

## ゴム支承の高機能化を実現させた新しい支承構造の提案

姫野岳彦<sup>1</sup>・鶴野禎史<sup>1</sup>・本間慶一<sup>2</sup>・森田泰玄<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 川口金属工業株式会社 技術本部技術一部開発課（〒332-8502 埼玉県川口市宮町18-19）  
<sup>2</sup>川口金属工業株式会社 技術本部技術一部計画設計グループ（〒332-8502 埼玉県川口市宮町18-19）

### 1. はじめに

橋梁用支承には、橋桁に活荷重が載荷された際に生じる支点部の回転変位に追随する機能が要求されることから、地震時水平力分散あるいは免震設計の適用を考えた場合、ゴム形状（水平バネ特性）の設定にある程度の制約が生じ、橋梁全体系として適切な固有周期が実現できないケースや、また、過度にゴム厚が厚くなり、座屈安定性の確保が困難となるケースなどが存在している。このような問題点を解決する手段の一例としては、機能分離型支承と呼ばれる構造形式<sup>1)</sup>などが挙げられるが、この支承システムの場合、支点部構成が主桁下に設置される鉛直支承（一般にすべり支承が用いられ、主に鉛直力支持機能および回転変位追随機能を担う）と横桁下などに設置され、地震時慣性力を受け持つ復元力装置（一般には積層ゴム構造が用いられる）の2種類の支承が必要となることから、その他の支承形式による構造と比べると桁下空間が煩雑となりやすく、支承取付け部周辺の補強材片量の増大や施工性の低下などの懸念が指摘されている。

そこで、筆者らは機能分離型支承と同様にゴム支承から回転変形に関する制約条件を解放しつつも、2種類の支承を用いずに、同一支承構造内でこれを実現（機能を混在化させる≒ハイブリッド化）することで、耐震設計上の自由度の向上という目標を達成させ、なおかつ、施工性についても特殊な段取りを必要とせずに、従来と同一工法により設置可能な支承形式を新しく考案した（以下、これをハイブリッド支承と呼ぶ）。本稿では、提案するハイブリッド支承構造に関する技術的な観点からの検討結果およびその実用化に向けての基礎的な性能検証実験結果等について、その概要を報告する。

### 2. ハイブリッド支承の構造・特徴

#### (1) 構造

提案する本支承の構造および動作状況の概念図を図-1に示す。ハイブリッド支承は従来と同様な積層ゴム構造の上部に、BP.B 支承（密閉ゴム支承板支承<sup>1)</sup>）の構成要素のうち、密閉ゴムによる回転機構を設けたシンプルな構造となっている。この密閉ゴム機構については、日本国内で採用が開始されて以来、約30年以上が経過し、主要高速道路などを中心にすでに多くの実績を有する構造であり、上部構造のたわみによる回転変位に対してポット構造部内の密閉ゴムが静水圧状態でこれに追随する機能を備えている。

