

# [2125] 連結部を有する鉄筋コンクリートはりの曲げ挙動

正会員 池田尚治 (横浜国立大学工学部)  
 高津和義 (首都高速道路公団)  
 山田 淳 (首都高速道路公団)  
 正会員 ○山口隆裕 (横浜国立大学工学部)

## 1. 緒言

本研究は、ゴムのような高圧縮性材料とPC鋼棒とで構成された連結部を支間中に有する部材の力学的挙動の把握を目的としたものである。対象とした構造物は沈埋トンネルであるが、ここで採り上げた研究内容はこの種の構造系の基本的な事項を多く含むものであり、連結部を有する一般の構造物の設計施工に対しても基礎的な資料となり得るものである。

## 2. 研究計画

連結部は、ゴムと連結用のPC鋼棒（以下連結鋼棒と記す）とを組合せたシステムである。以下、連結部とは連結鋼棒両端の定着部ではさまれた内側部分をさすこととする。研究は、実験とその結果を基に行なった解析とで構成される。実験は、まず、ゴムの基本的な力学的性状を把握する目的で種々の条件下でのゴム単体の圧縮試験を行なうこととした。次に、連結部を有する鉄筋コンクリートはり（以下RCはりとして記す）を用いて曲げ載荷実験を行ない、その基本的な曲げ挙動を把握することとした。最後に、ゴム単体の圧縮試験結果を基に、はりおよび連結部のモデル化を行ない、連結部を有するRCはりの曲げ挙動を解析し、実験値と比較することとした。

## 3. ゴム単体の圧縮試験

ゴム単体の圧縮試験に用いた供試体の一覧と載荷方法を表-1に示す。供試体の基準となる寸法は幅2cm、厚さ0.5cm、長さ10cmのベルト状のものである。実験の要因としては、ゴムの厚さ、長さ、形状、温度、載荷速度、繰り返し載荷、持続荷重とした。ゴムの製作時の目標硬度は40°であった。

実験結果を図-1(a)~(e)に示す。図-1(a)と(b)はそれぞれゴム厚と長さの違いによるゴムの応力-ひずみ曲線を比較したものである。この結果より、厚いもの、短いものほど剛性が低いことがわかる。これは、載荷板接触面による変形の拘束の影響と考えられる。また、他の物質と異なるゴムの材料特性の大きな特徴としては、低応力時から履歴曲線は非線形を示し応力が大きくなるにつれてヤング率も大きくなり、ゴム厚によっては、2桁以上も異なってくることがあげられる。

表-1 ゴム供試体一覧と載荷方法

供試体名	長さ (cm)	厚さ (cm)	載荷方法	変位の測定方法	ゴムの温度 (°C)		
L 1	5	0.5	(1)	目読	10~15		
L 2	10	0.5					
L 3	15	0.5					
H 1	10	1.0	(2)	(7)		0	
H 2	10	1.5					
S 1	10	0.5	(3)				98
S 2	10	0.5					
T 1	10	0.5	(4)		10~15		
T 2	10	0.5					
CR	直径 φ 5	高さ 5	(5)	目読			
SY	10	0.5					
CL	10	0.5	(6)				

備考：供試体の幅はすべて2cmである。  
 (1)：静的載荷で、載荷時間は実験開始から最大荷重までが計測時間を含めて約10分、除荷も同様に約10分である。  
 (2)：載荷速度が一定で50kgf/cm<sup>2</sup>/min  
 (3)：載荷速度が一定で100kgf/cm<sup>2</sup>/min  
 (4)：連続載荷で(1)の載荷時間の約半分  
 (5)：繰り返し載荷  
 (6)：応力70kgf/cm<sup>2</sup>、圧縮ひずみ0.35で30分間の一定荷重載荷  
 (7)：パソコンにより0.5Hz間隔でデータを収集

