

**落橋防止構造設計  
ガイドライン(案)の概説**

**落橋防止構造で想定する地震の影響と性能目標**

**落橋崩壊形を想定した落橋防止構造の設計への一提案**



**PWRC** 財団法人 土木研究センター  
Public Works Research Center

**ガイドラインの位置付け**

“平成14～16年度・落橋防止構造に関する研究委員会”での**検討成果**（行政的に通達された基準ではない）

**落橋防止構造の設計に活用するという視点で取りまとめたもの**

①落橋防止構造に求められる機能  
②設計の基本的な考え方

**落橋防止構造設計ガイドライン(案)  
目次**

1. 一般
2. 落橋防止で想定する地震の影響と性能目標
3. 落橋防止構造の設計
4. 落橋防止構造のモデル化と保有耐力／変形性能
5. 落橋防止構造の性能試験

**1. 一般**

本ガイドライン(案)は、**落橋防止構造に期待される性能とこれを担保するための設計法を示すものである。**

**落橋防止構造の要求性能＝  
落橋させないこと**

落橋させないために何が**必要か**については、  
十分検討されてこなかった。

- ①コストが小さい・2次部材
- ②平成8年道路橋示方書以前は弾性設計法
- ③平成8年道路橋示方書

**レベル2地震動を上まわる地震動**  
**想定外の地震としてどのような地震力**  
**を落橋防止構造に見込むべきか**  
**が定められていない。**

**2. 落橋防止で想定する地震  
の影響と性能目標**

**2.1 落橋防止に想定する  
地震の影響**

**2.2 落橋防止に対する  
性能目標**

**2.1 落橋防止に想定する地震の  
影響**

落橋防止構造には、**通常的设计**  
**で想定される地震の影響を上回**  
**る地震力を受けた場合にも落橋**  
**を防止することが求められる。**  
**地震の影響としては、**

**2.1 落橋防止に想定する地震の  
影響**

- 1) **終局照査用地震動**
  - a) 終局照査用加速度応答スペクトル
  - b) 終局照査用設計水平震度
- 2) **大規模な地盤の液状化・  
流動化・地盤破壊**
- 3) **断層変位**

**【現在の技術基準の規定】**  
**安全性照査用設計地震動**に対して橋が**所要の耐震性を有するように設計する**行為が規定されている。

- ・地震時保有耐力法
- ・レベル2地震動に対する動的解析

**【落橋防止構造に求められるもの】**

- ・安全性照査用設計地震動を上回る**終局照査用地震動**に対して**落橋を防止する**
- ・耐震設計という手順化されたプロセスとして**直接的に考慮されていない事象**に対して**落橋を防止する**

**2.1 落橋防止に想定する地震の影響**

- 1) **終局照査用地震動**
- 2) **大規模な地盤の液状化や流動化**
- 3) **大規模な斜面崩壊等による地盤破壊**
- 4) **断層変位**

**『終局照査用地震動』に対する落橋防止構造の設計法**  
⇒**本ガイドライン**

**『大規模液状化や流動化、大規模な斜面崩壊等による地盤破壊』**  
⇒**路線変更といったより広い立場に基づく構造変更等の対応**

**『断層変位』**  
⇒**今後の研究の進展に期待**

**終局照査用地震動をどう定めるか**

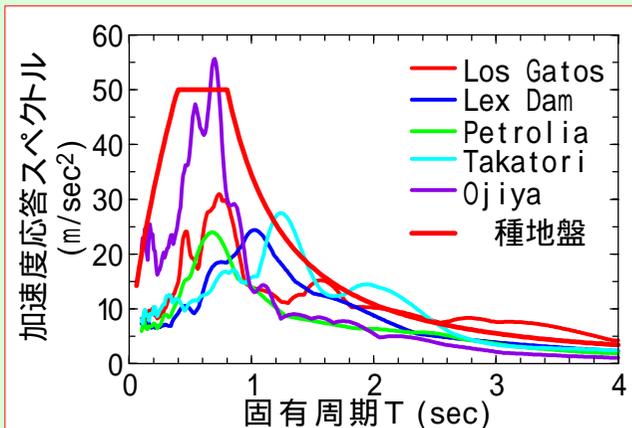
現在までに得られている代表的な国内外の断層近傍地震動から応答スペクトル特性を求め、これを安全側に包絡して設定

**終局照査用標準加速度応答スペクトル**  
**終局照査用設計水平震度の標準値**

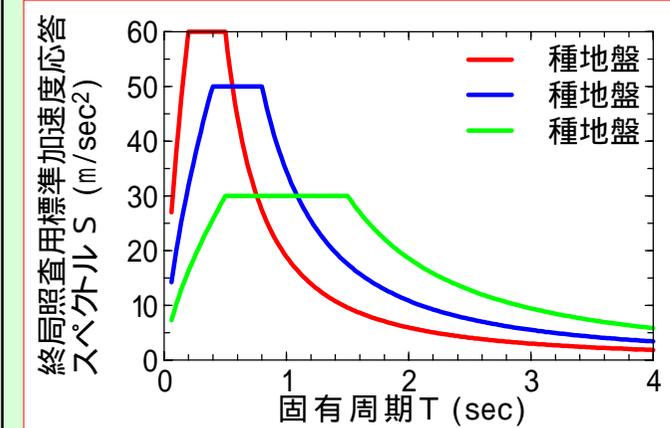
**表解2.1-1 安全性照査用設計地震動と終局照査用地震動**

|        | 安全性照査用設計地震動   | 終局照査用地震動  |
|--------|---|---|
| 地震動の性格 | 現在の耐震設計基準で考慮されているレベル2地震動  | レベル2地震動を上まわる、その地点で生じる可能性のある最大地震動<br>Maximum Credible Earthquake |
| 地震動の特徴 | 1923年関東地震の際に東京で生じたであろう地震動と1995年兵庫県南部地震の際に神戸で生じた地震動を基本とし、これに地震活動度や断層活動度等に基づいて地域別補正係数で補正した地震動 | 建設地点とその周辺で想定される発生可能性のある最大地震動による地震動で、場所によっては、マグニチュード8クラスの断層近傍地震動 |

**断層近傍地震動 II 種地盤**



**終局照査用標準加速度応答スペクトル**

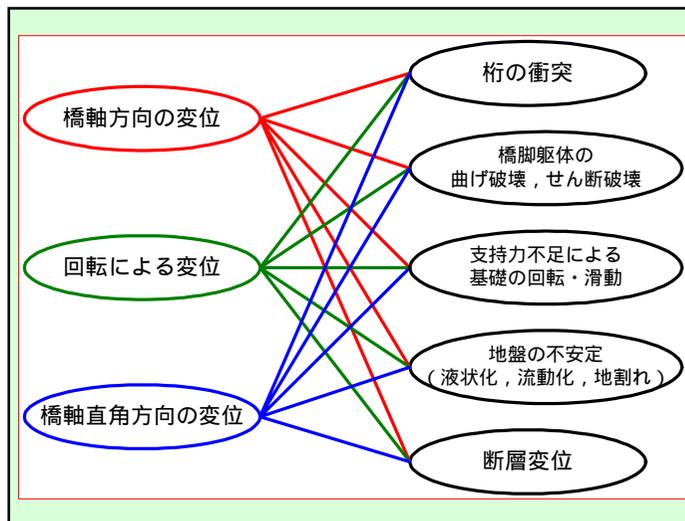


## 2.2 落橋防止に対する性能目標

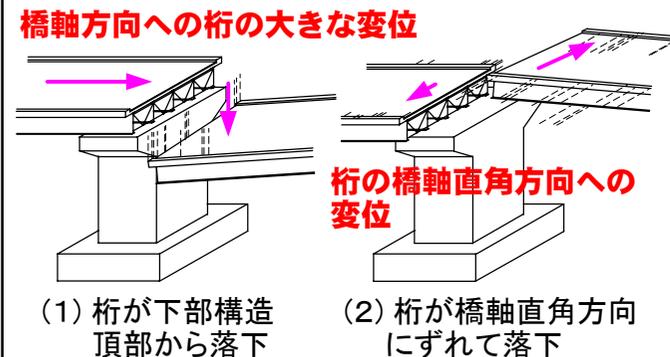
- (1) 落橋損傷モード
- (2) 落橋防止に対する性能目標
- (3) 地震動の3方向同時作用の影響

**終局照査用地震動を受けた場合に落橋を防止する。**  
**どう落橋するか？≡落橋損傷モード**

- 1) 橋軸方向の上下構造間の過大な相対変位
- 2) 上部構造間に生じる過大な回転
- 3) 橋軸直角方向の上部構造間の過大な相対変位



### 落橋損傷モードの一例



**落橋損傷モードの一例**

傾斜

橋脚躯体に生じる大きな損傷

横梁のせん断座屈

(3) 下部構造が損傷し桁が下部構造頂部から落下

**落橋損傷モードの一例**

桁の引張り+回転

桁の衝突+回転

橋梁の3次元的な振動に起因

(4) 桁が桁端の一方の角部から先行して下部構造頂部から落下

**2.2 落橋防止に対する性能目標**

(1) 落橋損傷モード

(2) 落橋防止に対する性能目標

(3) 地震動の3方向同時作用の影響

**2.2 落橋防止に対する性能目標**

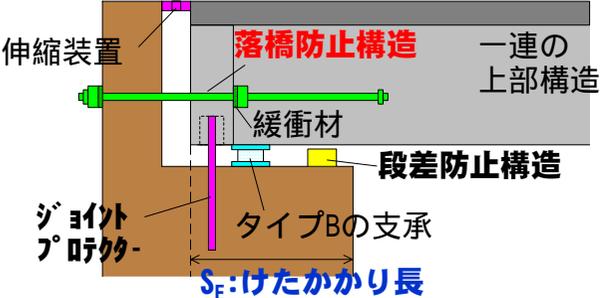
(2) 落橋防止に対する性能目標

1) 上部構造が下部構造から逸脱しないように変位を拘束する。

2) 上部構造が下部構造から逸脱した状態でも、上部構造の落下を防止できるようにする。

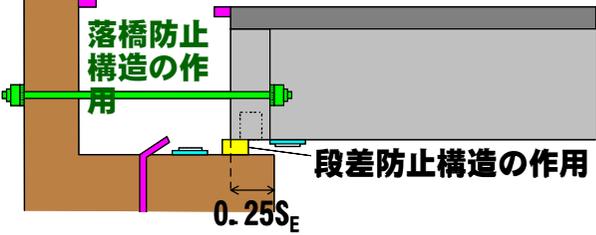
**道路橋示方書V耐震設計編16.3**  
**落橋防止構造の設計変位係数 $C_F$**   
**標準値 0.75**  
**落橋防止構造の設計遊間量**  
 <けたかかり長  
**落橋防止構造の遊間量が過大**  
 ⇒**支承部の機能や維持管理に**  
**障害にならない範囲で $C_F$ を**  
**標準値よりも小さくしてよい。**

**道路橋示方書V耐震設計編16.3**



**道路橋示方書V耐震設計編16.3**

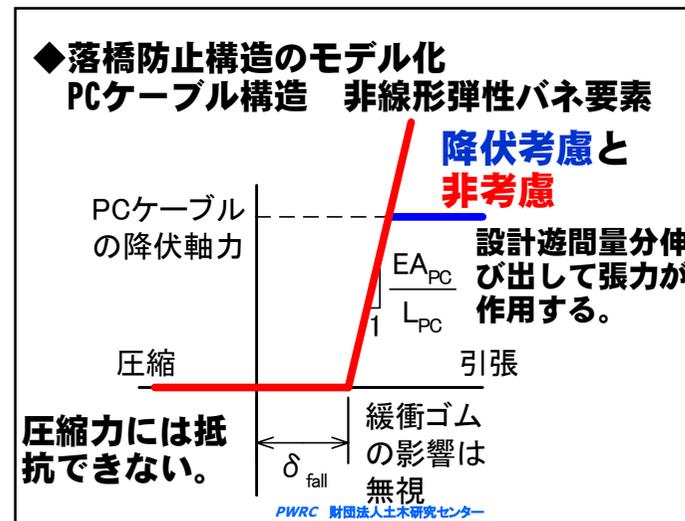
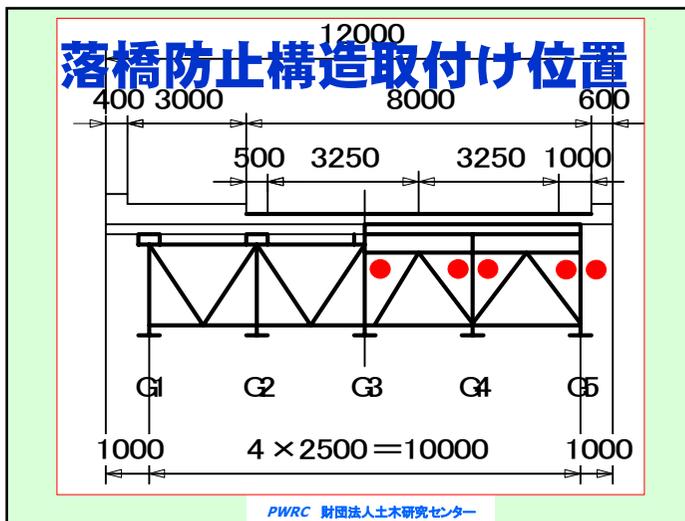
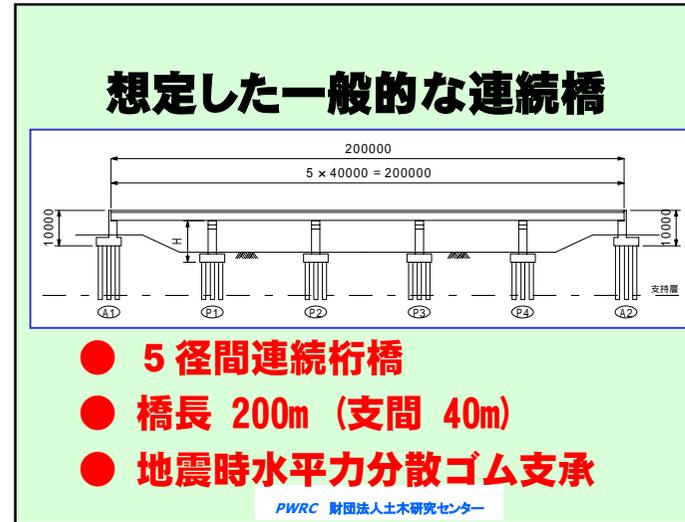
**支承破壊後の状況**  
**(落橋防止構造作用時)**

