

第4回 支承について

講師：近藤 誠一*

1. はじめに

支承は橋梁の上部構造と下部構造を結ぶ構造であり、橋梁の構成部材のなかでもとくに重要な機能を課せられます。

歴史をたどれば明治時代にさかのぼります。明治以前のわが国の橋梁は木橋や石橋がすべてであり、支承という概念は明確ではありませんでした。明治時代に入り文明開化とともに近代橋梁が西欧から移入され、初めて支承を有する構造の橋梁が建設されました。当時の支承は錬鉄板といわれる縁を切るための単なるすべり板でした。以降、橋の長大化に応じるべく支承も進化し続け、現在に至っています（写真 - 1）。

本講座では、道路橋支承便覧や道路橋の免震・制震設計法マニュアル（案）等に記載されている内容をわかりやすく解説していきます¹⁻⁴⁾。

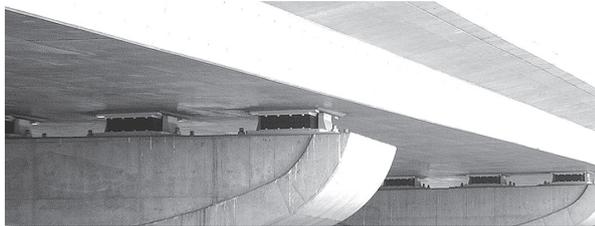


写真 - 1 ゴム支承の設置例

2. 支承の役割

2.1 支承から見た橋梁の特性

支承に要求される機能を紹介する前に、支承の視点から橋梁の物理的現象について簡単におさらいします。一つ目は橋桁の細くて長いという構造が示す特性として、温度変化により橋桁が伸縮するという現象があります。これは材料がもつ線膨張係数によるものです。二つ目として橋桁に車両などの移動荷重が載荷される際に橋桁自身がたわむという現象があります。三つ目として、これはプレストレストコンクリート橋ならではの特性ですが、プレストレスによる弾性短縮、クリープ収縮現象があり、さらにコンクリート構造物として乾燥収縮現象があります。

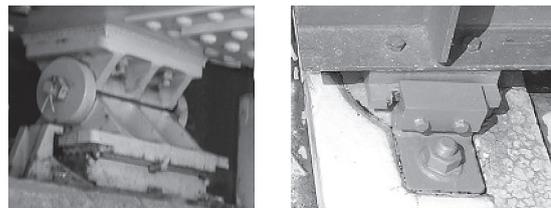
2.2 支承に要求される機能

橋梁の特性を 2.1 に示しましたが、この橋梁の特性に追従することが支承に要求される機能となります。具体的に

は①橋桁の温度変化による伸縮に追従すること、②橋桁のたわみに追従すること、③橋桁のクリープなどによる収縮に追従すること、です。また、その基礎ともいえるべき機能が④橋桁を支えることです。

2.3 支承の種類

これらの要求される機能を具現化するために鋼製支承（写真 - 2）、ゴム支承（写真 - 3）が採用されるに至りました。鋼製支承は伸縮追従のためにすべりもしくは転がり機構を具備し、ゴム支承のそれはゴムのせん断変形によるというものです。



（左：ピンローラー支承，右：高力黄銅支承板支承）

写真 - 2 鋼製支承の例

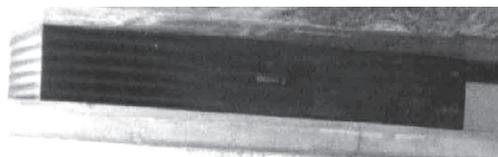


写真 - 3 ゴム支承の例

2.4 支承に要求される新しい機能

唐突ですが日本は全国で地震が多く発生しています。これを受けて旧建設省土木研究所を中心に道路橋における免震装置の研究が始まり「道路橋の免震設計法ガイドライン（案）（平成元年）²⁾」や「建設省・道路橋の免震設計法マニュアル（案）（平成4年）³⁾」に研究・評価の成果がまとめられるに至り、全国で免震橋が建設され始めました。1995年1月に兵庫県南部地震が発生し、多数の橋梁が被害を受けました。被害を受けた支承の特徴として鋼製支承は損壊に至るものが多数あり、ゴム支承は損傷被害が少数でした。さらに新しい技術として取り入れられた免震設計の効果が示され、以降、橋梁設計の基本が免震設計となるに至りました。この免震設計で使用される高機能支承を免震支承と呼びます。

