

既設橋梁支承の取替え用に開発されたゴム支承

安波博道* 中島和俊**

1. はじめに

平成7年の兵庫県南部地震では、橋梁支承部に想定を超えた衝撃力の作用や、上部工との大きな相対変位が生じたため、多数の鋼製支承が破損し、橋梁の被害拡大の一因となった。この地震の経験を踏まえて改訂された道路橋の耐震設計基準¹⁾では、橋梁支承への要求性能として「支承本体は大規模地震（レベル2）に対しても破損することなく、上部工慣性力を確実に下部工に伝達すること」となった。

鋼製支承と対比してゴム支承は、地震による被害が小さかったことや、鉛直と水平の双方に変形性能を有していることから、兵庫県南部地震以降は新設橋梁には積層ゴム支承（図-1）が多く使用されるようになった。しかし、既設橋梁の耐震補強を目的とした支承取替えにおいては、積層ゴム支承は外形寸法が大きいことから、スペースに納まらないという問題が生じた。

このような状況下、上部工の構造形式や支持機構、支承周りのスペース等のさまざまな既設橋梁支承の取替え条件に適合しやすくするため、支承メーカーは耐震や免震などの各種性能を有する製品の開発に取り組んだ。このうち特に支承本体の形状寸法の縮小を志向して開発された一連のゴム支承製品（技術名称：「機能分離型ゴム支承装置」、
「固定ゴム支承装置」、
「超小型ゴム支承装置」の3件）について、財団法人土木研究センターでは建設技術審査証明委員会にて審査を行った。

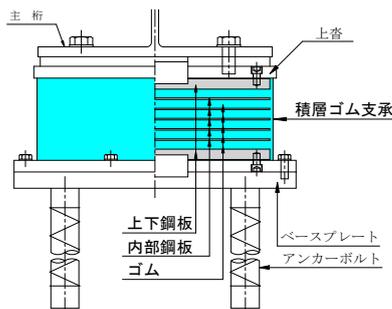


図-1 在来の積層ゴム支承

審査証明対象の一連のゴム支承製品は、在来製品には無い特殊な要素技術、すなわち、積層ゴム支承に比べて鉛直耐荷力が2倍以上の性能を有する「弾性荷重支持板：HiPS」、水平力に対する抵抗機能を支承本体の中心部に集約した「水平力支持装置：シンボウ」が共通して組み込まれている。審査証明では、これら特殊技術について力学機構と基本性能の把握の方法や、実寸大での試験ができない大型サイズの評価方法が焦点となった。本稿では、各ゴム支承製品の概要、ならびに特殊技術の評価方法について紹介するものである。

2. 各ゴム支承製品の概要

2.1 「機能分離型ゴム支承装置」²⁾

「機能分離型ゴム支承装置」は、図-2の配置例に示すように、従来は一つの支承で受け持たせていた鉛直力支持機能と水平力支持機能を分離し、鉛直力支持装置として支承の平面寸法が小さく、かつ、高さが低いゴム支承部品である「弾性荷重支持板：HiPS」を組み込んだものである。図-3に公称支持力が1,000kNの鉛直力支持装置を、また、図-4にHiPSの構造を示す。

