

粘 性 ス ト ッ パ ー

伊 関 治 郎*

1. 概 説

粘性ストッパーは、高粘度の高分子材料の粘性抵抗による力の伝達、および振動減衰機能を利用した耐震装置で、いわゆる“ダンパー”の一種である。

近年、橋梁構造等に対して、騒音公害の防止、維持保全費用の軽減、施工法の進歩、美観、用地問題などの理由から、上部工のPC連続桁化、支間長の増大、多径間連続桁の計画などが多くなりつつある。

このため、上部工の重量が増加し、設計に際して、特に橋軸方向の地震時水平力の処理が、橋脚のスレンダー化とも相まって困難になるケースが多い。

すなわち、連続桁において一橋脚だけを固定支点とする通常の設計の場合には、固定脚の設計が困難になり、また多点固定とすれば、橋脚の剛性によって、温度、乾燥収縮、クリープなどによる内部応力が生じ、地震時水平力との重ね合せを考慮した場合、下部工の設計のみならず、上部工の設計にも多くの問題を生じてくる。

従来、これらを解決するために行われてきた方法として、上下部工の橋軸方向の結合方式に、

- a) バネ結合方式
- b) ダンパー結合方式

の二つがある。

a) のバネ結合方式は、橋軸の剛性に比べて比較的柔らかいバネで上下部工を結合して、温度、乾燥収縮、クリープなどの変位による応力を緩和し、橋軸方向地震時の水平力は、バネを設けた橋脚に分散して支持しようとするものである。

支承の摩擦を無視すれば、温度応力などは明快に計算され、地震に対しては、平均応答スペクトル法による動的解析、あるいは、修正震度法による静的な耐震設計が可能である。

バネとして鋼索を用いた“SU ダンパー”がこの一例である。

b) のダンパー結合方式は、橋軸方向に一点を固定あるいはバネ固定とし、他の可動支点はダンパー（変位の相対速度に応じて抵抗力を生ずる構造要素）で結合し温度伸縮などのような、変位速度の小さいものは拘束せ

ず、地震時には、ダンパーを設けた橋脚に水平力を分散し、かつ、減衰効果により地震力を低減しようとするものである。

ダンパー方式の場合には、その抵抗力係数（粘性減衰定数）の設定の方法に、

- 1) 上・下部工で構成される振動系に最適減衰を与えて、地震動に対する応答を最小にする方法
 - 2) 抵抗力係数を、1) の場合よりも比較的大きくして、地震力の分散を図るとともに地震力を低減する方法
- の二つの方法が考えられる。

1) は、ダンパーの減衰効果を最大限に利用して、地震による応答値を下げることを重視した“免震構造”の発想であり、油圧シリンダー型オイルダンパーを用いた実施例がある。

2) は、地震力の分散をはかることを主眼とし、大きな抵抗力係数をもったダンパーが、地震時の急速な動きをうけたときに、地震力を可動脚に伝達するとともに力を低減する機能をもつことに着目するものである。