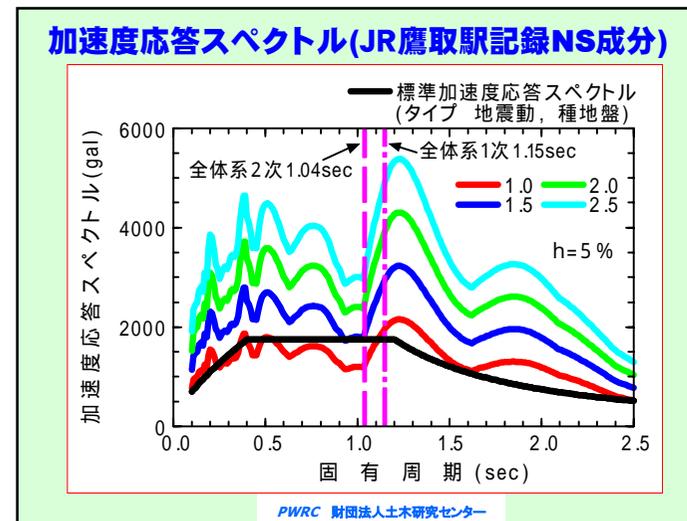
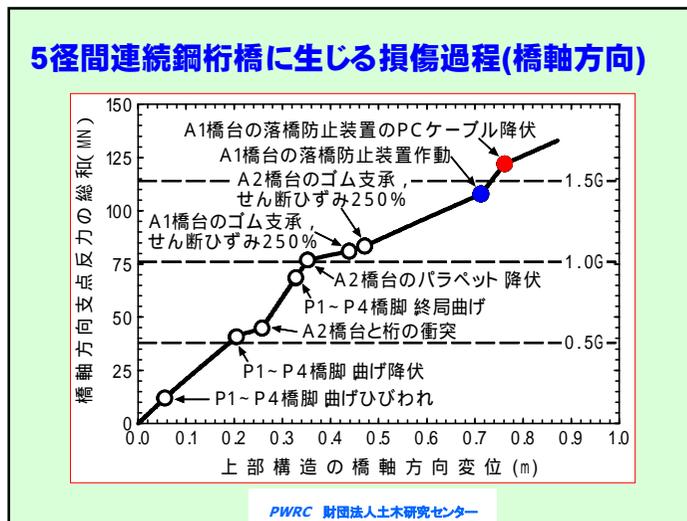
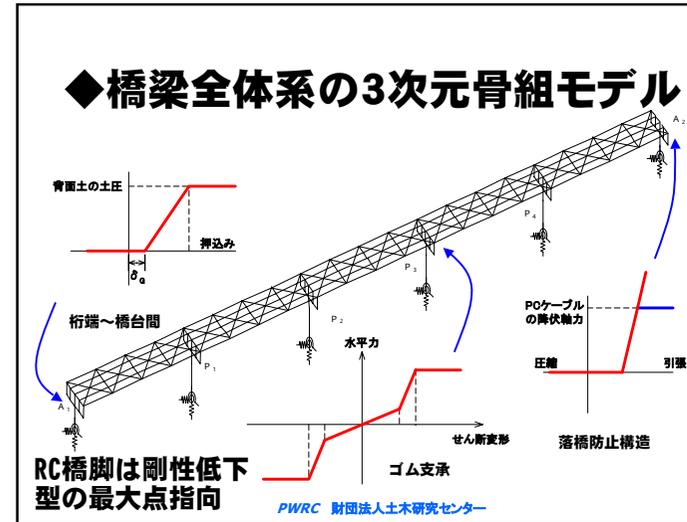
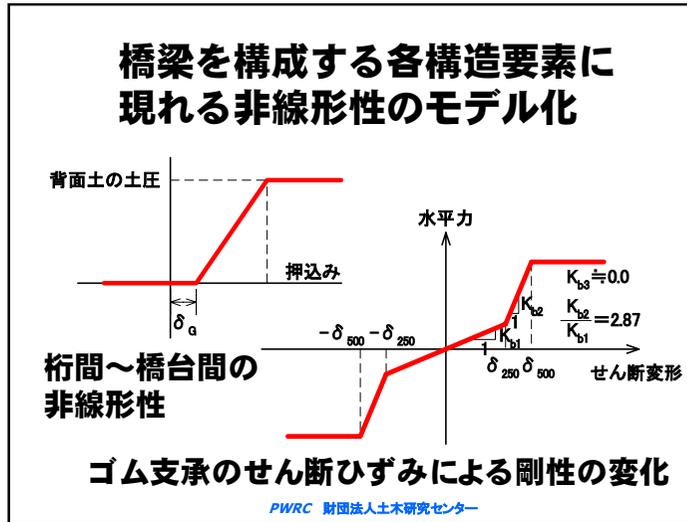


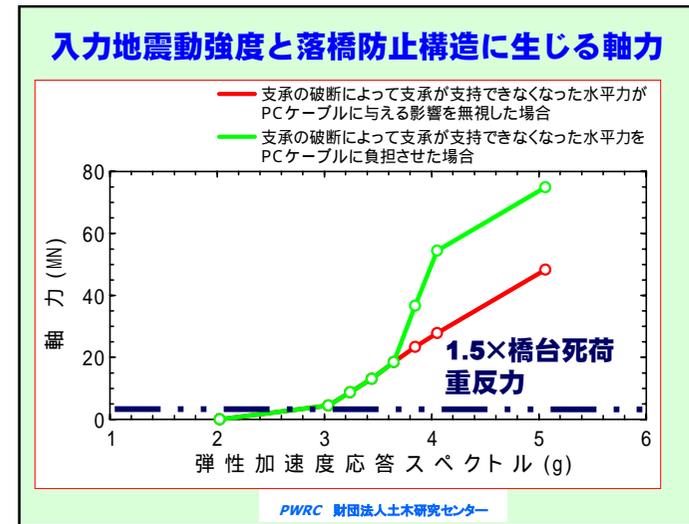
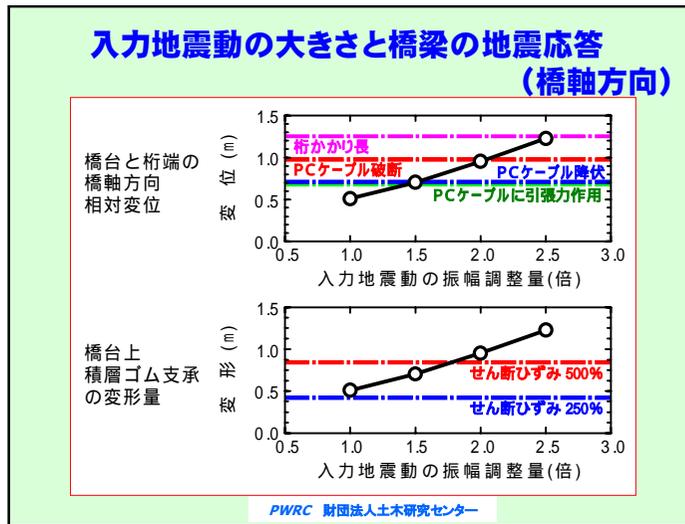
**設計変位係数 $C_F$ としてどの程度**  
**の値が望ましいか**  
**本来ならば、**

- ① **橋の特性**
- ② **落橋損傷モード**
- ③ **橋に求められる性能目標**

に基づいて定められるべきもの  
 ⇒ **今後の技術的蓄積が必要**







### 解析より得られた知見

- ◆入力地震動が**レベル2地震の2倍程度**になると、**落橋防止構造の張力は降伏耐力を上回る可能性**がある。
- ◆落橋防止構造が**桁に生じる変位を抑制**しても、**橋脚に大きな損傷が生じると桁落下を回避できない可能性**がある。
- ◆各部材に生じる損傷との関係を考慮しないと**落橋防止構造がフェイルセーフ機構として機能しない恐れ**がある。

PWRC 財団法人土木研究センター

### 2. 2落橋防止に対する性能目標

#### (2) 落橋防止に対する性能目標

- 1) 上部構造が下部構造から逸脱しないように変位を拘束する。
- 2) 上部構造が下部構造から逸脱した状態でも、上部構造の落下を防止できるようにする。

**2. 2 落橋防止に対する性能目標**  
**(2) 落橋防止に対する性能目標**

傾斜  
 下部構造が損傷し、桁が下部構造頂部から落下する。  
 ケーブルが鋭角な突起部を境に両方向から引っ張られる。

**2.2 落橋防止に対する性能目標**

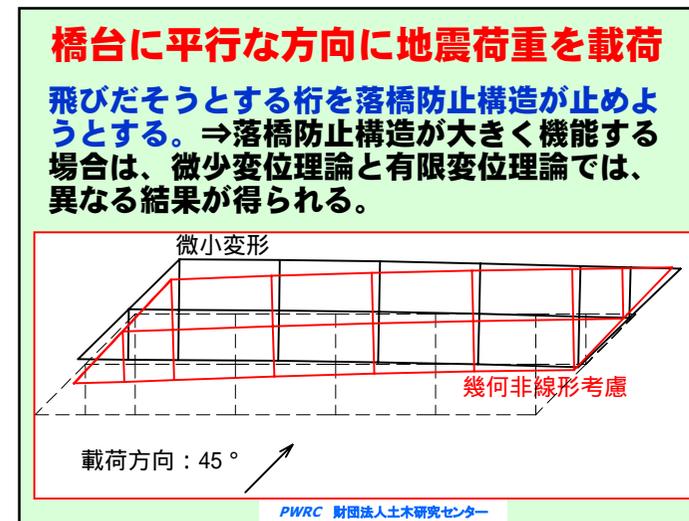
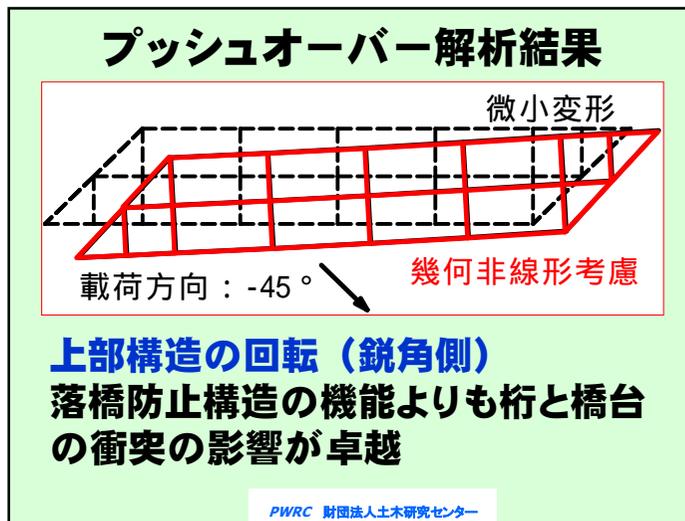
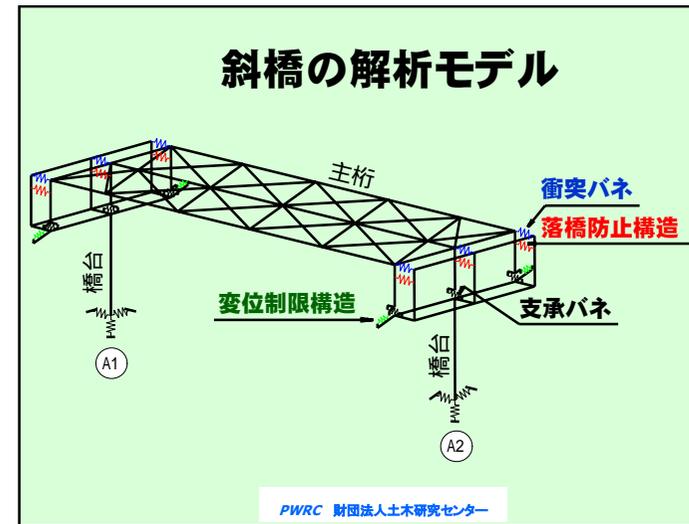
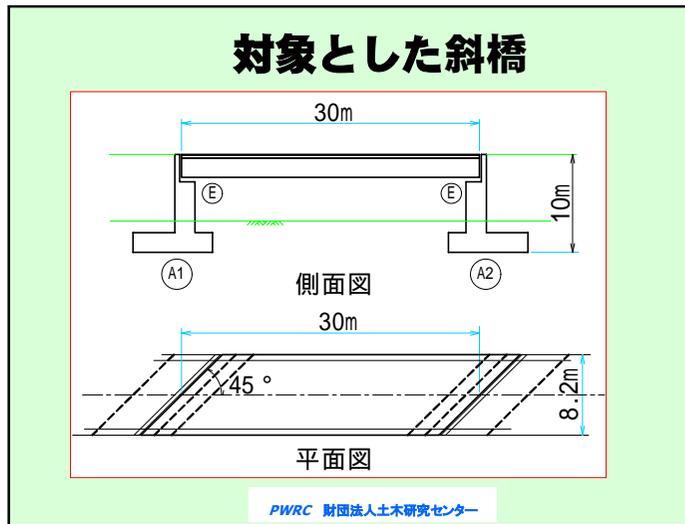
- (1) 落橋損傷モード**
- (2) 落橋防止に対する性能目標**
- (3) 地震動の3方向同時作用の影響**