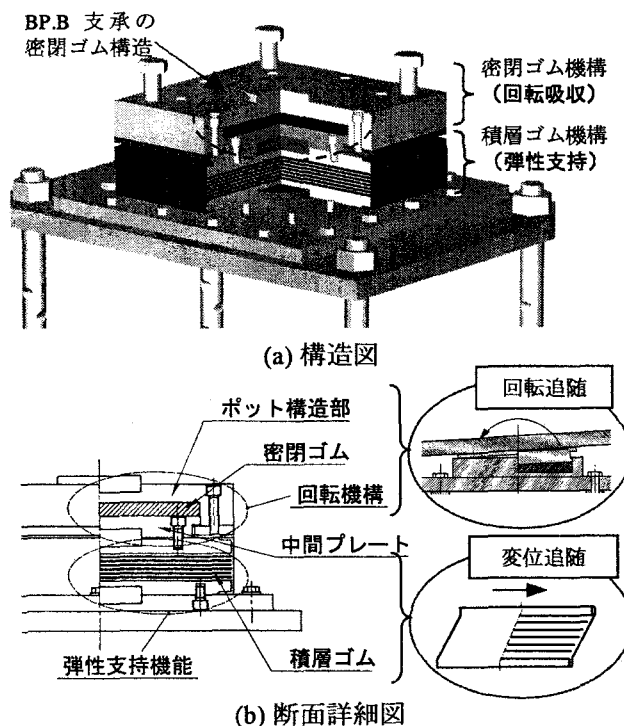


図-1 ハイブリッド支承の構造

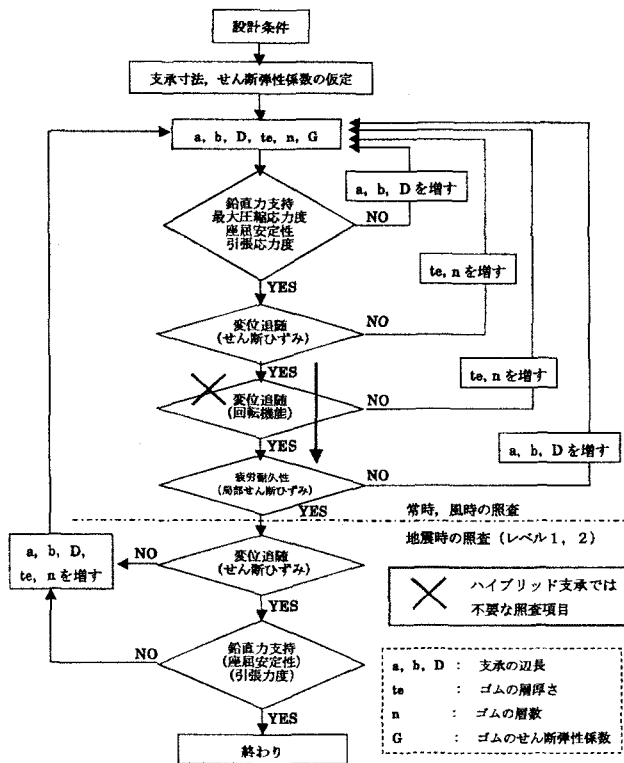


図-2 積層ゴムの形状決定フロー図

このため、上部の密閉ゴム機構部では、主に橋桁の活荷重たわみによる支点部の回転変位への追従機能を、積層ゴム機構部では、水平移動に対する変位追従機能（地震時慣性力支持機能、復元力機能）を、それぞれが個別に負担している。つまり、これまでひとつの構成要素に集約していた機能のうち、回転に対する変位追従性に関しては、積層ゴムから独立・解放させ、同一支承構造内で機能分離を行っていることがもっとも大きな特徴となる。

(2) 特徴

本支承構造を採用することにより発揮されるメリットは多岐にわたるが、その中でも主要な事項について、従来の積層ゴム単体のみからなる支承タイプ（以下、従来ゴム支承と呼ぶ）との比較をふまえながら、試算事例結果等を以下に詳述する。

a) 設計自由度の向上

ハイブリッド支承と従来ゴム支承におけるゴム形状の決定に関する設計フロー図の概略を文献 1)の書式を参考にまとめ、その結果を図-2 に示す。ハイブリッド支承の場合では、その構造特性から明かなように、積層ゴム部分に対しては回転変位への追従性の照査が不要となる。この結果、ゴム形状は鉛直力支持機能および地震時慣性力支持機能に特化した

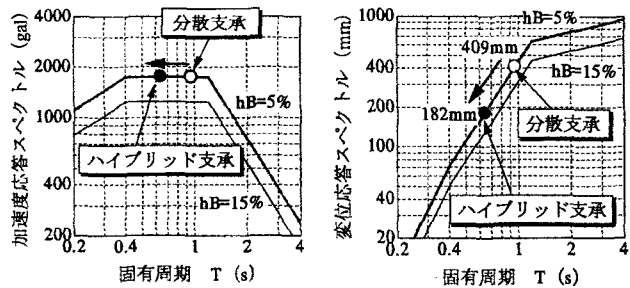


図-3 応答スペクトル (タイプII・II種地盤)