ダンパーとしては大きな抵抗力係数と耐荷力をもつ粘性ストッパーが、この考え方で実施されている。

以下に、粘性ストッパーの構造、機能を紹介するとともに、ダンパーを用いた連続桁の動的挙動を、簡単なモデルについて計算し、その効用を述べる。

2. 粘性ストッパーの構造と機能

粘性ストッパーには、内圧型ストッパーと、粘性せん断型ストッパーの2種類がある。

2.1 内圧型ストッパー

橋脚上面に固定される箱部と、上部工に固定される柱と、粘性材料から成る（図-1 参照）。

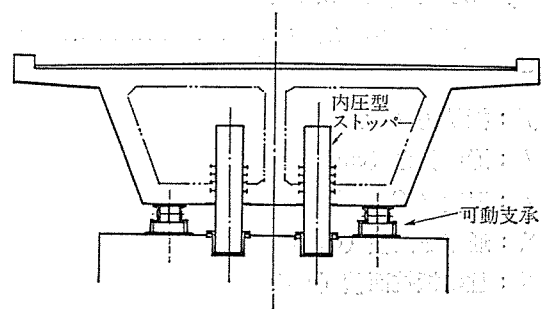


図-1 (a) 橋脚上の設置例

* オイレス工業（株）構造機器本部技術開発部

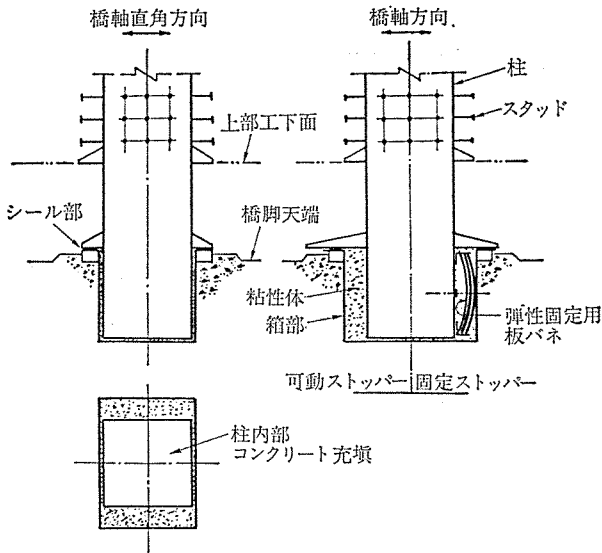


図-1 (b) 内圧型ストッパー構造図

箱部に柱が挿入され、高粘度の粘性体が箱と柱の間に充填されていて、箱の上面と柱との間には、桁のたわみによる回転と、温度伸縮等による水平方向変位を許容しつつ粘性体の内圧を密封するシール機構が設けられている。

上部工と橋脚とが相対変位をすると、充填されている粘性体の流動に伴い、速度に応じた抵抗力（内圧力）を生じ、ダンパーの作用を行うものである。

固定脚用には、橋軸方向の面に必要な強度と剛性をもった板バネを設けて、粘弾性固定とすることができる。

橋脚に埋め込まれる箱部は、水平力が粘性体の内圧によって等分布すると考えられるので、その寸法は、水平力と、コンクリートの許容支圧応力度によって決定できる。

柱は、上部工に埋め込まれた片持梁として、地震時水平力によって設計される。

柱の内部は、通常、現場打ちコンクリートで充填されるので、座屈に関する検算は一般に不要である。

ダンパーとしての特性は(1)式——実験式——で表わされる。

$$f = 52(0.048l + 3.6)(t + 40)^{-1.4} (S_0/S)^{-1.4} \cdot S \cdot v^{0.5} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、

- f : 抵抗力 (kg)
- l : 通路長さ (cm)
- t : 温度 (°C)
- S_0 : 通路総面積 (cm²)
- S : 柱の抵抗面積 (cm²)
- v : 柱と箱部の相対速度 (cm/sec) (図-2 参照)

構造が単純であり、大きな抵抗力係数と耐荷力をもつ

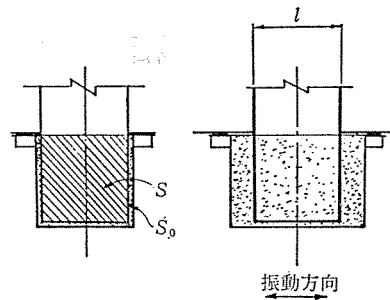


図-2 抵抗力計算式記号図

ことが特徴であり、ダンパーの機能のほか、最終的には落橋防止装置として有効なものである。

また、橋軸直角方向にも、橋軸方向と同程度の粘性抵抗をもつことが実験により確かめられていて、支承の地震時水平力の負担を軽減するものと考えられる。

主として、鉄道橋の PC 桁に多くの実績があり、1個の耐荷力 1000t 程度のもも施工されている。

東北新幹線の多くの実施例が昭和53年の宮城県沖地震の洗礼を受けたが、ストッパーを設けた橋梁の支承部には殆ど被害はなく、その有効性が確認されている。

2.2 粘性せん断型ストッパー

抵抗力発生部分は、互いに微小な間隔を保持しつつ相対する2組の鋼板（固定板と可動板）から成り、そのすきまに、高粘度の粘性体が充填されていて、相対移動速度に応じた抵抗力を生ずる（図-3）。

