

ラバー充填鋼管はりの弾塑性挙動に関する一考察

A STUDY ON ELASTIC-PLASTIC BEHAVIOR OF STEEL PIPE BEAM FILLED WITH RUBBER

伊藤一雄* , 香月 智** , 石川信隆*** , 生駒信康****

Kazuo ITOH , Satoshi KATSUKI , Nobutaka ISHIKAWA and Nobuyasu IKOMA

*工修 防衛大学校研究員 土木工学教室 (〒239 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

**工博 防衛大学校助教授 土木工学教室 (〒239 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

***工博 防衛大学校教授 土木工学教室 (〒239 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

****シバタ工業株式会社 (〒674 兵庫県明石市魚住町中尾1058)

This paper presents experimental and analytical approaches for the elastic-plastic behavior and absorption energy of the steel pipe beam filled with rubber. At first, the static flexural tests have been performed for the three types of steel pipe beams, i. e., hollow, half-filled and perfectly filled with rubber. It is found that the steel pipe perfectly filled with rubber shows the hardening type elastic-plastic behavior because of the restraint of local deformation. Secondly, the analytical approach is developed by modifying the discrete section area method considering the effect of the flatness due to local deformation at the loading point. The proposed method can simulate the elastic-plastic behavior of the steel pipes filled with rubber. It is also found that the capacity of absorption energy of steel pipe filled with rubber is larger than the one filled with concrete in the range of the large deformation.

Key Words: steel pipe beam filled with rubber, absorption energy,
elastic plastic analysis

1. 緒 言

従来、コンクリートや土石を主材料とした重力式の砂防ダムが建設されていたが、近年、土砂・水の透過性、施工性等における鋼材の長所が着目され鋼製の砂防ダムが建設されるようになってきた¹⁾。写真-1に示すA型スリットダムは、鋼製砂防ダムの一つであるが、これは、平常時の流出土砂は透過させ、土石流発生時には、土石流中の巨礫をスクリーニングして土石流の流出を抑止することを目的として建設されたものである。この鋼管部材の耐衝撃性能を向上させるために、鋼管内部に、コンクリート等を詰めた複合化部材の使用が検討されており、実際にコンクリートを充填した鋼製砂防ダムが実用化されている。しかし、コンクリート充填A型スリットダムが昭和56年姫川水系金山沢で大規模な土石流によって崩壊流出してしまうという被災例があった。著者らは、この原因を解明するために、鋼管にコンクリートを充填したコンクリート充填鋼管に対する実験的²⁾・解析的³⁾研究を行った結果、以下のことが明らかになった。

(1) コンクリート充填鋼管は、コンクリートを充填することにより、中空鋼管に比べて耐荷力および吸収エネルギーが2～3倍上昇するが、小さな変位で鋼管が脆性



写真-1 A型スリットダム

的に破断する。

(2) 中空鋼管は脆性的な破壊はしないが、耐荷力が小さく吸収エネルギーも小さい。

そこで、脆性破壊を生じることなく耐力を向上させるための施策の一つとして、ラバー等の充填材を用いた複合部材の開発が検討されている。

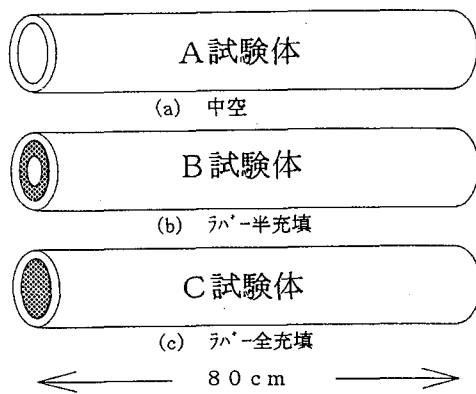


図-1 試験体概要図

表-1 ラバーの組成表

配合剤	名 称	配合比	配合剤	名 称	配合比
原料ゴム	天然ゴム	100	加工剤	ステアリン酸	5
加硫剤	硫黄	3	補強剤	カーボン	80
加硫促進剤	NOB	1	軟化剤	オイル	10
老化防止剤	パラフィン	4			

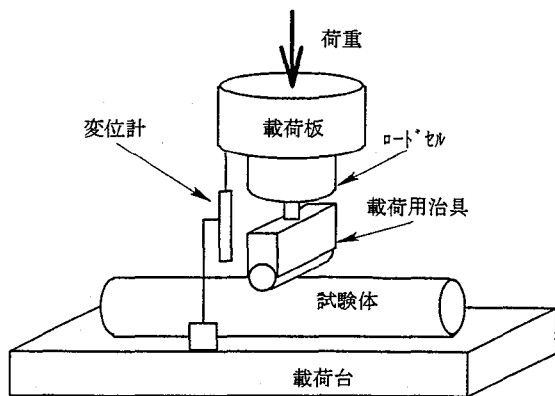


図-2 局部変形実験装置

本研究は、このような観点から、鋼管内にラバーを充填したラバー充填鋼管はりの特性を解明するための基礎的研究として、まず実験的にラバー充填の効果、特に弾塑性挙動について調べた。次に、荷重点での局部変形に着目して、曲率と断面扁平の関係を関数モデル化した修正断面分割法による弾塑性解析法を提案し、解析的にラバー充填鋼管はりの弾塑性挙動を解明した。