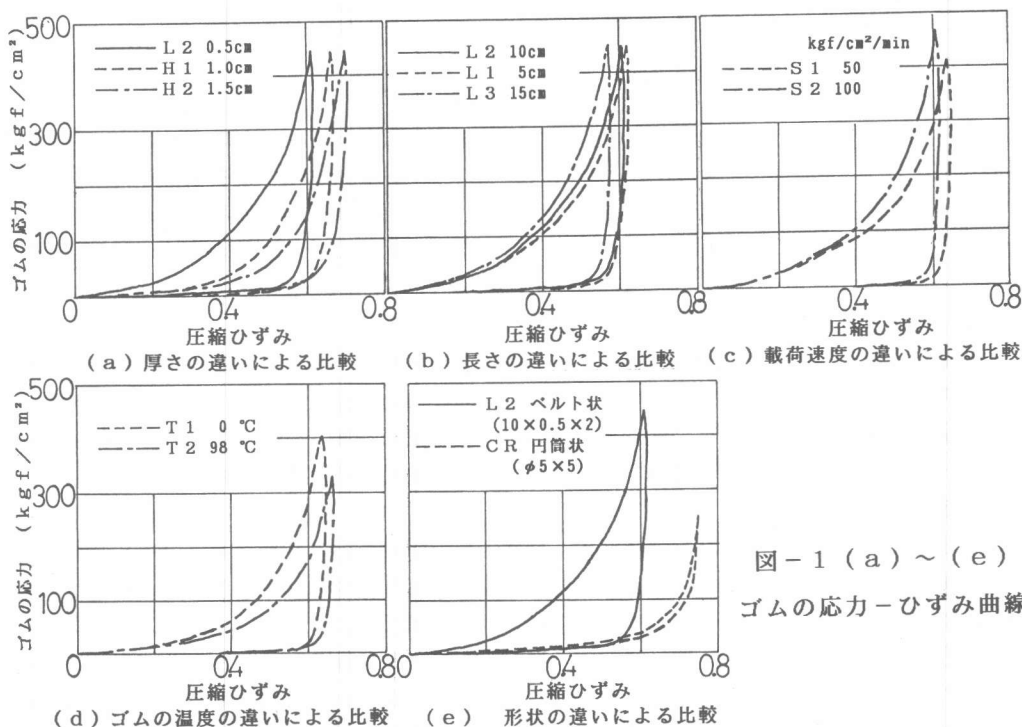


図-1 (a) ~ (e)  
ゴムの応力-ひずみ曲線

図-1(c)と(d)はそれぞれ載荷速度とゴムの温度の影響を比較したもので、載荷速度の遅い方が、また、ゴムの温度の高い方が剛性が低くなっている。

図-1(e)はゴム形状の影響を比較したものである。ベルト状と円筒状ではその履歴曲線の様子は大きく異なっており、特にベルト状のL2供試体の載荷時と除荷時の曲線は大きくずれているのに対し、円筒状のCR供試体はほとんどずれていないのが注目される。また、応力70 kgf/cm<sup>2</sup>、圧縮ひずみ0.35で約30分間応力を一定にしておき、持続荷重による影響をみたが、最初のおよそ3分で5%変形が進み、残りの27分でさらに5%変形が進んだ。このことより、短時間でのゴムのクリープ量が非常に大きいことが認められた。

以上の結果より、ゴムの力学的特性は、ゴムの形状と載荷速度や荷重の持続時間などの時間的要因により大きく影響を受けることが分かった。

#### 4. はりの曲げ載荷実験

##### 4.1 供試体と実験方法

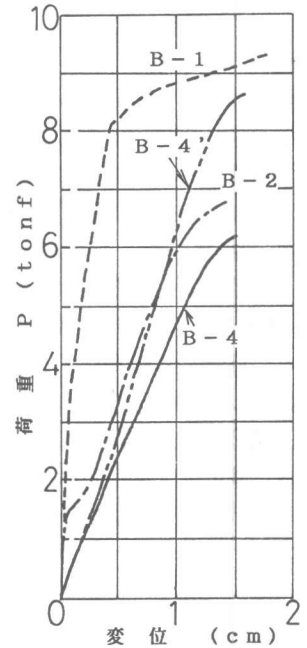
はり供試体の一般図と載荷状況を図-2に示す。供試体は、沈埋トンネルを対象としてモデル化したものである。基準供試体はI型断面で1本の長さ2mのはりの連結面に厚さ0.5cmのゴムを図に示すようにIIの形に接着し、断面中央のPC鋼棒で所定の軸圧縮力を導入して2本を連結し、後に断面下端の連結鋼棒2本を定着して一体とした構造となっている。