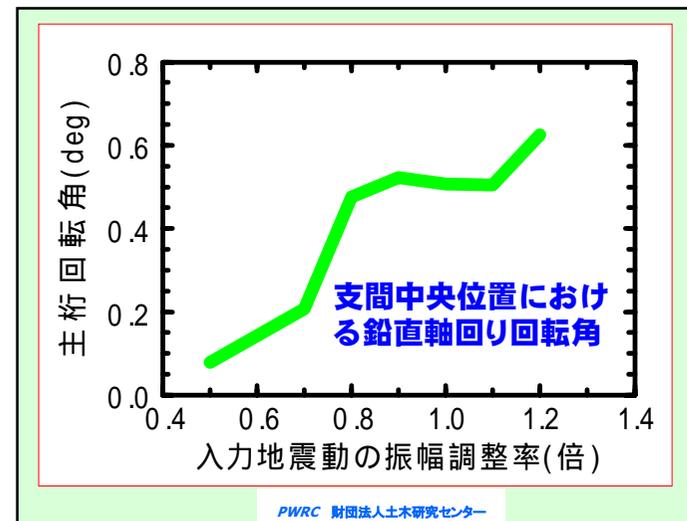
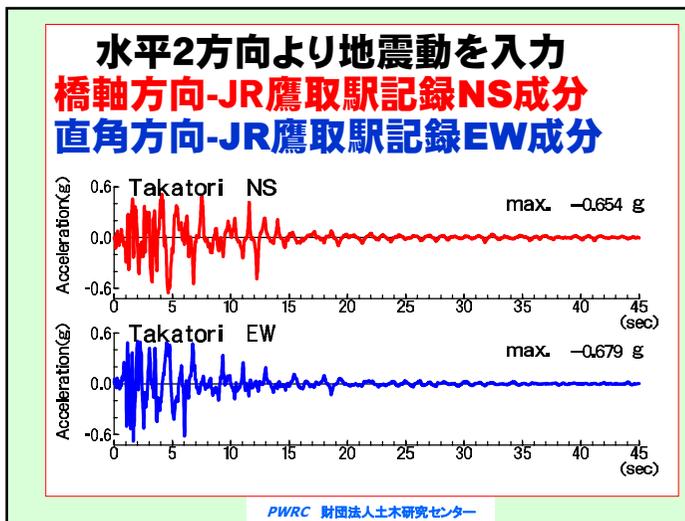
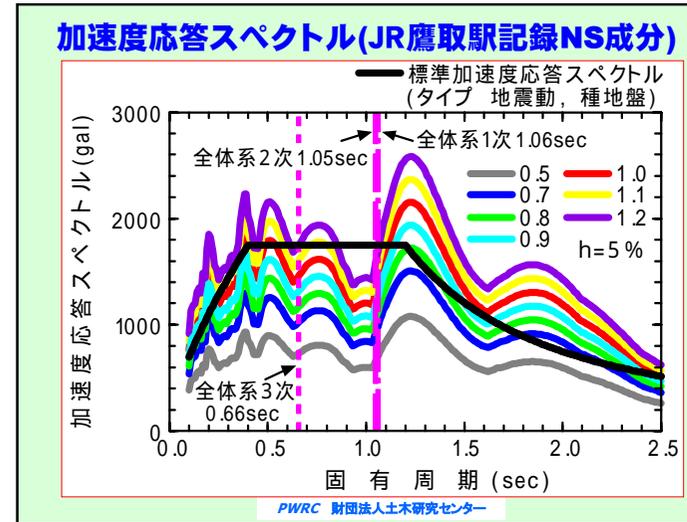
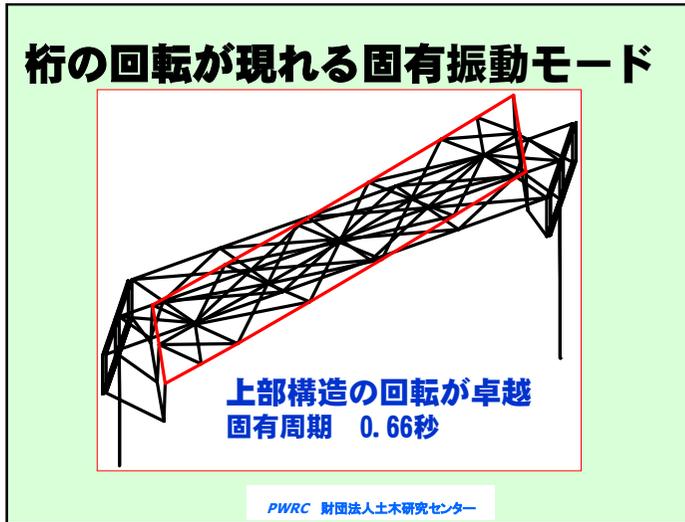
**3方向から作用する地震動によって生じた被災事例**

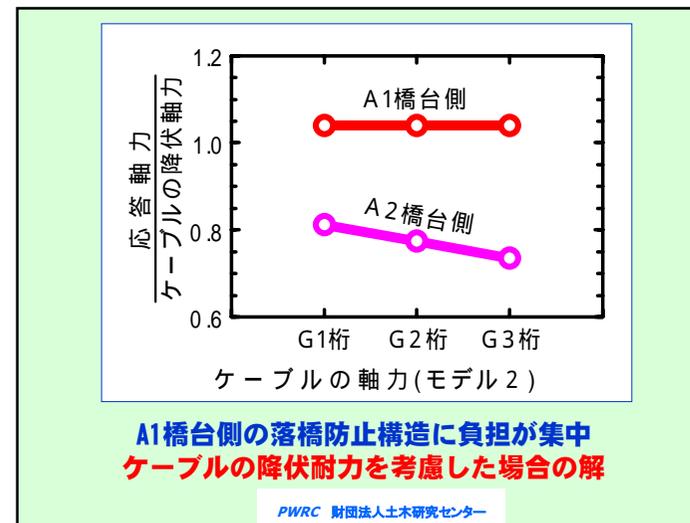
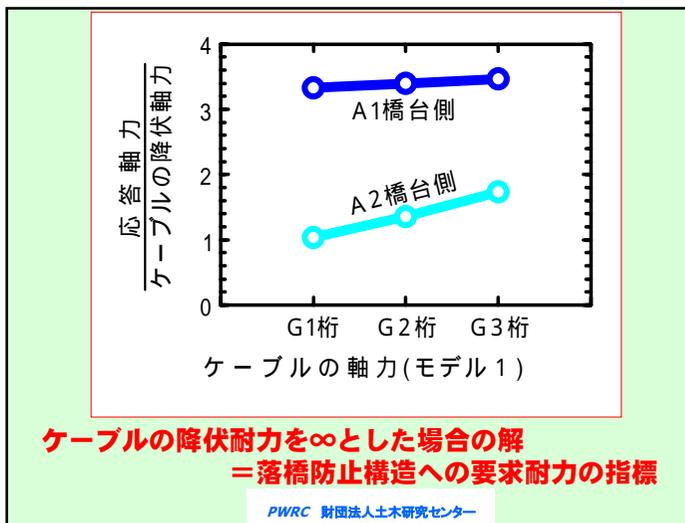
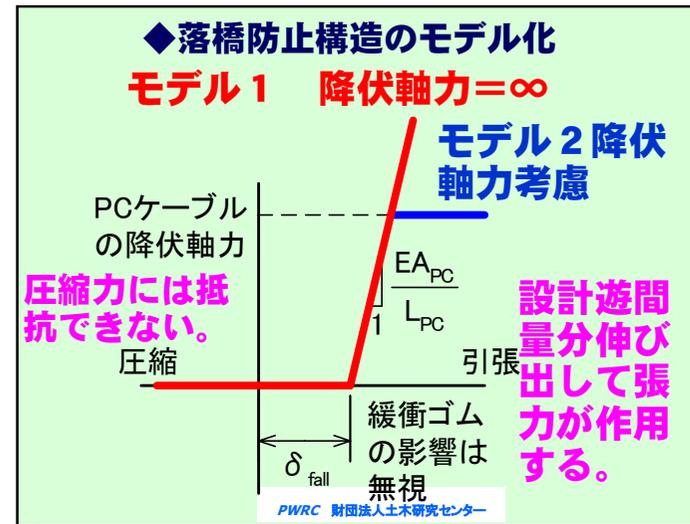
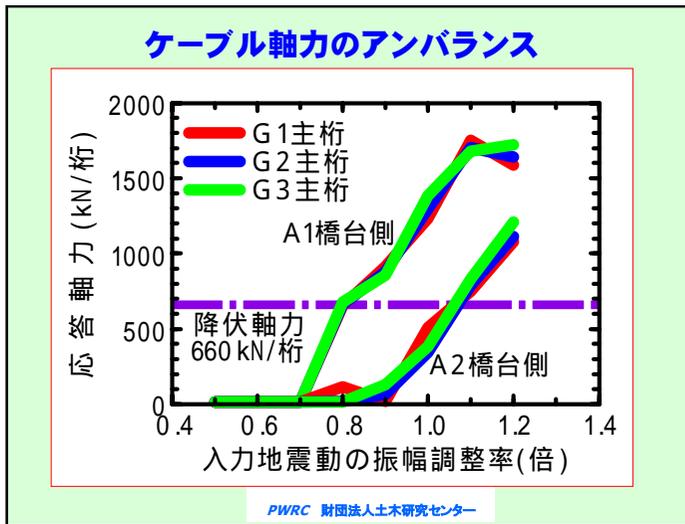
**橋梁の3次元的な振動が落橋防止構造に与える影響**  
**斜橋と曲線橋**  
 上部構造に水平移動や回転が生じた場合、落橋防止構造の作用力や変形は？

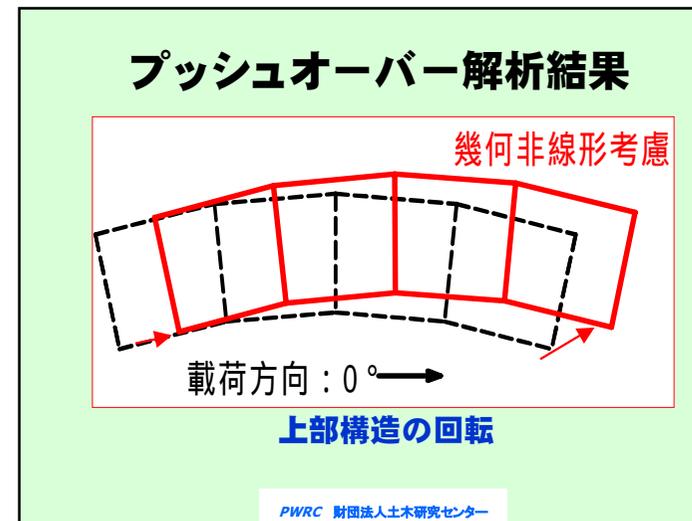
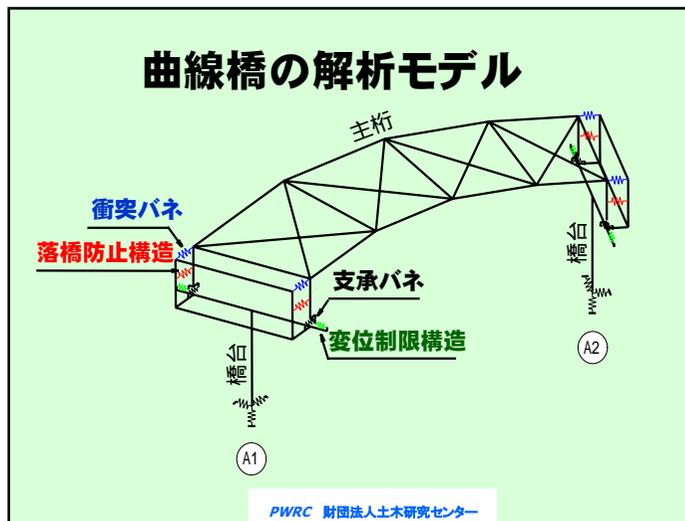
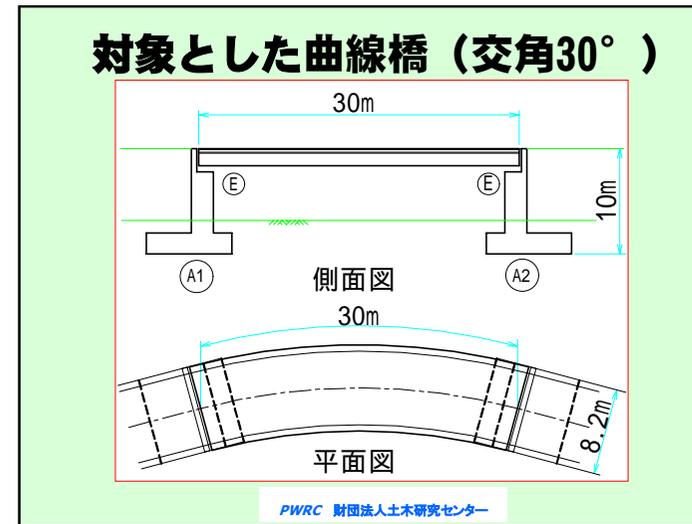
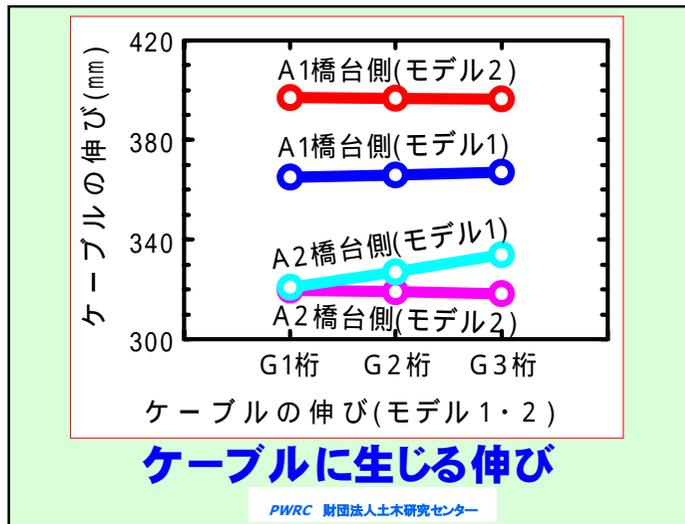
変位  
 回転  
 張力差  
 ゆるみ

