

於 土木学会

2019. 11. 1

免震・制震技術を応用した 長大橋の耐震補強

家村 浩和

京都大学名誉教授
土木学会名誉会員

講演の主な内容

- 家村の現在までの研究歴
 - 地震被害調査と研究のモチベーション
 - 免震・制振の原理と各種デバイス
 - 長大橋への応用事例
 - 阪神高速道路への応用事例
 - カルトランスの長大橋への応用事例
 - 本四高速道路橋への応用事例
 - セミアクチブダンパーにみられる
負剛性反力とスカイフックダンパとの関係
- 付録；我が家の制振と耐震補強

家村の主な研究歴

- 構造物の弾塑性地震応答と信頼性解析
- 構造部材の弾塑性挙動に関する
オンラインハイブリッド実験
- 地震入力エネルギーとその分担率
- 免震・制振デバイスの効果に関する
オンラインハイブリッド実験
- セミアクチブダンパーの負剛性特性
- 世界の被害地震の調査と分析
- IAEEのSecretary Generalとしての活動
- インドネシア地震津波の調査・解析実験と
津波ポールの建設

家村が参加してきた主な地震災害調査

- ・ サンフェルナンド地震(1971、近代構造物の大被害)
- ・ 宮城県沖地震(1978、ライフラインの大被害)
- ・ メキシコ地震(1985、超遠方地震による地盤の共振)
- ・ 日本海中部地震(1988、津波、長周期地震動)
- ・ フィリピン地震(1990、大断層地震)
- ・ カリフォルニア州ノースリッジ地震(1994、直下地震)
- ・ 兵庫県南部地震(1995、直下地震による強震動)
- ・ 台湾集集地震(1999、内陸部の巨大地震、調査団長)
- ・ スマトラ地震(2004、巨大津波、アチェ市被害調査
団長、記念ポール建設)
- ・ 中越沖地震(2007、原発被害5学会調査団長)
- ・ 東北太平洋地震(2011、津波被害、原発事故重大)

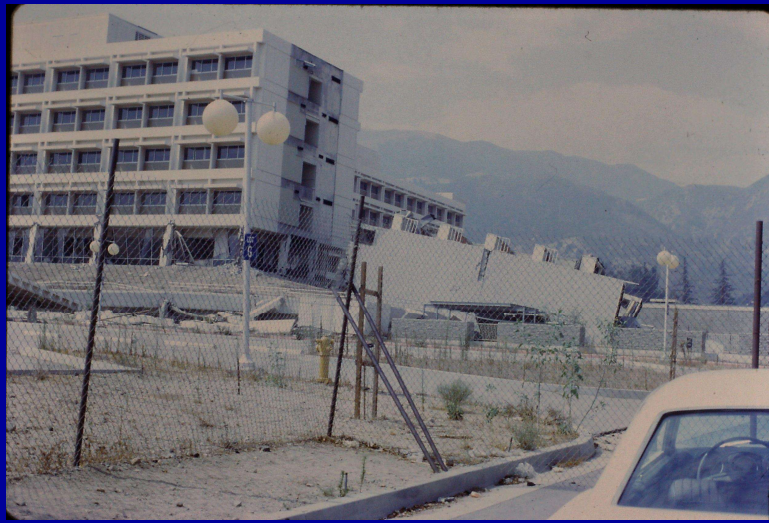
サンフェルナンド地震(San Fernando)

1971年(昭和46)2月9日

M 6.6



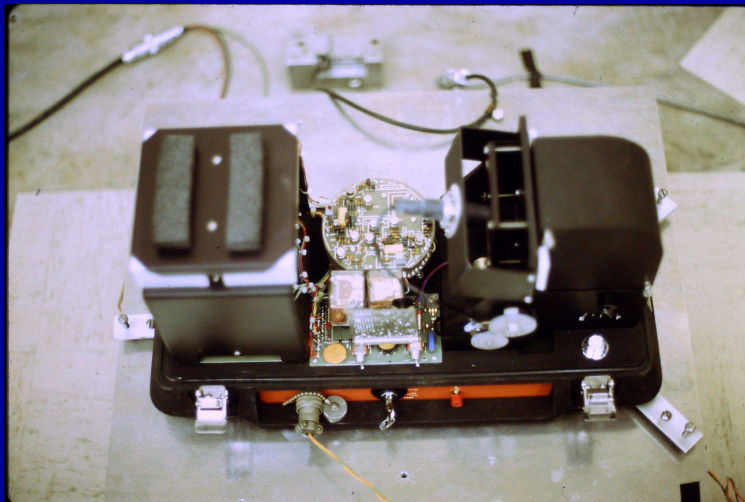
倒壊した高橋脚曲線高架高速道路



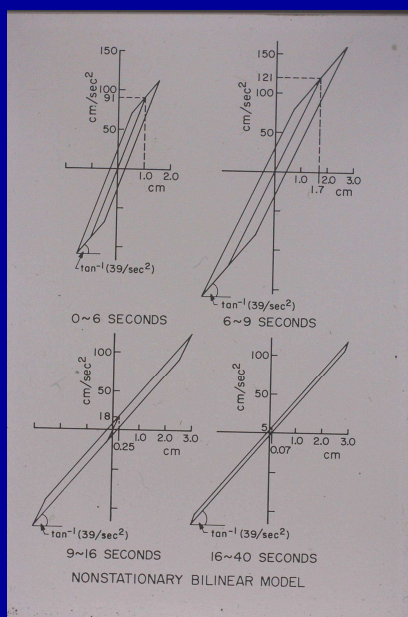
新築した直後に倒壊した病院



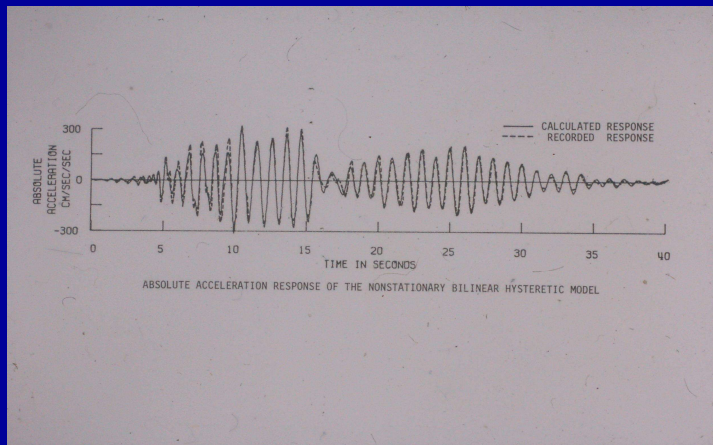
スパイラル筋で横拘束された柱



米国の光学式強震計
建物地下と屋上での同時記録

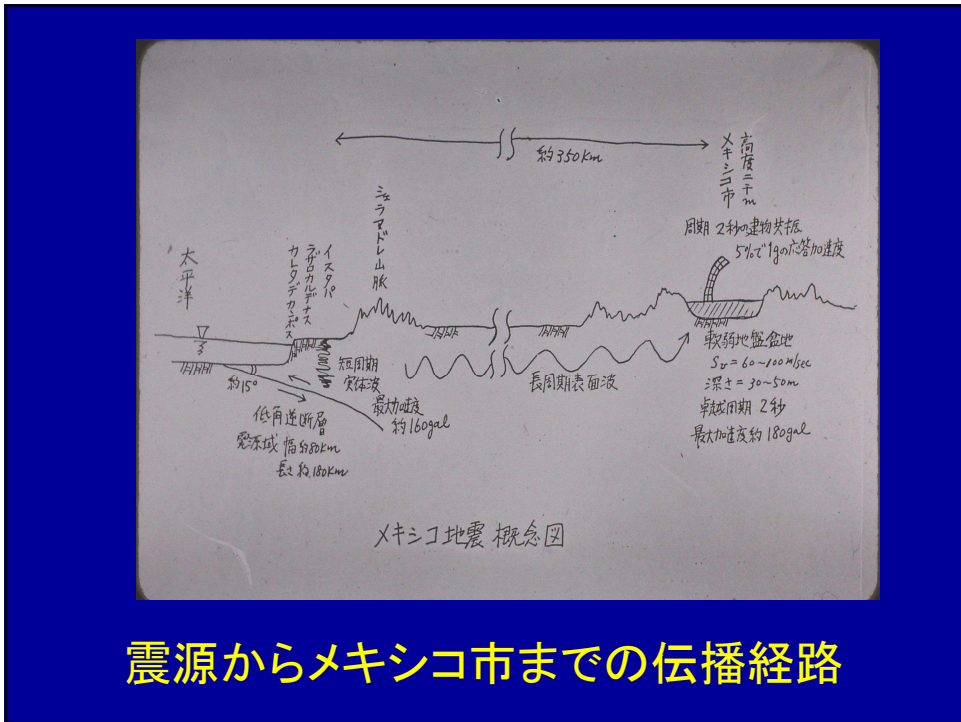


強震記録から
検出した劣化
履歴特性

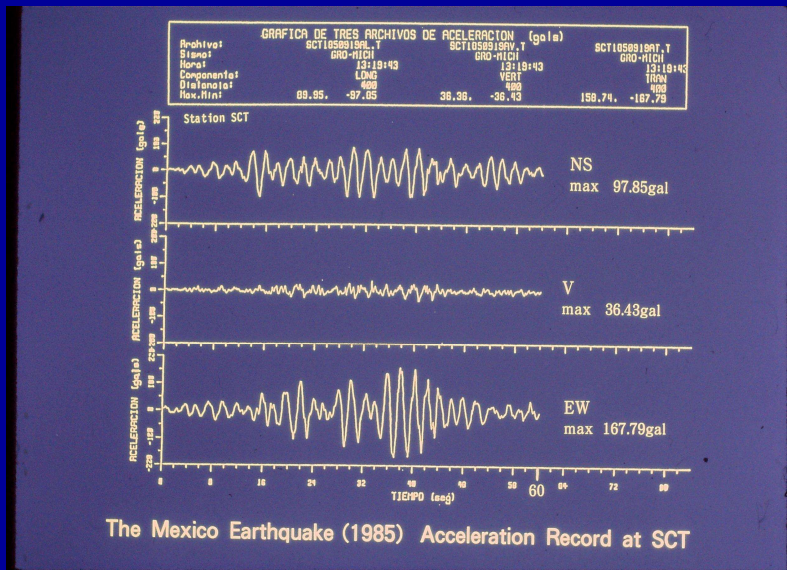


同時強震記録から得られた相対変位
と劣化モデルの時刻歴応答

メキシコ地震 (Mexico)
1985年 (昭和60年) 9月19日
M 8.1

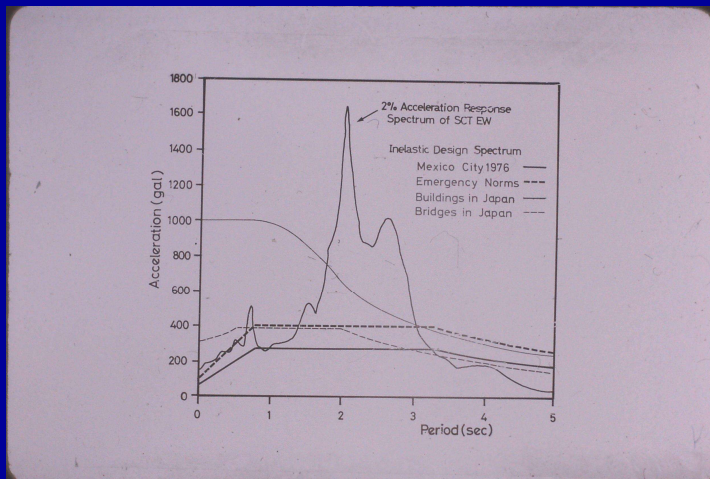


震源からメキシコ市までの伝播経路



The Mexico Earthquake (1985) Acceleration Record at SCT

メキシコ市での地盤加速度記録



加速度応答スペクトル(h=0.02)

