

埋 設 曲 管 の 応 力 解 析

Stress Analysis of Underground Curved Pipes

久保慶三郎*・吉田 裕*・松本 徳久*

Keizaburo KUBO, Yutaka YOSHIDA and Norihisa MATSUMOTO

電子計算機の大型化、高速化に伴い構造解析の分野の様相も一変しつつある。マトリックスによる構造解析法は有力な手法として各方面に取入れられ大きな成果をあげている。マトリックス法によって地中埋設管の応力解析を行なったところ実際の測定結果と比較して非常によい結果が得られたので、ここに解析の具体的内容と結果を実測結果と比較して示す。

1. は じ め に

地中埋設管構造の地震時応力や内挿物の発熱による熱応力を考える場合、曲管部の応力状態が特に複雑になりその応力解析が重要な問題となる。

本稿は地中埋設管の応力解析にマトリックス構造解析法を適用した結果を実験結果と比較して紹介するものである。

埋設管が一平面内にあり、地盤係数に相当する有限個のパネによって面内に拘束されているものとしてモデル化している。したがって、解析は軸力と曲げを受ける基本的な梁(はり)要素で構成される構造が各節点をパネによって拘束され、面内の荷重、支点の変位および温度変化を受ける場合の応力解析という形で行なっている。

このように理想化した場合の解析は、マトリックス構造解析法としては最も初歩的なものであって、特に目新しい手法を用いているというわけではない。しかし、地中埋設管のように、従来の解析の手法では解析が非常に困難であるばかりでなく、管路が複雑な場合には解析不可能であった問題に対しても比較的簡単に解が得られ、しかも実験結果と比較して非常によく実際問題を評価し得ることを示すことは、マトリックス法の応用例としておもしろい問題であると考え、ここに発表する次第である。

2. 構造系のモデル化について

地中埋設管の構造系は、埋設管と周囲の地盤によって構成される。

鋼管構造は厳密には円筒殻構造であって、集中荷重が作用して局部的な断面変形が生ずる場合や肉厚の薄い管で曲管部の曲率半径が小さいもの、すなわち Pipe Factor が小さな管の場合には、特にその部分の全体の構造系に与える影響を考慮する必要がある。しかし、ここで対象とする管路は、管径 25 cm、肉厚 7 mm、曲管部の最小曲率半径 10m 程度であって、曲げ剛性に比し管長が非常に長いので、梁要素によって構成されるものとして十分近似することができるものとする。

周囲の地盤については、土質そのものが非常に複雑で

あって、これを正しくモデル化することは困難である。いま、一辺 30 cm の正方形鋼板によって載荷を行ない、地盤の荷重—変位を測定した結果を示すと図 1 のように

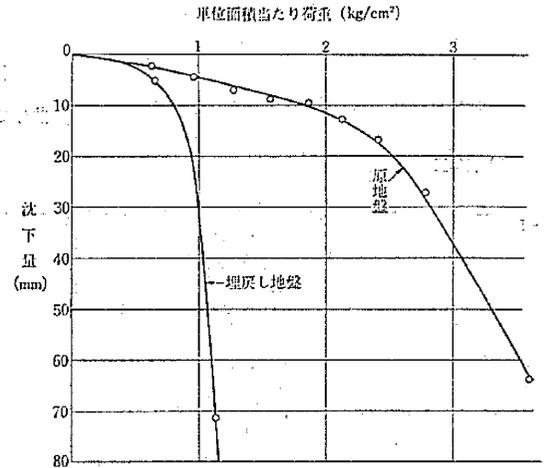


図 1

なる。しかし、この地盤の荷重—変位曲線は荷重が増加する方向に測定して得られたものであって、荷重が増加と減少を繰り返すような場合には、この関係はほとんど信頼性を持たなくなる。いずれにしても、解析のためにはこれを理想化した形で、モデル化しなければならない。