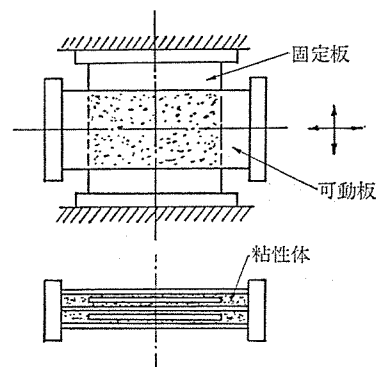


図-3 粘性せん断型ストッパー機構原理

その特性は(2)式——実験式——で表わされる。

$$f = 5S\sqrt{\frac{v}{c}} e^{-0.065(t+40)} \dots\dots\dots(2)$$

ここに、

- f : 抵抗力 (kg)
- S : せん断面の面積 (cm²)
- v : 相対速度 (cm/sec)
- c : すきま間隔 (cm)
- t : 温度 (°C)

構造が単純であり、抵抗力特性が確実なこと、微小振

動に対しても確実に作動すること、形状寸法の自由度が大きいこと、などが特徴である。

橋梁の耐震用のほかにも、走行車両による振動の減衰用に用いられた例、模型桁の振動実験用の超小型ダンパーとしての実施例があり、広い用途に応用可能である。

水平耐荷力は、数 kg から 500 t 程度までのものが可能であり、振動の最小振幅が 0.2 mm 程度にも確実に作動するものが可能である。

図-4 に、鋼連続箱桁用に実施されたものの概略構造図を示す。

多径間連続桁としては、平均支間40mの7径間連続鋼板桁が、阪神高速道路公団によって粘性せん断型ストッパーを用いて現在工事中である。

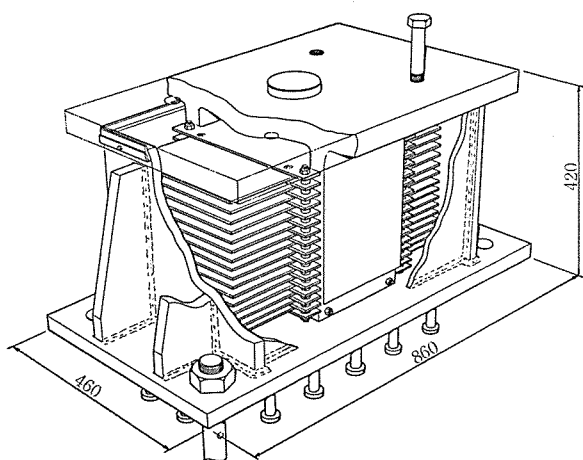


図-4 粘性せん断型ストッパー構造図

- 耐荷力 50 t
- 抵抗力 70 t ($t=15^{\circ}\text{C}$, $v=10\text{ cm/sec}$)
- 移動量 $\pm 130\text{ mm}$
- 重量 660 kg

2.3 粘性体について

粘性ストッパーに使用される粘性体は、コロイド状アスファルトと、炭化水素系の高分子材料を主成分とし、特殊な添加剤を加えた“オイルレス SA 粘性体”である。

品質の耐久性、安定性については、物理、化学的基礎物性試験をはじめとして、薬品に対する溶解性、酸素吸収度、鋼材に対する腐食性、耐熱耐寒性、熱サイクル安定性、粘性せん断耐久性など、各種の試験によって、一般の供用条件下において、少なくとも 50 年以上の期間にわたって、初期の性能を維持しうるものと考えている。

3. ダンパーの効用

粘性ストッパーなどのダンパーを設けた系の運動方程式は (3) 式で表わされる。

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = -\ddot{Z}[M]\{I\} \dots\dots\dots(3)$$

ここに、

- [M]: 質量マトリックス
- [C]: 減衰マトリックス
- [K]: 剛性マトリックス
- \ddot{Z} : 地震動の加速度
- {q}: 変位ベクトル
- {I}: 単位ベクトル

ダンパーの効果は、その抵抗力係数をパラメーターとして (3) 式を解けば明らかになるであろうが、ダンパーをもった系では、一般に減衰マトリックスがモーダルマトリックスとの直交性をもたないために、応答スペクトル法などのモード分解法が適用できず、直接積分法、複素固有値解析などの煩雑な方法によらねばならないので、ダンパーの効果の見通しは困難である。