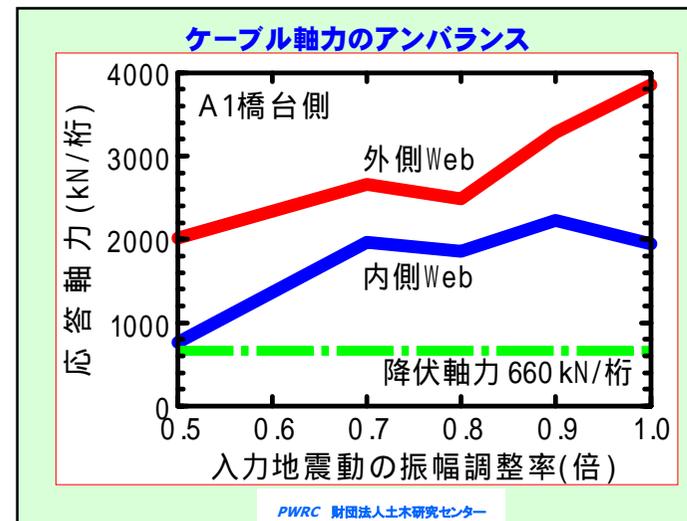
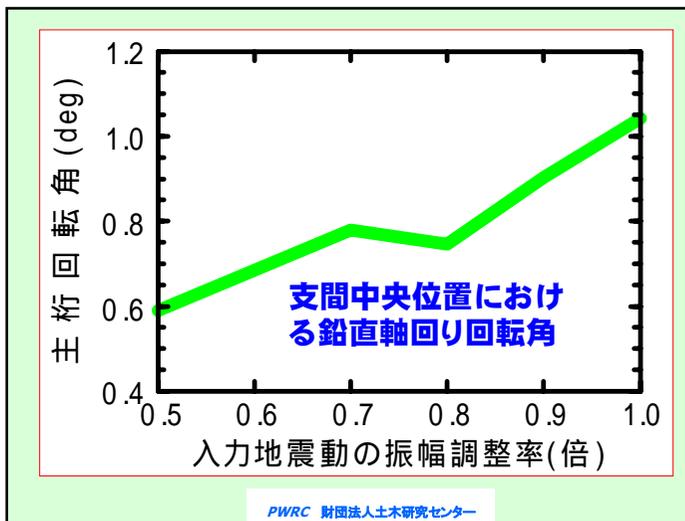
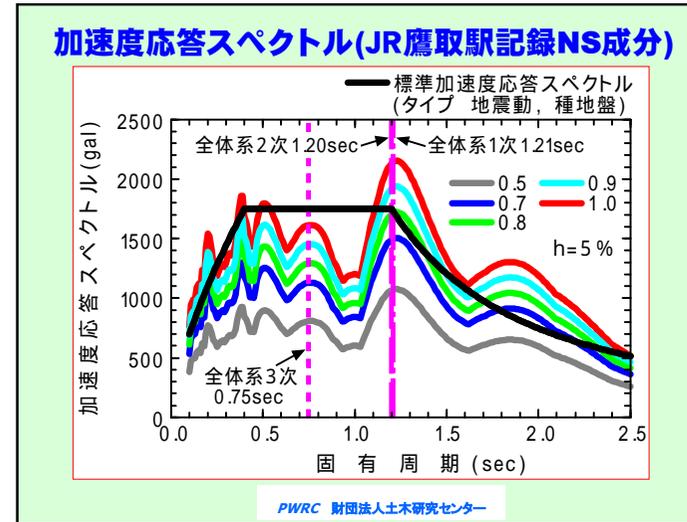
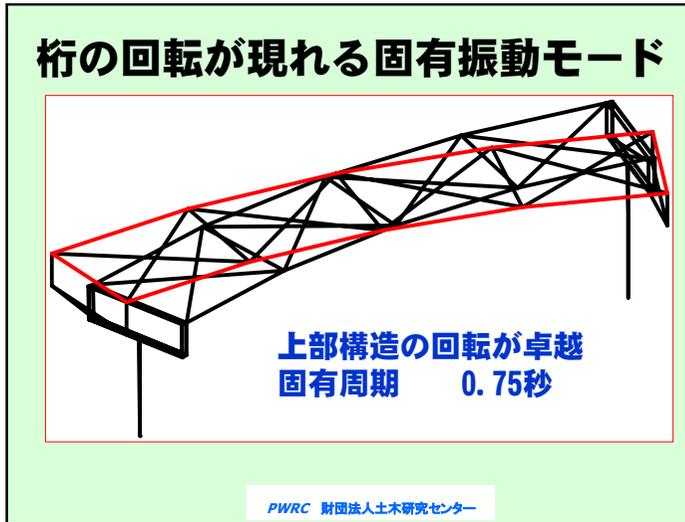
PWRC 財団法人土木研究センター











斜橋と曲線橋の解析より得られた知見

◆落橋防止構造ケーブルが機能する方向にプッシュオーバー解析を行う場合は、有限変位理論によらないと、その挙動を正しく追跡することができない。

◆鉛直軸周りの桁の回転が生じる。その結果、各々の落橋防止構造ケーブルに作用する軸力が均等とまらない。

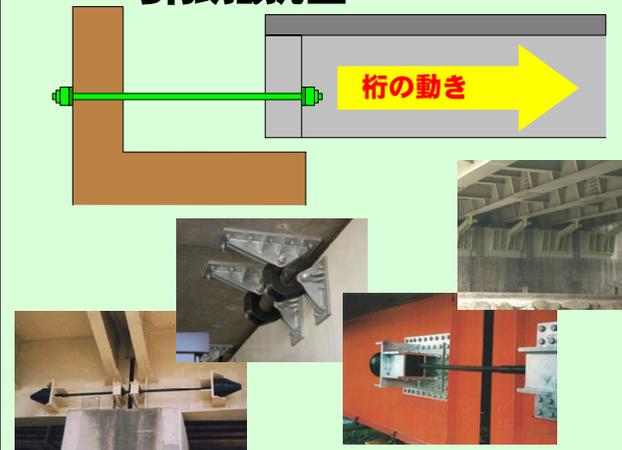
PWRC 財団法人土木研究センター

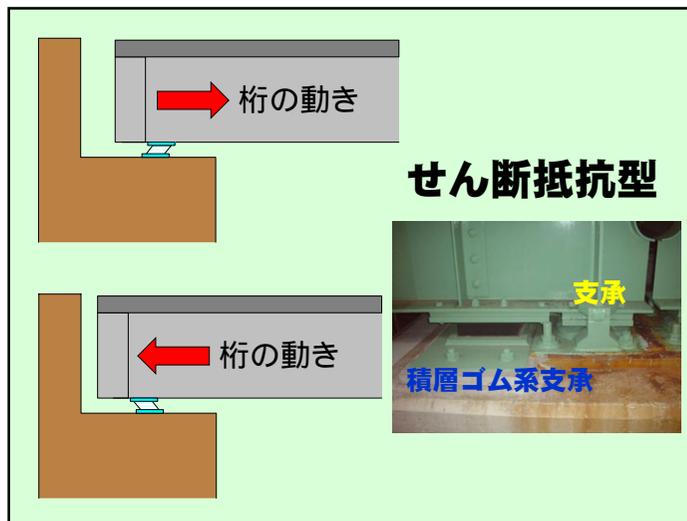
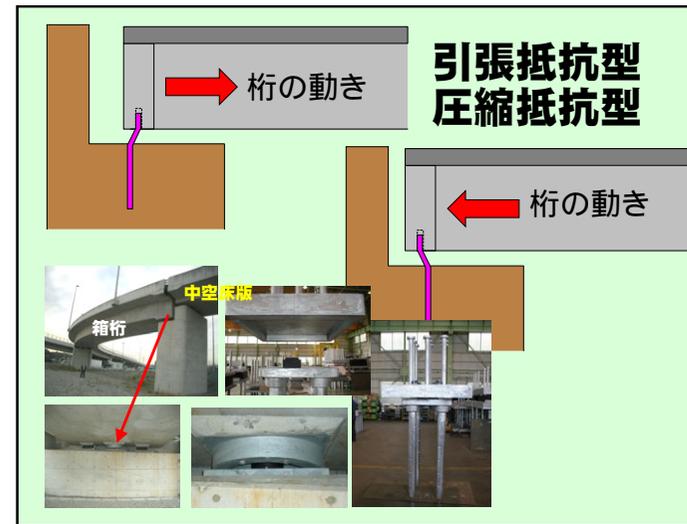
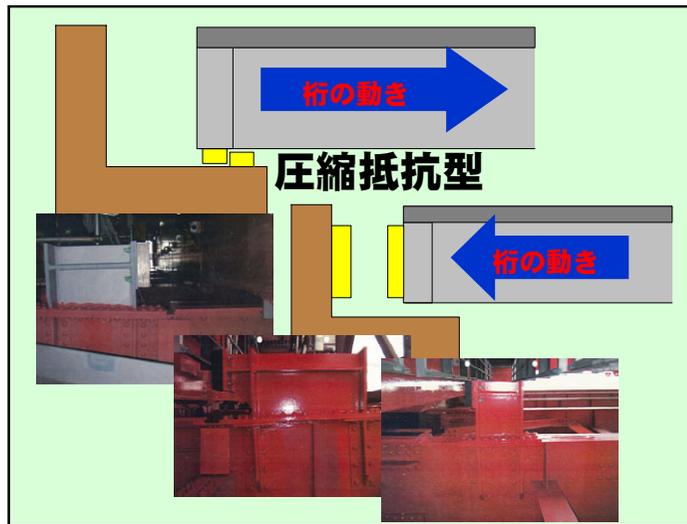
- 3. 落橋防止構造の設計
- 3. 1 落橋防止構造の特徴とその限界状態
- 3. 2 落橋防止構造の設計

3. 1 落橋防止構造の特徴とその限界状態

下部構造間あるいは上部構造間の過大な変位に対して  
引張で抵抗できる構造  
圧縮で抵抗できる構造  
せん断で抵抗できる構造  
これらを組合わせた構造

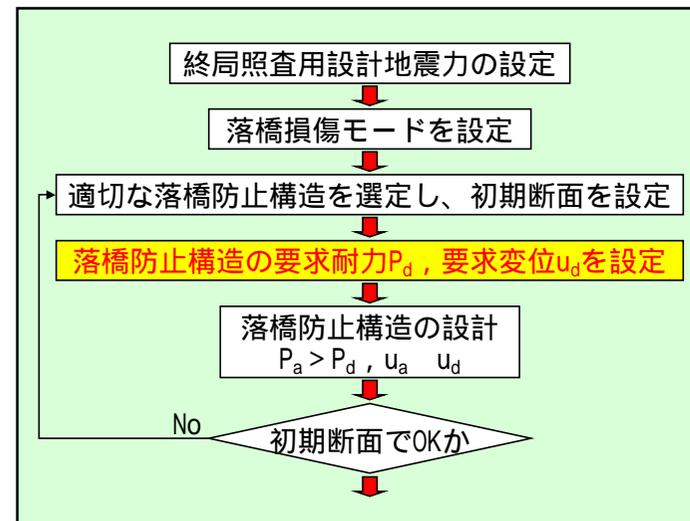
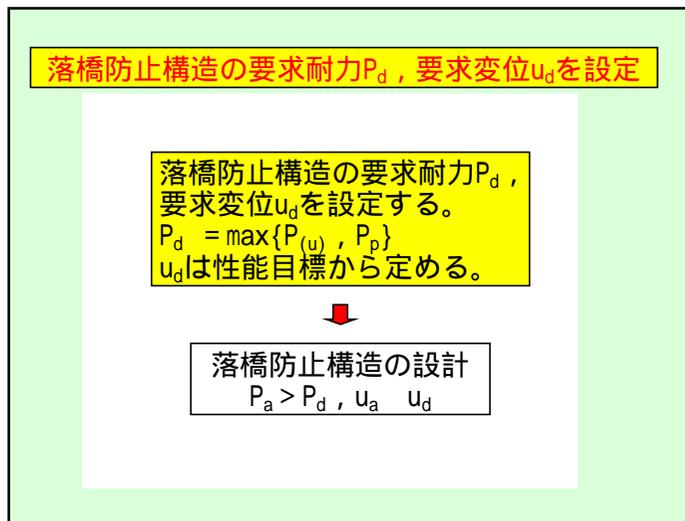
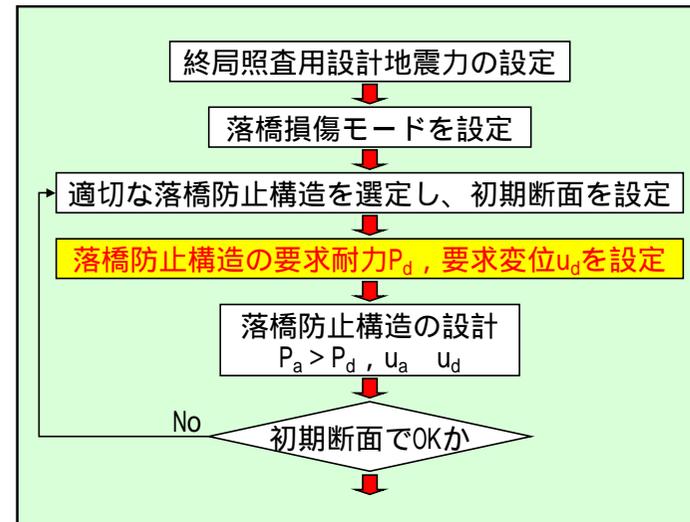
引張抵抗型