マトリックスによる数値計算的には、図 1 に与えられ

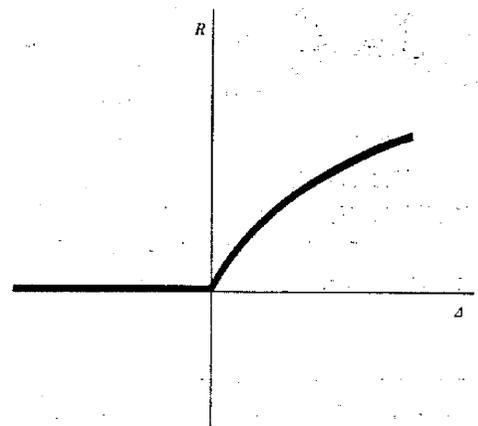


図 2

* 京大生産技術研究所第 5 部

たわみ

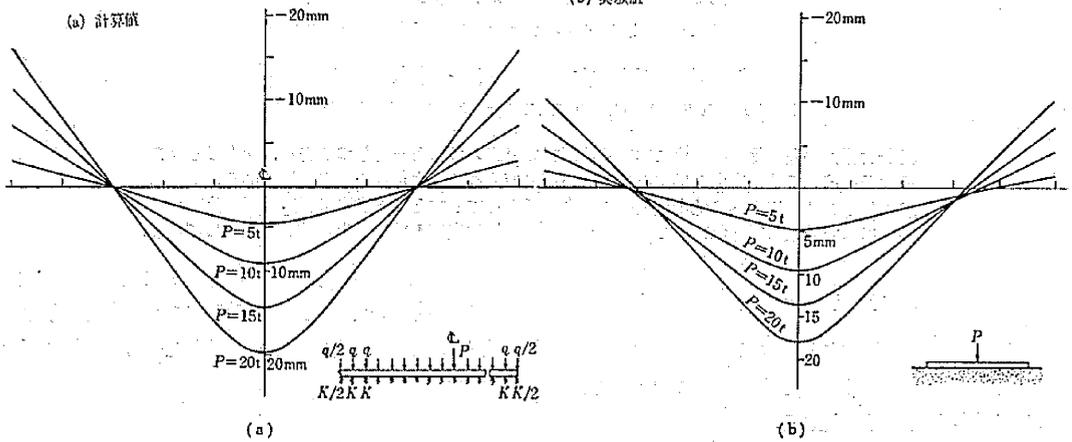


図 3

曲げモーメント

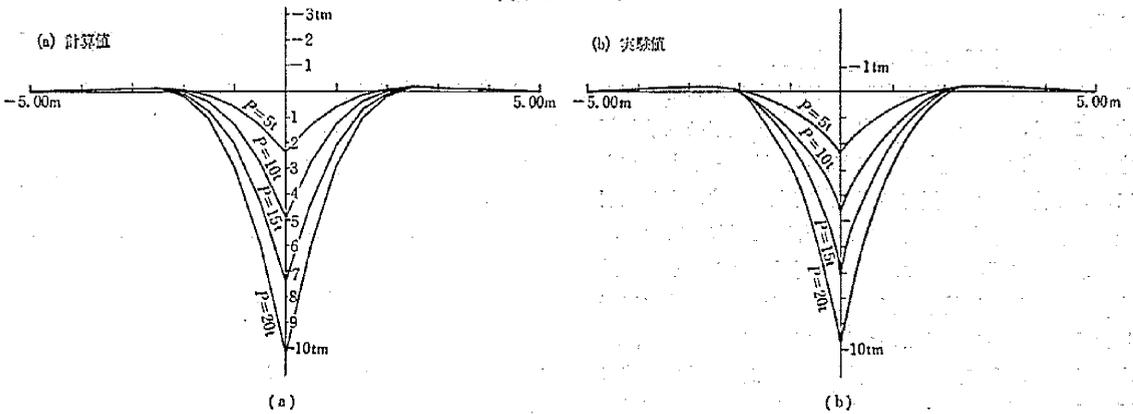


図 4

そのような荷重と変位の関係を忠実に考慮することが可能である。実際、砂地盤上の梁の問題に対して、地盤の荷重—変位の関係を図 2 のような形でとらえ、収斂計算によって解析を行なった結果、図 3, 4 に示すように実際の測定結果と非常によく一致する結果を得ることができた。