2. 実験と考察

2.1 試験体の概要

試験体は、図-1に示すような中空鋼管（A試験体）、鋼管内部にラバーを半分充填した鋼管（B試験体）、ラバーを完全に充填した鋼管（C試験体）の3種類を用いた。鋼管は、全試験体共通の一般構造用炭素鋼管で、鋼管径89.1mm、肉厚3.2mm、スパン長60cm（鋼管実長80cm）のものを用いた。ラバーは天然系ラバー（表-1にラバ

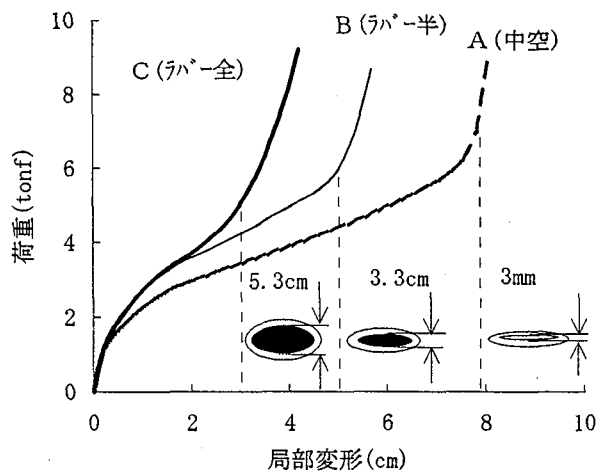


図-3 局部変形実験における荷重～局部変形関係

一の組成表を示す)を使用し、ラバー挿入後加硫接着により鋼管と接着一体化している。

2.2 局部変形実験

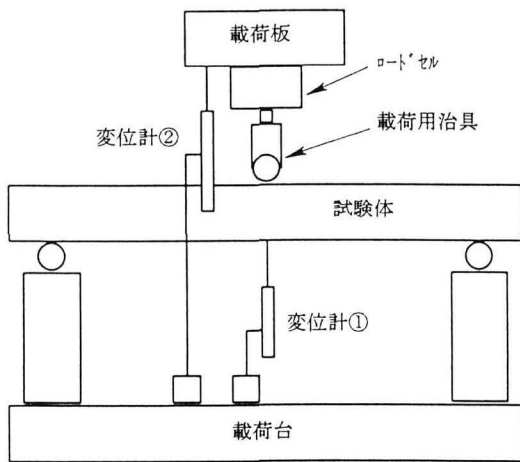
(1) 実験方法

鋼管断面が局部的に扁平化することによる荷重～変形関係を調べるために、図-2に示すように試験体を載荷台上置き、アムスラー載荷装置により試験体の中央点に、荷重を加える局部変形（局部めり込み）実験を行った。この際、試験体に接触する載荷体は、図-2に示す半径2.5cmの円柱面をもつ載荷用治具を用いた。測定項目は、荷重点荷重および局部変位で、荷重は荷載板に取り付けたロードセルで、局部変形（めり込み量）はひずみ式変位計で計測を行った。

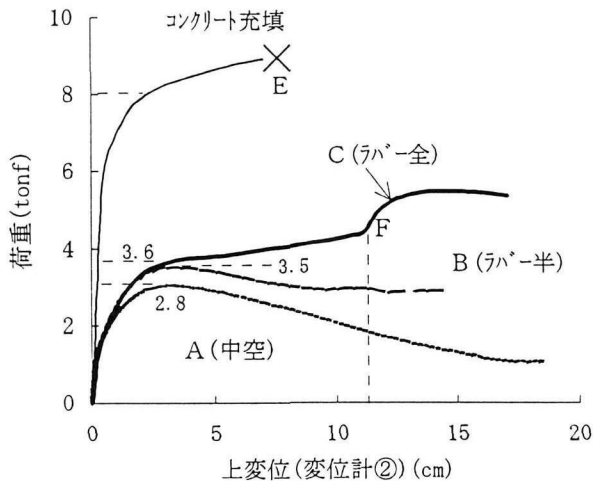
(2) 実験結果

図-3に実験で得られた荷重～局部変形関係を示す。A・B・C試験体いずれも剛→柔→剛と3段階に剛性が変化する弾塑性挙動を示している。この一旦柔な剛性から、再度剛に移行する点の断面状態を見ると、中空（A試験体）の場合には、3mmのギャップが残るもののほぼ閉そく状態になるが、ラバー半充填（B試験体）、ラバー全充填（C試験体）の場合には、ラバーの硬化型の特性により剛性が高まるものと思われる。

すなわち、荷重当初には鋼管の弾性応答により高い剛性を示すが、鋼管が一部塑性化すると一旦剛性が低下する。その後変形が大きくなるにつれて、ラバーが鋼管による拘束効果を受けて応力が上昇するために再度剛性が上昇することがわかる。このため、全充填（C試験体）の剛性が局部変形約3cmを境に最も早く上昇し、続いて半充填（B試験体）が約5.3cmから、中空（A試験体）が約8cm付近から、それぞれ剛性が上昇している。これより、ラバー全充填（C試験体）が断面の扁平剛性が最も高いことがわかる。