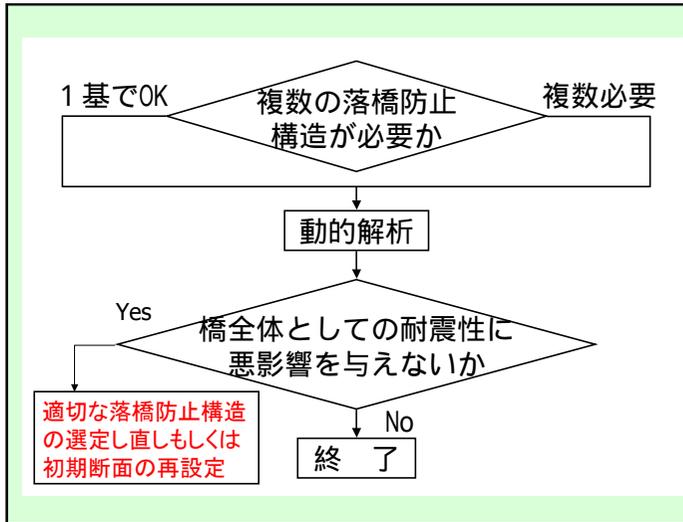




**3. 1 落橋防止構造の特徴とその限界状態**  
**落橋防止構造の作用力に対して、**  
 落橋防止構造は、**破断・変形性能・エネルギー吸収性能**もしくは**その組合わせから決まる限界状態**に至らない範囲で機能できる構造

### 3. 2 落橋防止構造の設計



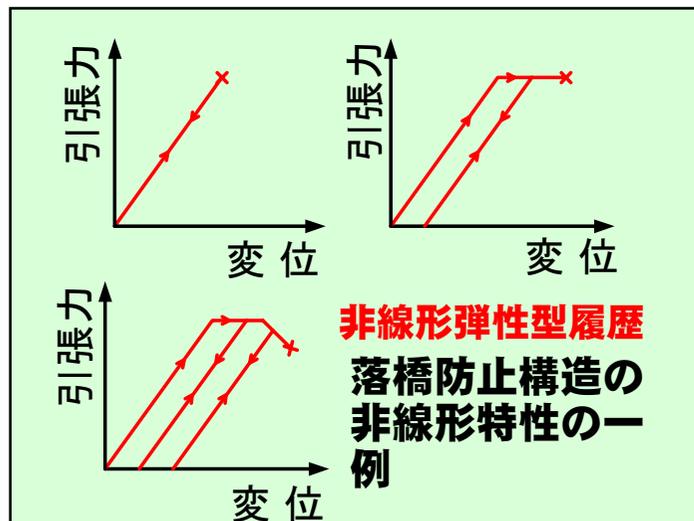


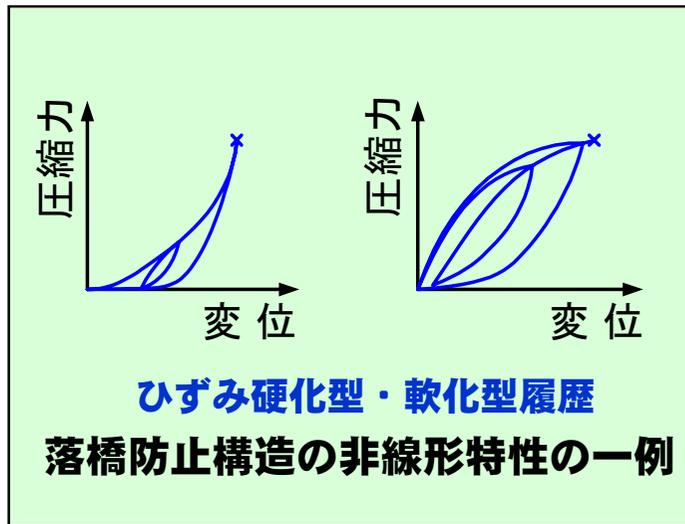
- ### 4. 落橋防止構造のモデル化と保有耐力／変形性能
- 4.1 一般
  - 4.2 引張抵抗型落橋防止構造
    - 4.2.1 PCケーブル
    - 4.2.2 鋼棒
    - 4.2.3 チェーン
  - 4.3 圧縮抵抗型落橋防止構造
    - 4.3.1 ゴム製緩衝型
    - 4.3.2 鋼製ストッパー型

**落橋防止構造のモデル化 (4.1一般)**

落橋防止構造が有する**強度と変形特性及び破断特性**を考慮

- 1) 落橋防止構造の**保有耐力と保有変位**
- 2) 载荷後に落橋防止構造に生じる**残留変位**

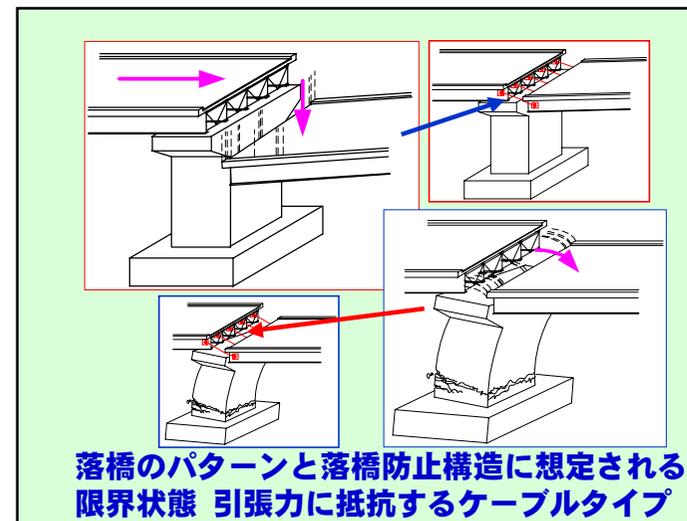
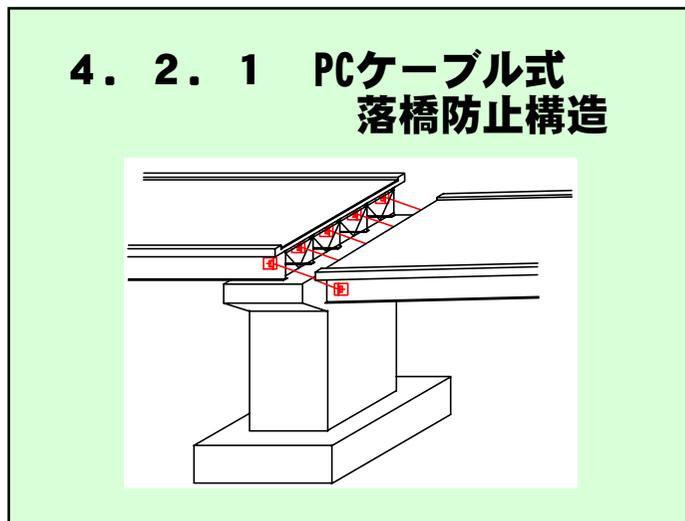


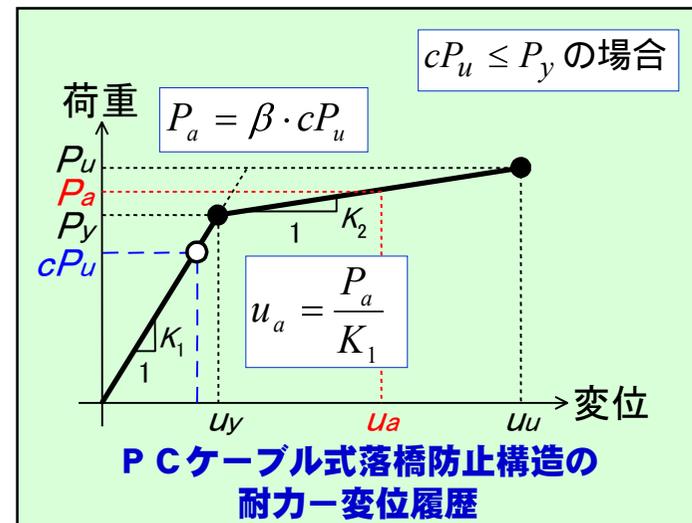
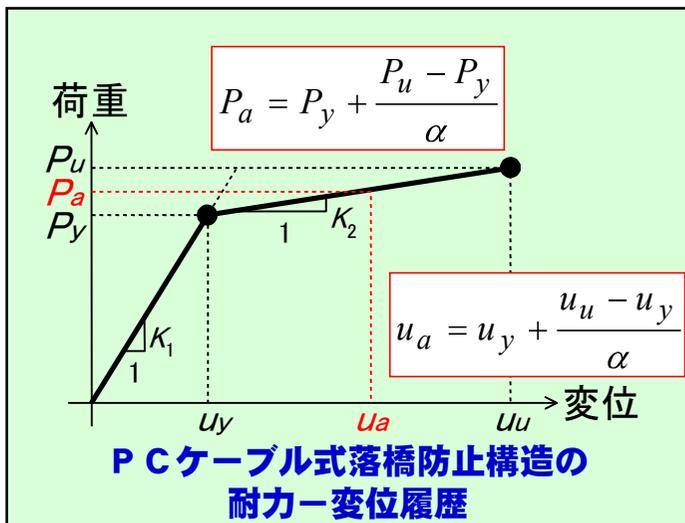
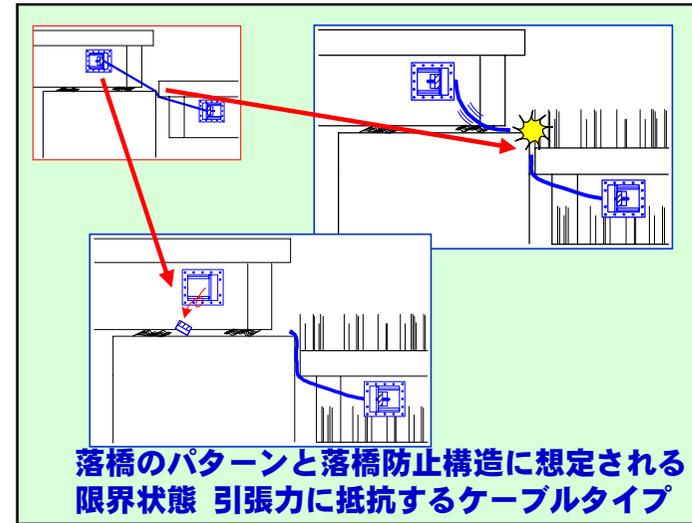
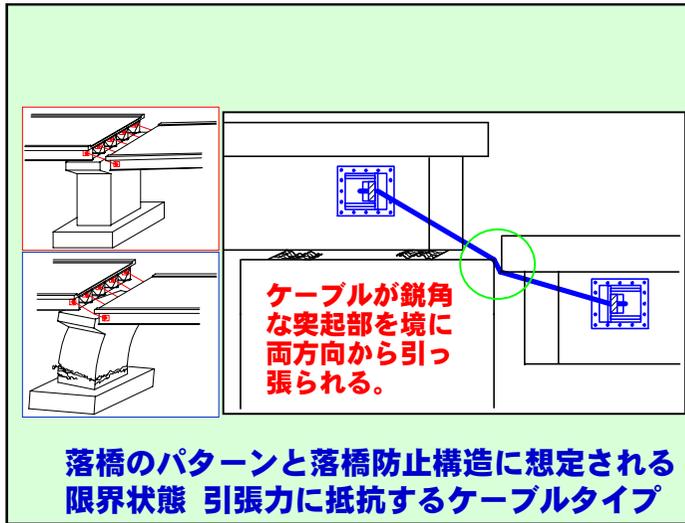


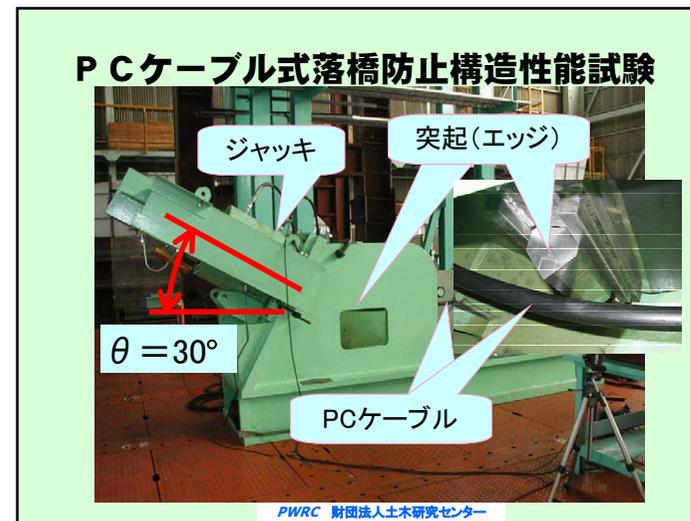
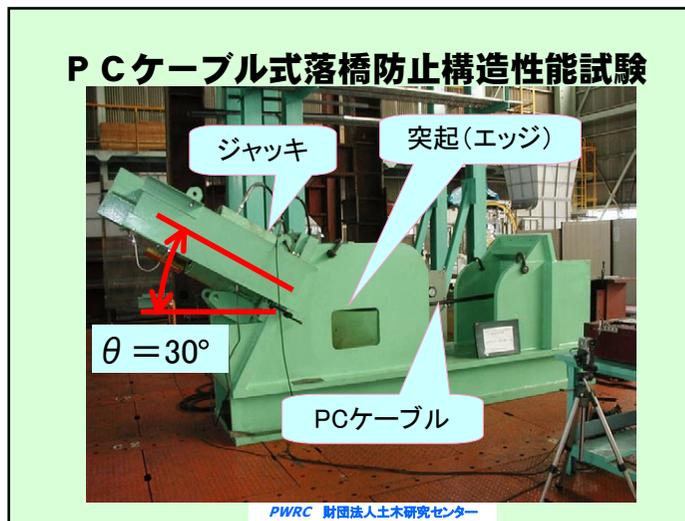
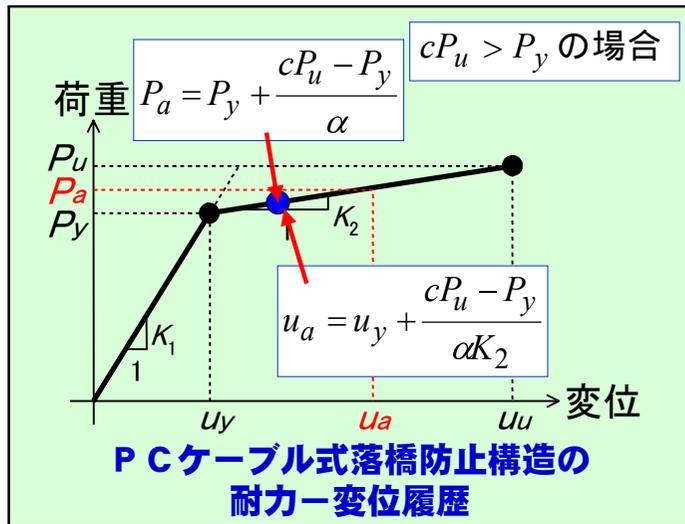
**解析モデル化**