* Seiichi Kondo : (株)ブリヂストン 免制震開発部 ユニットリーダー

2.5 免震支承に要求される機能

免震支承の機能は2.2①～④に加えて、地震時において⑤複数の下部構造による地震力の分担、⑥長周期化、⑦地震エネルギーの低減、という3つの機能を有します。長周期化とは、免震支承の柔らかいばね特性を用い、橋梁の固有振動周期を地震動の卓越振動周期より長くすることにより、地震動との共振を避け、地震時の橋梁の揺れを低減させることを意味します。

①～⑥を具現化できる支承を地震時水平力分散型支承もしくは分散支承と呼び、①～⑦すべてを具備している支承を免震支承と呼びます。

2.6 免震支承の種類

免震支承は高減衰ゴム支承（HDR/High Damping Rubber）と鉛プラグ入りゴム支承（LRB/Lead Rubber Bearing）の2種類があります。

高減衰ゴム支承は先に紹介した分散支承と構造は同一で、ゴム材料に工夫がなされています。ゴム自身がエネルギー吸収機能を保有しており、ゴムが変形することで地震力低減を図る機構となります（図-1左側）。開発当初の高減衰ゴムの減衰定数はせん断ひずみ175%時に約15%弱でしたが、エネルギー吸収量を増大（約17%強）させた超高減衰ゴムが開発され、現在は高減衰ゴム支承といえば超高減衰ゴムを適用した支承を示します。高減衰ゴム支承としては鉛プラグ入りゴム支承は使用するゴムは分散支承と同一ですが、中央部に円柱状の鉛が封入されています。支承が変形することで封入された鉛が変形し、鉛の塑性変形によるエネルギー吸収により地震力低減を図る機構となります（図-1右側）。

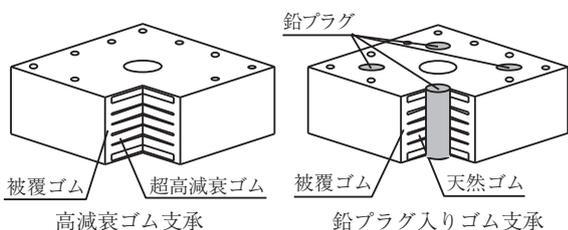


図-1 免震支承の例

2.7 免震支承の履歴特性

分散支承および免震支承の履歴特性（荷重-変位）を図-2～4に示します。分散支承の履歴特性の特徴としてはゴム材料の線形性が製品に反映されていることがわかります（図-2）。

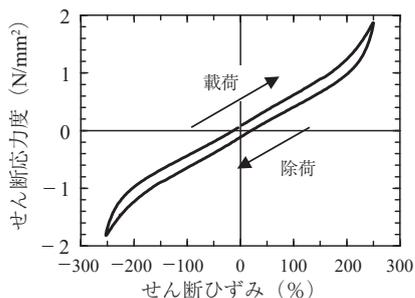


図-2 分散支承の履歴特性例

高減衰ゴム支承、および鉛プラグ入りゴム支承の履歴特性の特徴はひずみを与える時の載荷応力に対して、ひずみを戻す時の除荷応力が小さくなることであり、この応力差がエネルギー吸収されていることを示しています（図-3、4）。