L1



倒壊した20階
鉄鋼ビル



スライド 17

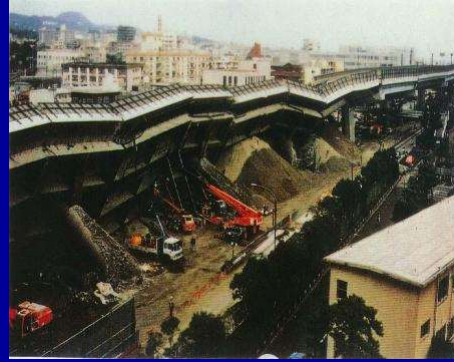
L1 Lenovo, 2019/10/18



角柱の
座屈

兵庫県南部地震(1995.1.17) M=7.2

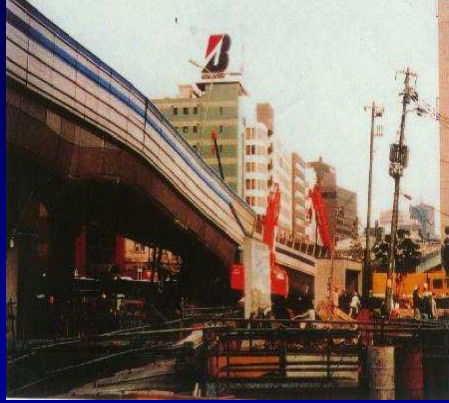
- 都市直下地震
- 震度7(激震)の地震の帯
- 家屋の倒壊による死者約5千人
- 高架橋、鉄道、港湾などインフラの被害大
- 81年以前の建物の被害大
- 都市ライフラインの被害大
- 火災も発生



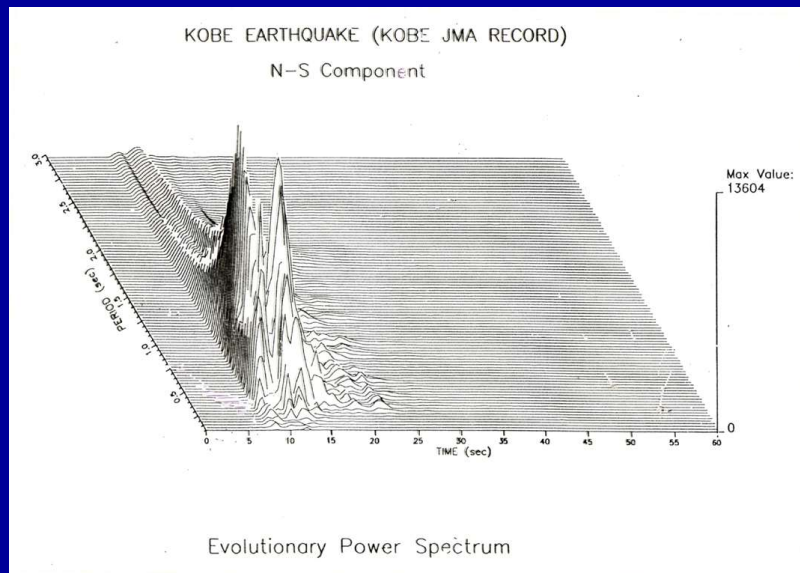
兵庫県南部地震(1995)により崩壊した
阪神高速道路3号線ピルツ型高架橋



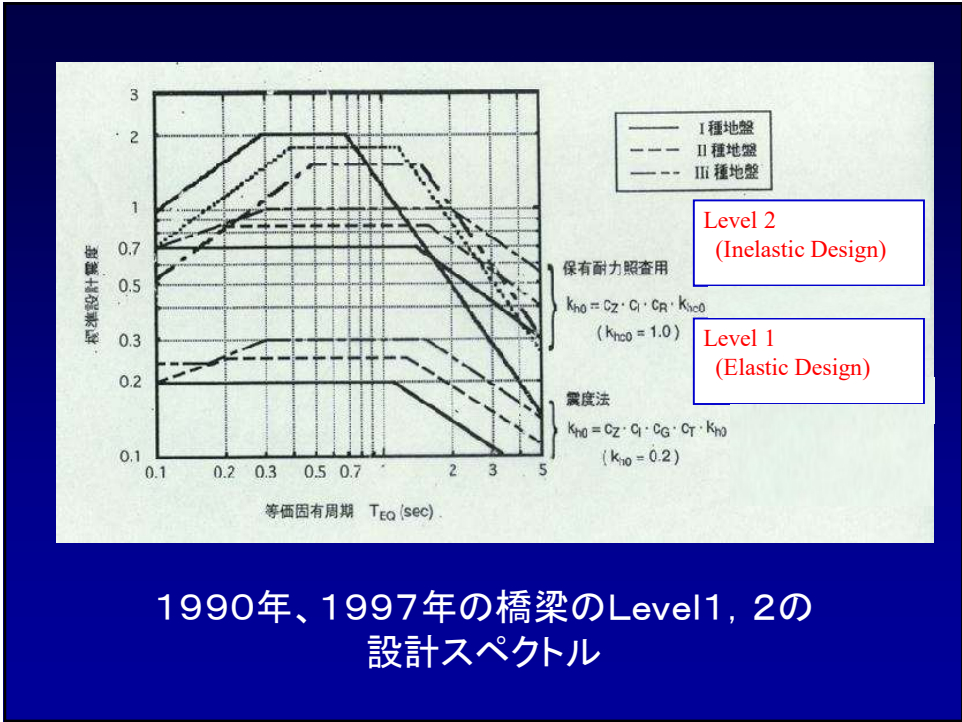
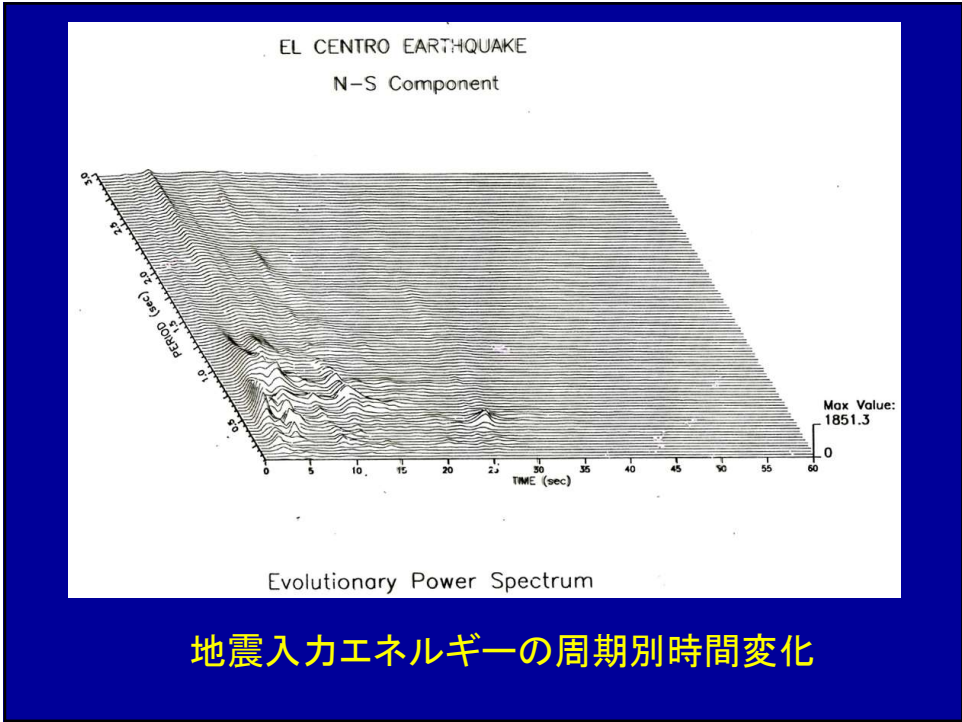
脆弱で崩壊した橋脚と、粘りを示した橋脚



阪神高速3号 弁天工区に於ける
桁一柱合結高架橋の崩壊



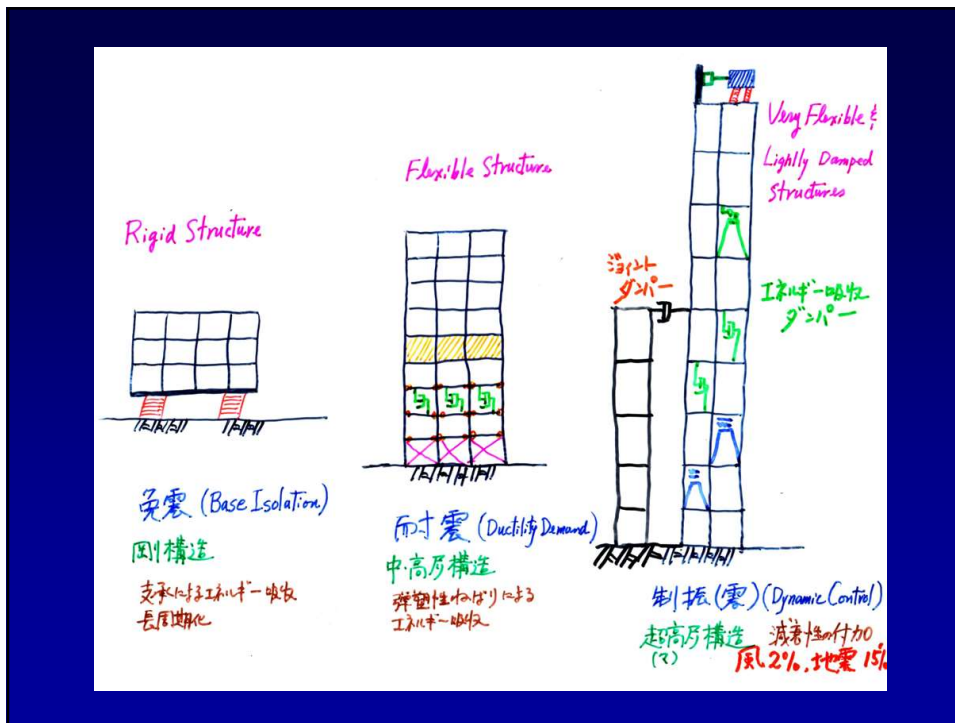
地震入力エネルギーの周期別時間変化(爆弾地震)