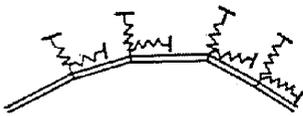


図 5

しかし、非常に大きな計算になると収斂計算を行なうことは計算時間的に大変であるので

以下の解析においては、地盤を、有限個の点で管を管軸方向と管軸に直角方向に拘束するそれぞれバネ定数の異なる線形バネで代表させることによって、図 5 に示すようにモデル化した。

3. 解 析

解析は軸力と曲げを受ける梁要素の基本的なマトリクス変形法によって行っている。解析法の詳しい内容については文献^{1), 2)}等に譲り、ここでは解析の手順を略述する。

すなわち、

- 1) 管路を構成する要素の各節点の座標、要素の寸法、剛性、地盤係数に相当するバネ定数などのデータを読み込む。
- 2) 構造体の剛性マトリクスを作成する。
- 3) 2)で求めた剛性マトリクスをバネ系などの境界条件によって修正し、構造系としての剛性マトリクスとする。
- 4) 3)で得られた剛性マトリクスを与えられた荷重系に対して解き、変位を求める。
- 5) 得られた変位から各要素の部材力、各節点のバネによる反力などを求める。

以上である。

これをもう少し詳しく説明する。

すなわち、梁要素 g に関する部材力と変位の関係は

$$P_g = K_g v_g$$

と表わされる。ここで P_g , v_g はそれぞれ要素 g の両端の部材力と変位である。 K_g は要素 g の剛性マトリクスである。次に各要素の剛性マトリクス K_g を合成し