ここでは、簡略化した振動モデルについて、ダンパーの抵抗力係数をパラメーターとして、自由振動と、地震応答を計算し、ダンパーの効果をみることにする。

図-5 の橋梁モデルを、図-6 の振動系にモデル化する。

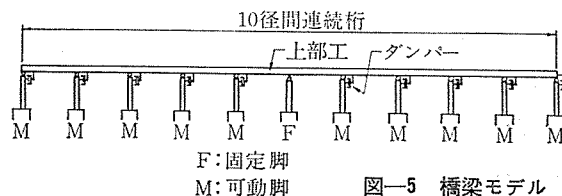


図-5 橋梁モデル

る。記号は以下のとおりである。

- M: 上部工の質量
- m_1 : 固定脚の上部の質量
- m_2 : 可動脚の上部の質量の和
- K_1 : 固定脚天端のバネ定数
- K_2 : 可動脚天端のバネ定数の和
- C: ダンパーの等価線形抵抗力係数の和
- C_1 : 固定脚の構造減衰の換算抵抗力係数
- C_2 : 可動脚の構造減衰の換算抵抗力係数

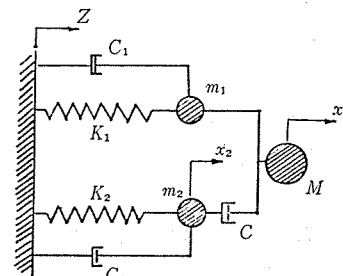


図-6 振動モデル

なお、各可動橋脚の水平バネ定数および脚上部の質量はすべて同一であることを仮定し、同じ能力のダンパーが設けてあるものとしている。

運動方程式は (4) 式のようになる。

$$\begin{bmatrix} M+m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_1 \\ \ddot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C+C_1 & -C \\ -C & C+C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = -\ddot{Z} \begin{bmatrix} M+m_1 \\ m_2 \end{bmatrix} \dots\dots(4)$$

(1) 自由振動

(4) 式において、 $\ddot{Z}=0$ として、適当な初期条件のも

耐震設計

とに、直接解けば、 x_1, x_2 は次のような形になる。

$C < C_{cr}$ のとき

$$x_1 = F_1 e^{-p_1 t} \sin(q_1 t + \varphi_1) + F_2 e^{-p_2 t} \sin(q_2 t + \varphi_2) \dots\dots\dots (4.1)$$

$$x_2 = G_1 e^{-p_1 t} \sin(q_1 t + \xi_1) + G_2 e^{-p_2 t} \sin(q_2 t + \xi_2) \dots\dots\dots (4.2)$$

$C \geq C_{cr}$

$$x_1 = H \cdot e^{-pt} \sin(qt + \varphi) \dots\dots\dots (4.1')$$

$$x_2 = I \cdot e^{-pt} \sin(qt + \xi) \dots\dots\dots (4.2')$$

C_{cr} は、簡単な式では表わせないが、定性的には次のように理解できる。

C が小さいときには、 $(M+m_1) \sim K_1$ 系と、 $m_2 \sim K_2$ 系は、相互に殆ど無関係に自由振動するが、 C が大きくなってくると互いに連成しあい、ついには、 $(M+m_1+m_2) \sim (K_1+K_2)$ 系の自由振動になるであろう。 $C=C_{cr}$ は、その境界と考えられる。

また、 $e^{-pt} \sin qt$ の形の振動の減衰定数 h は

$$h = \frac{p}{\sqrt{p^2 + q^2}}$$

与えられるが、ある C に対して、 h の最大になる点があるとすれば、それが一種の最適抵抗力係数であろうと考えられる。

これらは、解析的には容易に求められないので、後に数値計算例で示す。

(2) 地震応答計算

(4) の右辺 \ddot{Z} の項に地震の加速度波形を入力して、数値積分を行い、応答値を求める。

(3) 数値計算例 (10 径間連続桁)

$$M=10\,000 \text{ t/g}, m_1=300 \text{ t/g}, m_2=3\,000 \text{ t/g},$$

$$K_1=300 \text{ t/cm}, K_2=3\,000 \text{ t/cm}$$

構造減衰 2%

$C=(0.01 \sim 50) \times 10^4 \text{ t} \cdot \text{sec/m}$: パラメーター, g : 重力の加速度

上記の設定で計算する。

系の固有周期

$$(M_1+m_1) \sim K_1 \text{ 系}, T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{M_1+m_1}{K_1}} = 1.177 \text{ sec}$$

$$m_2 \sim K_2 \text{ 系}, T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{m_2}{K_2}} = 0.201 \text{ sec}$$