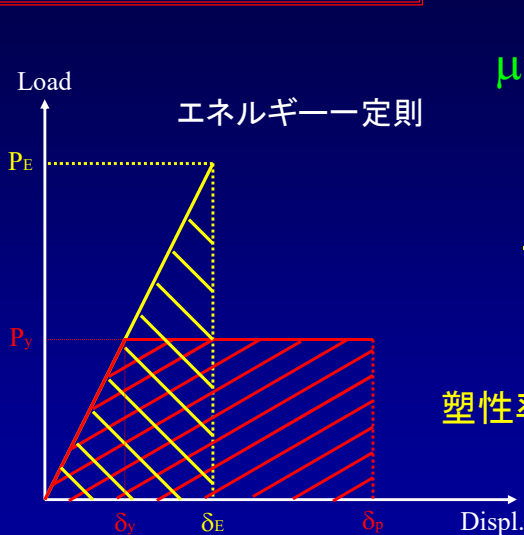
阪神大震災後の土木学会からの提言

1. 耐震設計に当たって、今までの200年に一度程度の地震力(レベル1)に加えて、1000年に一度程度の地震力(レベル2)を考慮する。
2. レベル2地震動を受けた場合、構造物が損傷しても崩壊しないことを確認する。
3. 一次および二次の2段階の耐震診断を行って、補強を必要とする構造物を選び、適切な補強を行う。
4. 新しい免震や制震技術を開発し応用する。
5. 都市計画に当たって、総合的な地震防災性の向上をはかる。

免震・制振の原理とデバイス



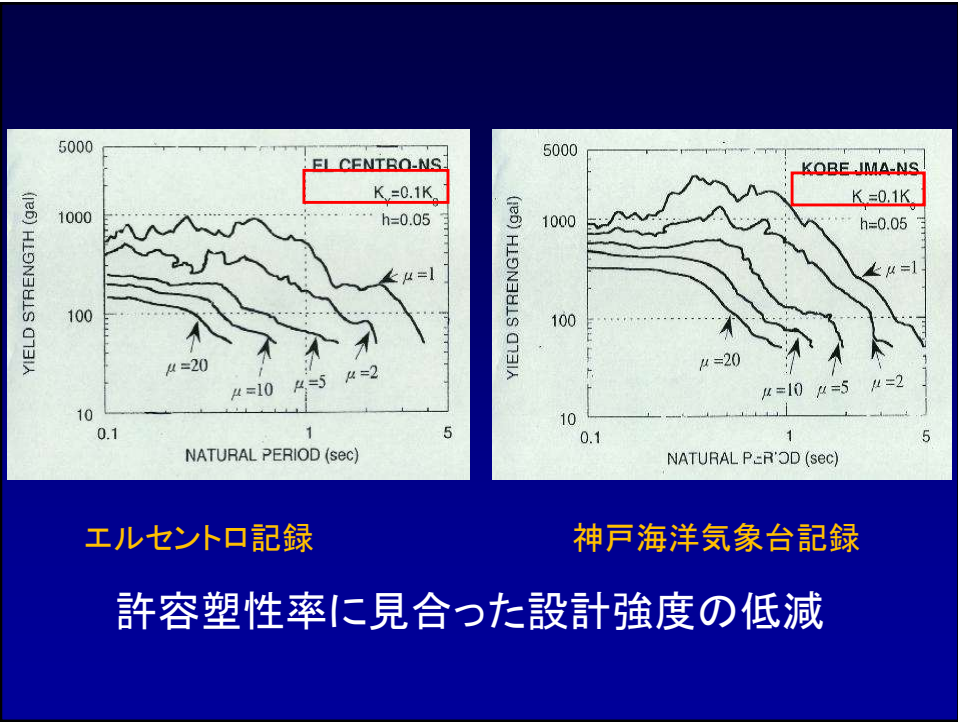
非弾性設計法



$$\mu = \frac{\delta_p}{\delta_y} : \text{塑性率}$$

$$\frac{P_y}{P_E} = \frac{1}{\sqrt{2\mu-1}}$$

塑性率による降伏強度の低減



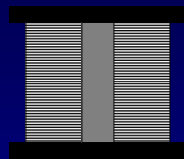
許容塑性率だけでは、設計強度を安全かつ十分に低減できない

追加的な変形性能と減衰性能が必要

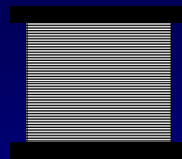
家村の遺言

50cm 15% 原理

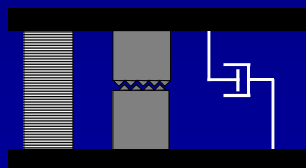
主な免震支承



LRB
(Lead Rubber Bearing)
鉛入りゴム支承

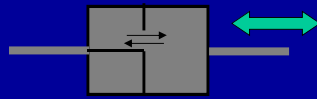


HDRB
(High Damping Rubber Bearing)
鉛入りゴム支承



機能分離型免震支承
ゴム支承 + 摩擦支承
ゴム支承 + 弾塑性鋼材
ゴム支承 + 粘性ダンパー

主なエネルギー吸収装置



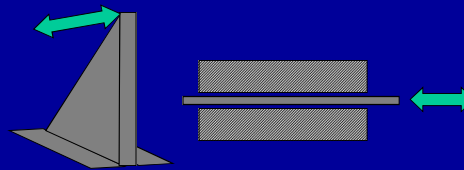
Viscous Damper
粘性体(オイル)ダンパー



Viscous - Elastic Damper
粘弾性体ダンパー



Friction Damper
摩擦型ダンパー



Inelastic Damper
弾塑性履歴ダンパー

長大橋の耐震性向上手法の特徴

- ・ 従来の強度の向上では、全体剛性が上がり、地震入力がかえって増大する。巨大な構造となり、基礎の負担も大きく、コスト的にも不合理
- ・ 免震や制震の技術を利用して、構造物の変形性能と、減衰性能を増大させ、地震入力そのものを低減するのが、合理的
- ・ 免震デバイスや制震デバイスを開発・利用するが、その性能の確証が重要
- ・ 免震、制震の効果は、動的地震応答解析(シミュレーション)により、確認

橋梁名	所属団体 または 所属国	橋梁形式	支間長(m) (完成年)	適用デバイスの種類
港大橋	阪神高速道路 日本	トラス橋	235+510+235 (1974年)	床免震構造 (すべり免震支承+ 積層ゴム支承) 制震ブレース構造 (座屈拘束ブレースBRB) (鋼製軸降伏型ダンパー)
天保山大橋	阪神高速道路 日本	斜張橋	120+350+170 (1988年)	ガセット部せん断パネル (鋼製せん断降伏型 ダンパー)
東神戸大橋	阪神高速道路 日本	斜張橋	149+355+149 (1992年)	縦おきサンドウィッチ型 高減衰ゴムダンパー 回転型粘性バーンダンパー
弁天連続 高架橋	阪神高速道路 日本	ラーメン型連続 曲線高架橋	19径間全長565m 最大スパン50m (1996年)	橋脚下端免震 (LRB)
岸和田大橋	阪神高速道路 日本	アーチ橋	95+255+95 (1993年)	支承部せん断パネル (鋼製せん断降伏型 ダンパー)
ベネシア・ マルテネス橋	カルトランス (米国)	トラス橋	最大スパン161m 全長1,894m	球面摩擦滑り免震支承 (FPB)
コロナド橋	カルトランス (米国)	鋼箱桁橋	最大スパン66m 17径間	鉛入・免震ゴム支承
ゴールデン ゲイト橋	カルトランス (米国)	吊り橋	343+1281+343 (1937年)	免震支承(アブローチ桁部) 粘性ダンパー (主桁の塔部, アバット部) サドルの可動化
リオン・ アンティリオン 橋	ギリシャ	5径間連続 鋼・コンクリート 複合斜張橋	286+560+560+560 +286 (2004年)	粘性ダンパー (主桁と塔部の間)
鶴見つばさ橋	首都高速道路 日本	1面吊り斜張橋	255+510+255 (1994年)	弾性拘束ケーブル



阪神高速3号線 ピルツエ区の免震改築

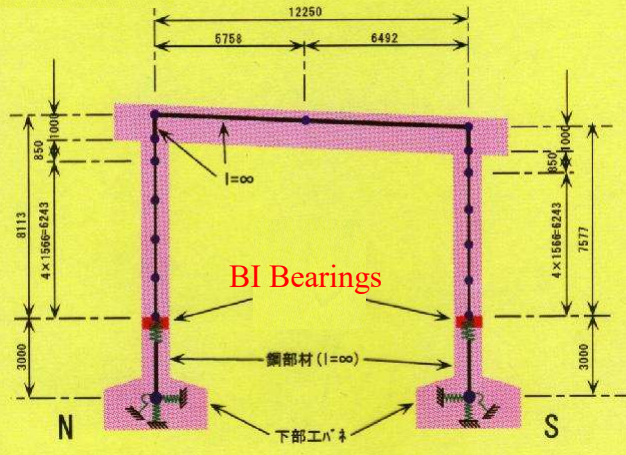


阪神高速3号線 弁天工区の橋脚下端免震による改築



弁天工区の橋脚下端に設置された免震支承（LRB）

脚一桁合結橋の動的解析 モデル

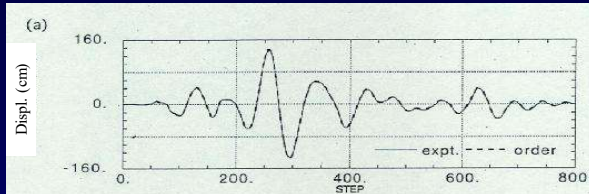


地震応答解析.

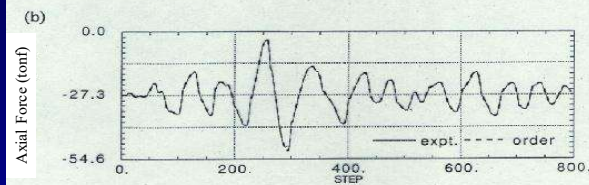
入力地震動として
兵庫県南部地震・JR鷹取駅でのNS方向の地震動の記録
を用いた地震応答解析を行い、
免震支承に生じる
・水平変形
・変動軸力
・回転変形
を求める。