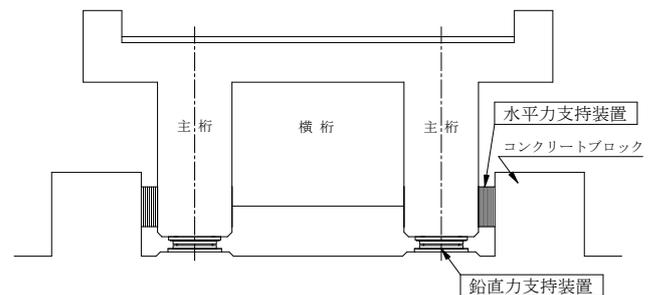


図-2 「機能分離型ゴム支承装置」の配置例

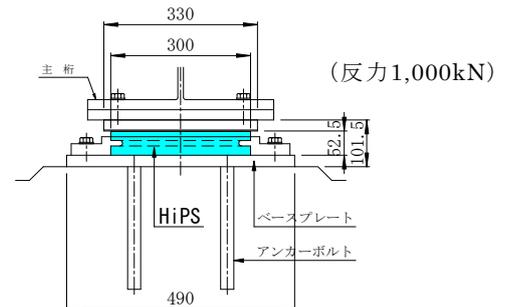


図-3 「機能分離型ゴム支承装置」の鉛直力支持装置の例

在来の積層ゴム支承は、図-1に示すようにゴムと鋼板を交互に積層し加硫接着させたものである。鉛直荷重が作用するとゴムが側方に膨らむが、鋼板との接着力によりゴムの膨出を抑制することで鉛直方向の支持力と剛性を確保するものである。これに対してHiPSは、図-4に示すように凹状に加工した上下の鋼板とリングプレートによりゴムの変形に対する拘束度を一層高めて鉛直方向の限界支持力を向上させた構造であり、これにより同格の公称支持力の積層ゴム支承に比べて形状寸法を小さくすることが可能となる。

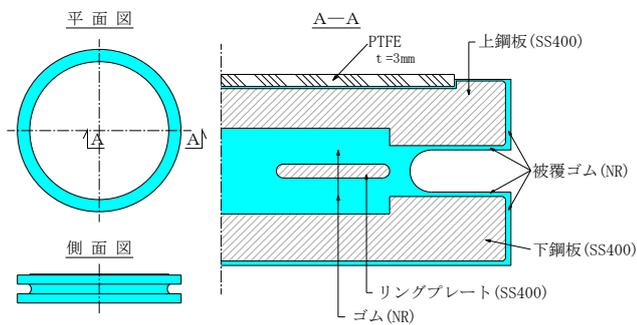


図-4 HiPSの構造

2.2 「固定ゴム支承装置」³⁾

既設の単純桁橋や連続桁橋の固定支承を取替える場合には、設置スペースの問題とともに、地震時の衝撃力による脆性破壊が生じないような支承本体でなければならない。「固定ゴム支承装置」の構造を図-5に示すが、鉛直力の支持には前項のHiPSを用い、水平力に対しては、従来の固定支承で支承本体の外側に備えていた水平力抵抗部材に代わり、水平全方向に抵抗する鋼製の円柱シンボウを支承中央に配置することにより、衝撃に強く、かつ外形寸法の縮小を可能にしたものである。