て構造全体の剛性マトリックス K_0 をつくり

$$f = K_0 v \quad (1)$$

を得る。ここに f は外力系である。

ここでバネ系の条件を考慮して (1) 式を修正する。すなわち、バネ i の反力 r_i と変位 v_i との関係は、バネ定数を k_i とすると

$$r_i = -k_i v_i$$

と表わされるから、バネ系全体として

$$r = -k v \quad (2)$$

となる。また、構造に対する外力 f は外荷重 f_L とバネの反力 r との和で与えられるから

$$f = f_L + r \quad (3)$$

となる。(1), (2), (3) 式より

$$f_L = [K_0 + k] v$$

となる。外荷重 f_L は一般には外から作用する荷重であるが、温度変化や初期ひずみの存在する場合にはそれに応じた荷重項となる。

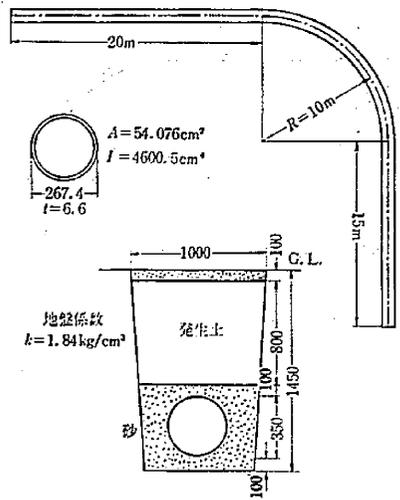


図 6

応 力

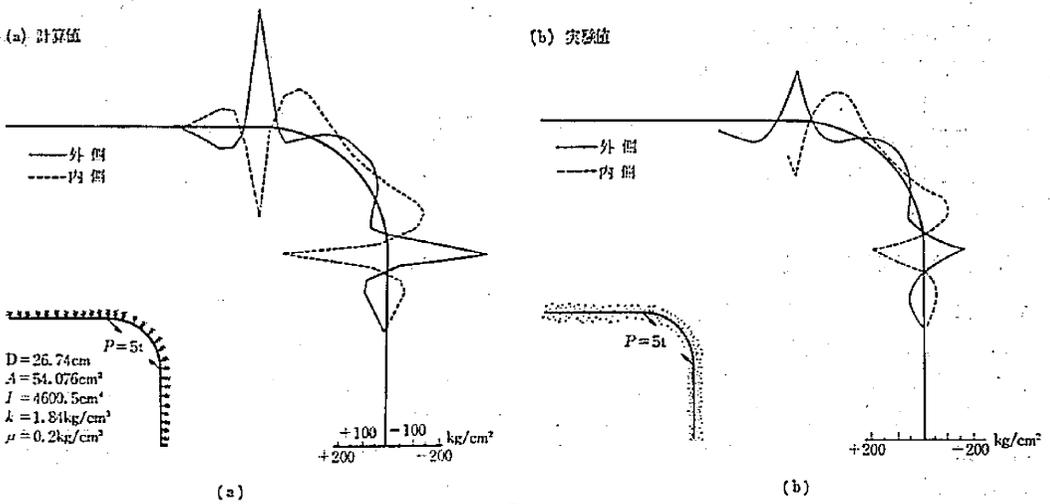


図 7

応 力

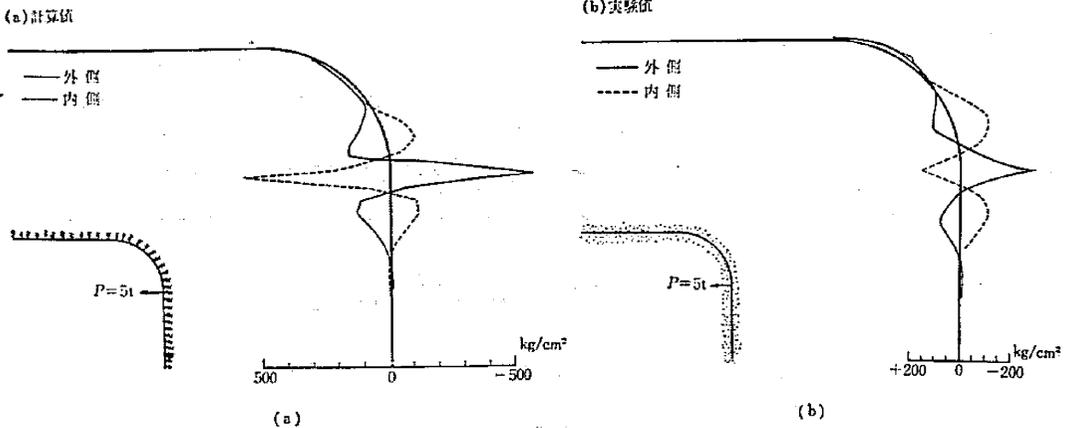


図 8

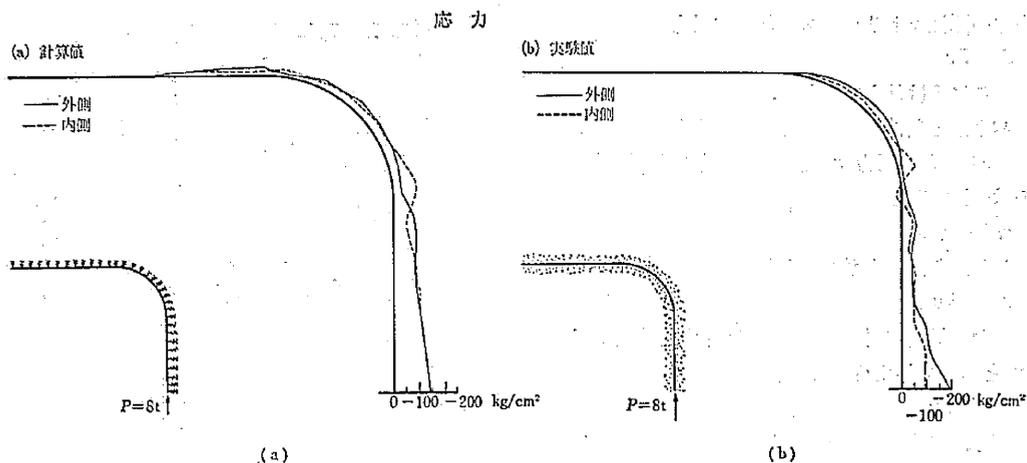


図 9

4. 実 験

実験は、図 6 に示すように、実寸の鋼管を地下約 1.2 m の深さに埋設し、半径 10 m で 90° の曲管部を有する試験管路をつくり、図 7~9 に示したような荷重条件のもとで、おもに曲管部の応力および変位の測定を行なった。