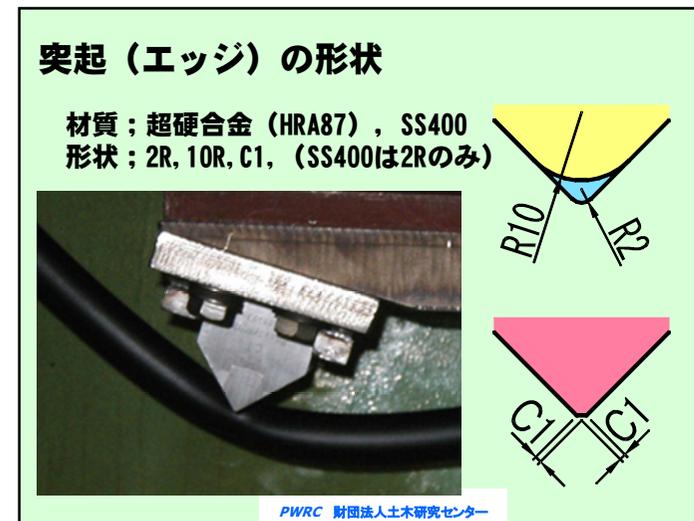
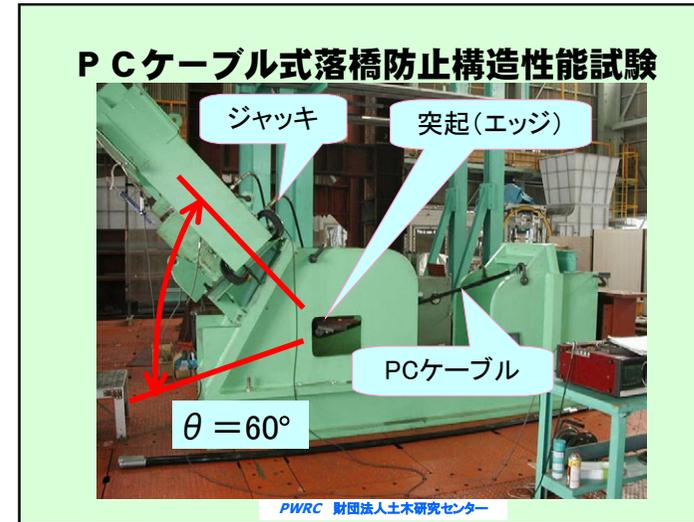
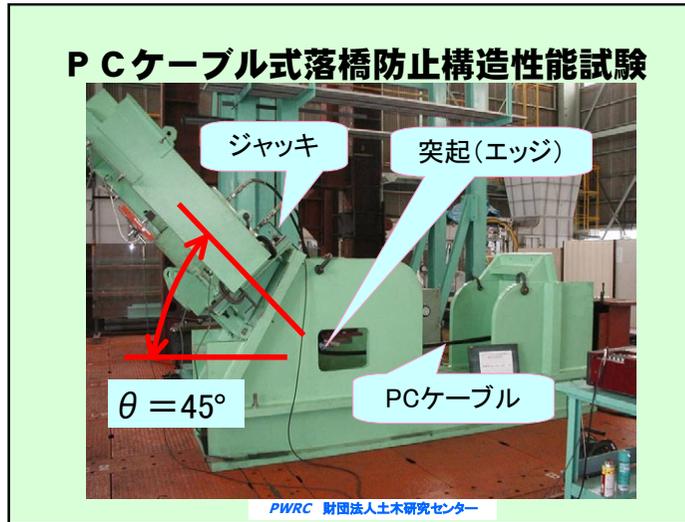
落橋防止構造の機能に直接影響を与える、**落橋防止構造に生じる最大耐力と最大変位**を評価できる解析モデル。

終局照査用地震動という強烈な地震動を受けた後に、橋に生じる**残留変位**に影響を与える除荷・再載荷過程における**変形特性、残留変位特性**についても考慮しておく。





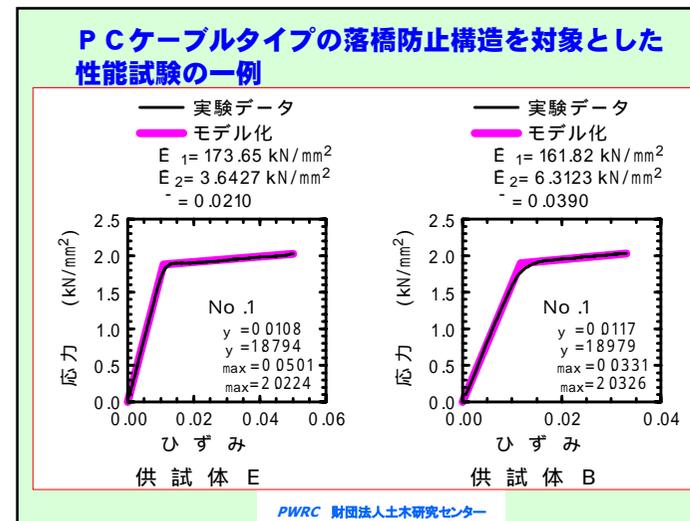
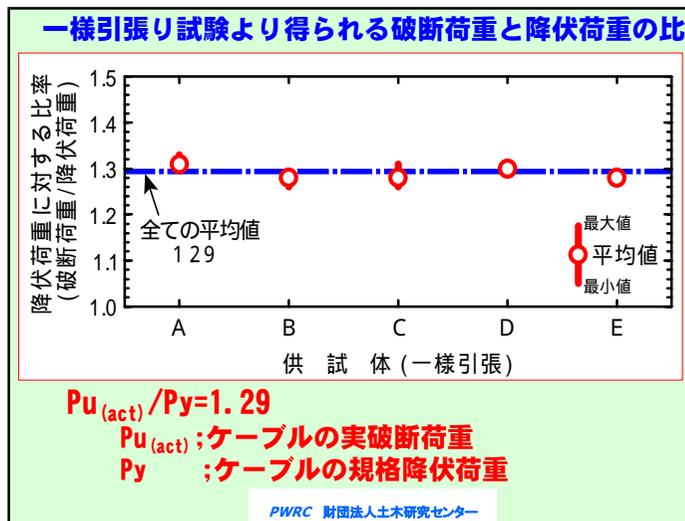


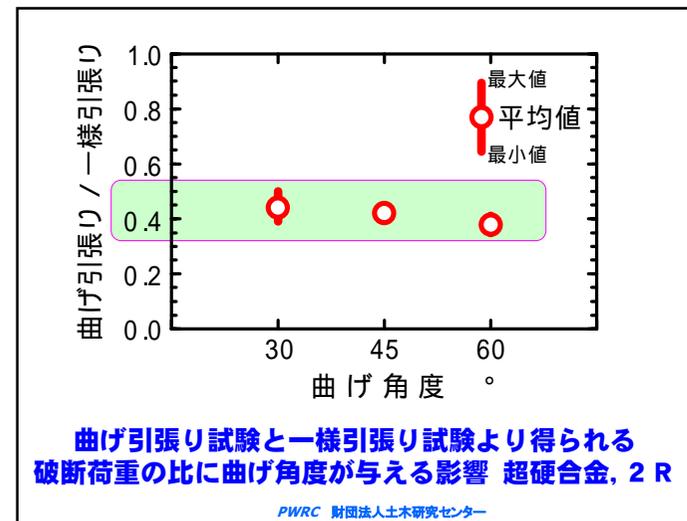
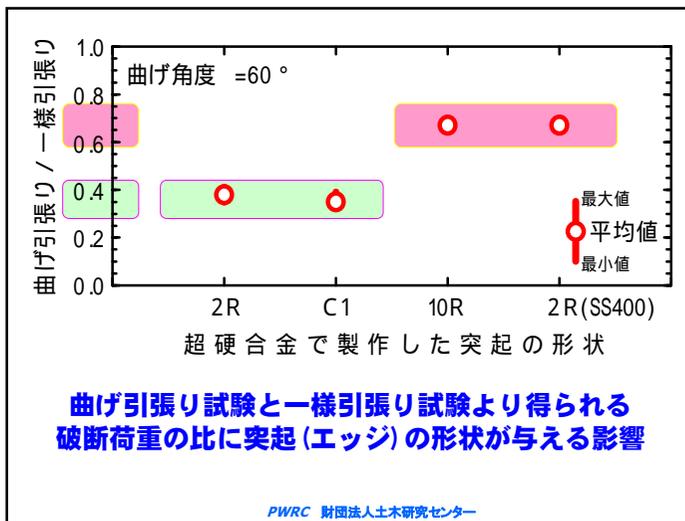
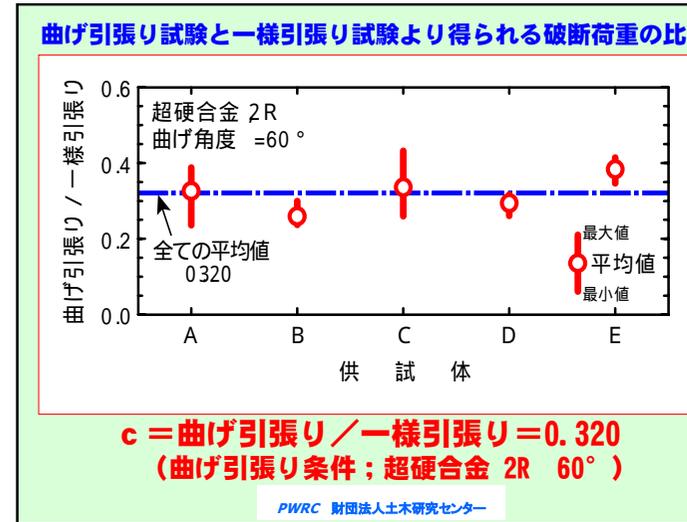
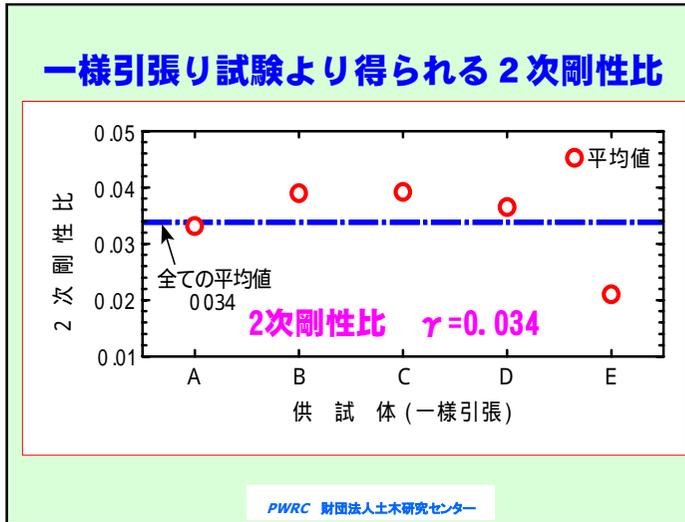


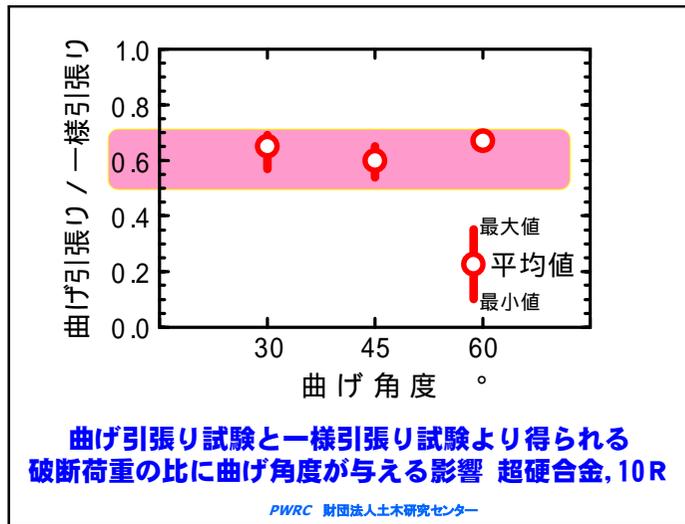
### 性能試験の条件一覧

| 載荷ケース | 突起 (エッジ) |            | 曲げ角度 $\theta$ |
|-------|----------|------------|---------------|
|       | 材質       | 形状         |               |
| 1     | —        | $\infty R$ | $0^\circ$     |
| 2     | 超硬合金     | 2R         | $30^\circ$    |
| 3     |          | 10R        | $45^\circ$    |
| 4     |          | C1         | $60^\circ$    |
| 5     | SS400材   | 2R         | $60^\circ$    |
| 6     | —        | $\infty R$ | $0^\circ$     |
|       | 超硬合金     | 2R         | $60^\circ$    |