表-1 支承形状の試算結果

支承タイプ	支点位置	積層ゴムの形状	支承全体コスト比
分散支承 <従来型>	端支点	□720, $t_e=35 \times 5$	1
	中間支点	□820, $t_e=35 \times 4$	
ハイブリッド 支承	端支点	□610, $t_e=11 \times 12$	0.67
	中間支点	□710, $t_e=13 \times 7$	

断面設定が可能となり、特に地震時水平力分散構造あるいは免震構造の採用を考えた場合に、もっとも重要となる水平バネ特性の設定について、その自由度が飛躍的に向上することになる。

この設計自由度の向上を示す一例として、図-3に道路橋示方書<sup>2)</sup>に示されるタイプII地震動（II種地盤）における1自由度系の加速度応答スペクトルと、それをもとに作成した変位応答スペクトルを減衰5%および15%の2ケースに対して示す。この図から、1自由度系で考えた場合、橋梁の実設計において課題となることが多い桁遊間量（=上部構造の応答変位量）に着目し、これを小さく抑えることを考えると、長周期化（1.2sec以上）を目指して、加速度応答（=橋脚への慣性力の伝達）の低減を図っても、変位量の増大に関しては、免震支承による減衰効果を期待しても一定以上の抑制は困難であることが分かる。また、一方で、固有周期が0.4sec~1.2secの範囲にある場合には、1.2sec付近よりも短周期化を考えた方が加速度応答を一定に保ちつつ、変位応答を抑える効果が期待できることが伺える。

そこで、このような設計コンセプトの有効性を確認するため、7径間連続鋼5主桁橋を想定し、地震時水平力分散設計を実施した従来ゴム支承のケースを対象に試設計を行った。その結果、従来ゴム支承を用いた場合、固有周期は0.96secとなり、このとき桁遊間の観点から変位低減の必要性が生じたが、回転追従性確保のための制約からバネ剛性を高めることが困難な状態であったのに対し、ハイブリッド支承を用いた場合では、水平バネ設定を硬くし、固有周期を0.64secとすることで変位応答を約1/2程度

表-2 積層ゴム断面試算結果の一例（地震時機能に特化した断面が許容できる回転角 $\theta$ の試算）

項目		算定式	計算結果(例)	備考
①	死荷重反力	$R_d$	-	2000 kN (初期設定値)
①	全反力	$R_{max}$	$R_d/0.7$	2857 kN 活荷重比率 ( $R_d/R_{max}$ ) を0.7と仮定
②	許容面圧	$\sigma_a$	-	8 N/mm <sup>2</sup> 許容支圧応力度
②	必要面積(1)	$A_1$	$R_{max}/\sigma_a$	357143 mm <sup>2</sup> 簡略化のため、常時変形量は考慮せず
③	固有周期	$T$	-	1.0 sec ※ パラメーター (0.5~1.5sec)
④	震度標準値	$K_{hc0}$	-	1.75 道路橋示方書参照 <sup>2)</sup>
④	設計水平震度	$K_{bc}$	$K_{hc0}/\sqrt{(2\mu_a-1)}$	0.78 $\mu_a=3$ と仮定
④	慣性力	$H$	$R_d \times K_{bc}$	1560 kN
④	必要面積(2)	$A_1$	$H/G\gamma_a$	520000 mm <sup>2</sup> G: ゴムの弾性係数 (1.2N/mm <sup>2</sup> を採用) $\gamma_a$ : ゴムの許容せん断ひずみ (250%)
⑤	ゴム必要面積	$A$	$\max(A_1, A_2)$	520000 mm <sup>2</sup>
⑤	ゴム辺長	$a$	$\sqrt{A}$	721 mm 正方形断面
⑥	水平バネ値	$K_s$	$4\pi^2 m/T^2$	8.051 kN/mm m: 質量 ( $R_d/g$ ), g: 重力加速度
⑦	変位量	$\delta$	$H/K_s$	194 mm
⑧	必要総ゴム厚	$\Sigma te$	$\delta/\gamma_a$	77.5 mm $\gamma=250\%$ となる最小ゴム厚
⑨	層数	$n$	-	4層 ※ パラメーター (2~6層)
⑨	1層厚	$te$	$\Sigma te/n$	19.4 mm
⑩	1次形状係数	$S_1$	$a/4te$	9.3
⑩	弾性係数	$E$	$35 \times S_1 G$	391 N/mm <sup>2</sup> NR, 矩形断面を使用→算出係数: 35
⑩	鉛直バネ値	$K_v$	$AE/\Sigma te$	2622 kN/mm
⑩	圧縮たわみ量	$\delta_c$	$R_{max}/K_v$	1.09 mm
⑪	許容回転角	$\theta$	$2\delta_c/a$	<u>1/331 rad</u> $\delta_c > \delta_r = a/2 \times \theta$ を満足する最大回転角 ( $\delta_r$ : ゴムの回転変形量)