供試体の一覧と、それぞれの供試体の特性を表-2に示す。載荷供試体数は合計10体で、そのうちB-4'供試体はB-4供試体の載荷後に連結鋼棒をより太いφ9.2に換えて、はり本体が先に降伏するようにして再載荷した物である。その他の連結部を有する供試体は、連結鋼棒φ7.4が最初に降伏するように設計されている。実験の要因としては、表-2に示すように連結部の有無、ゴムの有無、ゴムの厚さ、PC鋼棒による初期軸圧縮力の大きさ、連結鋼棒の連結長、連結鋼棒の径とした。初期軸圧縮力において基準とした6tonfはコンクリートの断面

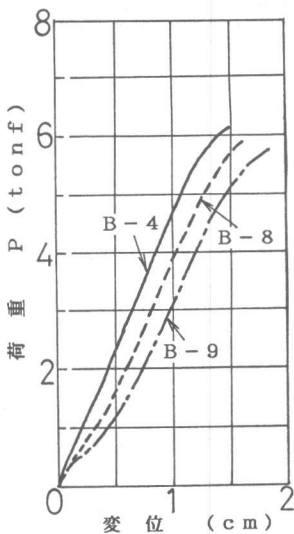


いる。B-2 供試体の剛性が1.5tonf 付近で急激に変化しているのは、軸圧縮力によるコンクリートの圧縮ひずみ小さいので接合面が開き始めたときには、まだ連結鋼棒の引張りひずみもほぼゼロで、定着部のアンカープレートとコンクリート面との間に目に見えないがたがあるためと考えられる。また、1.5tonf 付近で接合面が開き始めたのは、この時点で軸圧縮力の作用点が断面の心内から大きくはずれ圧縮縁付近となり、接合面での抵抗機構が圧縮力だけから連結鋼棒の引張力で力のつり合いを保つこととなったことを示している。B-2 供試体とB-4 供試体は連結部におけるゴムの有無による曲げ剛性を比較したものである。荷重がかかり始めた直後から、B-4 供試体はゴムの影響により大きく変形しており、B-2 供試体と比べて剛性はかなり小さい。しかし、荷重が大きくなり連結部に開きが生じたりゴムの圧縮比が大きくなると、2体の剛性はほぼ等しいものとなっている。B-4 供試体にB-2 供試体のような剛性の大きな変化が見られなかったのは、軸圧縮力によるゴムの圧縮ひずみ大きいので接合面が開き始めたときには連結鋼棒のひずみも大きく定着部のがたがなかったためである。また、ゴムが非線形的材料特性を持っているにも拘らず、剛性の傾きがほぼ一定であるのは、ゴムが荷重前の軸圧縮力によりある程度の剛性のレベルにあることと、供試体のスパン長に対するゴム部分の占める長さが非常に短いことによるものである。B-4 供試体とB-4' 供試体は連結鋼棒の径の違いによる曲げ挙動を比較したものである。B-4' 供試体の変形量はB-4 供試体に比べて若干小さくなっているが、はり本体部の鉄筋が先に降伏するので部材の終局時の性状としては韌性に富むものであった。

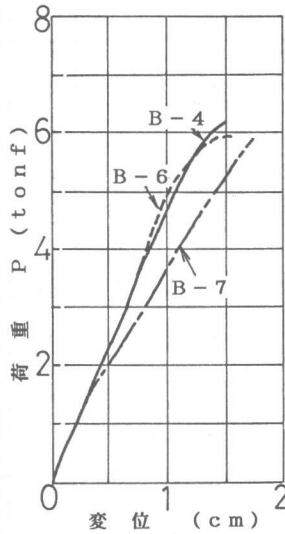
図-3(b) は、ゴム厚の違いによる曲げ剛性を比較したものである。荷重1tonf 未満で圧縮部のゴムの接線ヤング率に