PWRC 財団法人土木研究センター







耐力低下率  $c = \text{曲げ引張り試験} / \text{一様引張り試験}$

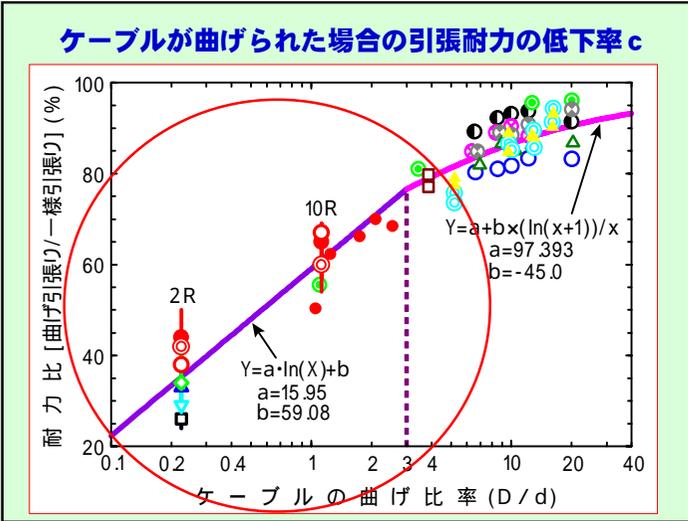
| 突起（エッジ） |     | $\theta$ | 耐力低下率<br>c (平均値) |
|---------|-----|----------|------------------|
| 材質      | 形状  |          |                  |
| 超硬合金    | 2R  | 30°      | 0.44             |
|         |     | 45°      | 0.42             |
|         |     | 60°      | 0.38             |
|         | 10R | 30°      | 0.65             |
|         |     | 45°      | 0.60             |
|         |     | 60°      | 0.67             |
|         | C1  | 30°      | 0.43             |
|         |     | 45°      | 0.39             |
|         |     | 60°      | 0.35             |
| SS400   | 2R  | 60°      | 0.67             |

PWRC 財団法人土木研究センター

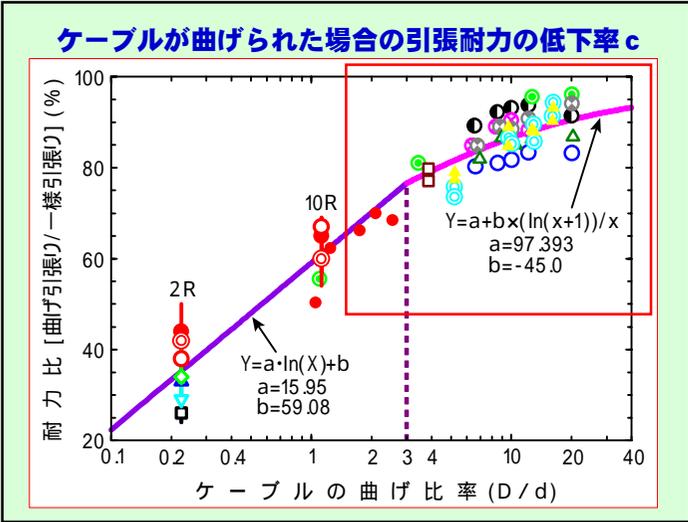
### PCケーブル式落橋防止構造性能試験結果

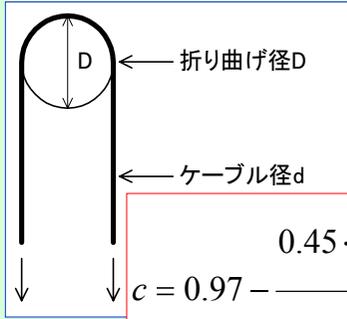
- ◆一様引張試験  
 実破断荷重/規格降伏荷重≒1.3  
 2次剛性比  $r \approx 0.034$
- ◆耐力低下率  $c$  (=曲げ引張試験/一様引張試験)  
 は、供試体A~Eではほぼ等しい。
- ◆耐力低下率  $c$  は、曲げ角度  $\theta$  が大きくなるにつれて小さくなるが、その変化は緩やかである。
- ◆突起の材質による耐力低下率  $c$  の変化  
 $\theta = 60^\circ$  , 突起形状2Rの場合  
 超硬合金  $c \approx 0.4$   
 SS400材  $c \approx 0.6$

PWRC 財団法人土木研究センター



### ケーブルが曲げられた場合の引張耐力の低下率 $c$

$$c = 0.59 + 0.16 \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right) \cdots \frac{D}{d} \leq 3$$


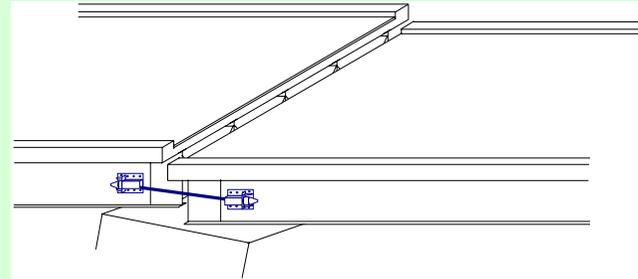
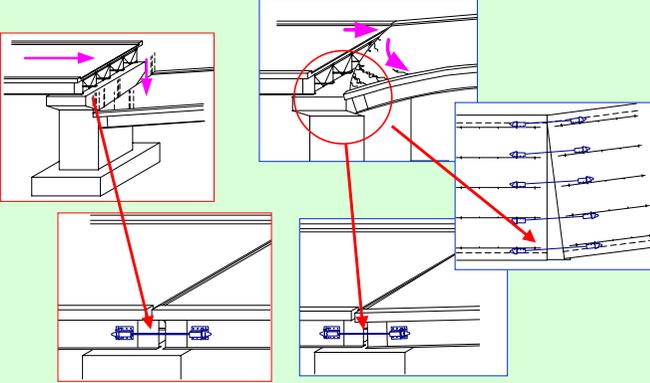


折り曲げ径D  
ケーブル径d

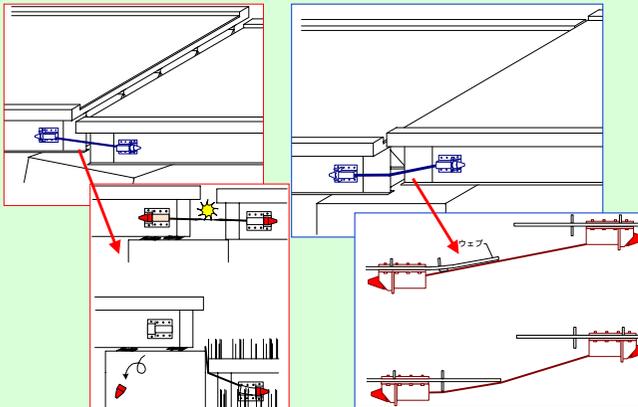
$$c = 0.97 - \frac{0.45 \cdot \ln\left(1 + \frac{D}{d}\right)}{\frac{D}{d}} \dots \frac{D}{d} > 3$$

**ケーブルが曲げられた場合の引張耐力の低下率 c**

### 4. 2. 2 鋼棒を用いた落橋防止構造

**落橋のパターンと落橋防止構造に想定される限界状態 引張力に抵抗する鋼棒タイプ**



**落橋のパターンと落橋防止構造に想定される限界状態 引張力に抵抗する鋼棒タイプ**

### PC鋼棒式落橋防止構造性能試験

突起形状 ; 10R     $2\theta = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$   
 材質 ; 合金工具鋼 (SKS) HRC45以上

PWRC 財団法人土木研究センター

### 試験装置と性能試験条件一覧

| 形状          | 規格荷重      |           |
|-------------|-----------|-----------|
|             | Py (kN)   | Pu (kN)   |
| φ17<br>×800 | 212<br>以上 | 246<br>以上 |
| φ23<br>×820 | 387<br>以上 | 449<br>以上 |
| φ26<br>×830 | 494<br>以上 | 574<br>以上 |

試験装置

PWRC 財団法人土木研究センター

### PC鋼棒の破断状況

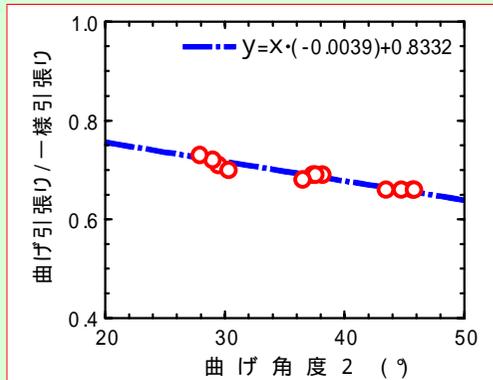
破断後供試体

PWRC 財団法人土木研究センター

### 曲げ引張り試験後のPC鋼棒破断面

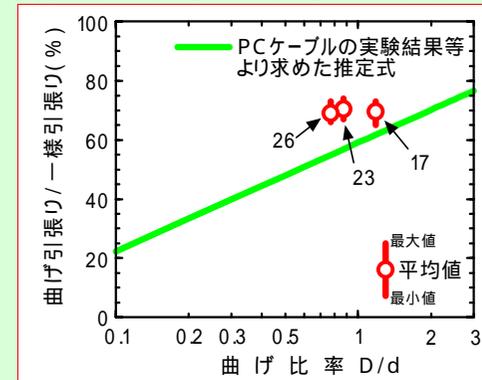
PWRC 財団法人土木研究センター

曲げ引張り試験と一様引張り試験より得られる  
破断荷重の比  $\phi 26\text{mm}$



PWRC 財団法人土木研究センター

曲げ引張り試験と一様引張り試験より得られる  
破断荷重の比  $\phi 17\text{mm}$ ,  $\phi 23\text{mm}$ ,  $\phi 26\text{mm}$



PWRC 財団法人土木研究センター

PC鋼棒の性能試験結果

| 鋼棒径  | $2\theta$<br>(平均値) | 耐力低下率 $c$<br>(平均値) |
|------|--------------------|--------------------|
| 17mm | 27.7°              | 0.72               |
|      | 35.7°              | 0.70               |
|      | 43.0°              | 0.67               |
| 23mm | 27.1°              | 0.73               |
|      | 36.9°              | 0.71               |
|      | 43.4°              | 0.68               |
| 26mm | 28.8°              | 0.72               |
|      | 37.7°              | 0.69               |
|      | 44.6°              | 0.66               |

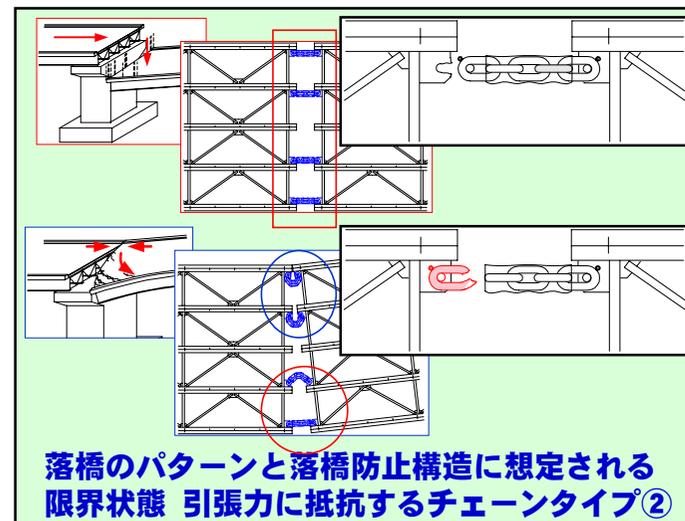
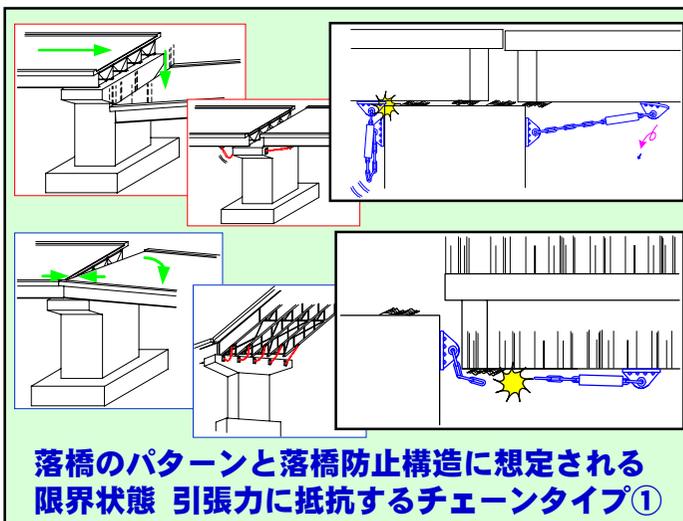
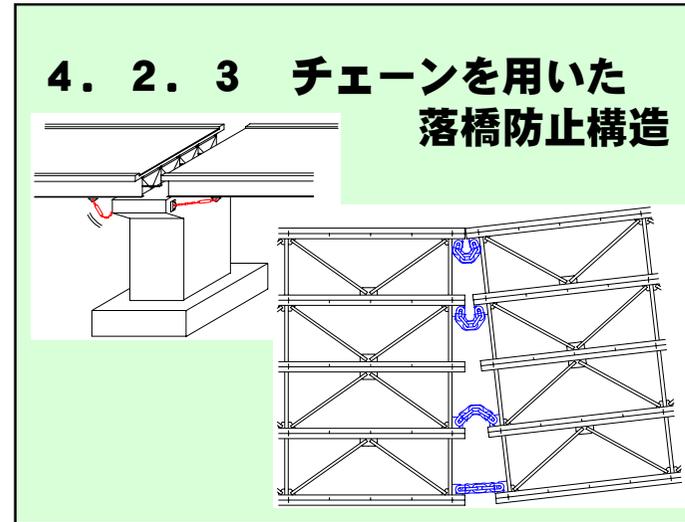
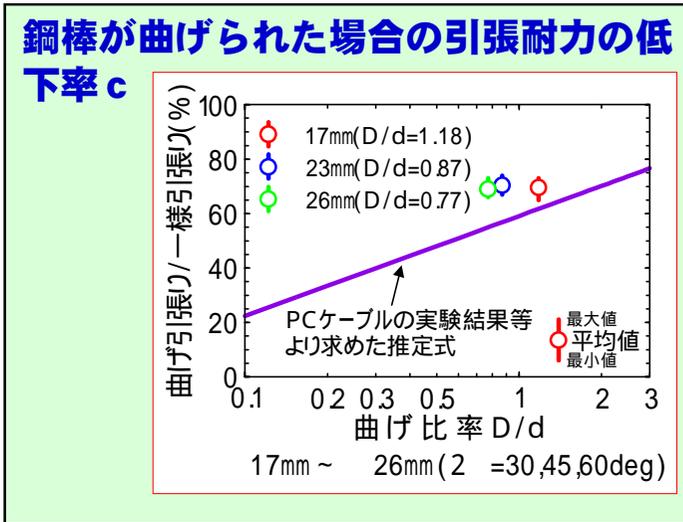
耐力低下率  $c = \text{曲げ引張り試験} / \text{一様引張り試験}$