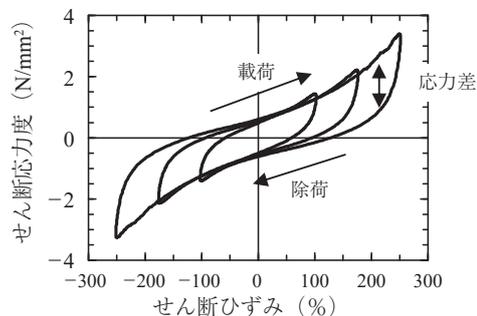


図-3 高減衰ゴム支承の履歴特性例

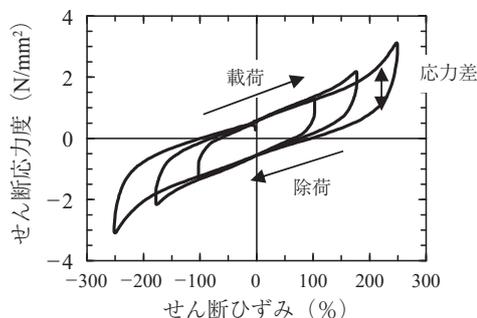


図-4 鉛プラグ入りゴム支承の履歴特性例

3. 積層ゴム支承の設計

3.1 積層ゴム支承の特性

分散支承、免震支承は写真-4に示すようにゴム層と鋼板層を積み重ねる構造から総じて積層ゴム支承と呼ばれます。はじめに積層ゴム支承の特性について紹介します。

なぜ積層ゴム支承か？という疑問が生じると思います。図-5に単層ゴムと積層ゴムに圧縮荷重を載荷した状態、図-6に水平荷重を載荷した状態の模式図を示します。

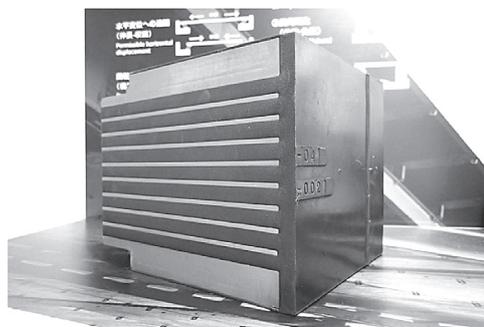


写真-4 積層ゴム支承断面の例

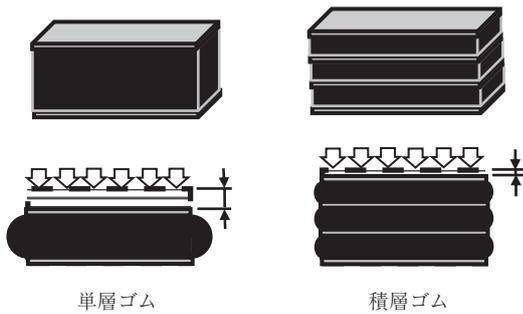


図 - 5 圧縮荷重載荷した状態（総ゴム厚は同一）

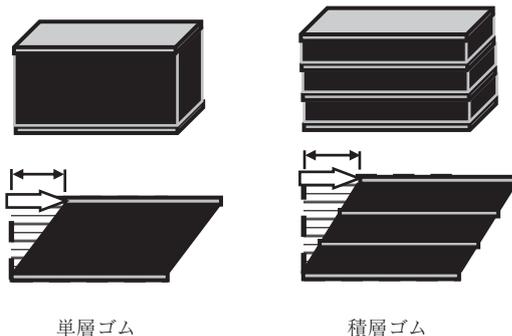


図 - 6 水平荷重載荷した状態（総ゴム厚は同一）

図 - 5 のようにゴムと鋼板を積み重ねると圧縮荷重に対して圧縮変位量が小さくなることがわかります。これは荷重による沈み込みを抑制することを示します。一方、図 - 6 はゴムと鋼板の積み重ねによる水平方向の性能に差異がないことを示しています。このように積層ゴムは鉛直方向にばねが硬く、水平方向にばねが柔らかいという2つの異方性ばね特性を有します。この特性により、橋桁をしっかりと支え、地震時に長周期化を可能とします。

よって、支承を設計するにあたっては鉛直剛性（鉛直方向ばね、 K_v ）、水平剛性（水平方向ばね、 K_s 、 K_B ）と呼ばれるばね定数が重要となります。ばね定数は(1)で示します。

$$\text{【ばね定数】} = \text{【弾性係数】} \times \frac{\text{【面積】}}{\text{【ゴム厚】}} \quad (1)$$

弾性係数はゴム材料および構造に起因する特性であり、鉛直剛性は縦弾性係数（ E ）を用い、水平剛性はせん断弾性係数（ G_e 、 $G_{(y)}$ ）を用います。