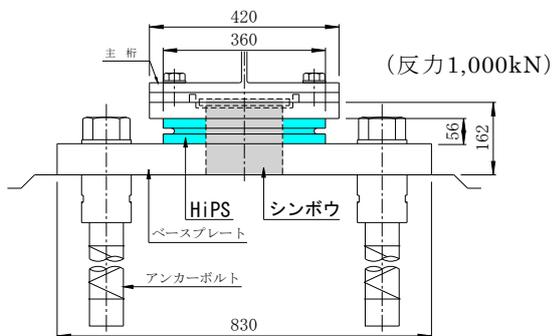


図-5 「固定ゴム支承装置」の構造概要

2.3 「超小型ゴム支承装置」⁴⁾

「超小型ゴム支承装置」は図-6に示すように、前項の「固定ゴム支承装置」に対してHiPSの下鋼板にベースプレートの機能を兼ねる構造とする

こと、ならびにシンボウの下鋼板へのねじ込み長さの極小化をはかることにより、支承高さを一層小さくした支承である。

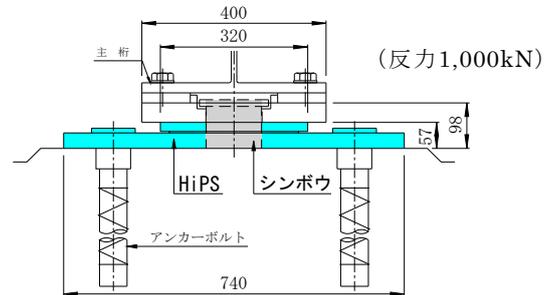


図-6 「超小型ゴム支承装置」の構造概要

3. 「弾性荷重支持板：HiPS」の力学性能

3.1 支持力特性と限界性能の把握

HiPSの鉛直支持力の限界性能を把握するために、公称支持力が250kNから20,000kNまでの製品のうち、試験機能力の制約により1,750kNの製品を用いて圧縮力荷重試験を行った。荷重は、圧縮応力度が25N/mm²刻みの繰返し漸増とした。試験結果の一部として荷重の最終サイクルと一つ前における応力度－変位関係を図-7に示すが、最終サイクルの圧縮応力度が125N/mm²から150N/mm²に至る荷重の途中で異状がみられた。また、除荷後には残留変位2mmが生じた。さらに、荷重試験後に供試体を切断解体して内部の状態を観察したところ、写真-1に示すようにリングプレートとの界面近傍でゴムのき裂が生じていた。

この試験結果から、HiPSの使用上の限界圧縮応力度を異状が発生した133.8N/mm²と定義し、以降、各サイズのHiPSの支持力性能を評価するための照査荷重（上限値）とすることとした。

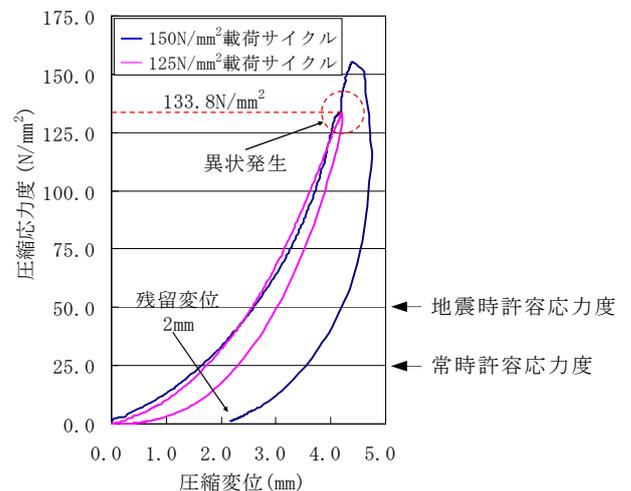


図-7 圧縮試験の応力度－変位関係図

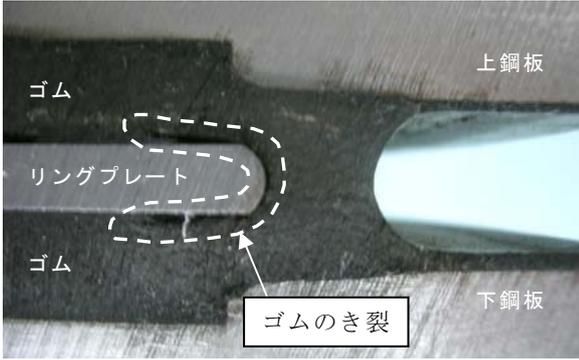


写真-1 試験後のHiPSの切断面

3.2 大型サイズの性能の推定方法

試験機能力の都合により照査荷重まで荷重ができない大型サイズについては、大変形理論に基づくFEM解析を用いた数値解析によって支持力性能を推定した。

まず、FEM解析の精度を確認するため、荷重試験を行った供試体を対象に単調荷重を作用させる数値解析を行った。図-8に数値解析の結果を荷重試験結果と合わせて示すが、ゴム材のポアソン比をひずみ依存形で設定することにより、荷重試験を高い精度で再現する解析モデルを設定することができた。また、図-9に数値解析のひずみ分布を示すが、試験でゴム材にき裂が生じた部位は解析でも最大ひずみが発生しており、ここで作成した数値解析モデルの大型サイズの性能評価に適用する妥当性を確認した。