PWRC 財団法人土木研究センター

PC鋼棒式落橋防止構造の試験結果

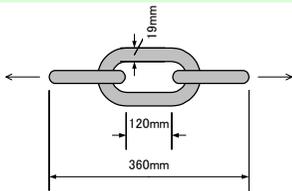
- ◆ 鋼棒の応力-ひずみ関係は、**バイリニア型の復元力モデル**で表すことができる。
- ◆ 耐力低下率  $c$  は、**曲げ角度  $2\theta$  が大きくなるにともない低下するが、ここで対象とした  $2\theta = 26^\circ$  から  $60^\circ$  の範囲ではその変化は小さいので、実用上一定とみなすことができる。**
- ◆ ここで検討した鋼棒径  $d$  と折り曲げ径  $D$  の範囲では、**耐力低下率  $c$  はほぼ一定とみなすことができる。**

PWRC 財団法人土木研究センター





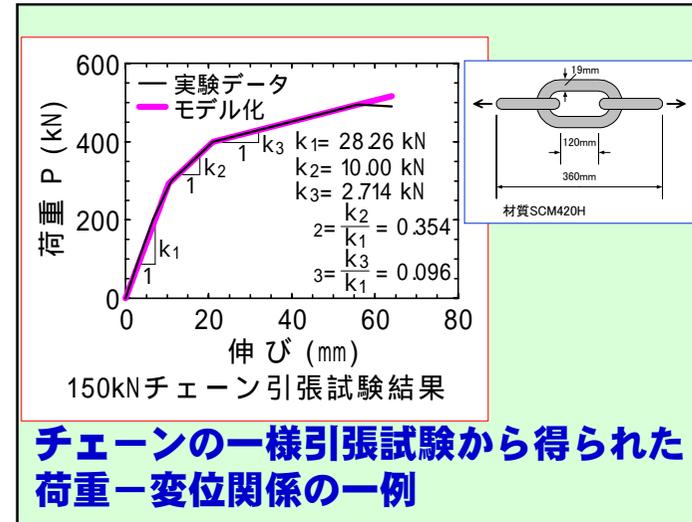
試験装置：200kNアムスラー式汎用万能試験機



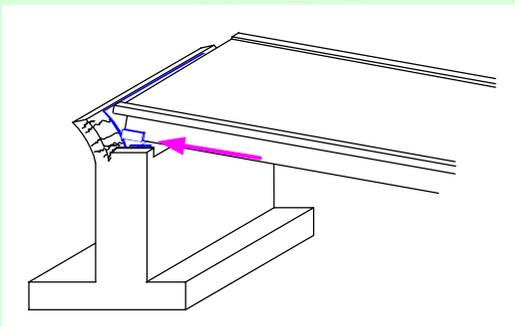
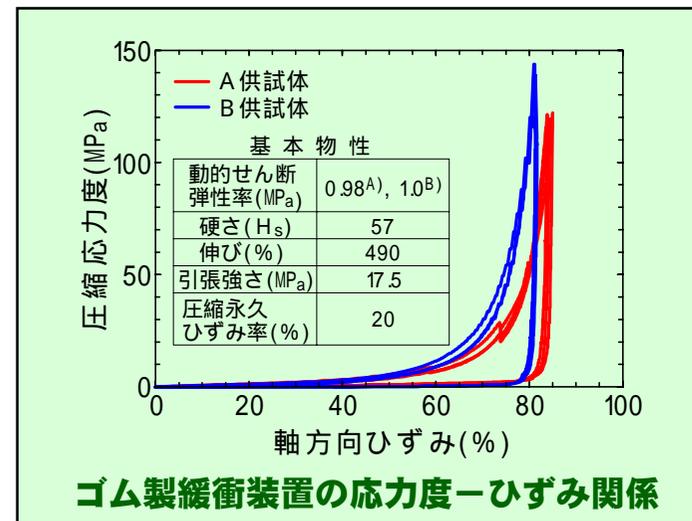
材質SCM420H  
性能試験に用いた供試体



試験装置：150kNチェーン引張試験状況



### 4. 3. 1 ゴム製緩衝型落橋防止構造

落橋のパターンと落橋防止構造に想定される  
限界状態  
圧縮力に対する緩衝効果を有するストッパー

### ゴム製緩衝型落橋防止構造性能試験

PRF緩衝材・・・連続繊維を積層状にして補強した緩衝材

全面圧縮

部分圧縮: 1 / 2 載荷、1 / 4 載荷

PWRC 財団法人土木研究センター

### 圧縮タイプ(緩衝材)の落橋防止構造を対象とした性能試験の一例 部分載荷の影響

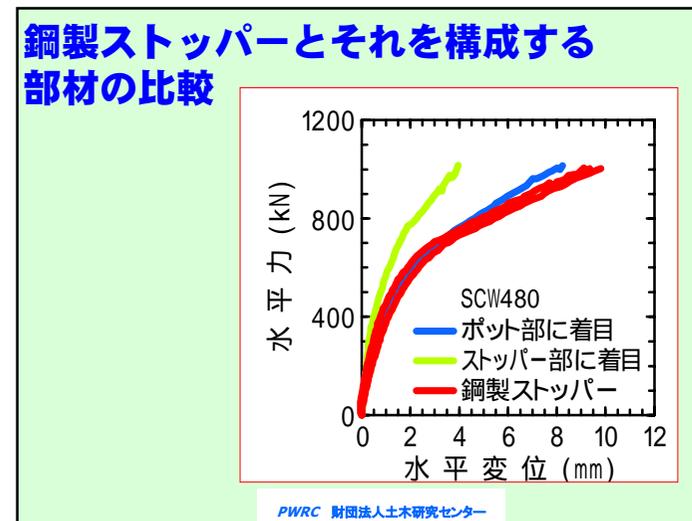
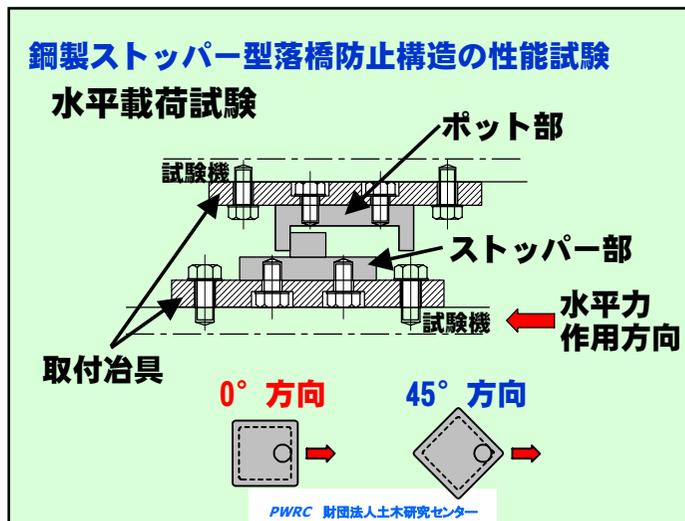
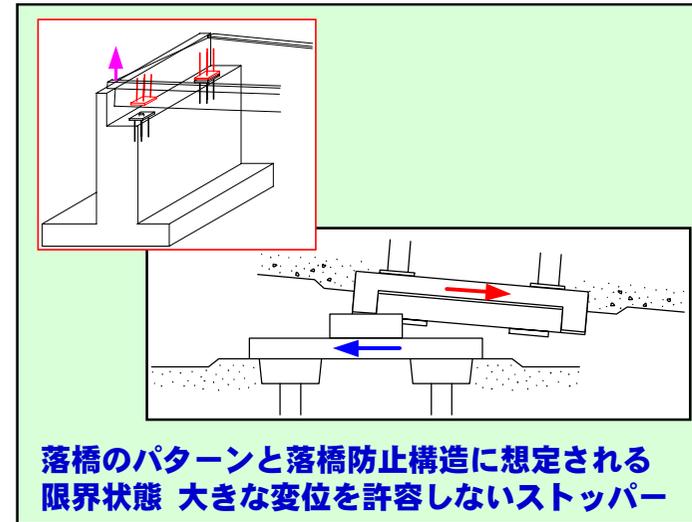
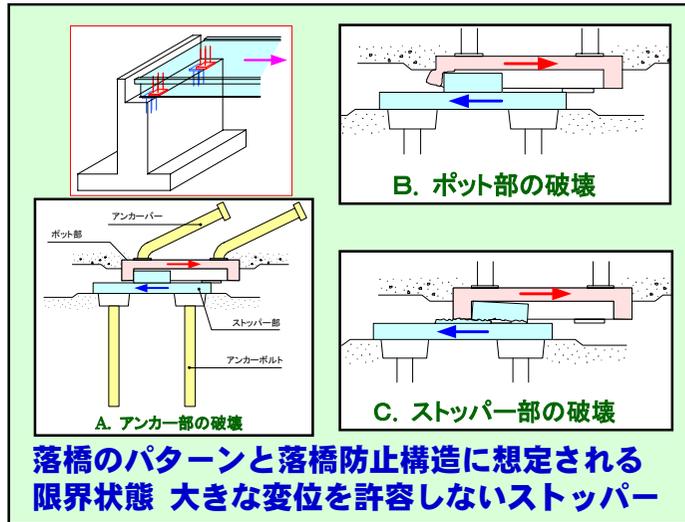
ゴム製緩衝材

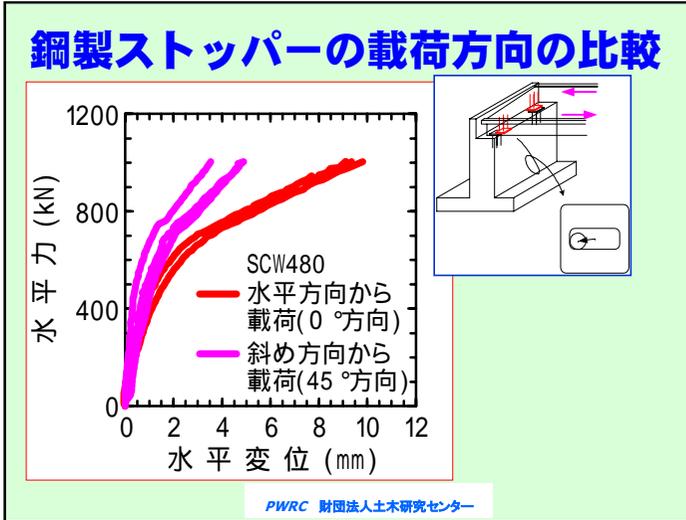
PRF緩衝材

PWRC 財団法人土木研究センター

落橋のパターンと落橋防止構造に想定される  
限界状態  
圧縮力に対する緩衝効果を有するストッパー







### 鋼製ストッパ<sup>o</sup>-型落橋防止構造の試験結果

◆鋼製ストッパーの荷重-変位関係は、**ひずみ硬化型の復元力モデル**で表すことができることがわかる。

◆設計で想定している0°方向から荷重するよりも、**斜め45°方向から荷重する方が同一荷重が作用した場合に落橋防止構造に生じる変位が小さい。**

PWRC 財団法人土木研究センター

### 5. 落橋防止構造の性能試験：原則

#### 落橋防止構造の特性と安全性の評価

(1) 試験目的  
 履歴特性等の検証・所要の性能を有することの検証

(2) 環境条件や荷重の作用のさせ方等  
 : 設置される環境条件および地震の作用に基づいて

(3) 試験体：「落橋防止構造本体+取付部」

(4) 試験体の規模  
 : 実大もしくはこれに近い寸法



**落橋防止構造は、**

- ・ 終局照査用地震動に対して**落橋を担保する重要な部材**
- ・ 異なる力学メカニズムに基づく幾つかの部材から構成される複雑な構造特性を有する構造

⇒その**特性や安全性の検討は性能試験に基づいて行う必要がある。**

**落橋防止構造は、予期しない厳しい地震力の作用下でも落橋という最悪の状態を防止するためのフェールセーフ機能を委ねられた構造であり、現実に予想される過酷な条件から目をそらせて試験をしたのでは、有用な情報は得られない。**

**当該落橋防止構造の力学メカニズムを確実に担保できる試験方法の選択が重要である。**

性能試験においては、原則として「**落橋防止構造+取付部**」を対象に**実験を行う**。ただし、取付部だけを単独で実験し、これと落橋防止構造本体に対する実験を組み合わせれば全体系の特性が把握できることが明らかな構造では、両者を別々に実験してもよい。

**性能試験においては、実大もしくはこれに近い寸法の供試体を用いることを原則とする。**

落橋防止構造は、橋脚や橋台と異なり、**実大試験が可能な部材であり、これが有する規模の大きさから、実大寸法の供試体を用いることを原則としたものである。**

### 本ガイドライン（案）の位置付け

行政的に通達された基準ではなく、あくまでも研究会の報告書とその審議に基づく提案としてガイドラインの形に取りまとめたものである。

落橋防止構造に対する実験的、解析的検討は限られており、ここに示す一部のタイプの落橋防止構造の設計法も限られた条件での実験、解析に基づくものである。

⇒今後の継続的検討に基づく内容の充実が不可避である。

ご静聴ありがとうございました。

「落橋防止構造設計ガイドライン（案）」が落橋防止構造の性能目標や落橋崩壊形を想定した設計法を考えていくための一助となれば幸いです。

落橋防止構造に関する研究委員会