また、疲労特性を示す指標として式(2)に示す一次形状係数（ S_1 ）、座屈特性を示す指標として式(3)に示す二次形状係数（ S_2 ）という無次元量を用います。

$$\text{【一次形状係数】} = \frac{\text{【拘束面積】}}{\text{【自由面積】}} \quad (2)$$

$$\text{【二次形状係数】} = \frac{\text{【変形方向の辺長】}}{\text{【総ゴム厚】}} \quad (3)$$

ここで、拘束面積はばね定数における面積すなわち鋼板面積（ $a \times b$ ）を示します（図 - 7）。図 - 5 において積層ゴムに比べて単層ゴムの側部（自由面積（ $2 \times (a + b) \times te$ ））が大きく膨らみ出していることがわかります。膨らみ出し

はゴムにひずみが発生している状態であり、膨らみ出しが大きいほど、ひずみが大きいことを示します。ひずみが大きいということは疲労特性が低くなることが知られています。これを定量的に示したものが一次形状係数です。現状、一次形状係数は6程度以上が望ましいとされています。さらに一次形状係数は積層ゴムの縦弾性係数を算出する際にも使用します。一方、二次形状係数は積層ゴムの座屈し易さを示す指標で、水平変形（図 - 8）時の鉛直荷重支持機能の安定性や水平特性の安定性を示します。現状、二次形状係数は4程度以上が望ましいとされています。

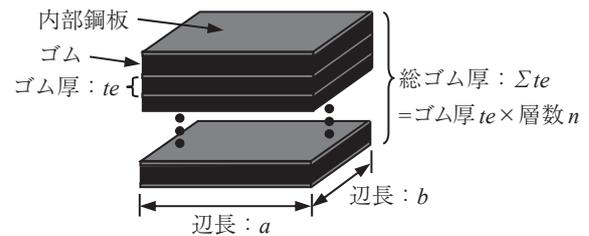


図 - 7 積層ゴム支承の単語の定義

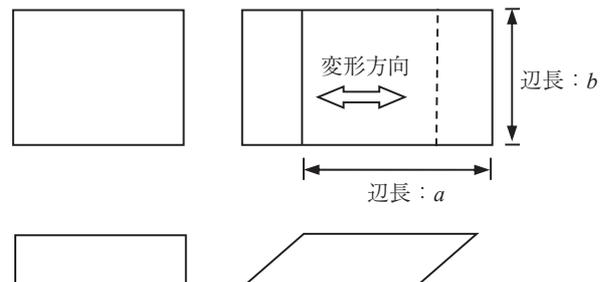


図 - 8 変形方向（水平変形）の定義

3.2 積層ゴム支承の設計

2章で支承に要求される機能①～⑦を紹介しましたが、積層ゴム支承の設計はこの役割を果たしていることを確認します。主要な照査事項を次に示します。

(1) 常時（温度変化時）の照査

以下の4点について照査することが求められます。

- 1) ①③は合計伸縮量が総ゴム厚の70%以内にあること。
- 2) ②は積層ゴム支承の圧縮変位量が橋桁の回転変位以上であること。
- 3) ④は最大面圧が許容圧縮応力度以内にあること。
- 4) これらが与える積層ゴム支承の合計ひずみ（=せん断変形によるひずみ、回転変形によるひずみ、圧縮変形によるひずみ）が許容ひずみ内（ゴム種ごとに異なる）にあること。

(2) 地震時の照査

⑤～⑦について、L2地震時に発生するせん断変形量が総ゴム厚の250%以内にあることが求められます。

4. 積層ゴム支承の品質管理と検査

4.1 品質管理と検査の目的

積層ゴム支承は2章で記述したように変位追随、荷重支持などの機能が要求されます。これらの要求される機能を満足していることを検証するために検査を実施します。

4.2 使用する試験機

積層ゴム支承の品質管理試験に使用する試験機は二軸試験機と呼ばれます。二軸は水平方向と鉛直方向の二軸を示しています。二軸試験機の例を図-9に示します。

4.3 水平試験

2.2①, ③, 2.5⑤～⑦を検証する水平試験では、積層ゴム支承が地震時の水平力に対して所要の水平剛性を有していることを検証します。試験条件としては死荷重相当荷重を鉛直載荷し、レベル2地震動における許容ひずみ ($\gamma_{ca} = 250\%$) の有効値 (70%) となる水平変位 (総ゴム厚 \times 175%) を正負繰り返し与え、水平剛性を計測し設計値に対して $\pm 10\%$ 以内にあることを検証します。また、同試験において減衰性能も検証します。この試験により図-2～4に示す履歴特性を得ます。

