

積層管の剛性・応力・疲労解析プログラム LAYCAL

高橋一比古*, 正信聡太郎*, 田中 義久**, 金田 成雄*
前田 克弥*

Program LAYCAL Used to Analyze Rigidity, Stresses and Fatigue of Multilayered Pipes

by

Ichihiko TAKAHASHI, Sotaro MASANOBU, Yoshihisa TANAKA, Shigeo KANADA
and Katsuya MAEDA

Abstract

A cross-section analysis program LAYCAL for multilayered pipes has been developed and on sale. LAYCAL has three major functions, namely, (i) Rigidity analysis of the whole pipe including bending, axial and torsional rigidity calculations by theory of structural mechanics, (ii) Stress analyses of the structural members and strain analysis of the whole pipe (axial strain and curvature) under arbitrary axial force, bending moment and internal / external pressures, and (iii) Fatigue life estimation of the structural members under the mean stress and constant amplitude cyclic stresses, which are obtained from the above stress analyses. Additionally, bending tests of multilayered pipe models were performed and the test results were comparatively examined in order to verify LAYCAL.

* 海洋開発系、** 構造基盤技術系

原稿受付 平成28年1月 8日

審査日 平成28年2月26日

目 次

1. はじめに	102
2. 積層管の剛性・応力・疲労解析プログラム LAYCAL	103
2.1 LAYCAL の概要	103
2.2 LAYCAL の特徴	104
2.3 LAYCAL の構成	104
3. 積層管モデルの曲げ試験	105
3.1 積層管モデルの構成	105
3.2 試験方法	106
3.3 試験結果および LAYCAL との比較	106
4. まとめ	107
謝辞	107
参考文献	107

記 号

R : 等価円断面半径 [mm]
 S : 応力振幅または応力レンジ [MPa]
 N : 繰返し数 [cycle]
 EI : 曲げ剛性 [$\text{kN}\cdot\text{m}^2$]
 EA : 軸剛性 [kN]
 GJ : ねじり剛性 [$\text{kN}\cdot\text{m}^2/\text{rad}$]
 ϕ : パイプ曲げの中立軸に対する螺旋状の軸力補強条の位置 [deg]
 σ_{eq} : ミーゼスの相当応力 [MPa]

1. はじめに

海洋開発に用いられる各種の構造物は、上部構造・下部（水中）構造を問わず、用途や稼働海域（水深等）などに応じて特定の設計要件を満たす必要があるため、設計者は経験の無い構造様式への対応や設計フローにおける頻繁なフィードバックを余儀なくされ、大小含めて数え切れない程の仕様変更が繰り返されることも珍しくない。その際、構造設計の各段階において用いられる強度解析ツールの良し悪し（特にスピードと精度）は、設計フローの円滑な流れを左右するばかりでなく、最終的な設計の妥当性、即ち構造物の安全性・信頼性に関わる重要な要因となる。また、優れた設計支援ツールは、そのまま既存構造物の安全性評価ツールとしても活用できる。

さて、海底資源輸送用のライザーやフローライン等に用いられるフレキシブル積層管は、主として管部材（主に樹脂製）と螺旋部材（主に鋼製）の積層により構成されるが、積層された部材間の相対滑りや螺旋形状の特殊性などから、有限要素法等を用いた汎用構造解析ツールによるモデル化は極めて困難であり、管が軸力、曲げ、圧力などの様々な外力を受けた時に各構成部材（特に螺旋部材）に生じる局所応力を簡便に精度良く評価するためには、積層管専用の解析ツールが必須となる。

当所ではこれまでに、そのような専用解析ツールとして、フレキシブル積層管の剛性・応力・疲労解析プログラム LAYCAL を開発し、積層管モデルの曲げ試験による検証を経て、初期設計支援および安全性評価ツールとして活用するとともに、外部への販売も実施しているので、以下にプログラムと検証試験の概略について紹介する。

2. 積層管の剛性・応力・疲労解析プログラム LAYCAL

2.1 LAYCAL の概要

LAYCAL は、主として管（または芯）部材と螺旋部材の積層により構成される各種のフレキシブル積層管を対象として、構造力学的な解析（主として Costello の理論¹⁾）に基づく計算式により曲げ剛性・軸剛性・捩り剛性を求め、任意の軸力・曲げモーメント・内外圧条件下において各部材に生じる応力や積層管全体の軸方向歪・曲率等を計算すると共に、算出された応力値を用いて構成部材の定振幅疲労寿命を簡便に解析するプログラムである（使用言語：Visual Basic 6.0，実行環境：Microsoft Windows を OS とする PC）。