図－4 静的曲げ実験装置



図－5 静的曲げ実験 荷重～上変位関係

2. 3 静的曲げ実験

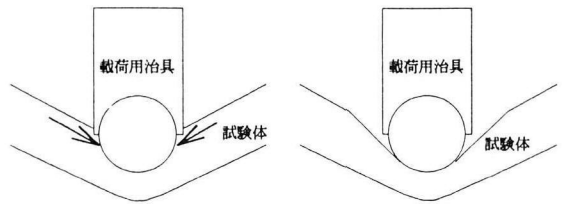
(1) 実験方法

図－4に示すように、試験体をスパン60cmで単純支持し、中央点にアムスラー載荷装置によって荷重を加えて実験を行った。測定項目は、載荷点荷重、載荷点上変位（載荷板の変位）および下変位（試験体下縁の変位）で、荷重については、載荷板に取り付けたロードセルで、また変位については、ひずみ式変位計を用いて上変位（変位計②）および下変位（変位計①）を計測した。ここで局部変形量（めり込み量）は、上変位から下変位を差し引くことにより計算によって求めた。

(2) 実験結果

a. 荷重～上変位関係および吸収エネルギーに関する考察

図－5に、実験から得られた荷重～上変位（図－4中の変位計②の変位）関係を示す。参考のために、コンクリート充填鋼管の荷重～上変位関係を比較して示す²⁾。まず弾塑性挙動の性状は、コンクリート充填とラバー全充填が硬化型であるのに対し、ラバー半充填と中空は軟化型の弾塑性挙動を示しており、概ね充填物の強さに応

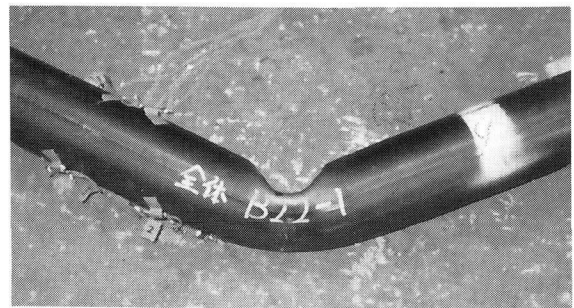


(a) C試験体 (b) A・B試験体

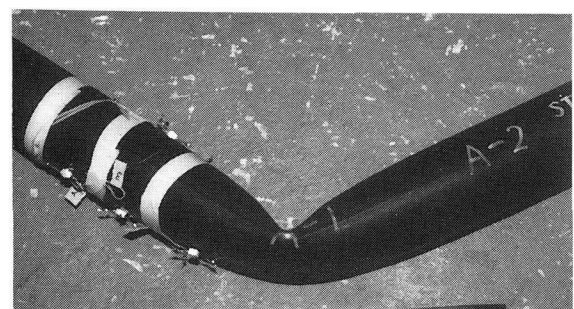
図－6 載荷点での形状変化



(a) コンクリート充填鋼管



(b) ラバー全充填鋼管(C試験体)



(c) 中空鋼管(A試験体)

写真－2 各試験体の破壊形態

じて軟化型から硬化型へ移行することがわかる。なお、ラバー全充填鋼管は、図中F点で示した変位を境に、再度荷重が上昇するが、これは、鋼管の局部変形によるめりこみ部が図－6(a)に示すように完全に載荷用治具に沿った形で接触するため、載荷用治具を巻き込むように変形し、局部変形がさらに大きくなると図中の矢印のように鋼管のへこみ部分を補強するようになるため、曲げ耐力が向上したと考えられる(写真－2(b)参照)。一方、写真－2(c)および図－6(b)に示すように試験体Aお

