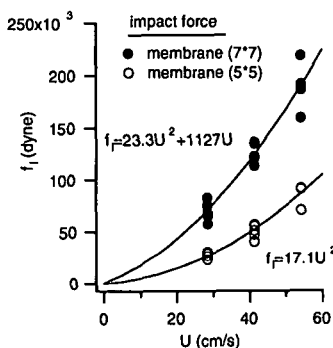


図-7 張力と流速の関係 (3) 一膜のサイズの影響

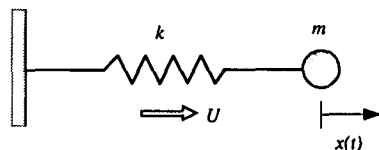


図-8 バネ・質点系によるモデル化

は不明である。

$$M = \alpha \cdot \rho \frac{\pi}{4} a^2 b \quad \dots\dots (4)$$

ここに、 a , b は板の一辺の長さで、 a が短軸方向長さ、 b が長軸方向長さである。また、 a は板のアスペクト比によって決まる係数で、 $b/a=1$ のとき 0.579, $b/a=2$ のとき 0.757, $b/a=\infty$ では 1 で与えられる。もちろん、自由表面の存在は付加質量に影響を及ぼすが、鉛直運動に比べると水平運動に対する影響はあまり大きくない。水面直下で水平振動する喫水 a の 2 次元平板については、Landweber and Macagno (1957) が求めており、 $M=2\rho a^2\pi$ となる。これと、(4) 式で $a=1$, $b=1$ とおいたものの比は、 $8/\pi^2=0.81$ となり、自由表面の存在により付加質量は 2 割程度小さくなるのが予想される。ただし、今回の計算では (4) 式の表現をそのまま用いた。一方、抗力係数については、定常力の実験結果から得られる値を用いることとし、例えば $5\text{ cm}\times 5\text{ cm}$ の板については $C_d=1.31$ 、膜については $C_d=1.0$ とした。

実験に用いた係留システムに対して、このモデルが適用できるかどうかを確認するために、質量 m の錘りを係留策の先に取り付け、空気中をある高さから落下させることにより、衝撃張力を発生させる実験を行った。この場合は外力として重力を考慮する代りに、流体力が消去できるので、解析解が求められる。図-9 は、錘りの自由落下による張力の時系列の実験値と理論値を比較した一例であるが、衝撃的な張力を、大きさ、立ち上がり時間ともに正しく表現できていることがわかる。

次に、このモデルから予想される結果から、先に述べた実験結果の解釈を試みる。図-5 に示したように、板のケースでは衝撃力は流速にほぼ比例することがわかった。一方、(3) 式で与えられる付加質量力による張力も流速に比例するので、板の場合の衝撃力は付加質量力が支配的であることが類推できる。ただし、正方形の板の場合、 $M\gg m$ とすると、(3), (4) 式より f の最大値は板の一辺の長さの $3/2$ 乗に比例することになるが、図-5 より、実験では衝撃力に及ぼす板のサイズの影響が理論より大きく現われていることがわかる。衝撃力に及ぼすバネ定数の影響についてみると、(3) 式より、付加質量

力はバネ定数の平方根に比例するので、係留策が伸びやすいほど衝撃力は小さくなる。これは図-3 から確認できる。一方、膜のケースについては、衝撃力にも流速の 2 乗に比例する成分がみられるが、これは膜では衝撃力に及ぼす抗力の影響が板に比べて相対的に大きくなっていることを意味している。

