

(財)土木研究センター
橋梁の免震設計に関する講習会

東日本大震災による橋梁被害と免震設計

平成23年12月6日

東京工業大学大学院理工学研究科
土木工学専攻
川島一彦

東北地方太平洋沖地震の震源域

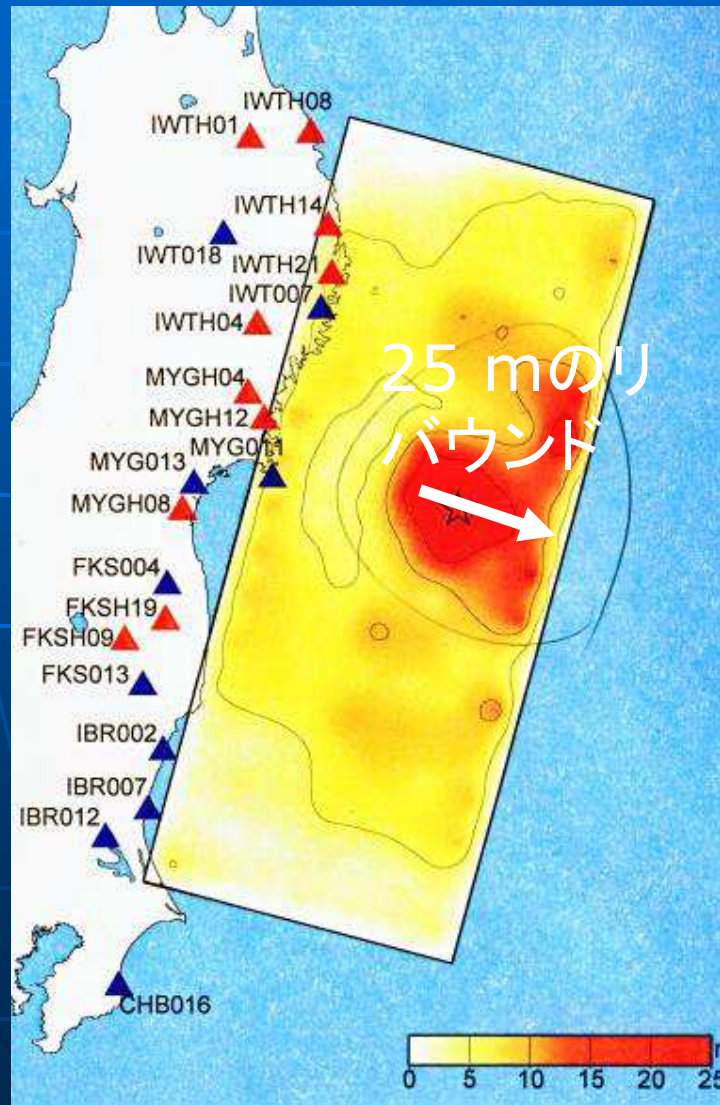
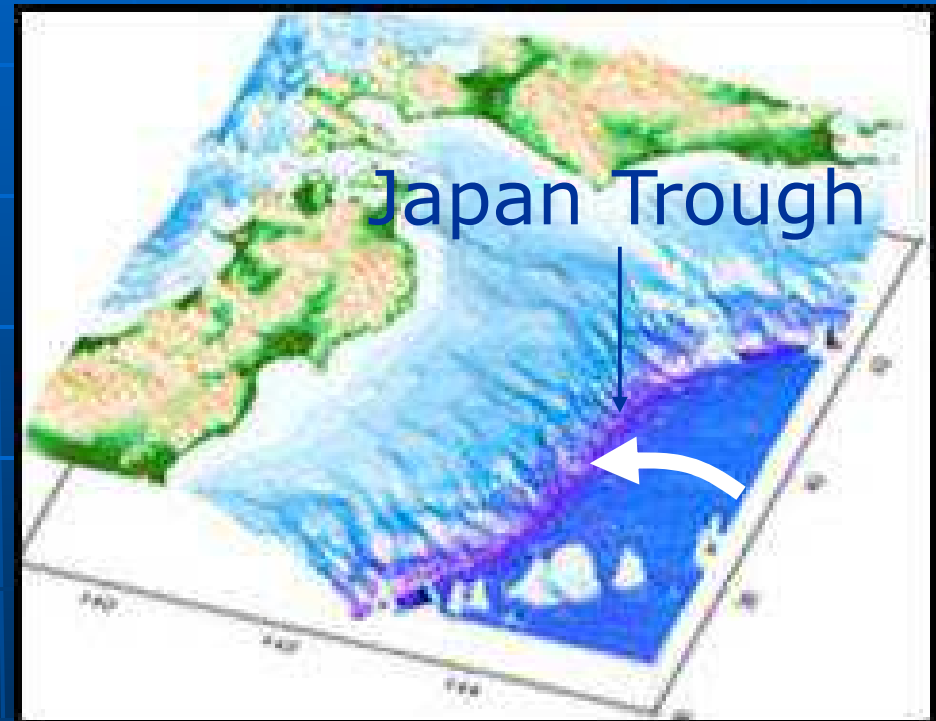