なお、地盤係数は原地盤について 1.84 kg/cm³、埋戻し地盤については、1.28 kg/cm³ であった。

5. 実験および解析結果

図 7~9 に解析および実験結果を比較して示す。また、地中に埋設された鋼管が内挿物の発熱によってどのような熱応力を生ずるか、おもに曲管部を中心に解析した結果を図 10~13 に示す。

図 7, 8 において載荷点の応力の大きさは実験値の方がかなり小さくなっているが、これは実験の際に載荷点

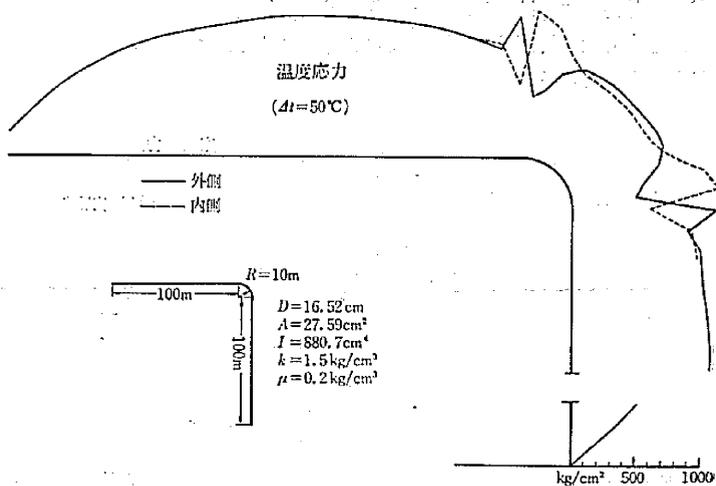


図 10

上に抵抗線ひずみ計を貼付することができなかったため、載荷点から少し離れた点の応力を測定したためである。

温度変化による管路の応力分布に関しては、曲管部により複雑な応力状態が生ずることがわかる。直線部分

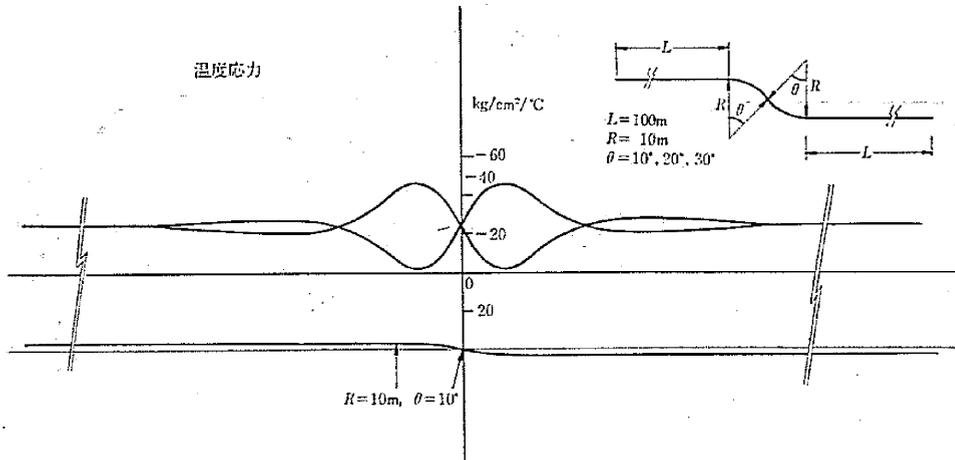


図 11

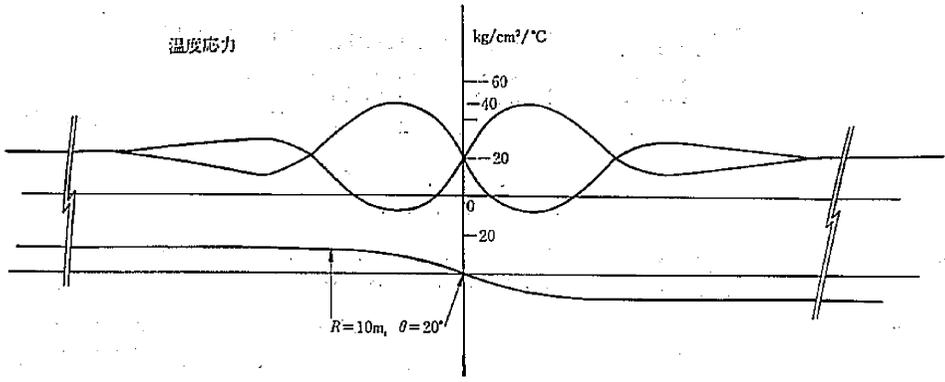


図 12

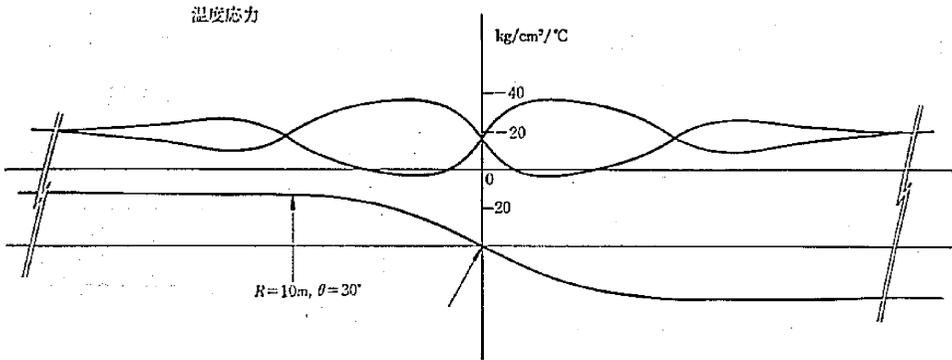


図 13

を長くしたのは、直線部分に変位が固定され、軸力が一定の領域があり、この部分を含めた解析を行えば半無限に長い管路の曲管部について、この解析結果が適用できるからである。

6. おわりに

解析結果と実験結果とを比較してみると、構造系のモデル化の点で種々の問題を含んではいるが、このような解析によって十分実際の状況を捕え得ることがわかる。

なお、実験データは東京電力技術研究所の実験によるもので借らせていただいたものである。

(1968年2月29日受理)

参考文献

- 1) S.J. McMinn; Matrices for Structural Analysis, E. & F.N. SPON LTD. LONDON 1962
- 2) H.C. Martin; Introduction to Matrix Methods of Structural Analysis, McGraw-Hill Book Company

(p.20 よりつづく)

- 18) J.M. Gere and W. Weaver, Analysis of Framed Structures, (1965) D. Van Nostrand Co., Princeton N. J.
- 19) H.L. Laursen, Matrix Analysis of Structures, (1965) McGraw-Hill Book Co. New York.