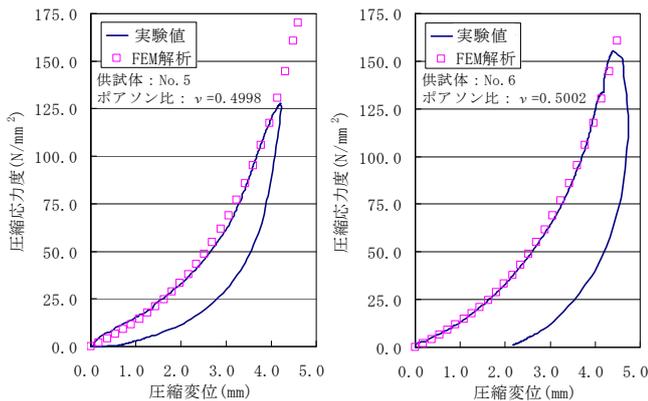


図-8 FEM解析結果と圧縮荷重試験の比較

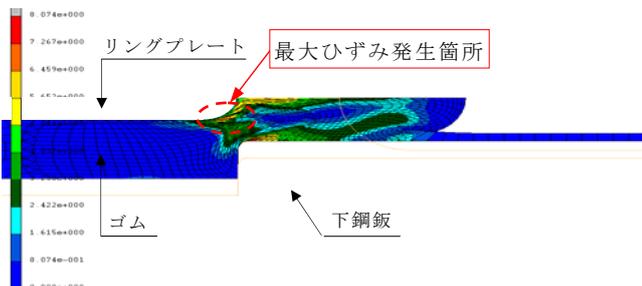


図-9 FEM解析におけるゴム材のひずみ分布

次に、大型の各サイズの数値解析においては、照査荷重を荷重したときのゴム材に生じるひずみを照査ひずみ (7.19×10^0) と定め、FEM解析によってゴム材の最大ひずみが照査ひずみに達した時点の圧縮荷重をそのサイズの限界荷重とした。その結果、いずれのサイズの限界荷重とも圧縮応力度が 75 N/mm^2 以上であった。これにより、限界荷重に対する安全率を3以上として、HiPSの許容圧縮応力度を 25 N/mm^2 に設定したことの妥当性を検証した。なお、これは積層ゴム支承の許容圧縮応力度 (最大 12 N/mm^2) の約2倍に相当する。

4. 「水平力支持装置：シンボウ」の力学性能

4.1 支持機構と限界状態の把握

「超小型ゴム支承装置」では、支承高さを縮小するためにシンボウの下鋼板（ベースプレート兼用）へのねじ込み長さを小さくしている。この場合、シンボウの径とねじ込み長さとの力学的な関係を把握する必要がある。シンボウに水平力が作用した場合の抵抗機構は、図-10に示すようにシンボウ本体の曲げ耐力、せん断耐力、ねじ部の抜け出しのいずれかと考えられる。そこで、実製品を用いてシンボウに水平力を作用させて、最終の壊れ方を確認することとした。その結果、写真-2に示すように、ねじ部の抜け出しが支配的であることがわかった。

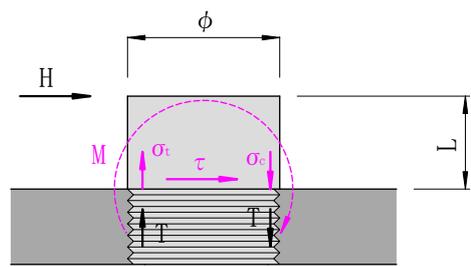


図-10 シンボウの抵抗機構



写真-2 試験終了時の供試体の状況

4.2 大型サイズの性能の推定方法

シンボウの径と下鋼板へのねじ込み長さとの力学的な関係を把握するため、水平力載荷試験を行った。ねじ部の抜け出しを伴う反力を評価するにあたり、ここではシンボウ基部（下鋼板上面）における曲げモーメントを指標として整理した。

「超小型ゴム支承装置」に用いられるシンボウの径は80mmから340mmであるが、まず、このうち実物大モデルでの試験が可能な径180mmより小さい径について、径が同じで複数のねじ込み長さの供試体を対象とする試験を行った。図-11の図中（■印）に、ねじ山数ごとの（n=7, 10, 15）シンボウ径と最大曲げモーメントの関係を示す。図からわかるように、ねじ込み長さ（ねじ山数）と最大曲げモーメントに相関があることがわかった。