まで低減することが可能となった(図-3)。このときの支承断面形状の比較を表-1に示すが、ゴム形状が非常にコンパクトとなったことで、支承全体として約30%のコスト低減効果がみられ、その有効性が確認できた。

以上のように、従来ゴム支承が抱えていたバネ設定の制約という課題に対して、本支承の場合では、橋梁条件に応じた自由度の高い設計が可能であることが分かる。なお、ここでは橋脚の保有耐力が比較的高く、短周期化が合理的であった事例を示したが、ハイブリッド支承は長周期化を行う場合にも同様な適用性を有しているため、その点も付記しておく。

#### b) ゴム形状のコンパクト化

表-1の結果からも推測できるように、ハイブリッド支承では水平バネ設定に関する自由度の向上(固有周期設定の合理化)だけでなく、ゴム形状のコンパクト化が図れることも期待できる。これは、回転追随性照査の影響から解放されたことで、断面の最適化が容易となる点に由来する。ここでは、その効果に関する試算を行った事例について述べる。

表-2は、主に鉛直力支持機能および地震時慣性力支持機能に着目した場合におけるゴム形状の最適

(最小)断面の試算結果を示している。本表の計算手法としては、

- ① 1つの支承が支えるべき上部構造の死荷重反力等の諸条件を設定
- ② 鉛直力支持機能の確保の観点から求まる必要ゴム面積を算出
- ③ ゴム支承と上部構造の質量のみからなる1自由度系での固有周期を0.5~1.5secの範囲で設定(パラメトリック試算の対象値)
- ④ 固有周期から慣性力を求め、地震時慣性力支持機能の確保の観点から求まる必要ゴム面積算出
- ⑤ 上記②と④のうち、大きい方の断面を採用
- ⑥ 上記③で設定した固有周期を実現するために必要な水平バネ値を求める
- ⑦ 地震時慣性力と水平バネ値から変位量を算出
- ⑧ せん断ひずみの許容値 $\gamma_a=250\%$ から必要ゴム厚(積層構成の合計値)を求める
- ⑨ ここで、積層構成を求めるために層数分割を2~6層の範囲で設定(パラメトリック試算の対象値)し、そのときの1層ゴム厚みを算出
- ⑩ 1次形状係数等から鉛直バネ特性を算出
- ⑪ 上記までに設定したゴム形状に対し、回転追随性照査式から、許容できる最大回転角 $\theta$ を算出