- 20) W. Weaver, Computer Programs for Structural Analysis, (1967) D. Van Nostrand Co., Princeton N. J. 邦訳 山本善之, 構造物解析のプログラム (1968) 共立出版.
- 21) J. Robinson, Structural Matrix Analysis for Engineer, (1966) John Wiley & Sons, New York.
- 22) C.K. Wang, Matrix Methods of Structural Analysis, (1966) International Textbook Co., Scranton Pa.
- 23) Proceedings of the Conference on Matrix Methods in structural Mechanics, Wright-Patterson Air Force Base, Dayton, Ohio, Oct. 26-28, 1965 AFFDL-

TR 66-80, 1966.

- 24) Proceedings of the 1st and 2nd Conferences on Electronic Computation ASCE, Nov. 1958 and Sept. 1960.
- 25) J.F. Besseling. The Complete Analogy Between the Matrix Equations and the Continuous Field Equations of Structural Analysis, Intern. Symp. Analogue. Digital Techn. Appl. Aeron., Liege, Sept, 1963.
- 26) マトリックス構造解析法講座 1~8, 日本鋼構造協会誌 (昭和 42 年), JSSC. Vol 3, No. 14, 15, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 24. (本年度も引続き掲載される予定である)
- 27) R. Melosh, Computer Analysis of Large Structural Systems, preprint of the AIAA 4th Annual Meeting and Technical Display, Anaheim, Calif., Oct. 23-27, 1967 AIAA paper No. 67-55.