(2) 実験とモデルの比較

以上の様に、簡単な数学モデルで実験結果をある程度定性的に説明できることがわかったが、ここでは具体的に上記の数学モデルによる計算結果を実験結果と比較することにより、モデルの適用性ととも流体力の特性について考察する。図-10 は、板および膜の実験結果と、モデルによる計算結果を比較したものである。まず、図(a)の板のケースについてみると、(4) 式で与えられる付加質量および定常力から求めた抗力係数を用いた結果(model) は、張力のピーク値を過大に予測することがわかる。また、張力の立ち上がり時間が実験値よりもかなり短い。そこで、付加質量を 0.4 倍に減少させた場合と抗力係数を 0 にした場合について計算してみた。付加質量を減少させることにより、衝撃力のピーク値は低減するものの、ピークの立ち上がり時間が短くなり、付加質量力を低減するだけでは実験を説明できない。また、抗力係数をゼロとしても、衝撃力の波形はほとんど変化しない。以上より、付加質量は理論値よりもかなり小さな値をとることが予想されるが、定数係数の流体力係数を用いる限り、実験値を時系列レベルで説明することは難し

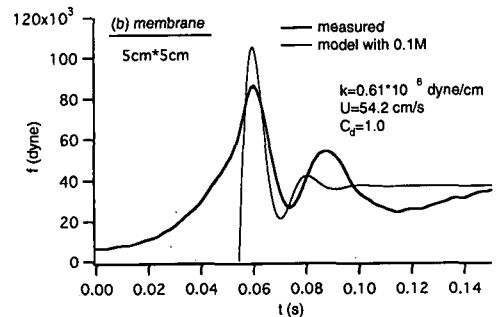
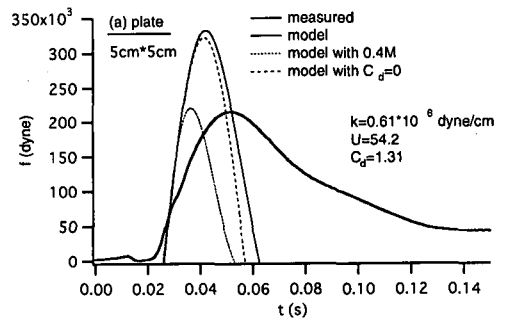


図-10 実験結果と計算結果の時系列の比較

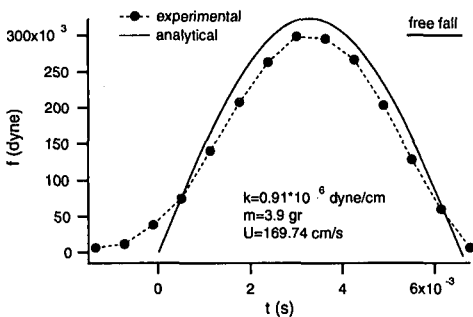


図-9 自由落下実験における実験値と計算値の比較

いことがわった。同様に、膜のケースについて比較したのが図(b)であるが、ここに示した計算値は、付加質量を(4)式の値の1/10としたものである。膜は緊張する際に大きく変形するので、付加質量はかなり小さくなるものと思われるが、ここでも張力のゆっくりした立ち上がりの説明できておらず、流体力係数が短時間のうちに大きく変化しているものと考えざるを得ない。ただし、張力がピークを示した後にみられる振動が計算でも再現されているが、これは、質量がほとんど無視できる膜の場合には、付加質量を考慮しない限り現われないものである。

(3) 係留策中の弾性波の伝播に関する検討

上述のモデルでは、応力は係留策に静的に作用するものとして取り扱ったが、衝撃的な張力を対象にする場合には係留策中の応力の動的な伝播について考慮しておく必要があろう。ただし、今回の実験条件についてはその影響がないであろうことは、図-9の自由落下の実験とモデルの結果がよく合うことから確認できる。