LAYCAL の製品セット概観を Fig. 1 に示す。



Fig. 1 Program package of LAYCAL

一般的なフレキシブル積層管の積層構造は Fig. 2 に示す通りで、構造の詳細は管の内側から順に以下の通りである。

①インターロック管（Carcass）

外圧等により管の断面が潰れないようにするための鋼製内管。可撓性が大きく、曲げ剛性は無視できる。

②圧力内管（Pressure sheath）

内部流体を閉じ込めるパイプ。ポリアミド等の樹脂製。

③圧力補強条（Pressure armors）

巻き角を大きくした鋼製螺旋条で、主として内外圧を受け持つ。

④軸力補強条（Tensile armors）

巻き角を小さくした鋼製螺旋層で、主として軸力を受け持つが、積層管が曲げを受けると曲げ・捩り応力が生じる。パイプ径方向への浮き上がり変形を抑えるため、外側を高弾性材料の包帯（Holding bandage）で巻き締める場合も多い。

⑤外部シース（Outer sheath）

海水の侵入を防ぎ、内部構造を保護する。曲げ剛性に大きく寄与する。ポリアミド、ポリエチレン等の樹脂製。

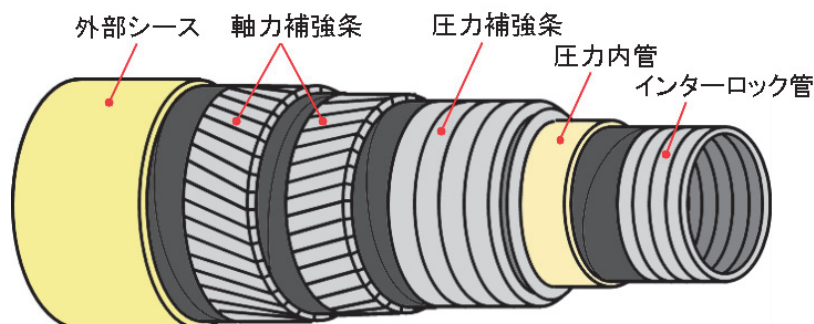


Fig. 2 Multilayered flexible pipe

2.2 LAYCAL の特徴

①データ入力 of 容易さ

積層は螺旋層・パイプ層ともに 10 層まで可能であり、寸法や材料特性を表形式で簡単に入力できる。入力したデータはテキストファイル形式で保存・読込が可能である。

②豊富なオプションメニュー

螺旋層が矩形断面の場合の等価円断面半径 R の算出法や、剛性の算出式などをメニュー形式で細かく選択できる。また、疲労解析で用いる $S-N$ 曲線は代表的なもの (DNV²⁾ および JSSC³⁾ の設計曲線) からメニュー形式で簡単に選べるようになっており、平均応力補正法も 3 通りの方法から選択できる。

③解析時間の短さ

解析には有限要素法ではなく構造解析の理論式を用いているため、データ入力後ほぼ瞬時に結果が得られる。なお、次節で述べる各解析フォームにおける解析結果はテキストファイル形式で保存することができる。

2.3 LAYCAL の構成

LAYCAL には、データ入力、剛性解析、応力解析、疲労解析という 4 種類のフォーム (プログラム画面) があり、プログラムの起動後、解析の進行と共に順次表示される。以下、各フォームについて概説する。

①データ入力フォーム

このフォームでは、積層管を構成する各部材の形状寸法・材料定数・数などを入力すると共に、剛性や応力の算出に関わるオプションを設定する。

②剛性解析フォーム

このフォームでは、積層管を構成する各部材および積層管全体の曲げ剛性 EI 、軸剛性 EA 、ねじり剛性 GJ の値を計算して表示すると共に、積層管全体の剛性に占める各部材の寄与の割合をパーセント表示する。

③応力解析フォーム

このフォームでは、積層管に作用する任意の張力、曲げモーメントおよび内外圧により各部材に生じる歪や応力を計算して表示する。また、積層管全体の軸方向歪や曲率 (半径) など也表示する。

フレキシブル積層管が曲げを受けると、螺旋状の軸力補強条には 2 軸の曲げおよび捩りによる多軸応力場が生じる (Fig. 3)。応力の種類や大きさは、積層管の曲げ中立軸に対する螺旋の位置 ϕ (角度) や補強条を外側から巻き締める包帯的作用等によって種々に変化するため、簡易的な推定式などにより精度良く推定することはこれまで困難であった。そこで、LAYCAL にはこれらの多軸応力および相当応力を算出する機能を付与し、次章で述べる積層管モデルの曲げ試験による実データと比較することにより、その有効性を検証した。

更に、LAYCAL の応力解析フォームでは必要に応じて「固着ー滑り曲げ解析フォーム」を呼び出し、螺旋部材の摩擦や滑りを考慮した非線形曲げ解析を行うことも可能である。Fig. 4 に応力解析フォームを示す。