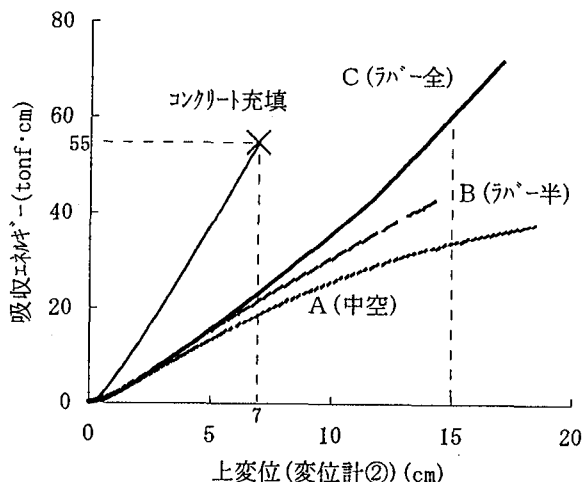


図-7 曲げ実験 吸収エネルギー～変位関係

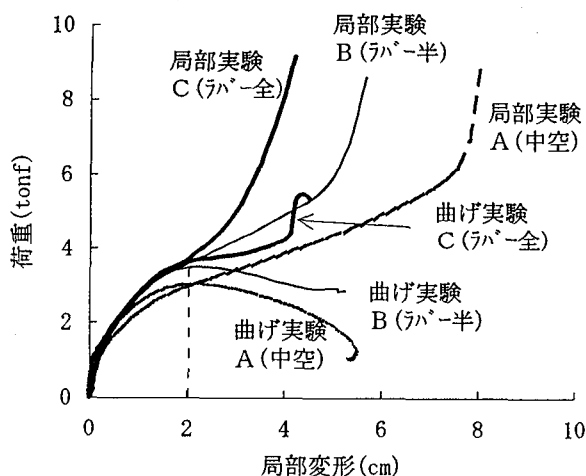


図-8 曲げ実験における荷重～局部変形関係

およびBのへこみは、治具に沿わないため、図-5中の荷重～上変位関係に再度の耐力上昇は現れない。

次に、初期剛性から塑性域の柔な剛性へ移行する時の荷重を「耐力」とすると、コンクリート充填鋼管で約8.0tonf、ラバー全充填で約3.6tonf、ラバー半充填で約3.5tonf、中空で約2.8tonfと、充填物の強さに応じて耐力が大きくなっている。これより、コンクリート充填鋼管に比較して、ラバー充填鋼管および中空鋼管は、概ね半分の耐力であることがわかる。しかし、コンクリート充填鋼管は、図中Eで示した点を境に急激に耐力を失うのに対し、ラバー充填および中空鋼管は耐力が持続している。これは、写真-2(a)に示すようにコンクリート充填鋼管がE点で鋼管が破断するのに対し、中空鋼管およびラバー充填鋼管では鋼管が破断しないためである。

衝撃荷重を受ける構造物では、衝突物の持つ運動エネルギーを全て吸収した際に破壊しなければ、耐力が小さくても、変形によってエネルギーを吸収する。このため、オープン式砂防ダムの設計では、変形限界を用いた設計が行われている¹⁾。

そこで、図-7に、吸収エネルギー～変位関係を示し

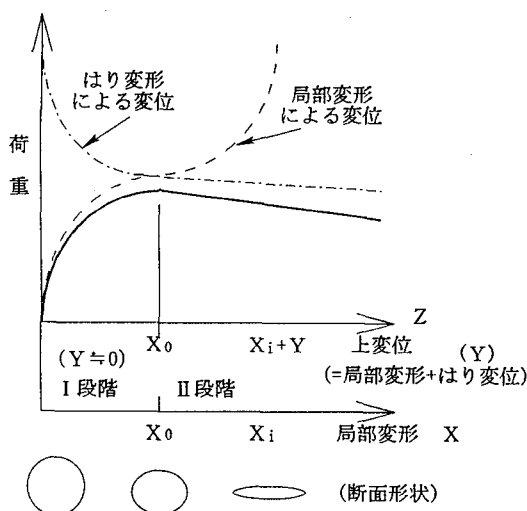


図-9 荷重～変位関係の定性的概念図

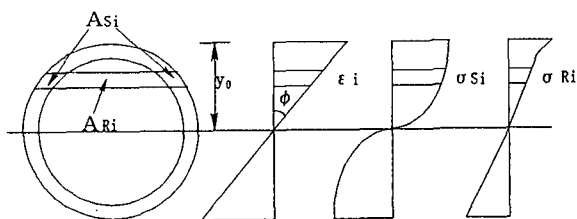
比較する。これより、コンクリート充填鋼管は、変位7.0cmまでに約55tonf・cmのエネルギーを急速に吸収するものの断面が破断してしまうのに対し、ラバー充填鋼管や中空鋼管の場合は、緩やかにエネルギーを吸収し破断することはない。吸収エネルギーの勾配は、コンクリート充填鋼管の方が大きい、ラバー全充填鋼管の変位は15cmを越えるとコンクリート充填鋼管が破断する時よりも大きな吸収エネルギーとなることがわかる。

b. 局部変形の影響

図-8に、曲げ実験における荷重～局部変形関係を示す。この局部変形は、図-4に示した変位計②と変位計①の差によって与えられるものである。図中には、前述の局部変形実験のものを合わせて示す。これより、試験体A、B、Cいずれの場合も、概ね変形2cmまでは局部変形実験と同じ荷重～局部変形関係をたどるが、それ以降は局部変形実験のものとは異なった荷重～局部変形関係をたどっている。これは、模式的に図-9に示すように、局部変形による変位とはり変形による変位が複雑に影響し合うことによるものと考えられる。すなわち、まず載荷初期は、断面は健全に保たれているためはりの剛性は十分に高い。また断面の塑性モーメントから算出されるはりの耐力も十分に大きい。このため、はり変位

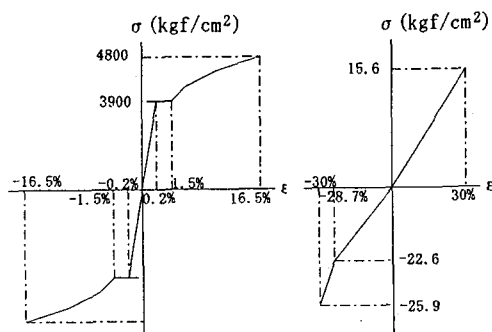
(変位計①)は非常に小さく、載荷面は局部変形実験と同じ耐力カーブに従って扁平する(図中I段階領域)。断面が扁平すると、その断面のもつ塑性モーメントが低下するため、ある変形量(図中 X_0)に達すると、局部変形による耐力よりも、この塑性モーメントによって決定されるはりの耐力が、小さくなるため、急激にはり変位が増加する(図中II段階領域)ものと考えられる。