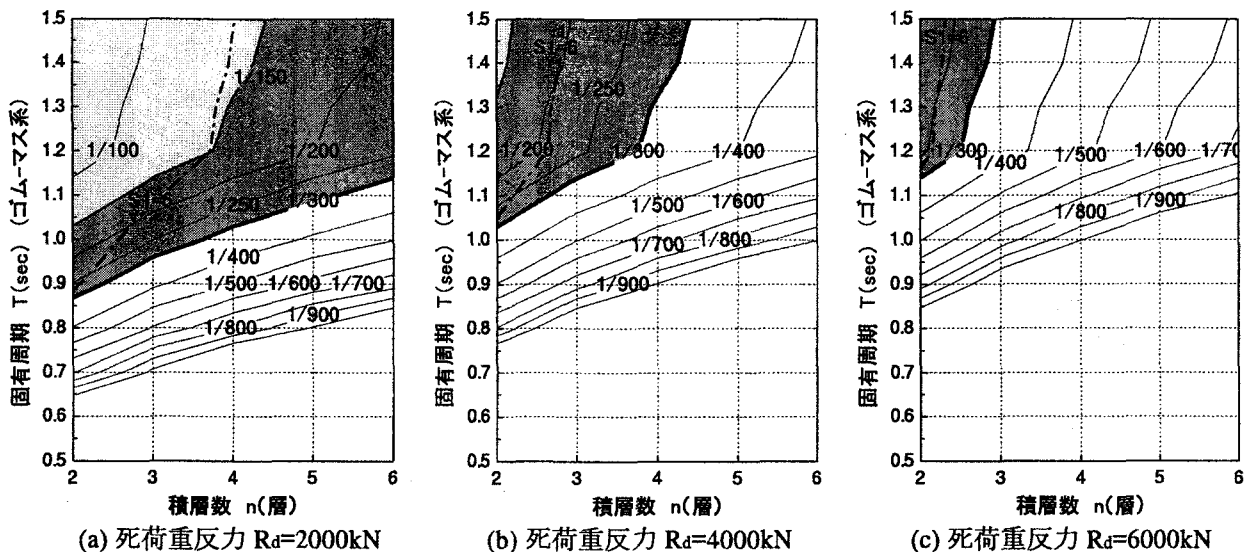


図-4 回転追随性照査以外の要因で決定したゴム形状が許容できる最大回転角 ( $\theta$  [rad])

となっている。なお、ここでの計算では、簡略化のため、座屈安定性や引張応力度などの一部照査項目を省略しており、また、あくまで理想化された条件下での試算であるので、実設計では用いない端数を有する断面設定を行っている点に留意が必要である。

表-2 のような計算を固有周期  $T$  およびゴムの積層構成を決める層数  $n$  をパラメーターとし、また、上部構造の死荷重反力  $R_d$  を 2000, 4000, 6000kN の 3 パターンとして試算した結果を図-4 に示す。ここで行う検討の基本方針としては、主に地震時に対する照査に特化して設定した断面 (表-2 の手法) で、そのまま回転追随性照査規定が満足できれば、その設計条件下では従来ゴム支承は元々最適化断面を実現していたことになるが、逆に、回転追随性能が不足となるケースでは、ハイブリッド支承を用いない場合、再び断面の収束計算が必要となり、このことが複数の要求性能を積層ゴムのみで実現するためにゴム形状が最適化 (最小化) できていない状態にあると判断できるとの考えに基づいている。

そこで図-4 をみると、横軸は積層構成の層数  $n$  を示しているが、これは 1 次形状係数  $S_1$ 、ひいては回転抵抗モーメントの決定につながるパラメーターであるため、層数の増加に伴い、許容できる回転角  $\theta$  が減少していることが分かる。また、縦軸の固有周期  $T$  のパラメーターに着目すると、その感度は非常に高く、仮に橋梁条件から求まる必要回転角を  $1/150\text{rad}$  (鋼桁の端支点部相当<sup>1)</sup>) と仮定すると、 $R_d=2000\text{kN}$  のごく限られたケース以外では、回転追随性能が不足していることが分かる。また、 $1/300\text{rad}$  (鋼桁の中間点部あるいは PC 桁の端支点