阪神高速3号線 弁天工区

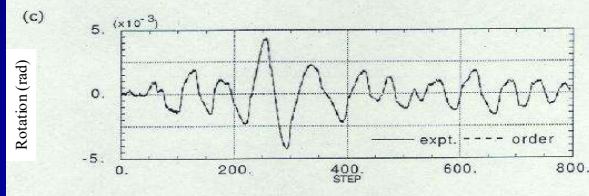
水平変位



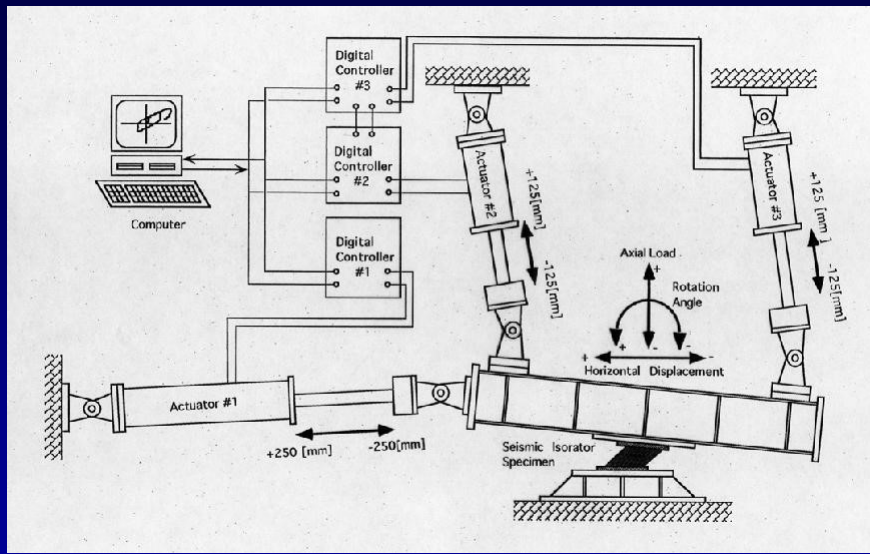
変動軸力



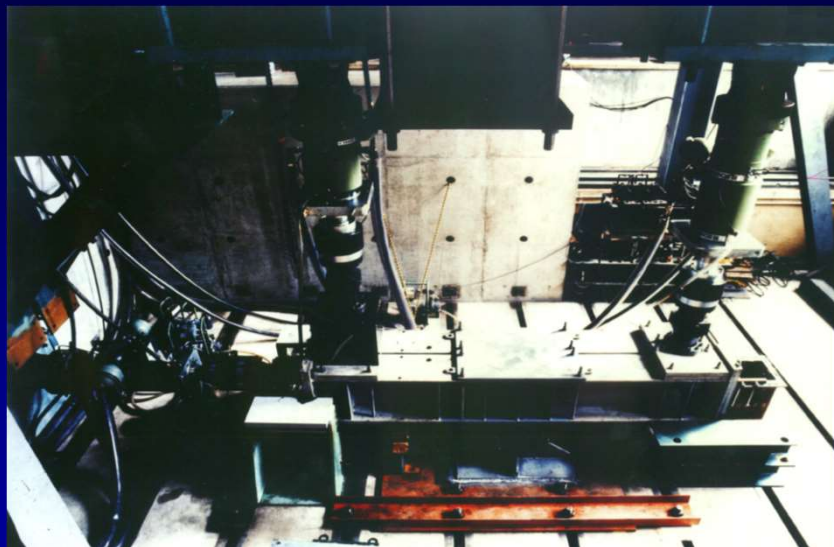
回転角



免震支承に作用する組み合わせ外力

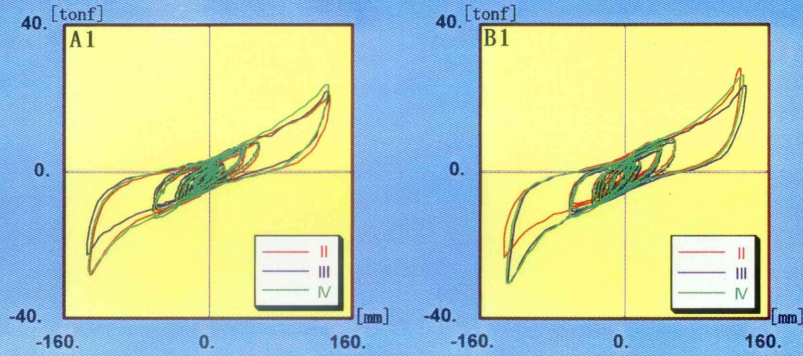


材端3自由度サブストラクチャーハイブリッド試験装置



材端3自由度裁荷試験装置の概要

水平変位-水平復元力



履歴ループは逆S字型

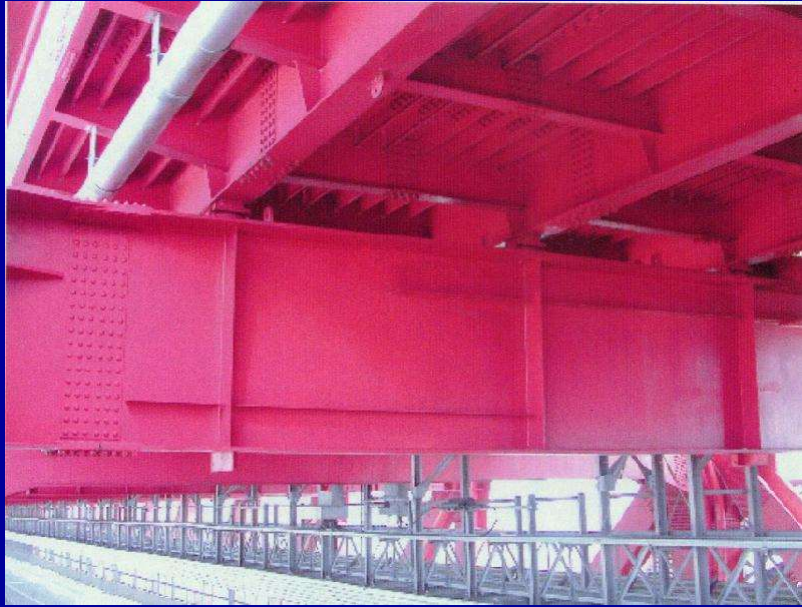
各種組み合わせ荷重下での免震支障の復元力特性

港大橋

橋梁形式	カンチレバートラス
全長	980 m
重量	45000 ton
交通量	114,800 台
完成	1974

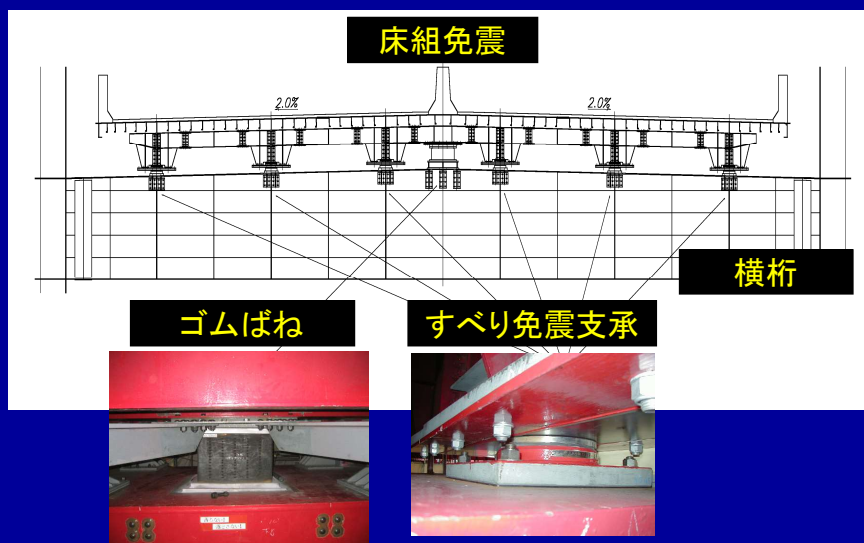


[Long span Truss]
 No.1: Quebec Bridge
 No.2: Forth Bridge
 No.3: 港大橋

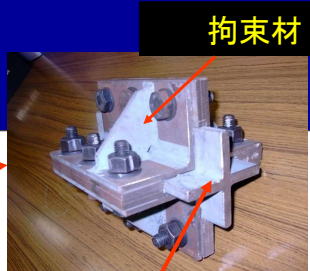
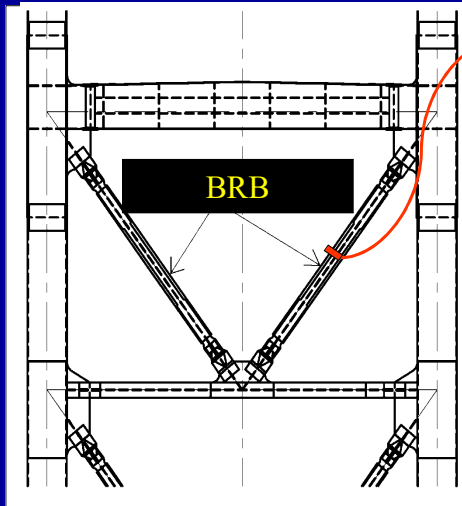


元設計では、横桁と床構造が結合されている

床組免震システム

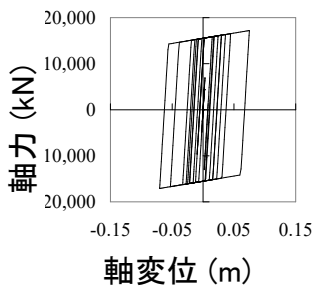


制震ブレース

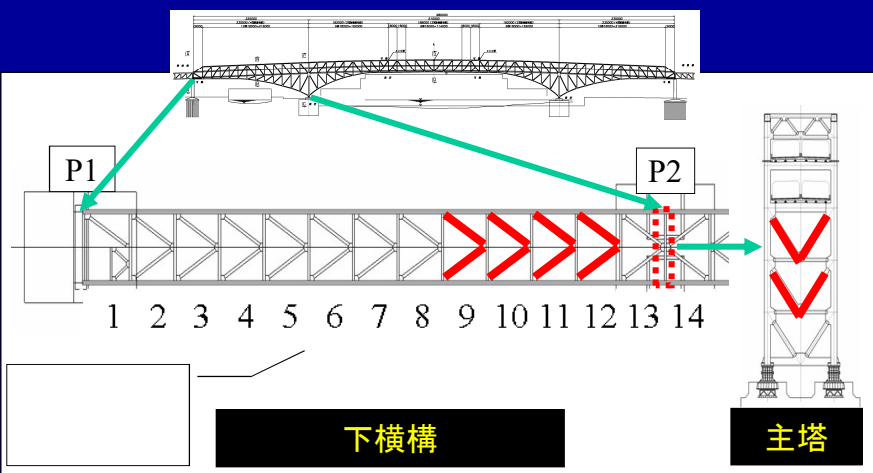


拘束材

芯材 (LYP225)



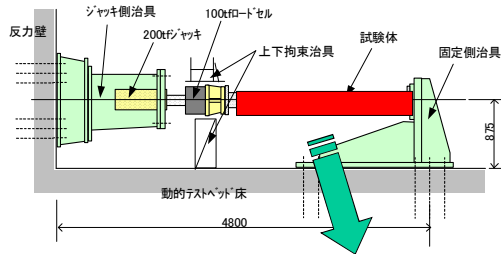
最適配置



下横構

主塔

繰り返し载荷試験



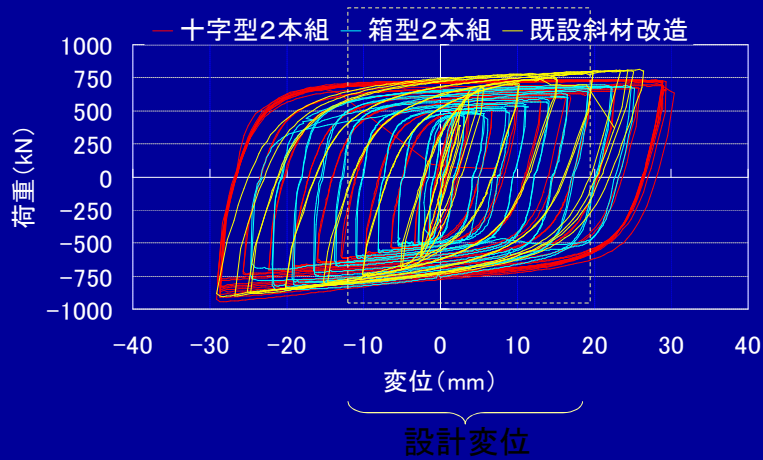
1 δ y, 2 δ y, 4 δ y
→2回

↓
 2%ひずみ→20回

構造特徴	部材長 (mm)	塑性化長 (mm)	板厚 (mm)	断面積 (mm ²)
十字型2本組	2265	1468	8.2	2312
箱型2本組	2265	1225	8.2	2296
既設斜材改造型	2265	1468	6	1644