4.4 鉛直試験

2.2②, ④を検証する鉛直試験では、積層ゴム支承が橋桁のたわみに追随し、橋桁荷重および移動荷重をしっかりと支持できることを確認するために鉛直方向設計条件における最大反力相当の鉛直力を載荷し、水平剛性同様の履歴特性を得ます。

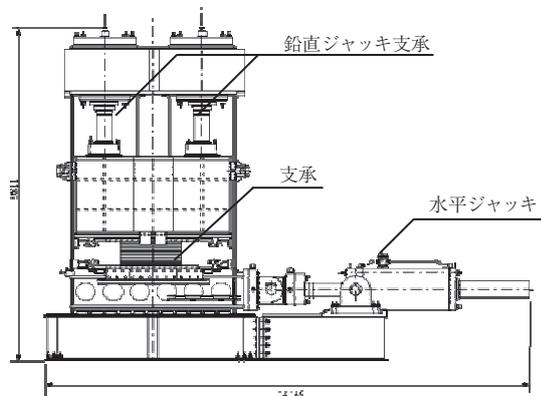
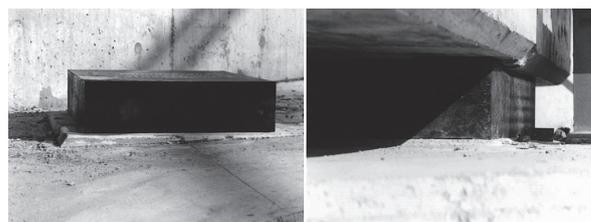


図-9 二軸試験機の例 (鉛直 32 MN - 水平 10 MN/1 000 mm)

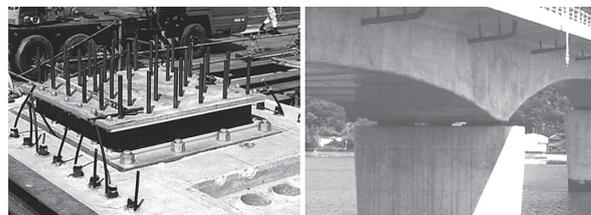
5. 積層ゴム支承の施工

5.1 積層ゴム支承の施工

ゴム支承は基本的に全温度振幅変位量とプレストレストコンクリートによる収縮変位量を総変位量として許容できるようにゴム厚を設計するため、橋脚天端に設置し橋桁を架設します (写真-5, 6)。



橋脚天端設置 プレキャスト桁架設
写真-5 ゴム支承の設置例



橋脚天端設置 場所打ち桁架設
写真-6 免震支承の設置例

5.2 橋梁の長大化による施工技術の進化

近年、1 km を超える連続高架橋が増大しており、これらは支承の設計手法、施工手法に影響をもたらしました。ゴム支承のゴム厚にも製造限界があるため長大化に応じたゴム厚をもつ支承設計に限界が生じます。5.1に「基本的に全温度振幅変位量とプレストレストコンクリートとしての収縮変位量を総変位量」と紹介しましたが、この「基本」が変わります。そもそも温度変化による伸縮量はある中心温度 (春、秋) から夏は伸長、冬は収縮するので、設置時期が春もしくは秋であれば全振幅考慮してきた伸縮量について「伸」もしくは「縮」のみ、すなわち半分の伸縮量を考えればよくなります。さらにプレストレストコンクリートの一方的な収縮量も施工で除去できれば、積層ゴム支承の変形量として考慮する必要がなくなります。この設計手法を可能とする施工方法が各種開発されました。ここではその一つである後ひずみ調整 (ポストスライド) 方法について紹介します。

写真-7は後ひずみ調整作業前状況です。ベースプレート (最下鋼板) と下沓 (その上段鋼板) 側面にあらかじめねじ加工 (左側面) が施されています。下沓のねじ加工部に PC 鋼棒を取り付け、ベースプレートねじ加工部に反力受け板を取り付けます。設置した反力受け板に反力を取りながらセンターホールジャッキで必要な移動量を滑らせます (写真-8)。