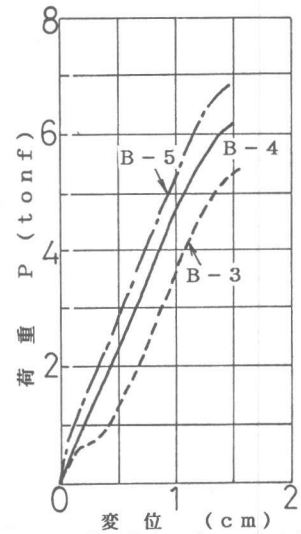
(a) 連結部の有無とゴムの有無の比較



(b) ゴム厚の違いによる比較



(c) 連結長の違いによる比較



(d) 軸圧縮力の違いによる比較

図-3 (a) ~ (d) はりの荷重-変位曲線の比較

大きな差があるときには、曲げ剛性も大きく異なっているが、ある程度荷重が上がるとほぼ同様な傾きを示している。このことは、ゴムのようにヤング率が変化する材料に曲げ圧縮力が作用する場合、ある荷重レベルに達するとゴム厚に関係なく連結部の曲げ剛性がほぼ同じになることを示している。荷重0tonf～2tonfにおいてB-4、B-8、B-9供試体それぞれの変位量は、一体RCはりのB-1供試体に対して7倍、10倍、12倍の値を示した。この値は、ゴムとRCはり部との曲げ剛性およびゴム厚とRCはり部との長さの比から理論的に推定した値とほぼ一致した。

図-3(c)は連結鋼棒の連結長の違いによる曲げ剛性を比較したものである。基準供試体のB-4は連結長を50cmとし、B-6はその半分の25cm、B-7は倍の100cmとしている。連結鋼棒に引張応力が作用するようになると、連結鋼棒の剛性の影響が現れ始め、B-7供試体の剛性は他の2体と比べ小さな剛性を示している。しかし、一方ではB-4とB-6供試体の剛性はほぼ同じ傾きとなっている。このことは、連結部における連結鋼棒の占める剛性の割合がもともと小さいことと、B-4とB-6供試体は、はり中央のモーメント一定区間に連結部がほぼ含まれるが、B-7供試体は、連結部の区間がモーメント一定区間を大きく越えているので、変形しやすくなったと考えられる。

図-3(d)は初期軸圧縮力の違いによる曲げ剛性を比較している。軸圧縮力による違いが現れているのは載荷荷重1tonf程度までで、それ以降は、ほぼ同じ曲げ剛性となっているのは興味深い。一般に一体RCの場合は、軸圧縮力により曲げ剛性は相当に異なるが、ゴムがある場合、連結部の変形への寄与が大きいため軸圧縮力の影響が相対的に小さいものと考えられる。軸圧縮力の小さいB-3供試体の剛性が0.7tonf付近で急変しているのは、B-2供試体と同様連結鋼棒定着部のがたによるものと考えられる。

## 5. 解析

連結部にゴムの有る部材の解析の手法としては、簡便に解析を行なうために、連結部のコンクリートとゴム部分を均質な新しい材料にモデル化し、ファイバーモデルにより解析する方法を採用した。ここで、連結部内のモデル化した均質な物質の応力-ひずみ関係は、連結部のコンクリートおよびゴムの長さを $l_c$ 、 $l_g$ 、ひずみを $\epsilon_c$ 、 $\epsilon_g$ 、断面積を $A_c$ 、 $A_g$ 、応力-ひずみ関係を $\epsilon_c = C(\sigma_c)$ 、 $\epsilon_g = K(\sigma_g)$ 、面積比を $\alpha = A_c/A_g$ とすると軸圧縮力を受ける時の連結部のひずみの関係より次式が得られる[1]。

$$\epsilon = (l_c \cdot C(\sigma_g/\alpha) + l_g \cdot K(\sigma_g)) / (l_c + l_g) \dots\dots (1)$$

また、連結鋼棒が軸圧縮力導入後に定着されることから、連結鋼棒を除いた断面の軸圧縮力によるひずみを起点として連結鋼棒のひずみ量を決定した。今回の計算に用いたゴムの材料特性は図-4に示すように載荷曲線と除荷曲線の間を通る3本の直線とした。このように考えたのは計算の簡便さのためである。一体RC構造の解析には、せん断変形を考慮したファイバーモデルを用いた[2]。解析の対象としたのは、B-1(一体RC)、B-4(ゴム厚5mm)、B-9(ゴム厚15mm)の各供試体である。なお、断面中央のPC鋼棒はグラウトを行ってなく、コンクリートとの間の付着力が存在しないので、