$(M_1+m_1+m_2) \sim (K_1+K_2)$ 系,

$$T_3 = 2\pi\sqrt{\frac{M_1+m_1+m_2}{K_1+K_2}} = 0.403 \text{ sec}$$

図-7 に、自由振動の周期、減衰定数と、抵抗力係数の関係を示す。

図-8 に、El Centro および十勝沖地震波による橋脚の応答水平力を、固定、可動、各一橋脚当りで示す。

(4) 考 察

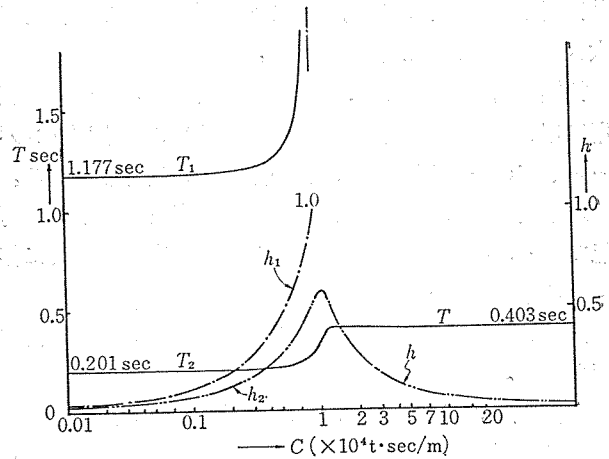


図-7 抵抗力係数 (C) と固有周期 (T), 減衰定数 (h) の関係

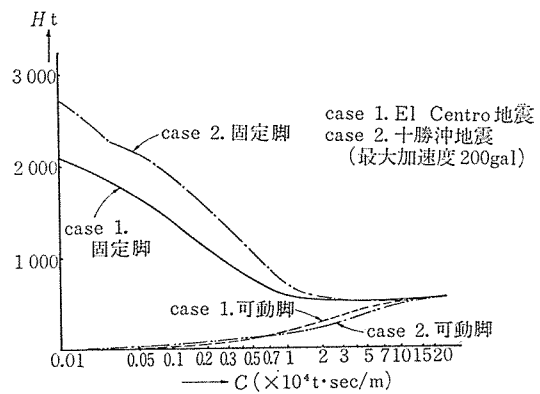


図-8 抵抗力係数 (C) と橋脚一基当りの地震時水平力 (H) の関係

- 1) $C_{cr} \doteq 10\,000 \text{ t} \cdot \text{sec/m}$ は、 $K_2 = \infty$ の場合の、臨界減衰定数 $2\sqrt{(M+m_1) \times K_1} = 11\,230 \text{ t} \cdot \text{sec/m}$ に近い値であり、これは $K_1 : K_2 = 1 : 10$ と、可動脚の剛比が高いためと考えられる。また T_1 の振動が消失する理由も理解される。
- 2) C の広い範囲にわたって、減衰自由振動の周期は $C=0$, あるいは $C=\infty$ のものに極めて近い。
- 3) 減衰定数は $C=C_{cr}$ の付近で最大であり、 $h \doteq 0.6$ と高い値を示すが、以後 C の増加につれて減少する。
- 4) 地震時水平力は、固定脚では C_{cr} まで急激に減少するが、以後、一定値を保つ。可動脚では、 C の増加とともに漸増し、 C の十分大きいところで、固定脚と同じ値になっていく。
- 5) この計算でダンパーの抵抗力係数を設定する場合には、最適減衰としては $C=C_{cr}$, 分散を主眼とすれば $C \doteq (5 \sim 7) \times C_{cr}$ 程度と考えられよう。
- 6) 実施設計においては、本例程度の簡単なモデルで試算を行ったうえで、詳細な多質点モデルで確認の計算を行えばよいと思われる。二、三の例では、本例程度