次に、シンボウ径が180mmを超える大型サイズの製品については、形状寸法が1/2の縮小モデルの供試体を用いて実物大モデルと同様の水平力

載荷試験を行った。1/2モデルの供試体は、ねじピッチも実寸の1/2で加工されている。

1/2モデルの力学的相似則を確認するために、シンボウ径が100mm、150mm（ねじ込み長さ2ケース）、180mmの4ケースについて実物大モデルと1/2モデルの両方の試験を行った。最大曲げモーメントの理論上の相似率は4.00であるが、載荷試験結果は4ケースの平均で4.78となった。図-12に、1/2モデルの試験結果に対して水平荷重を4.78倍にしたものを実物大モデルの試験結果と対比した一例を示す。両者の荷重-変位関係はよく一致している。ここでは4ケースの相似率のばらつきが小さいこと等から、1/2モデルの試験結果を用いて実物大の最大曲げモーメントを推定する場合の相似率として4.78を用いることとした。

図-11の図中（◆印）に1/2モデルの試験結果から推定した最大曲げモーメントを示す。また実物大の試験結果も総合して、ねじ込み長さに対するシンボウ径と最大曲げモーメントの相関式を示した。シンボウの各サイズの許容水平支持力は、本実験式に0.9を乗じた値に対して安全率1.7を考慮して設定した。

5. おわりに

橋梁支承の小型化を志向して開発されたゴム支承製品に関する審査証明の一部を紹介した。本稿に掲載した実験や解析の詳細については、参考文献2)～4)の各報告書を参照されたい。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、2002.3
- 2) 建設技術審査証明報告書「HSB」、2006.3
- 3) 建設技術審査証明報告書「FxSB」、2006.9
- 4) 建設技術審査証明報告書「UCB」、2009.1

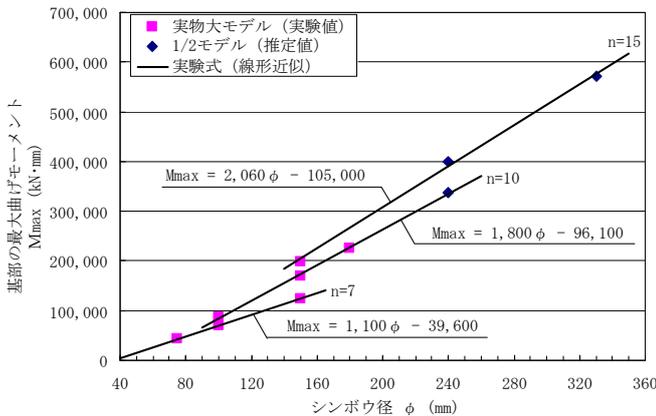


図-11 シンボウ径と最大曲げモーメント（シンボウ基部）との関係

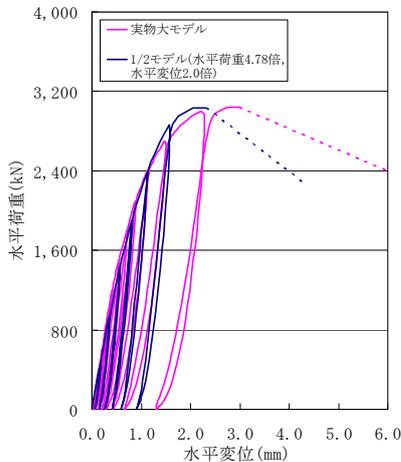


図-12 1/2モデルから推定した実物大の荷重-変位関係と実物大試験結果の比較

安波博道*



財団法人土木研究センター
材料・構造研究部長、工博
Dr. Hiromichi YASUNAMI

中島和俊**



財団法人土木研究センター
材料・構造研究部 研究員
Kazutoshi NAKASHIMA