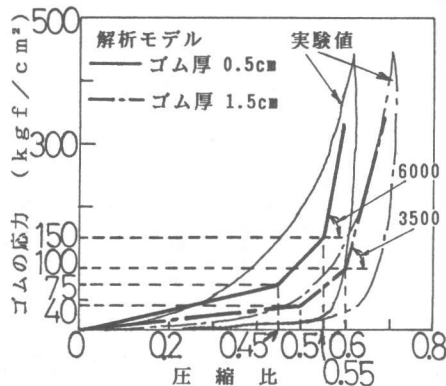


図-4 ゴムの材料特性の解析モデル

軸力の変化を計算上考慮しなかった。

図-5に実験値と計算値の比較を示す。B-1 供試体の場合、せん断変形量を含めたことにより計算値は変形挙動を非常によく表している。計算値では若干降伏荷重が小さい値を示しているが、これは、主鉄筋比が小さいので主鉄筋の局部的ひずみ硬化の影響が現れたためと考えられる [3]。B-4 供試体の場合、計算値は低荷重域では実験値とよく一致しているが、接合面に開きが生じだすと、剛性に若干の差が現れている。B-9 供試体の場合は、荷重終了近くまでほとんど接合面が開かなかったため、計算値は全体的に変形挙動を非常によく表している。特に、ゴムの剛性変化の大きい低荷重域での変形挙動もよく表しており、ゴムのような非線形材料を含む部材の変形解析を簡便な手法で行なうことができた。しかし、この計算結果はゴムの材料特性に大きく影響されるので、ゴムの圧縮試験方法とモデルの妥当な定量化が重要と考えられる。

## 6. 結 論

研究結果を総合的に検討して得た結論は次の通りである。

- 1) ゴムの力学的特性は、ゴム自体の形状、荷重速度や荷重の持続時間などの時間的要因、荷重時の拘束状況によって大きく変化する。したがって圧縮試験を行なう場合には、目的に合った方法とすることが必要である。
- 2) ゴムのような高圧縮性の材料で構成された連結部を持つ部材は、これを持たない部材に比べて曲げ変形しやすく、地震、温度変化、乾燥収縮、不等沈下、等の影響を吸収する効果が大きいと思われる。今回の実験に使用した連結部を有するRCはりは、一体構造のものより約10倍変形した。
- 3) 連結鋼棒より、はり本体部の鉄筋が先に降伏する方が部材の終局時の性状としては安全性が高いと思われた。
- 4) 可撓性の連結部を持つRCはり部材の変形挙動は、はりおよび連結部をファイバーモデルによりモデル化することによって解析的に求めることができた。

## 謝 辞

本研究は沈埋トンネルの設計検討の一環として首都高速道路公団が横浜国立大学に委託した研究の一部である。本研究の実施に当たり公団と大学の関係各位に多大のご支援を賜った。供試体の製作にはオリエンタルコンクリート株式会社の協力を得た。ここに記して謝意を表す次第である。

## 参考文献

- [1] 池田、山口、萩原：可撓性連結部を有する部材の連結部剛性の評価に関する研究、第42回JSCE年講、Vol. V、p.p.204-205、1987
- [2] 池田、山口、南雲：鉄筋コンクリートはりの変形の解析モデルについて、第42回JSCE年講、Vol. V、p.p.138-139、1987
- [3] 池田、山口、後藤：鉄筋コンクリート中の引張鉄筋の局部ひずみと部材の変形、第43回JSCE年講へ投稿予定。

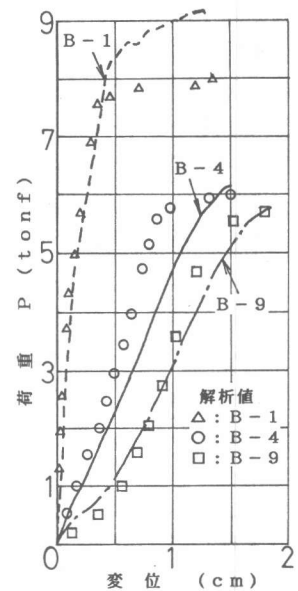


図-5 はりの曲げ変形の実験値と計算値の比較