④疲労解析フォーム

このフォームでは、積層管のある特定の層 (部材) を対象に、応力計算フォームで計算された応力の最大値・最小値および任意の $S-N$ 曲線を用いて定振幅疲労解析を行う。疲労解析では、応力集中係数や繰り返し応力の周波数、平均応力の影響等を考慮することができる。

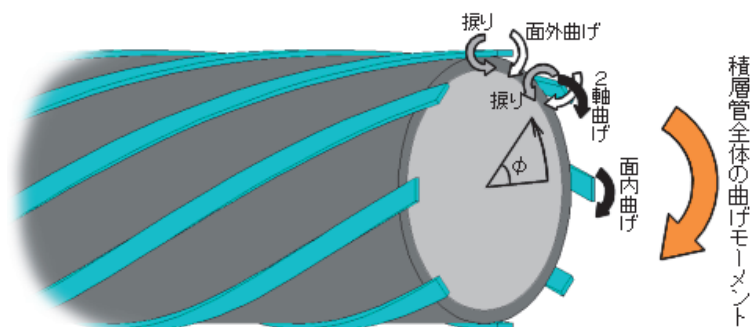


Fig. 3 Multiaxial stress states of tensile armors under bending of multilayered pipe

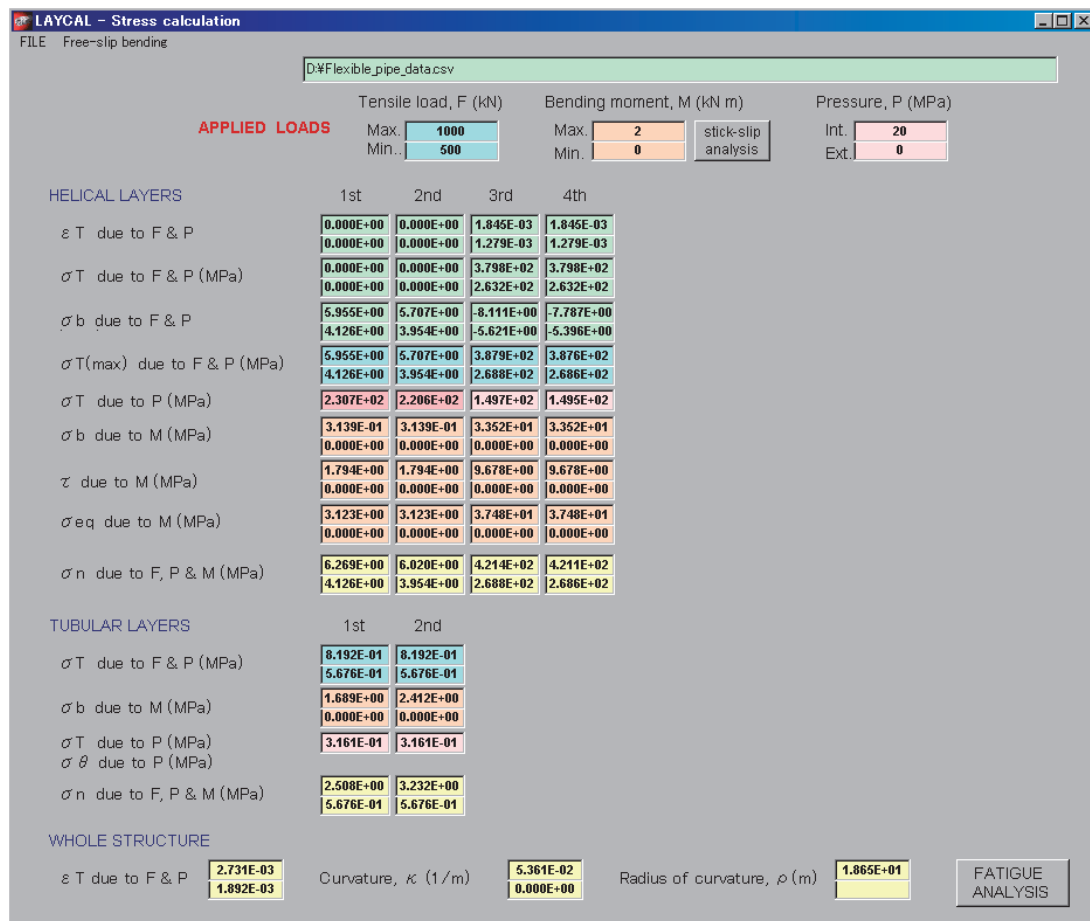


Fig. 4 Stress analysis form of LAYCAL

3. 積層管モデルの曲げ試験

3.1 積層管モデルの構成

曲げ試験に用いた積層管モデルの積層構成を Table 1 に示す。モデルの最外径は約 180 mm である。第 7 層が応力を測定した螺旋巻きの鋼製軸力補強条である。なお、第 8 層の軸力補強条包帯（樹脂テープ）については、無い場合とある場合の両方について曲げ試験を行い、影響を調べた。