の計算でも5%程度の誤差でよく一致している。

4. あとがき

構造物の耐震装置としてダンパーを用いる場合には、何らかの動的な検討を行ったうえでその特性を設定し、地盤を含めた上下部工の構造系全体の耐震性を評価し確かめなければならない。

現在、動的応答を考慮した耐震設計法として、修正震度法、平均応答スペクトル法などが、多くの不確定要因の検討と、過去の経験のうえに立って公に基準化されているが、ダンパーを用いた場合にはそのような基準もなく、また、これらの方法も、そのままでは適用できないので、直接積分法や、複素固有値解析などの、煩雑な方法によらなければならない。

この場合には、入力地震波の選定、構造系のモデル化、構造減衰の評価と取扱いなどによって、応答値が大きく変動する可能性があるため、設計にあたっては、現行の基準、指針の規定の根拠をふまえた工学的判断が必要であると考えられる。

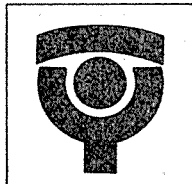
今後、耐震装置の開発とあいまって、実用的な動的設計法の研究開発が望まれる。

参考文献

1) 野口功, 尾坂芳夫, 石黒吉男: 瀬田川橋梁の設計と施工,

プレストレストコンクリート, Vol. 9. No. 3. 1967.7

- 2) 小須田紀元: PC 桁のストッパー設計, 構造物設計資料, No. 32. 1972.12
- 3) T. Kitto, J. Kodera, K. Ujiie, H. Tada: A New Type Shock Absorber and its Effects on the Response of the Bridge to the Earthquake; Proceedings of 5 WCEE, 1973.6
- 4) 窪田元依, 前原康夫: 塩津橋梁の支承構造, 土木技術, Vol. 28. No. 9. 1973.9
- 5) Bridge and Structural Committee, JSCE: Earthquake Engineering For Bridges
- 6) 石黒吉男, 宮崎修輔ほか: プレストレスト コンクリート 構造物の設計実技, プレストレストコンクリート 技術協会講習会資料, 1974.11
- 7) 野口 功: 土木におけるプレストレスト コンクリートの現状と将来, コンクリート工学, Vol. 13. No. 7. 1975.7
- 8) 石黒, 小須田, 前原, 下田: 粘性せん断型ストッパーについて, プレストレストコンクリート技術協会第15回研究発表会講演概要, 1975.11
- 9) 石黒吉男, 前原康夫: プレストレスト コンクリート橋に用いる粘性せん断型ストッパーについて, プレストレストコンクリート Vol. 18. No. 3. 1976.6
- 10) 菊地貞博: 橋梁耐震用 オイルダンパーの計画および性能実験, 土木技術 Vol. 17. No. 3. 1962.3
- 11) 上前行孝: ダンパ方式による橋梁耐震設計法の研究, 1970.3
- 12) 西山啓伸, 小寺重郎: 橋りょうの耐震設計計算例, 1977.5 (山海堂)
- 13) 福岡 悟: 大阪西宮線 吉野・玉川工区, 阪神高速道路公団社内報, 1979. 7



橋梁・構造物の安全に役立つ オイルス支承・ストッパー

日本支承協会会員

OILES オイルス工業株式会社

東京都港区新橋2-1-1山口ビル
〒105 TEL03-501-1261

[営業所]

東京: TEL03-501-1261

大阪: TEL06-448-2533

名古屋: TEL052-582-6531

福岡: TEL092-441-9298

広島: TEL0822-28-2719

静岡: TEL0542-53-9196

金沢: TEL0762-63-8636

小山: TEL0285-24-3179

[工場]: 藤沢・大和・滋賀

ステンレス鋼高硬度ローラー支承

コ ロ ウ エ ル ド 支 承

高力黄銅支承板支承(BP・A支承)

ベ ア リ ン グ プ レ ー ト 支 承

密閉ゴム支承板支承(BP・B支承)

ネ オ ト ッ プ ・ ネ オ ト ッ プ グ ラ イ ト 支 承

各種ゴム支承

オ イ レ ス ハ イ コ ン パ ッ ド

脱落防止・水平力分散装置

オ イ レ ス ス ト ッ パ ー

一般支承

線 支 承 ・ ピ ン 支 承 ・ ピ ボ ッ ト 支 承 等