荷重変位関係

構造	heq	η
十字型	0.47	1124
箱型	0.50	580
既設改造	0.37	200



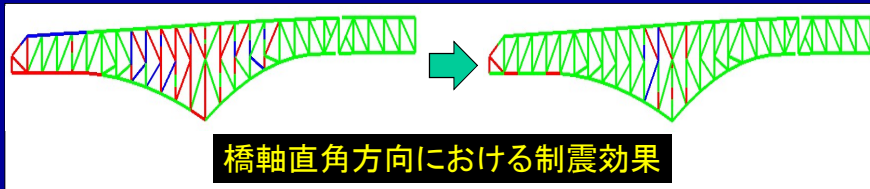
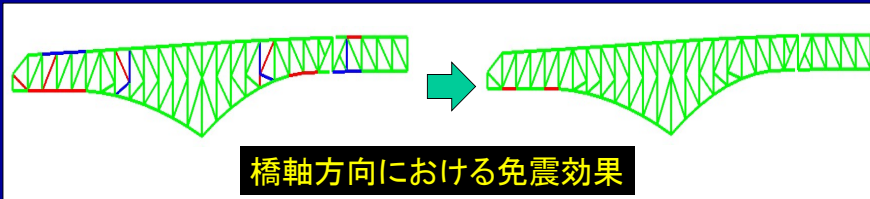
部材応力比

応力比:
 $R = \sigma / \sigma_a$

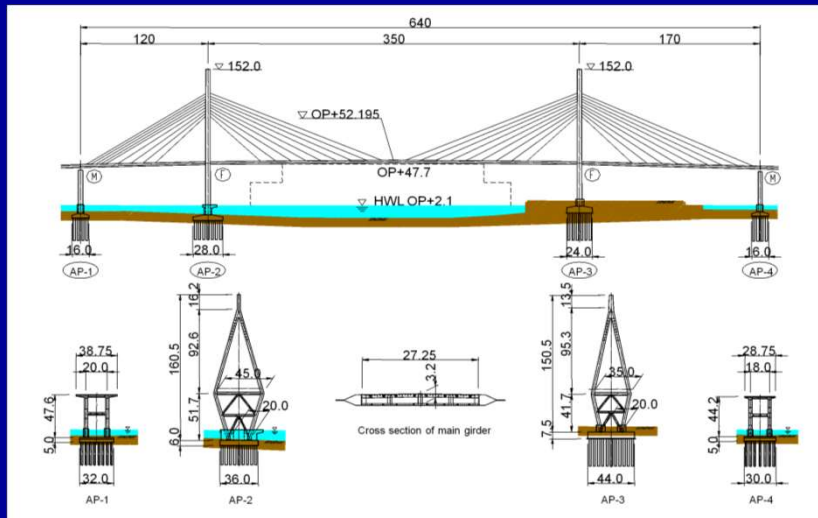
Red: 座屈, $1 < R$

: 引張, $R < -1$

Green: 弾性, $-1 \leq R \leq 1$

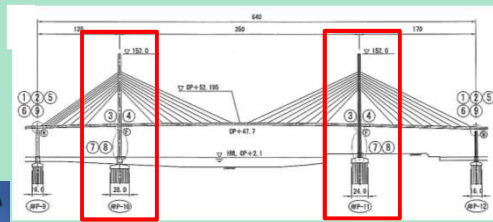


天保山大橋構造概要



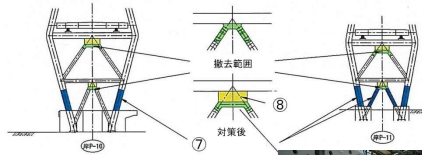
当初より耐震性を考慮し、フレキシブルタワーによる長周期構造としていた

耐震補強内容 主塔

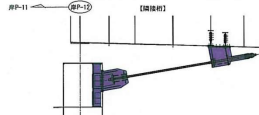


⑦コンクリート充填補強【岸P-10、11】

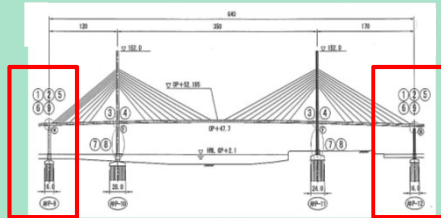
⑧せん断型制震パネルの設置【岸P-10、11】



⑨隣接橋梁との落橋防止構造【岸P-9、12】



耐震補強内容 端橋脚

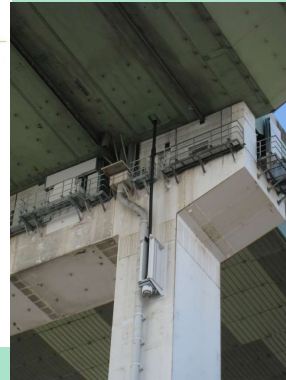
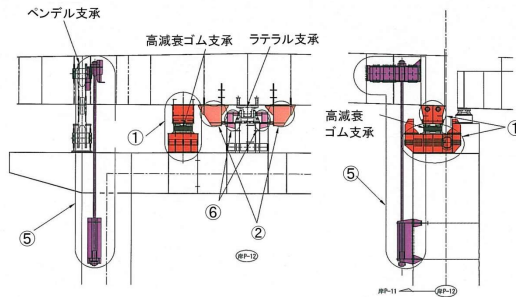