必要な移動量を滑らせた後、溶接もしくはボルトで積層ゴム支承を固定します (写真-9)。

このように施工方法を工夫することで免震支承の適用範囲を大きく広げるに至りました。

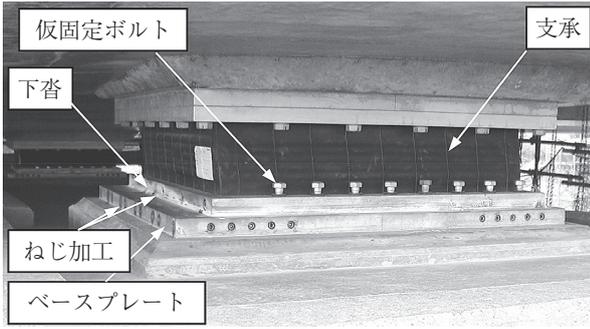


写真 - 7 後ひずみ調整作業前状況

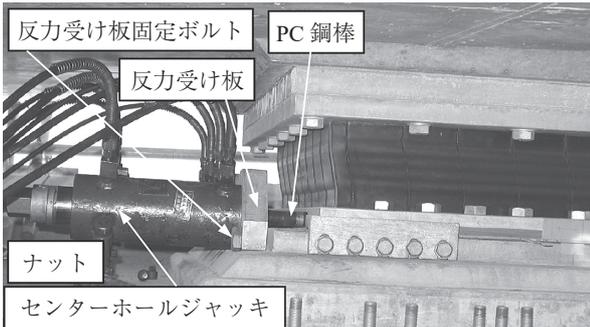


写真 - 8 後ひずみ調整作業中状況

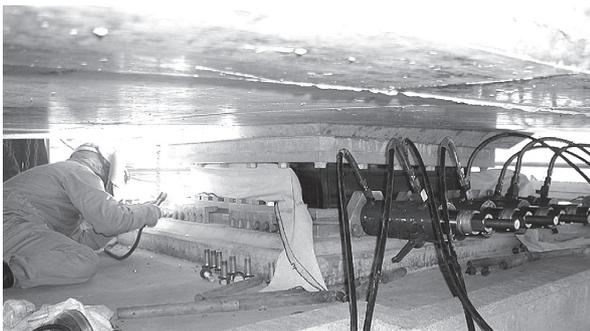


写真 - 9 後ひずみ調整作業後溶接固定作業状況

5. おわりに

橋梁技術者は兵庫県南部地震，新潟県中越地震，東北地方太平洋沖地震，熊本地震などの大地震を経験し，都度知恵と工夫で乗り越えてきました。現在は高度経済成長期に建設された橋梁の老朽化，ライフサイクル管理システムなどの新たな課題が持ち上がってきています。これらの橋梁ははるかに小さい地震力による設計しかなされておらず，現在求められている大きな力が作用する設計条件には到底耐えられません。新しい提案はいろいろなされていますが，ますますの知恵と工夫が求められているところです。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋支承便覧，2004.
- 2) 国土開発技術研究センター：道路橋の免震設計法ガイドライン（案），1989
- 3) 土木研究センター：建設省・道路橋の免震設計法マニュアル（案），1992
- 4) 土木研究センター：道路橋の免震・制震設計法マニュアル（案），2011

【2018年8月23日受付】



刊行物案内

既設ポストテンション橋の PC 鋼材調査 および補修・補強指針

平成 28 年 9 月

本工学会「既設ポストテンション橋の PC グラウト問題対応委員会」において，ポストテンション方式の既設 PC 橋の実態把握（健全性・損傷事例の把握や規準等の整理），PC グラウトの充填性調査手法の把握，PC 鋼材の健全性調査手法の把握，ポストテンション橋の健全性診断の方法検討，PC グラウト充填不足・PC 鋼材損傷の補修・補強の提案等の検討が行われ，その成果を指針としてまとめたものです。

定 価 4,800 円／送料 300 円

会員特価 4,000 円／送料 300 円

公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会