また、図-8の約2cm以降(図-9のII段階領域)で、荷重が減少するのに局部変形が進行する理由は、当初局



(a)断面図 (b)ひずみ分布 (c)鋼応力 (d)ラバー応力

図-10 鋼管断面と応力およびひずみ分布



(a) 鋼材

(b) ラバー

図-11 鋼材とラバーの応力～ひずみ関係

部変形により扁平化した断面が、はりの全体変形の進行に伴い圧縮側のへこみが局部座屈と同じように曲げ変形によってさらに促進されるためと思われる。

3. 修正断面分割法を用いた解析

星川ら⁴⁾は、図-9の考えに基づいて、剛塑性理論を用いた中空鋼管はりの弾塑性変形解析を行った。しかし、剛塑性理論では、図-9中のⅡ段階において断面扁平が進行することを表現できないため軟化領域の説明ができない。

そこで本研究では、図-9の定性的な傾向を簡易な数式モデルによって表現したうえで、断面分割法を改良してこれを解析することを試みた。そのうえで実験結果から推察した図-9の現象説明を数値解析によって確認した。

3.1 断面分割法の基本式⁵⁾

(1) 曲げモーメント～曲率関係の求め方

鋼とラバーの非線形な応力(σ)～ひずみ(ϵ)関係に基づく断面の曲げモーメント(M)～曲率(ϕ)関係を求めるため、まず図-10(a)に示すようにラバー充填鋼管断面を n 個の層状な離散断面に分割する。その上で、①断面の曲率 ϕ を与える。②中立軸の高さ y_0 を仮定し、ひずみ分布(図-10(b))を作り、各層ごとのひずみ ϵ_i を求める。③ ϵ_i に対応する鋼とラバーの応力 σ_{si} 、 σ_{ri} を求める。ここで鋼とラバーの応力～ひずみ関係は、図-11に示す多段階線形近似式を用いた。④断面に働く引張力 T と圧

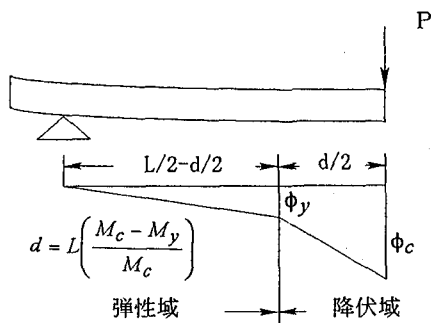
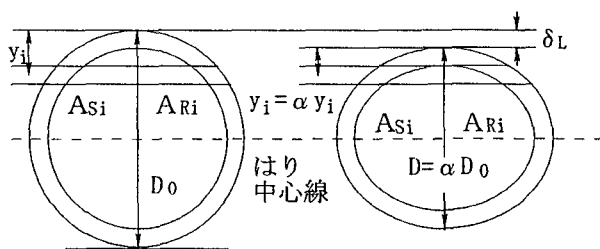


図-12 曲率分布



(a) 初期断面

(b) 扁平断面

図-13 断面扁平の模式図

縮力 C を次式を用いて計算する。

$$T = \sum_{i=1}^m \{A_{si} \sigma_{si} + A_{ri} \sigma_{ri}\} \quad (1)$$

$$C = \sum_{i=1}^k \{A_{si} \sigma_{si} + A_{ri} \sigma_{ri}\} \quad (2)$$

ただし、 A_{si}, A_{ri} ：分割断面 i に属する鋼とラバーの面積、 m, k ：それぞれ引張側と圧縮側に属する分割断面の総数。⑤引張力 T と圧縮力 C が等しくなるまで中立軸の高さ y を調整し、②～④を繰り返す。⑥釣り合った断面の引張力と圧縮力の作用中心を求め、 $T-C$ 間の距離 z を求める。⑦ ϕ に対応する M を次式によって求める。

$$M = C \cdot z = T \cdot z \quad (3)$$

⑧ ϕ を逐次に増分して、断面の $M \sim \phi$ 関係を求める。

(2) 荷重(P)～変位(δ_c)関係の解析基本式

前項の解析法による $M \sim \phi$ 関係を荷重～変位関係に変換するため以下の基本式を用いる。まず、曲げモーメント M と荷重 P との関係は次式によって求められる。

$$P = \frac{4M_c}{L} \quad (4)$$

ここに、 M_c ：はり中央点での曲げモーメント、 L ：はりの長さ。よって、中央点の曲率 ϕ_c と変位量 δ_c の関係は、図-12に示すような曲率分布を仮定して次式によって与えられる。