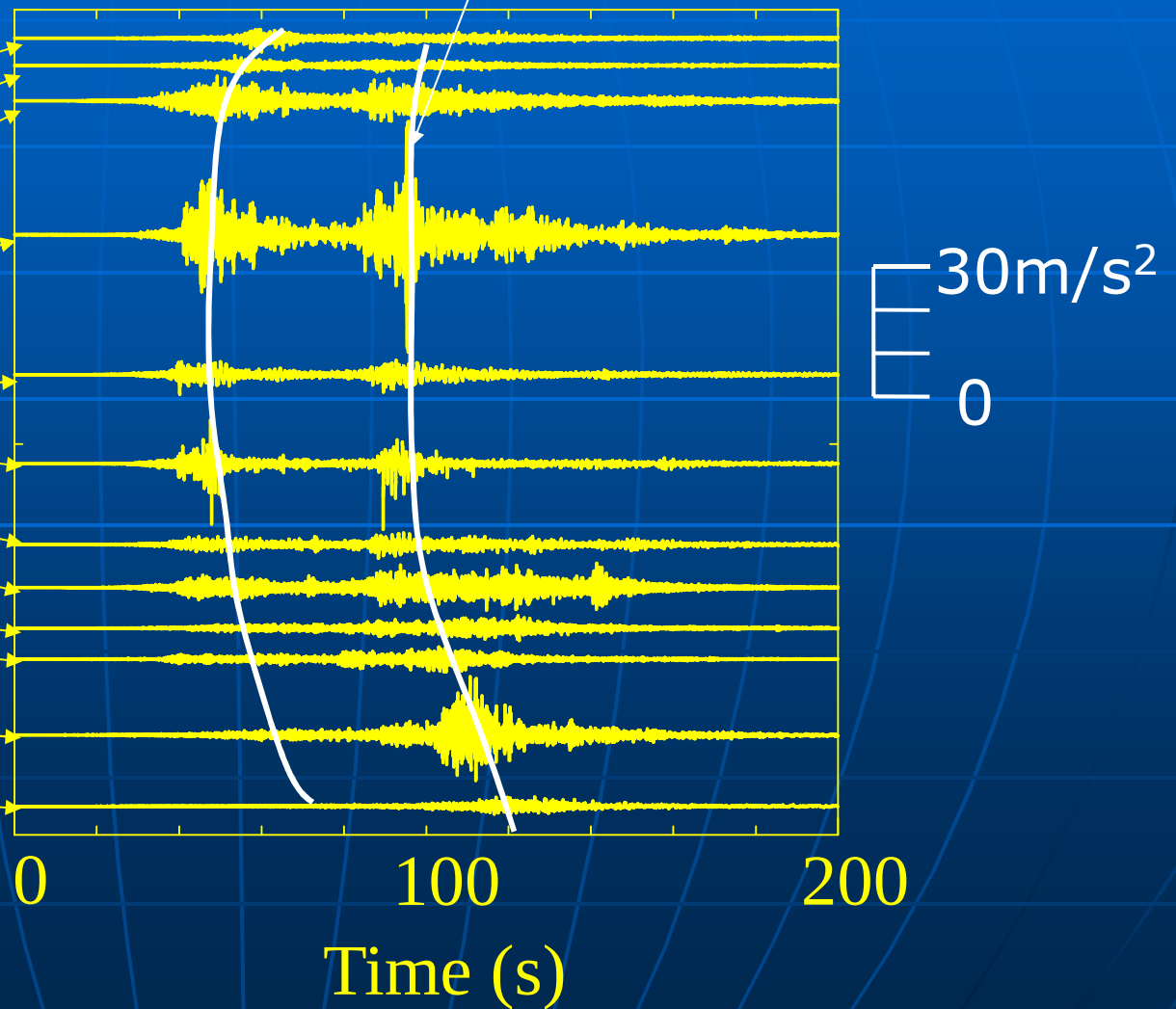
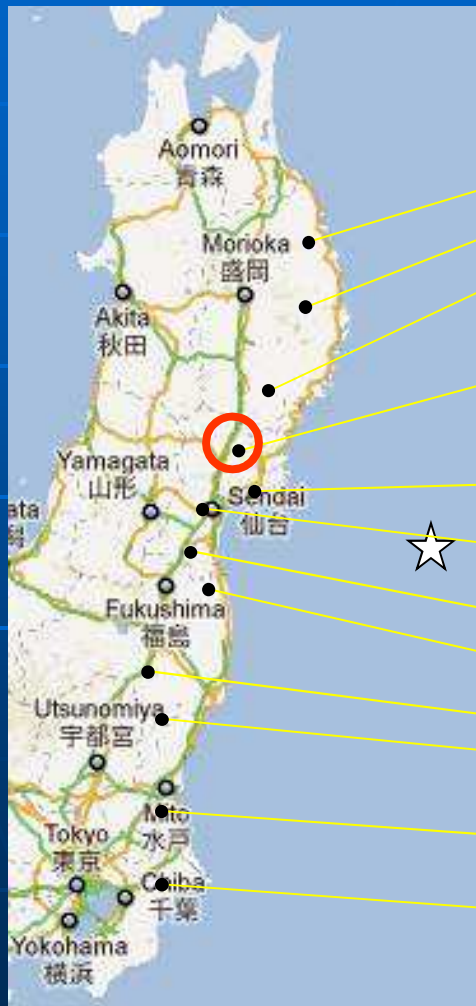
Plate Tectonics at Tohoku