部相当<sup>1)</sup>) を基準に考えても、ゴム支承のみの固有周期で 1.0sec よりも短く設定したい場合には、その大半が回転追随性能を満足できないため、この結果、少なからず従来ゴム支承では回転照査の影響が関与して断面の増加が発生している可能性が伺える。

よって、このようなケースに当てはまる場合には、ハイブリッド支承を用いることでゴム本体の断面をコンパクト化することができる可能性があり、その低減比率が密閉ゴム機構部の材料費よりも上回ることになれば、支承全体の単価としてのコストダウンも期待できることになる。この点は本支承の大きなメリットであると考えられる。

#### c) 積層の多層化による効果

回転追随性能の必要性の有無によりゴム形状に生じる影響度が顕著に伺える事例としては、建築用ゴム支承との対比が考えられる。建築構造物の場合、その構造上の特性から支承部に回転追随性能をほとんど必要としないため、1 次形状係数が  $S_1=20\sim 40$  程度と、非常に多層化された積層構成が採用されている。一方、橋梁用ゴム支承では  $S_1=6\sim 10$  程度が多く、このような差は鉛直パネ特性に顕著な影響を与えることになり、両者を比べると橋梁用では約 1/2 程度の剛性領域で使用しているのが実状である。

このことから、橋梁用ゴム支承が交通振動や伸縮装置部での段差による騒音問題の発生等の一因である可能性も否定できないものと考えられるが、ハイブリッド支承では、従来ゴム支承に比べ、 $S_1$  を建築用ゴム支承程度まで高めることもできるため、これらの問題点の改善に寄与する可能性を有している。

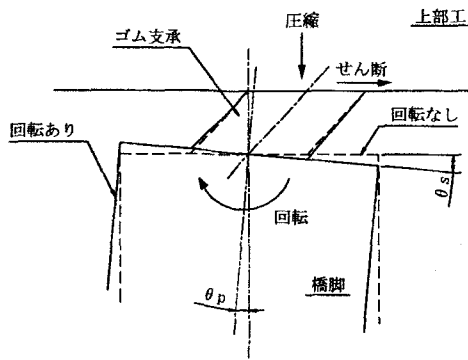


図-5 橋脚の塑性回転角に伴う支承部の変形状態

さらに、積層構成の多層化の効果としては、既往の研究事例によれば、1次形状係数の増加に伴い、ゴムのせん断変形性能（破断性能）が向上する傾向が報告<sup>3)</sup>されている。この点については、今後、さらなる実験的な検証が必要な課題であるが、ハイブリッド支承では、従来ゴム支承よりも破断特性に対する安全性の向上も期待される効果のひとつである。

d) 橋脚の塑性回転角に起因する変形への追従性能

現行の支承の設計法では、回転発生機構として常時の橋桁のたわみによるものに着目している<sup>1)</sup>が、大規模地震時に橋脚の塑性化を許容している現在の耐震設計法<sup>2)</sup>の場合、その基部に塑性回転角が生じると、支承部では図-5に示すような変形状態となり、圧縮、せん断、回転の複合的な影響が生じることになる。このような現象は実際にRC橋脚を対象とした载荷実験<sup>4)</sup>においても計測されており、それによれば、1/20~1/12rad程度と非常に大きな回転角となる可能性が示唆されている。

このような挙動に対して、ゴム支承の場合、従前の設計法に準拠していれば、局所的なひずみの累積の観点からは限界ひずみを上回るケースは少ないとの検討結果<sup>5)</sup>もあるが、特に免震支承のケースで重要となる履歴特性の安定性などについては、詳細な検討事例<sup>6)</sup>は少ないのが現状である。そこで、筆者らは、圧縮・せん断・回転の3要素同時载荷によるハイブリッド実験により非線形履歴特性への影響をふまえた性能検証の実施を計画している。本結果については、別途報告を予定しているが、ハイブリッド支承の場合、積層ゴムよりも回転機能に優れている密閉ゴム機構を有していることから、その優位性は高いものであると期待される。