$$\delta_c = \int_0^{L/2} \phi_x \cdot x dx \quad (5)$$

ただし、 ϕ_x ：はりの x 点での曲率。

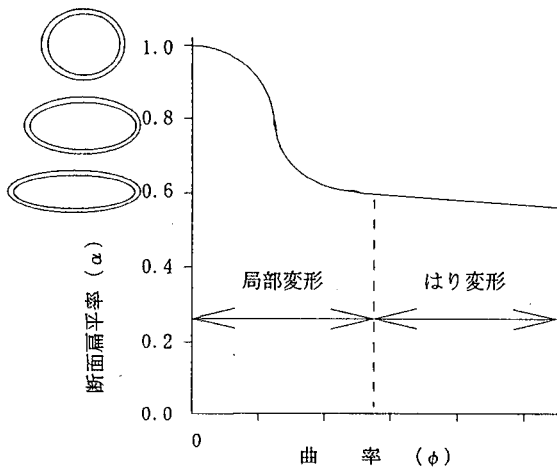


図-14 シグモイド関数による

断面扁平率(α)～曲率(φ)関係

表-2 解析入力値

(1) 鋼管及びラバーの諸元

鋼 管		ラ バ ー	
直径 D (cm)	8.91	降伏強度 σ_1 (kgf/cm ²)	22.6
内厚 T (cm)	0.32	降伏開始歪 ε_1 (%)	28.7
長さ L (cm)	60	圧縮強度 σ_2 (kgf/cm ²)	40.0
降伏強度 σ_y (kgf/cm ²)	3900	弾性歪 ε_2 (%)	35.5
引張強さ σ_u (kgf/cm ²)	4800	引張強度 σ_3 (kgf/cm ²)	208.0
弾性係数 E_s (kgf/cm ²)	2.1×10^6	終局歪 ε_3 (%)	400.0
降伏終了歪 ε_h (%)	1.5		
破断歪 ε_u (%)	16.5		

(2) 実験定数

試験体種類	a	b	c
A試験体(中空)	7.0	0.5	5000
B試験体(ラバー半充填)	4.0	0.55	5000
C試験体(ラバー全充填)	0.0	0.6	5000

曲率微小領域での
断面扁平率(α)～
曲率関係の拡大図

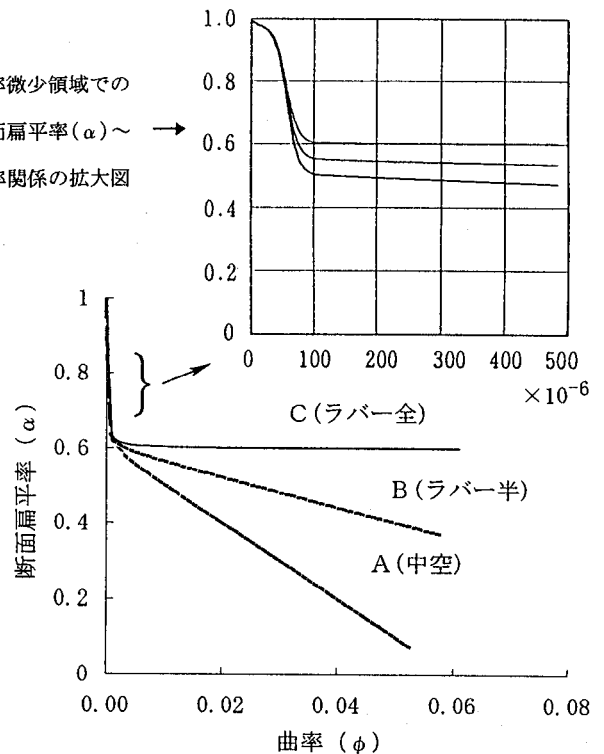


図-16 断面扁平率(α)～曲率(φ)関係

3. 2 載荷点断面の扁平効果

ここでは、ラバー充填および中空鋼管の弾塑性挙動を適切にシミュレートするために、載荷点に生ずる断面扁平の影響を断面分割法に取り入れる手法について検討する。これは、図-13に示すように扁平後の断面を楕円形⁶⁾になるものと仮定し、扁平後においても断面分割数および各層に属する鋼・ラバーの断面積は、そのまま保つモデルである。よって、扁平後の形状に対する断面分割法によるM～φ関係の解析手法は原則的に従来のものと同じであるが、はりの曲率の増加にともなって扁平が進行することを表す関数モデルを導入し修正した。この関数モデルとして、図-8の実験結果および図-9の考

察に基づき、当初は局部変形が卓越し、以後はり全体の変形形態に移行する特徴を表すために、図-14に示すように曲率の小さい領域では急激に扁平率が小さくなり(局部変形が卓越)、その後線形的に扁平率が小さくなる(はり全体の変形に移行)関数である次式のようなシグモイド関数を混合したモデルを用いた。