①橋軸方向変位制限構造【岸P-9、12】

⑤負反力用ケーブル支承【岸P-9、12】

②橋直方向変位制限構造【岸P-9、12】

⑥ラテラル支承の補強【岸P-9、12】

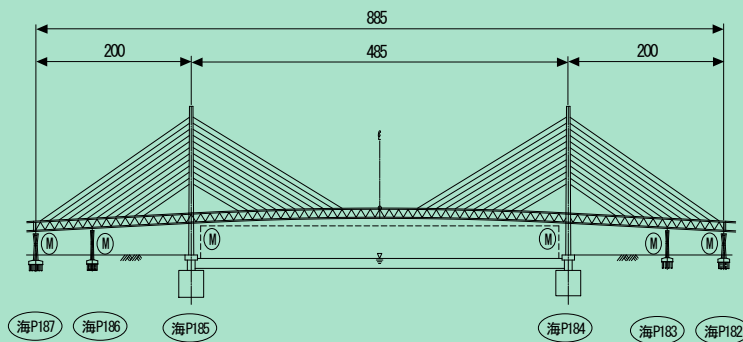




改修前の天保山大橋

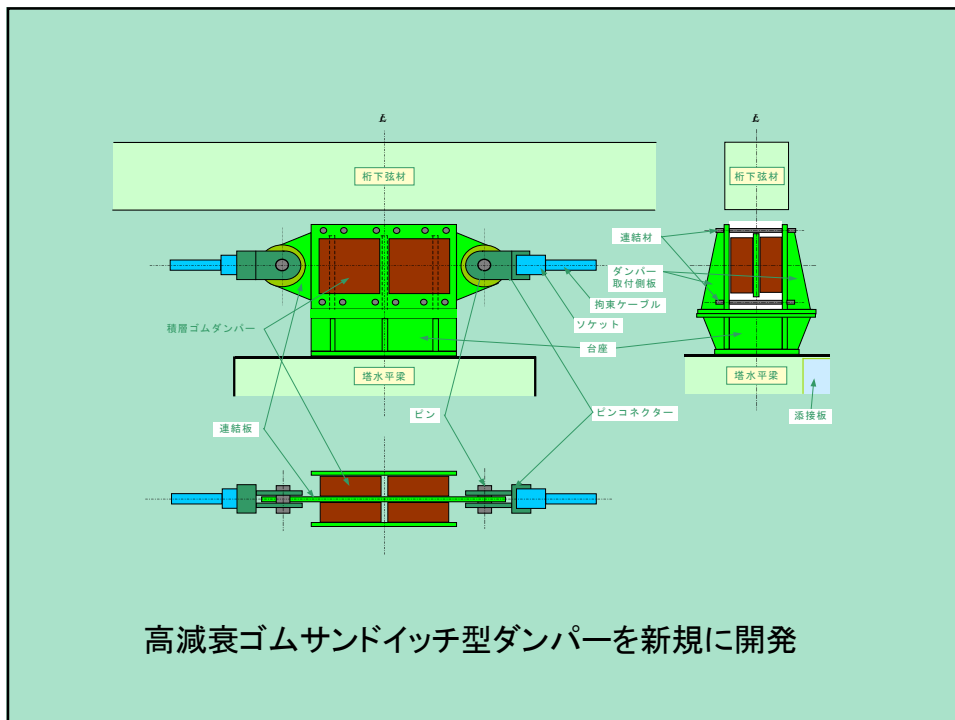


改修後の天王山大橋

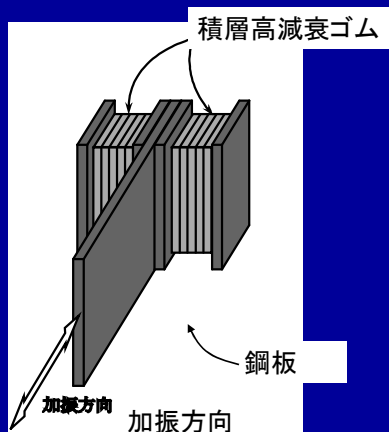


東神戸大橋の耐震補強

- ・フローティング桁構造で、変形しやすい。
- ・過度の変形による、細部の損傷やタワーの安全性の危惧。
- ・大容量、大ストロークのダンパーの必要性



試作HDRダンパー供試体

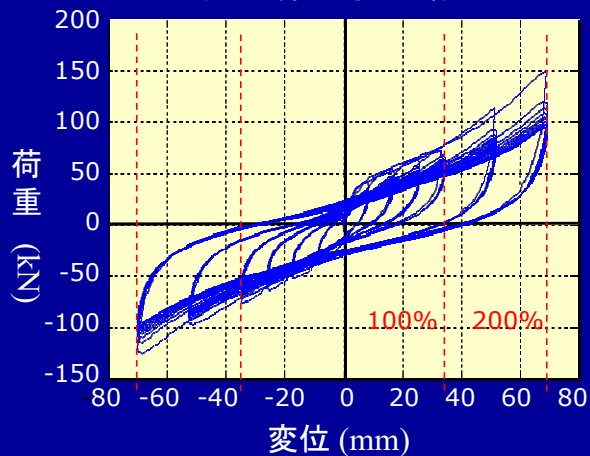


積層ゴム	2基
積層ゴム寸法	150mm × 150mm
ゴム層厚	7mm × 5層
せん断弾性係数	G12相当



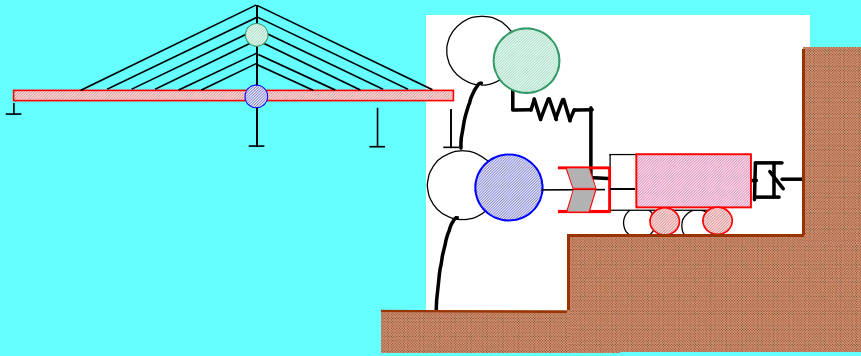
高減衰ゴムダンパーの復元力

<せん断ひずみ-荷重 履歴曲線>



繰り返し载荷の影響が見られる

ハイブリッド実験用3自由度モデル

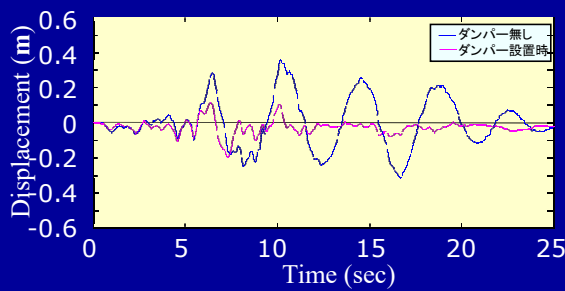


$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx + f_d = -M\ddot{u}_g$$

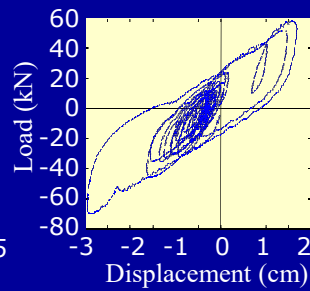
63

ダンパー効果の実験結果

JMA神戸(兵庫県南部地震)入力時



橋桁—橋脚相対変位の比較



HDRダンパー履歴ループ

64

実験結果 最大応答値

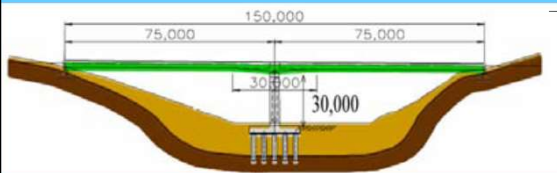
	ダンパー無し	ダンパー有り
桁-橋脚 相対変位(m)	0.3579	0.1149
桁-橋脚 相対速度(m/s)	1.0899	0.8123
桁 絶対加速度(m/s ²)	0.9842	1.6810

応答低減比率: 約30.6%(相対変位)

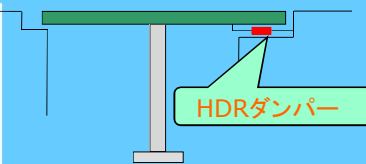
65

高橋脚橋梁へのダンパー設置

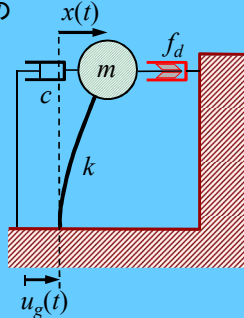
対象橋梁



設置の仕組み



対象橋梁のモデル化



m	3622.45 (t)
c	1648.45 (kN · s/m)
k	490141.57 (kN/m)
f_0	1.85 (Hz)

66

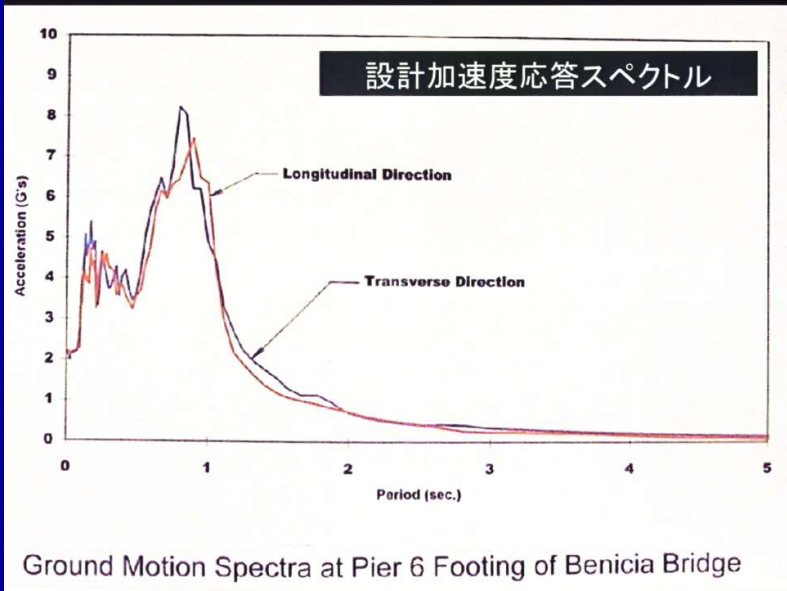
カルトランスにおける 長大橋の免震・制震

- Benicia Martinez 橋
- Golden Bridge
- East Bay Bridge

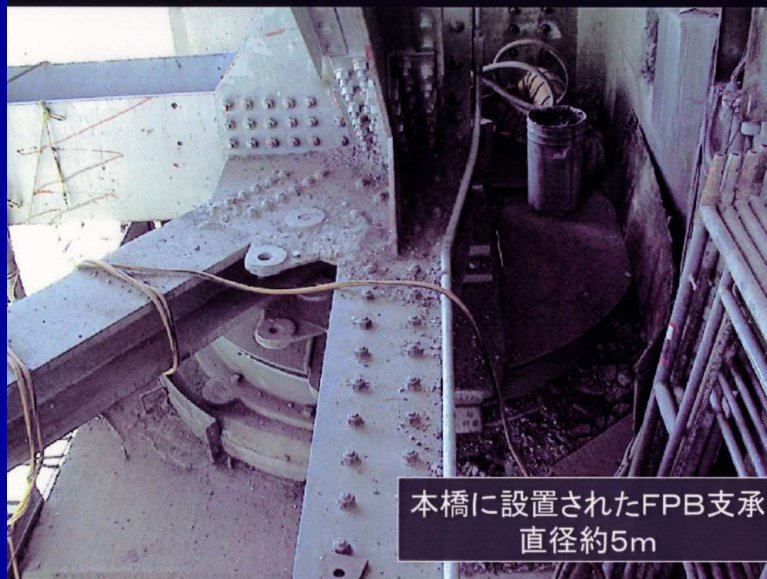
Benicia Martinez 橋



Benicia Martinez 橋



Benicia Martinez 橋

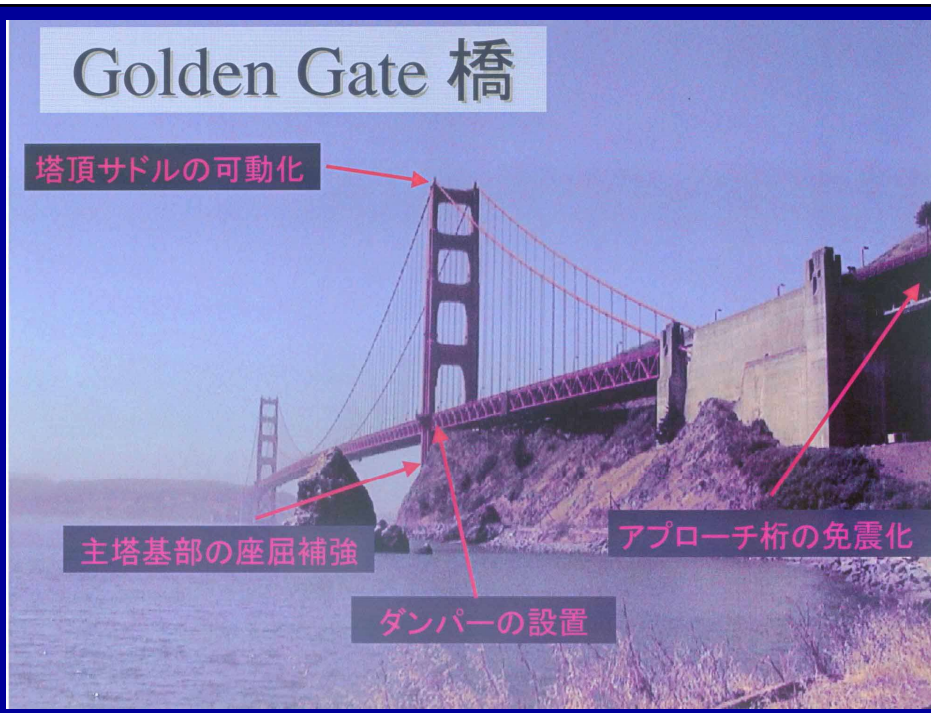


Benicia Martinez 橋



FPB支承模型 (EPS社訪問時)