3. 実験的検証

前項において、ハイブリッド支承による設計上の

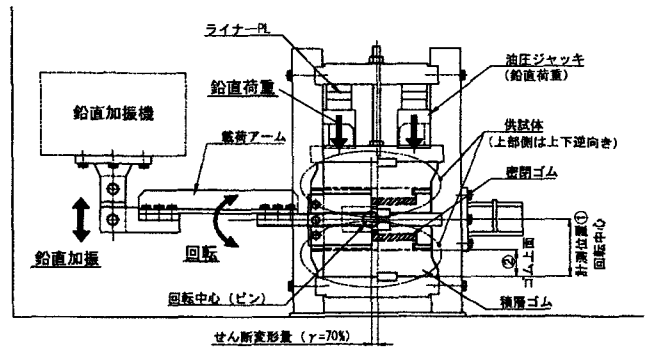


図-6 回転载荷試験装置の概要

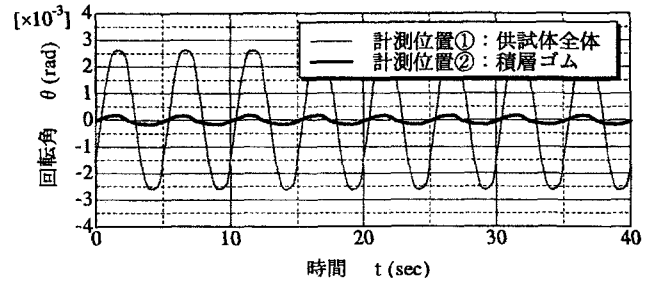


図-7 回転変位計測結果

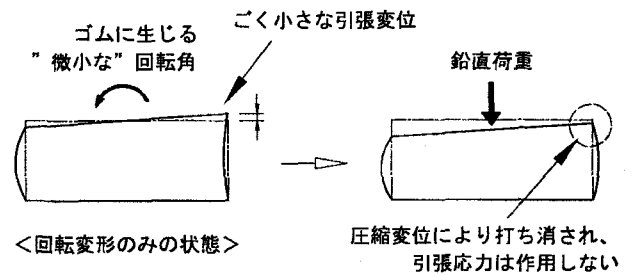


図-8 積層ゴムの微小回転量の吸収機構

メリット等について述べたが、次に、本支承構造が設計で想定している所定の性能を有していることを確認するために基礎的な検証実験を実施した。

ここでは、そこで得られた実験データの一部について報告する。

(1) 回転特性

ハイブリッド支承構造が目指す回転追従機構の独立化の実現を実験的に確認するために、設計反力2000kNによる試設計結果を基に供試体（積層ゴム形状：□470、 $\Sigma t_e=5\text{mm} \times 7$ 層）を製作し、図-6に示す回転载荷試験装置により回転挙動の計測を行った。試験は鉛直荷重を試験装置上部の油圧ジャッキにより载荷させ、また積層ゴムに70%のせん断ひずみを生じさせた状態に保ち、载荷アーム先端を鉛直加振することによって供試体に回転変位を与えることとした。また、測定項目は積層ゴム上面および回転中心となるピンの位置での回転変位量とした。

図-7 に正弦波による正負交番荷重を行った試験期間のうち任意区間における計測結果を示す。この図から供試体全体に生じた回転角は積層ゴムにはほとんど伝達されず、密閉ゴムの変形により吸収されていることが分かる。また、この積層ゴムの回転量は全体の1/10以下と非常に小さく、このとき生じたゴム端部の引張側となる変位量(-0.05mm)は、別途測定を実施した積層ゴムの圧縮特性を加味すると、鉛直荷重によるゴム自体の圧縮変位量によって図-8 に示すように相殺されるため、局所的な引張応力が発生することはなく、ゴム自体は回転変位の影響から解放されて、安定した挙動を示すことが確認された。