$$\alpha = \frac{1.0 - b}{1.0 + e^{-(\phi - \phi_0)c}} + b - a\phi \quad (6)$$

ここに、α：扁平率(D/D_0)、D：扁平後の鋼管の短径、 D_0 ：扁平前の鋼管の直径、a, b, c：実験定数、 ϕ_0 ：扁平後の断面の弾性限界曲率。

断面の扁平を導入したことにより、局部変形量 δ_L は次

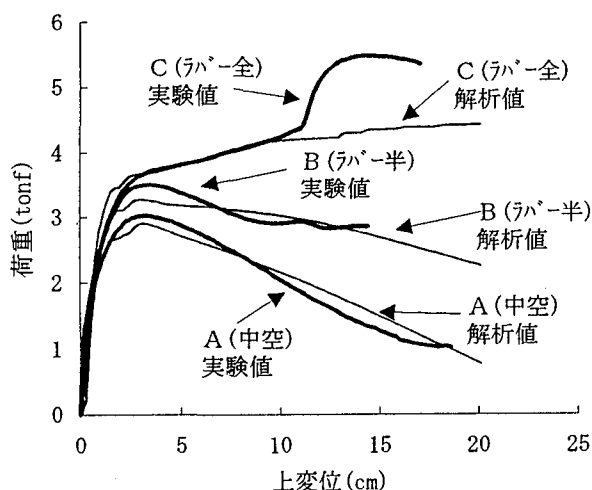


図-17 荷重～上変位関係(解析結果)

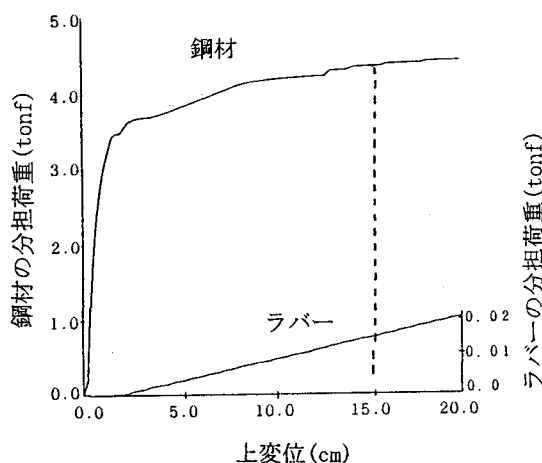


図-18 ラバーと鋼材の荷重分担率

式によって求められる(図-13(b)参照)。

$$\delta_L = (D_0 - D) / 2 \quad (7)$$

よって、載荷点変位 δ は次式によって算定される。

$$\delta = \delta_c + \delta_L \quad (8)$$

3.3 解析結果と考察

図-15に、従来の断面扁平の影響を考慮しない断面分割法を用いて行った解析と実験による荷重～上変位関係を示す。参考のためにコンクリート充填鋼管の実験と解析結果³⁾も示しているが、その解析結果は、塑性域での荷重をやや低く推定するが、実験で得られた荷重～上変位関係をかなり良くシミュレートしている。特に、解析で鋼管の破断ひずみを16.5%として得られた破断限界は実験値と比較的良好に一致している。しかし、ラバー充填および中空鋼管の解析値は、実験値と全く異なった挙動を示し、断面扁平の効果を導入することの必要性がわかる。

次に、断面の扁平効果を導入した解析法の結果を述べる。解析に用いた入力値は、表-2に示すとおりである。ここで、実験定数 a 、 b 、 c はそれぞれの試験体の定性

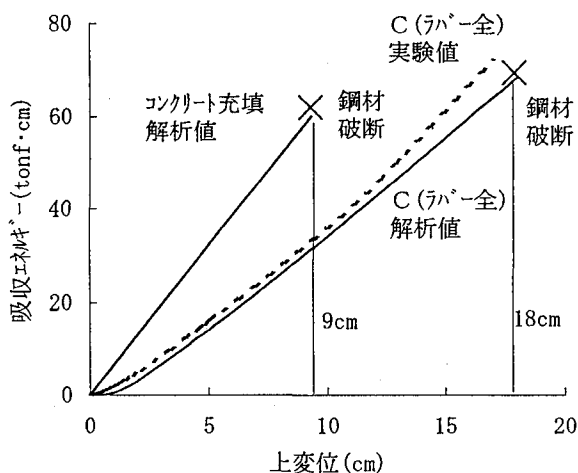


図-19 吸収エネルギー～上変位関係(解析結果)

的特性を表すためにパラメトリックに実験結果に合うように決定した。図-16には、解析で用いた断面扁平率(α)～曲率(ϕ)関係を示す。これは、はりの曲率の小さい領域において局部変形が卓越し、その後局部変形の進行が緩やかになって、はりの全体変形が卓越する現象を関数近似したものであり、図-8で示したようにラバー全充填鋼管の局部変形の進展が途中で止まるのに対し、ラバー半充填や中空鋼管の断面扁平が引き続き進展して行くことと定性的に一致するものである。

(1) 荷重～上変位関係

図-17は、断面の扁平効果を考慮した荷重～上変位関係を示したものである。これより、断面扁平率(α)～曲率関係(ϕ)にシグモイド関数を用いると、C試験体(ラバー全)の弾塑性硬化およびA、B試験体の弾塑性軟化の挙動をほぼ良くシミュレートしていることがわかる。C試験体(ラバー全)の実験値と解析値が変位10 cm以上で、異なった傾向を示しているのは、2.3(2)で述べた原因によるものである。よって、本解析法を用いることにより、純粋なラバー充填鋼管の曲げ強度を求めることができると考えられる。