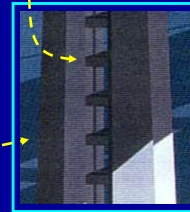
Golden Gate 橋



サンフランシスコの East Bay
Bridge塔の塑性ダンパー



Shear Links



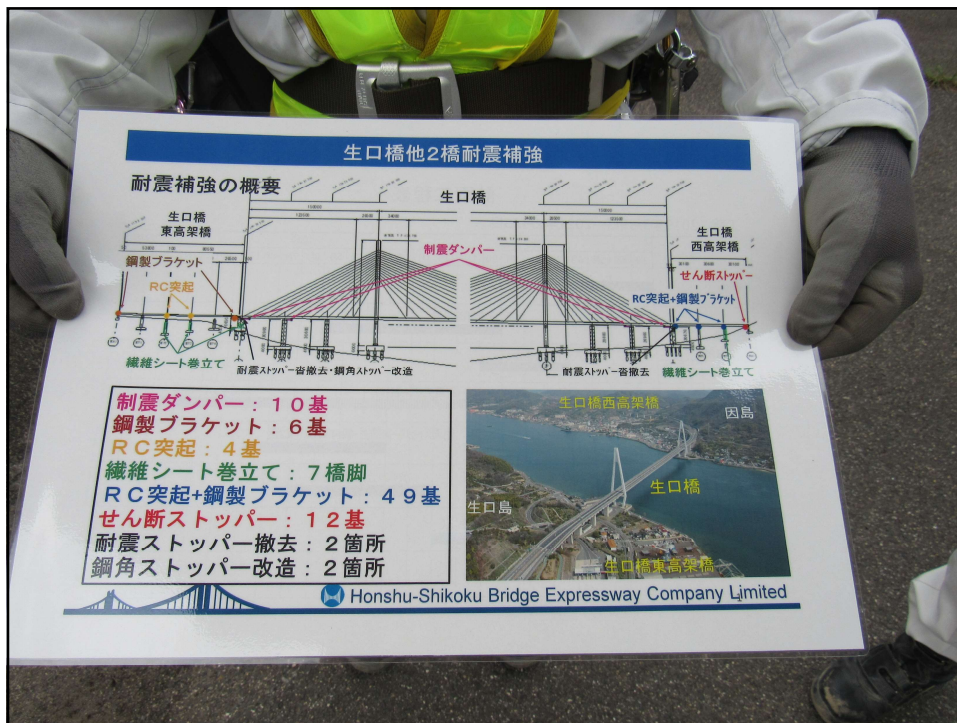
本州四国連絡橋の耐震補強



しまなみ海道生口橋



しまなみ海道生口橋





しまなみ海道
はサイクリング
の聖地



塔中からの
ダイナミック
な景観

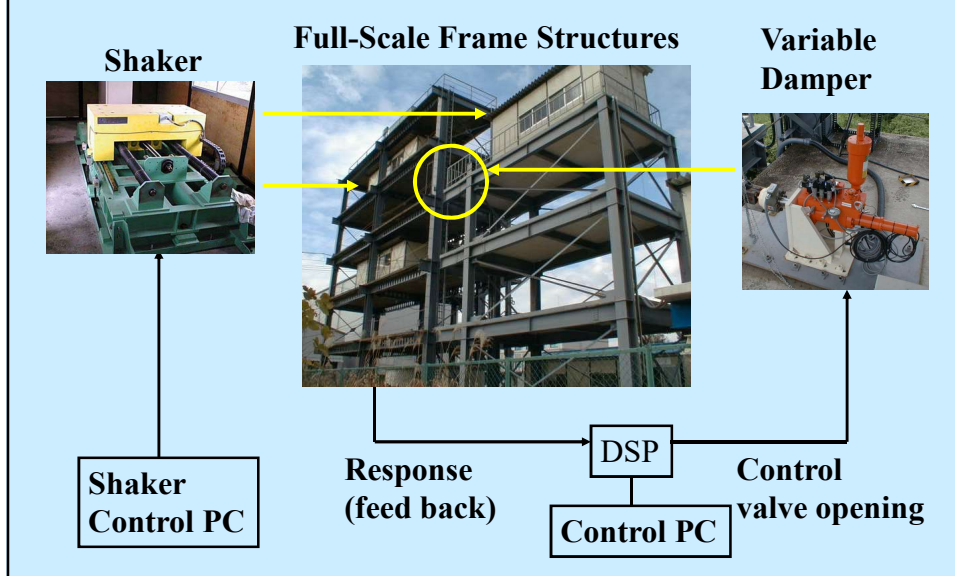


負剛性減衰力の有効性の発見と 新ダンパーの開発

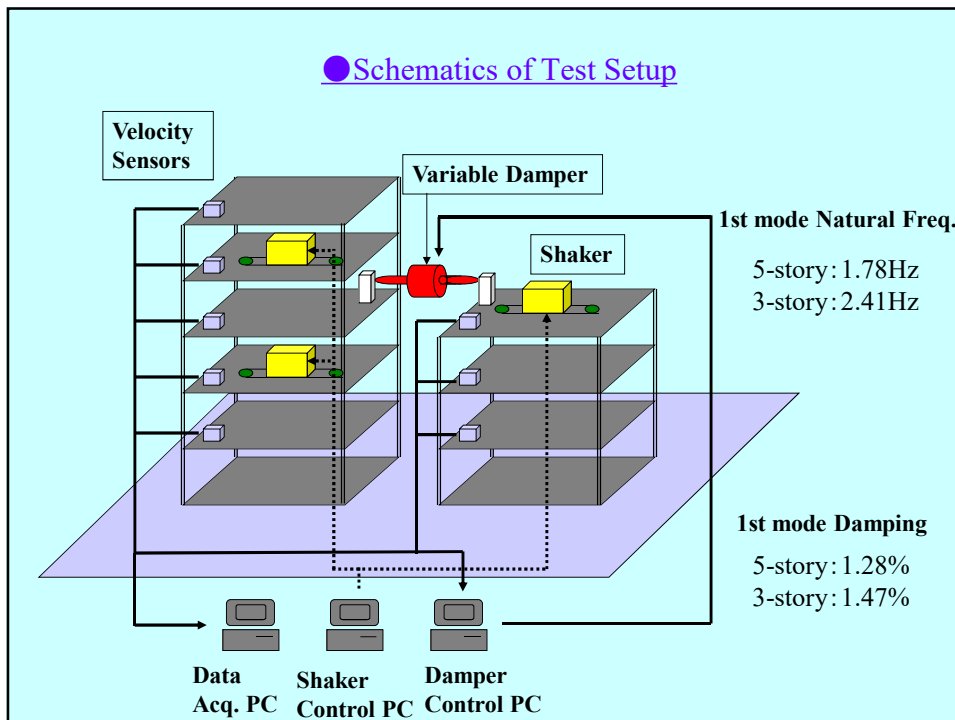
- ・ヴァリアブルダンパーの最適制御中に
負剛性の出現を発見
- ・負剛性ダンパーの有効性を
ベンチマークテストにより確認
- ・スカイフックダンパーも、負剛性減衰力を
発生することを、理論的に発見
- ・鹿島のセミアクティブダンパーも
負剛性を出現

● Test Setup for Joint Damper System

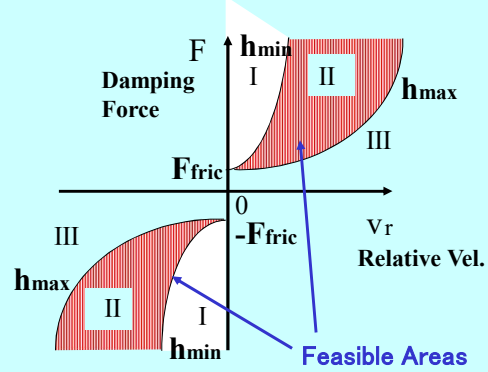
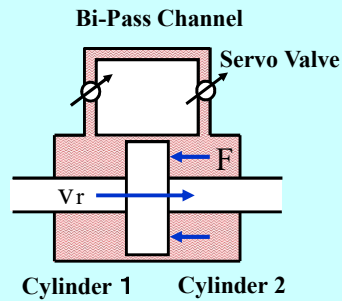
Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ.



● Schematics of Test Setup



Schematics of the Variable Damper Device



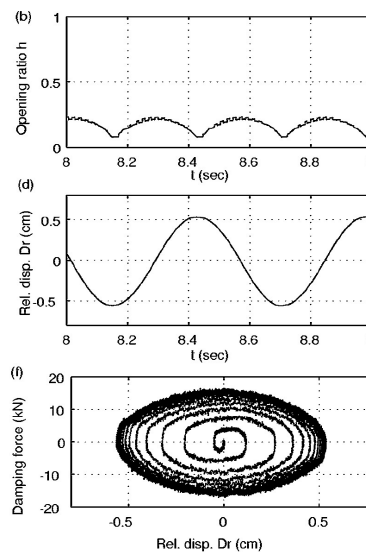
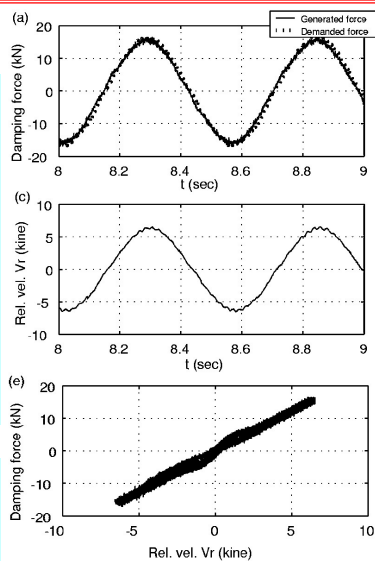
Dynamic Characteristics

$$F(h, v_r) = \text{sgn}(v_r) \left\{ \left(\frac{159.232}{h^2} + 307.2 \right) v_r^2 + 0.6 \right\}$$

Experimental Result *

Viscous Type Control (sinusoidal input)

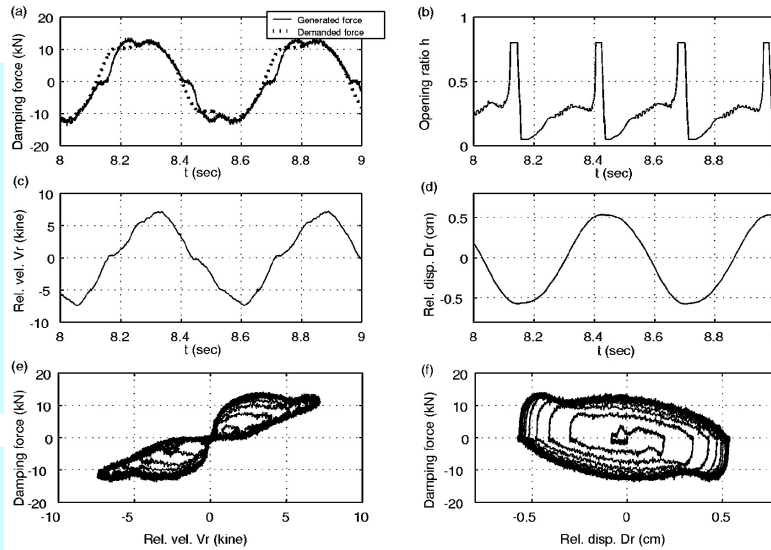
* Iemura et al., 2001



Experimental Result *

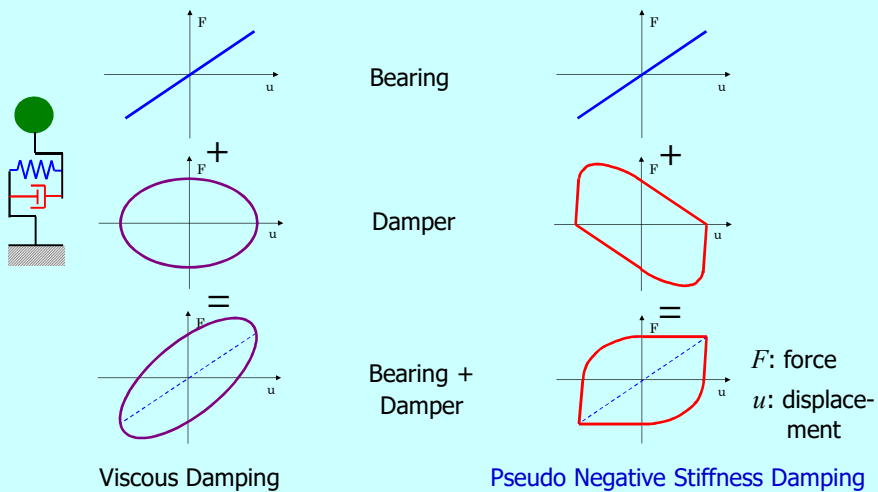
LQR Type Control (sinusoidal input)

* Iemura et al., 2001



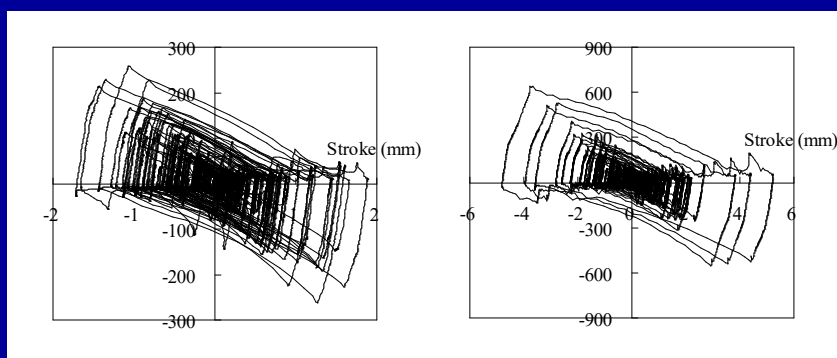
Advantage in Energy Absorption

Pseudo Negative Stiffness





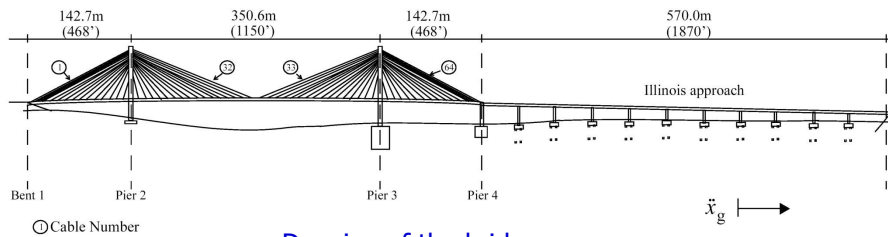
高層ビルの制震
に用いられてい
る鹿島のセミアク
チブダンパー



セミアクチブダンパーの復元力も負剛性を示している

Benchmark Control Problem for Cable-stayed Bridges

Benchmark problem focuses on Bill Emerson
Memorial Bridge in Cape Girardeu, Missouri, USA