Table 1 Configuration of the multilayered pipe model

No.	項目	材料
1	インターロック管	ステンレス鋼
2	座床防止層	布テープ
3	内管	樹脂チューブ
4	磨耗防止層	樹脂テープ
5	軸力補強条	高張力鋼
6	磨耗防止層	樹脂テープ
7	軸力補強条	高張力鋼
8	軸力補強条包帯	樹脂テープ

3.2 試験方法

軸力補強条に生じる多軸応力を測定するため、外側（第7層）の軸力補強条に面内曲げ・面外曲げ・振り測定用の各種歪ゲージを貼付した。

曲げ試験は Fig. 5 に示すような弓形曲げ試験とし、弓の弦に当たるチェーン部分の牽引荷重を適宜増減させながら、積層管モデル中央部の曲率ならびに軸力補強条の各種歪を計測した。



Fig. 5 Bending test of the multilayered pipe model

3.3 試験結果および LAYCAL との比較

Fig. 6 は、第8層の樹脂テープ包帯を巻かなかった場合について、積層管モデル中央断面・第7層の軸力補強条の各位置におけるミーゼスの相当応力を、実験値と LAYCAL による推定値の双方で比較したものである。なお、同図には参考のため汎用構造解析コード MARC による推定値も付け加えてある。横軸の ϕ は中立軸に対する螺旋の位置 (Fig. 3) を示しているが、各位置とも実験値と推定値の相関は良好であり、LAYCAL および MARC の双方とも安全側で妥当な推定を与えている。

次に Fig. 7 は、第8層の樹脂テープ包帯を巻き締めた場合について、Fig. 6 と同様に相当応力の比較を示したものであるが、この場合も実験値と LAYCAL による推定値の相関は良好であった（包帯ありの場合、MARC によるモデル化および解析は極めて煩雑かつ実効性に乏しいため実施していない）。

Fig. 6 と Fig. 7 を比較すると、樹脂テープ包帯で軸力補強条を抑えつけることにより、各位置における相当応力が増大することがわかる。

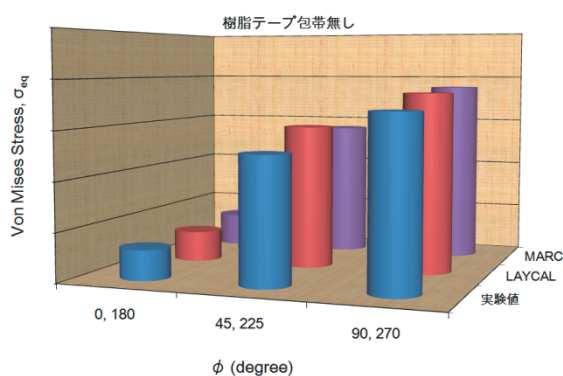


Fig. 6 Von Mises stress in the outer tensile armors (without the holding bandage)

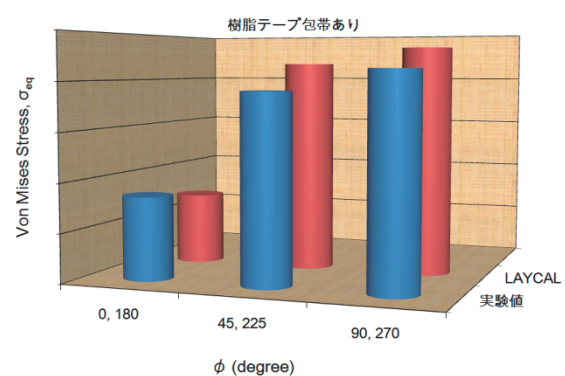


Fig. 7 Von Mises stress in the outer tensile armors (with the holding bandage)

4. まとめ

本稿では、積層管の剛性・応力・疲労解析プログラム LAYCAL の機能、特徴、構成などについて紹介するとともに、積層管モデルの曲げ試験による検証結果についても概説した。

冒頭でも述べたが、当所では、海洋資源輸送用のライザー管等、各種のフレキシブル積層管の強度解析、初期設計支援および安全性評価に LAYCAL を活用するとともに、外部への紹介や販売も適宜行っているところである。

謝 辞

積層管モデルの製作および曲げ試験の実施に関し、古河電気工業株式会社の山口武治氏ならびに眞鍋博紀氏には多大なるご協力を賜りました。ここに記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) George A. Costello, Theory of Wire Rope (Second Edition), Mechanical Engineering Series, Springer (1997).
- 2) Det Norske Veritas, Recommended Practice DNV-RP-C203, Fatigue design of offshore steel structures (2010).
- 3) 社団法人 日本鋼構造協会（JSSC）編，鋼構造物の疲労設計指針・同解説，技報堂出版（2010）.