(2) ラバーの荷重分担率

図-18に解析から得られた鋼材とラバーの荷重分担率を示す。これより、変位15 cmで鋼材は約4.3 tonf、ラバーは0.015 tonfとなり、充填材(中詰材)のラバーが分担する荷重は、鋼材に比べて約1%以下であることがわかる。すなわち、ラバー充填鋼管の曲げ耐力は、ほとんど鋼管の曲げ応力によるものであり、充填材としてのラバーの応力は、はり全体の曲げ耐力にほとんど寄与しないことがわかる。すなわち、充填されたラバーは局部変形(扁平)を抑制することによって、鋼管の曲げ応力を効率的に発揮させることに寄与していると考えられる。

吸収エネルギー

図-15で示したように、コンクリート充填鋼管の場合は、断面分割法によって限界値(16.5%ひずみ)を与えるとかなり良くその破壊限界をシミュレートできた。しかし、ラバー充填鋼管の場合は、鋼材の破断が生じないため、破断による限界吸収エネルギーを定義できない。そこで、本解析法に同一の鋼材の破断限界を用いて評価することにより、整合性のとれた限界吸収エネルギーを算定できるものとする。

図-19は、解析結果から得られたコンクリート充填鋼管とC試験体(ラバー全)の吸収エネルギー～上変位関係を示したものである。これは、鋼管の下縁のひずみが破断ひずみ(16.5%)に達した時点で、鋼管の破壊と定義し、そこまでの荷重～上変位関係を積分したことにより得られたものである。すなわち、コンクリート充填鋼管の場合は約9cmで約60tonf・cmのエネルギーを吸収して破断するのに対して、ラバー全充填鋼管の場合は約18cmで約70tonf・cmのエネルギーを吸収して破壊している。これより、ラバー全充填鋼管は、小さい変位領域で吸収エネルギーは小さいが、大きな変位領域では吸収エネルギーが大きくなっていることがわかる。破断時の吸収エネルギーをそれぞれの吸収エネルギー容量とすると、コンクリート充填鋼管では約60tonf・cm、ラバー充填鋼管は約70tonf・cmとなり、ラバー充填鋼管の方が約17%大きいことが解析的に求められる。

4. 結論

以上より本研究の成果をまとめると以下ようになる。

(1) ラバー充填鋼管は、コンクリート充填鋼管の脆性破壊、中空鋼管の小耐力という欠点を補い、中程度の耐力と大きな靱性をもつエネルギー吸収容量の大きな部材である。

(2) 載荷点での断面の扁平効果を考慮した修正断面分割法を用いることにより、ラバー充填鋼管・中空鋼管の弾塑性挙動をほぼ良くシミュレートすることができた。

(3) 解析において、ラバーに生ずる応力から算定されるラバーの荷重分担率は、鋼材の約1%以下であり、ラバー充填鋼管のラバーの機能は、局部変形(扁平)を抑えることにより、鋼管の曲げ応力を発揮させることにある。

(4) 本解析法に鋼材の破断ひずみ限界値を導入することにより、中空、ラバー充填鋼管およびコンクリート充填鋼管の吸収エネルギー容量を算定することが可能となった。その結果、ラバー充填鋼管の吸収エネルギー容量は約70tonf・cmで、コンクリート充填鋼管の約60tonf・cmより約17%大きいことがわかった。

(5) 本解析では、各試験体の硬化型や軟化型の弾塑性挙動を解析するために、局部変形による断面扁平率と曲率の関係をシグモイド関数を導入したが、この中の実験定数a, b, cの決定法については、さらに検討が必要である。また、今後ラバー充填鋼管の衝撃特性についても考察を行って行く必要がある。

(6) 衝撃荷重を受ける鋼管部材の設計において、許容変形量をいかに設定するかは、部材の弾塑性挙動のみならず破壊形態の及ぼす影響や、維持管理上の制約等を考慮して総合的に判断されなければならない。よって一概にコンクリート充填、ラバー充填、非充填鋼管の優劣を決定することはできないが、本研究の成果が基礎的資料として寄与できるものと考えられ、今後さらなる検討が必要である。

参考文献

- 1) 砂防・地すべり技術センター 鋼製砂防構造物委員会：鋼製砂防構造物設計便覧，昭和62年版
- 2) 伊藤一雄，石川信隆，川嶋幾夫，鈴木宏：モルタル充填鋼管はりの衝撃限界吸収エネルギーに関する実験的考察，構造工学論文集，Vol. 37A，pp. 1581～1589，1991年3月
- 3) 伊藤一雄，石川信隆，香月智，鈴木宏：コンクリート充填鋼管はりの衝撃限界吸収エネルギーに関する解析的考察，構造工学論文集，Vol. 38A，pp. 1553～1563，1992年3月
- 4) 星川辰雄，石川信隆，彦坂熙，阿部宗平：半球状の重錘落下による鋼管固定はりの衝撃応答変位，構造工学論文集，Vol. 40A，pp. 1543～1554，1994年3月
- 5) Park, R., Kent D. C. and Sampson R. A. : Reinforced Concrete Members with Cyclic Loading, Proc. of ASCE, ST7, July 1972.
- 6) 川井豊，石渡正夫，山野井節雄：鋼管部材の耐力実験，落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp. 9～14，1991年3月

(1994年9月14日受付)