Drawing of the bridge

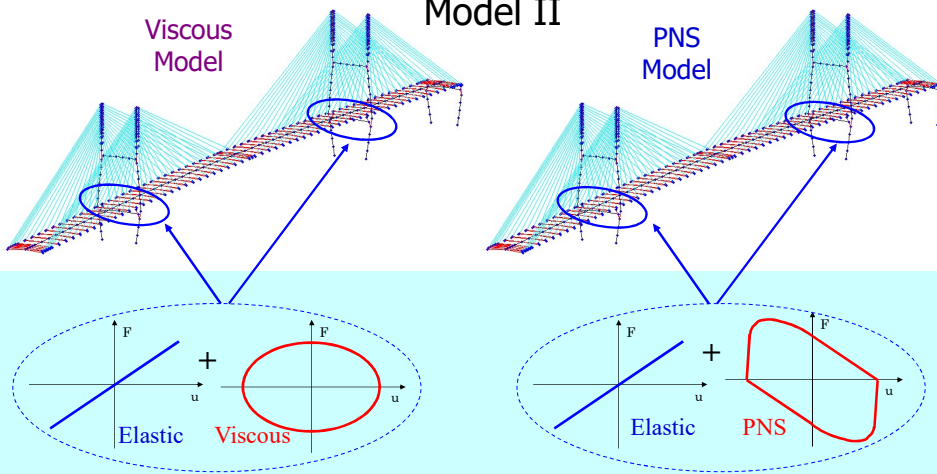
Cable-stayed Bridge with total length of 636 meter

Application of PNS and Viscous Dampers to the Benchmark Control Problem

Model II

Viscous
Model

PNS
Model

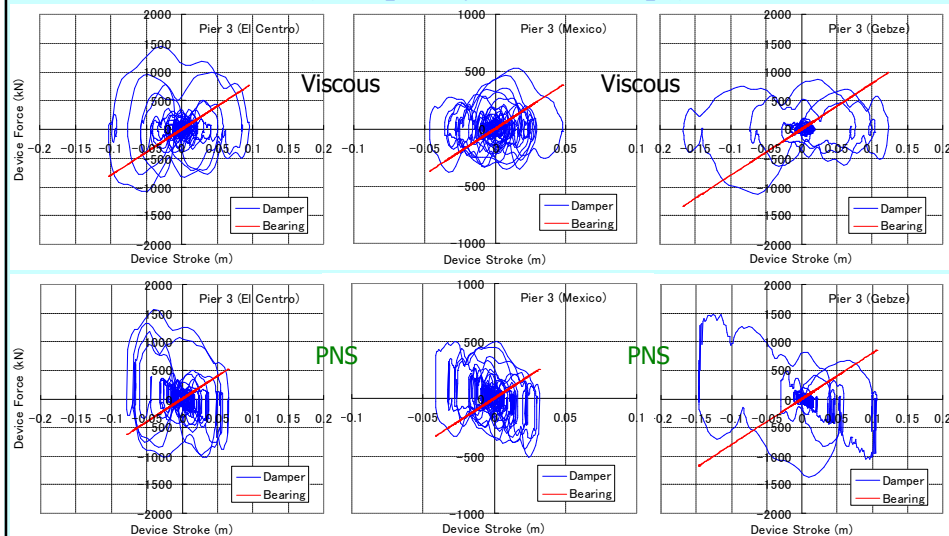


Application of PNS Damper to the Benchmark Control Problem for Cable-stayed Bridges (Results of Evaluation Criteria)

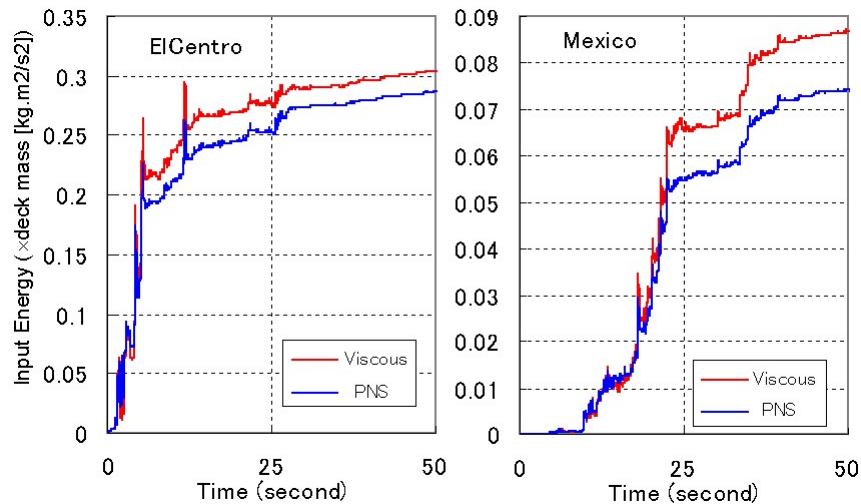
Evaluation Criteria	El Centro		Mexico		Gebze	
	Viscous	PNS	Viscous	PNS	Viscous	PNS
J1: tower shear force at base	0.334	0.327	0.479	0.448	0.482	0.467
J2: tower shear force at deck level	1.016	0.933	1.137	1.047	1.234	1.193
J3: tower moment at base	0.300	0.248	0.607	0.504	0.532	0.491
J4: tower moment at deck level	0.638	0.516	0.578	0.536	1.094	0.890
J5: deviation of cable tension	0.167	0.175	0.063	0.060	0.123	0.117
J6: deck displacement	1.340	1.110	2.511	2.178	2.798	2.476
J7: normed J1	0.227	0.213	0.405	0.375	0.412	0.366
J8: normed J2	0.989	0.907	1.015	0.913	1.220	1.127
J9: normed J3	0.297	0.259	0.513	0.420	0.567	0.478
J10: normed J4	0.834	0.761	1.103	0.955	1.195	1.066
J11: normed J5	0.024	0.023	0.009	0.009	0.016	0.015
J12: force by control devices	3.529e-3	2.846e-3	1.471e-3	1.116e-3	3.922e-3	3.710e-3
J13: stroke of control devices	0.876	0.660	0.404	0.352	1.449	1.320
J16: number of control devices	20	20	20	20	20	20
J17: number of sensors	0	4	0	4	0	4

Viscous and PNS dampers have the same damping coefficient

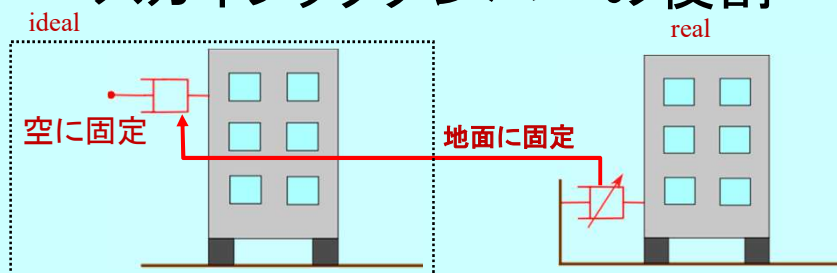
Application of PNS Damper to the Benchmark Control Problem for Cable-stayed Bridges (Damper hysteretic loops)



Application of PNS Damper to the Benchmark Control Problem for Cable-stayed Bridges (Earthquake Input Energy)

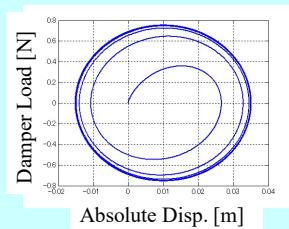


スカイフックダンパーの役割



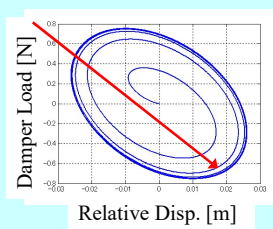
- A structure is connected to **the virtual fixed point** through a dashpot.
- Even in an earthquake, the fixed point never moves like sky.
- So this system is called 'Skyhook System.'
- Skyhook System can reduce **absolute response**.
- Of course, the fixed point is just ideal.
- Skyhook control is the method to control a groundhook damper to follow the target load that would be generated by the skyhook dashpot.

空に固定したダンパーの力を地面に固定したダンパーで発生させられないか？



Hysteretic loop with horizontal axis of absolute displacement

Damper load is proportional to absolute velocity.

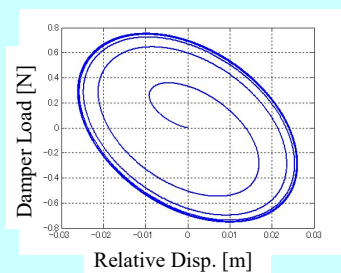


Hysteretic loop with horizontal axis of relative displacement

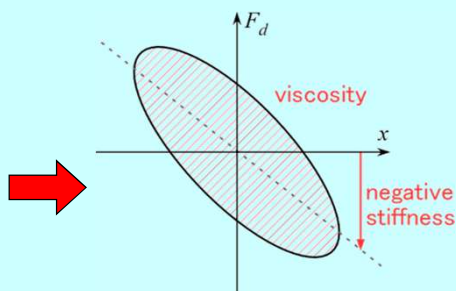
負の剛性が見つかった

97

負の剛性のバネを開発できればよい



$$F_d = c_{sh}(\dot{x} + \dot{z})$$



$$F_d = -k_{ens}x + c_{ens}\dot{x}$$

- The hysteretic loop of Skyhook Control can be represented by negative stiffness and viscosity.
- Relative displacement can be measured directly.
- Skyhook performance can be reproduced more simply.

98

付録:我が家の制振と耐震補強

- 木造90年
- 耐震補強だけでなく、水周りも改修
- 屋根瓦を軽く、壁パネルで偏心を除去
- 仕口ダンパーで、減衰性能を確保
- 震度7にも対応
- 新築の60%の支出
- 古い木造の家は保存された

耐震補強

既存の耐震要素

↑耐 震 ↑補 強↑



荒壁パネル

仕口ダンパー

葺土除去

床と屋根の面の補強



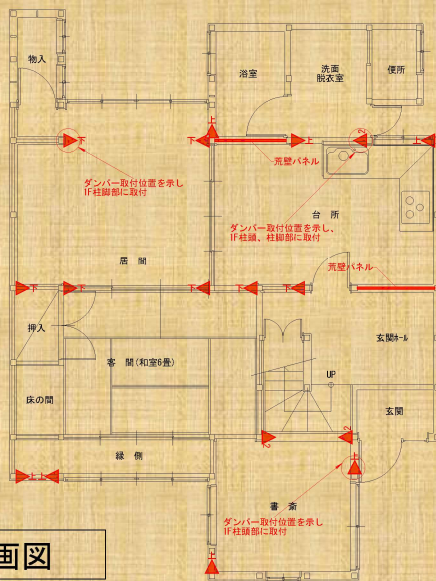
床



屋根

水平構面の改善

補強計画



仕口ダンパー
20個
荒壁パネル
2枚

1階補強計画図

居間や水まわりも新築そっくり



居間

洗面所

台所

住みやすさ = 安心性

外見も美しく改修



仕口ダンパー

ご清聴ありがとうございました

- 免震・制震デバイスは、まだまだ新開発の余地のある分野です。
- 皆様の、積極的な挑戦を期待しています。