一本の策の一端(自由端)に作用する外力 $F(t)$ と、他端(固定端)で生じる張力 $f(t)$ との関係は、策中での減衰を無視すると、次式で与えられる(例えば中川ら, 1976)。

$$f(t) = \frac{2}{l} \sqrt{\frac{E}{\rho_c}} \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \int_0^t F(\tau) \sin \omega_n(t-\tau) d\tau \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 ρ_c 、 E は策の密度および弾性定数であり、 $\omega_n = (2n-1)\pi\sqrt{E/\rho_c}/2l$ である。いま、外力 $F(t)$ として、 $F(t) = F_0 \sin pt$ ($0 \leq t \leq \pi/p$)型のインパルスを与えるとき、 f/F の値は無次元数 $pl/\sqrt{E/\rho_c}$ のみの関数となる。計算の結果、この値が0.1程度までは $f(t)$ と $F(t)$ はほとんど等しくなり、弾性波の伝播の影響を考慮する必要がないことがわかった。今回の実験条件では、高々0.01程度であった。実際の膜体構造物の設計においても、係留策の応答は静的に考えても差し支えないものと思われる。

6. あとがき

本研究で取り扱った膜体構造物に発生する衝撃張力に類似したものとして、パラシュートの開傘衝撃があり、Ludtke (1986)は、開傘衝撃に対する取り扱いを包括的に示している。パラシュートの開傘問題においては、衝撃力の発生は抗力のみが用いられており、パラシュート

の変形に伴う後流域の変化から説明されている。本研究では、付加質量力の影響を中心に調べたが、その結果以下のような知見を得た。

(1) 抵抗体が剛な平板の場合には、衝撃張力は付加質量力によって定性的に説明できるが、張力の大きさや立ち上がり時間を定量的に説明するためには、流体力係数の時間的な変化を導入する必要がある。

(2) 抵抗体に変形する膜の場合や係留策が伸びやすい場合には、衝撃張力に及ぼす付加質量力の影響は相対的に小さくなり、衝撃力に抗力成分を考慮する必要があるが、付加質量を無視することはできない。

本研究を行うに当たり、豊橋技術科学大学大学院生、牧野友美君の協力を得た。また、関西空港2期工事における汚濁防止膜検討会における議論が有益であった。さらに本研究を遂行する上で(株)ブリヂストンから研究費の補助を受けた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 青木伸一・岡野 聡・樺木 亨 (1998): 自立式汚濁防止膜の有効高さと係留力の実用算定法, 海岸工学論文集, 第45巻, pp. 796-800.
- 安 成模・樺木 亨・青木伸一・萬藤 満 (1993): 波流れ共存場に設置されたオイルフェンスに発生する衝撃展張力及びフェンスの挙動, 海岸工学論文集, 第40巻, pp. 921-925.
- 樺木 亨・青木伸一・劉 海波・山下 真 (1990): 波浪中に振られた垂下式汚濁防止膜の展張ケーブルに発生する衝撃張力の特性, 海洋開発論文集, vol. 6, pp. 311-316.
- 樺木 亨・青木伸一・劉 海波 (1991): 垂下式汚濁防止膜に発生する衝撃展張力のモデル化, 海洋開発論文集, vol. 7, pp. 95-100.
- 田端竹千穂・八尋明彦・播本一正・相澤幹男・平石哲也・永松宏一 (1999): 垂下式汚濁防止膜の係留力に関する模型実験, 海岸工学論文集, 第46巻, pp. 846-850.
- 中川憲治・室津義定・岩壺卓三 (1976): 工業振動学, 森北出版 238 p.
- Landweber, L. and M. C. de Macagno (1957): Added mass of two-dimensional forms oscillating in a free surface, Jour. of Ship Research, vol. 1, pp. 20-30.
- Ludtke, W. P. (1986): Notes on a generic parachute opening force analysis, Collected Tech. Papers, AIAA 9th Aerodynamic Decelerator Balloon Tech. Conf., pp. 72-85.
- Meyerhoff, W.K. (1970): Added masses of thin rectangular plates calculated from potential theory, Jour. of Ship Research, vol. 14, pp. 100-111.
- Sawaragi, S., S. Aoki and H. Liu (1992): Wave-induced impulsive forces in tension cables of a floating silt curtain, Proc. 2nd Int. Offshore and Polar Eng. Conf., vol. III, pp. 339-346.