## (2) 水平特性

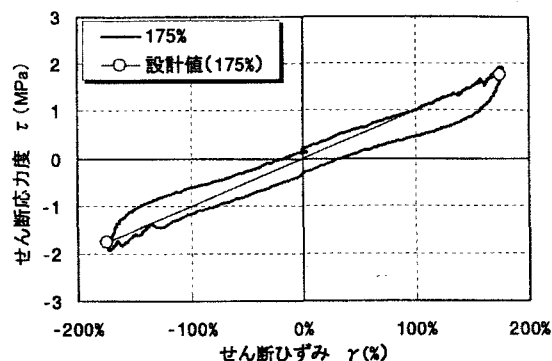
弾性支持機能の検証を行うため、死荷重反力相当の鉛直荷重を載荷させた状態で供試体に175%のせん断ひずみに相当する水平変位を与え、非線形履歴曲線(荷重-変位関係)の計測を実施した。図-9に天然ゴム系供試体および高減衰ゴム系供試体における試験結果を示すが、この図からハイブリッド支承構造でもその履歴は安定した復元力特性を有しており、また、その値は従来のゴム支承単体における設計式から求まる特性値と良く一致していることが分かる。

## 4. まとめ

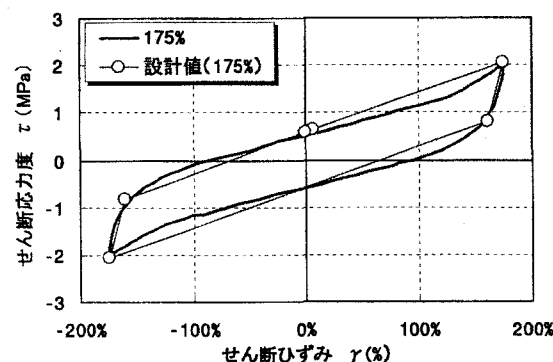
本研究では、ゴム支承のさらなる高機能化を目指した新しい支承構造の提案として、密閉ゴムによる回転機構と積層ゴムによる変位追従機能とを複合させたハイブリッド支承に関する設計的な試算検討、および基礎的な性能検証実験等を行った。

得られた知見をまとめると以下の通りである。

- (1) 回転機構を同一支承構造内で分離させた新しい支承構造について、その構造上の特性や機能上の特徴等を整理し、本支承の優位性を示した。
- (2) 回転機構をゴム支承から分離した場合、多くのケースで断面設定の改善(コンパクト化)が図られる可能性があることを試算結果を通して明らかにした。
- (3) 性能検証実験の結果、設計上において想定していた回転追従性能の分離は実現可能であり、また、水平バネ特性に関しても積層ゴム単体での性能と変化は生じないことを確認された。よって、ハイブリッド支承の特性は、非常に安定した性能を有しているものと判断できることが示された。



(a) 天然ゴム系供試体 (ハイブリッド構造)



(b) 高減衰ゴム系供試体 (ハイブリッド構造)

図-9 ハイブリッド支承の水平バネ特性(履歴曲線)

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋支承便覧，2004。
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2002。
- 3) Yasuhiro MIYAUCHI, Toshio NISHI, Fumihiko YAZAKI, and Toshiaki OHNAKA : Shape Factor Dependency of Ultimate Properties on Elastomeric Isolators for Bridges, International Rubber Conference, Beijing, 2004.
- 4) 庄司学, 川島一彦, 斎藤淳：免震支承とRC橋脚がともに塑性化する場合の免震橋の耐震性に関する実験的検討, 土木学会論文集, No.682, I-56, pp.81-100, 2001.7
- 5) 姫野岳彦, 運上茂樹：橋脚の塑性化によって生じるゴム支承の回転変形に関する一考察, 第6回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.407-410, 2003.1
- 6) 家村浩和, 五十嵐晃, 陳友真, 中島裕之：曲げ・変動軸力載荷条件下における免震支承の復元力特性, 免震・制震コロキウム講演論文集, Vol.1, pp.305-312, 1996.