太平洋岸の強震記録を見ると、.....

築館

最大加速度 = 27.0 m/s^2

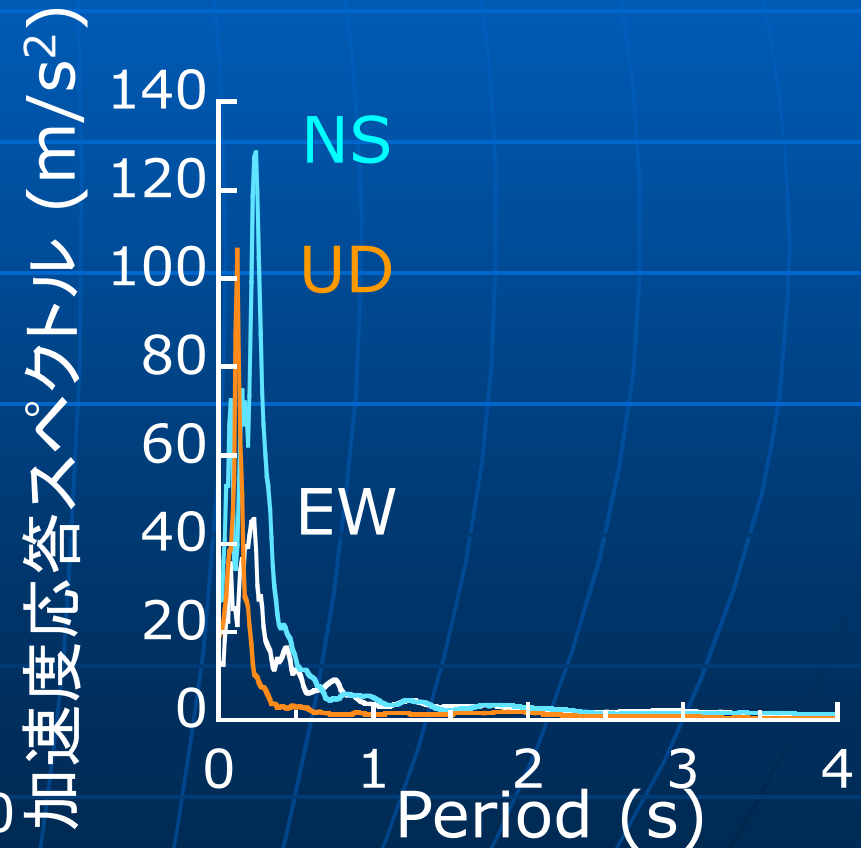
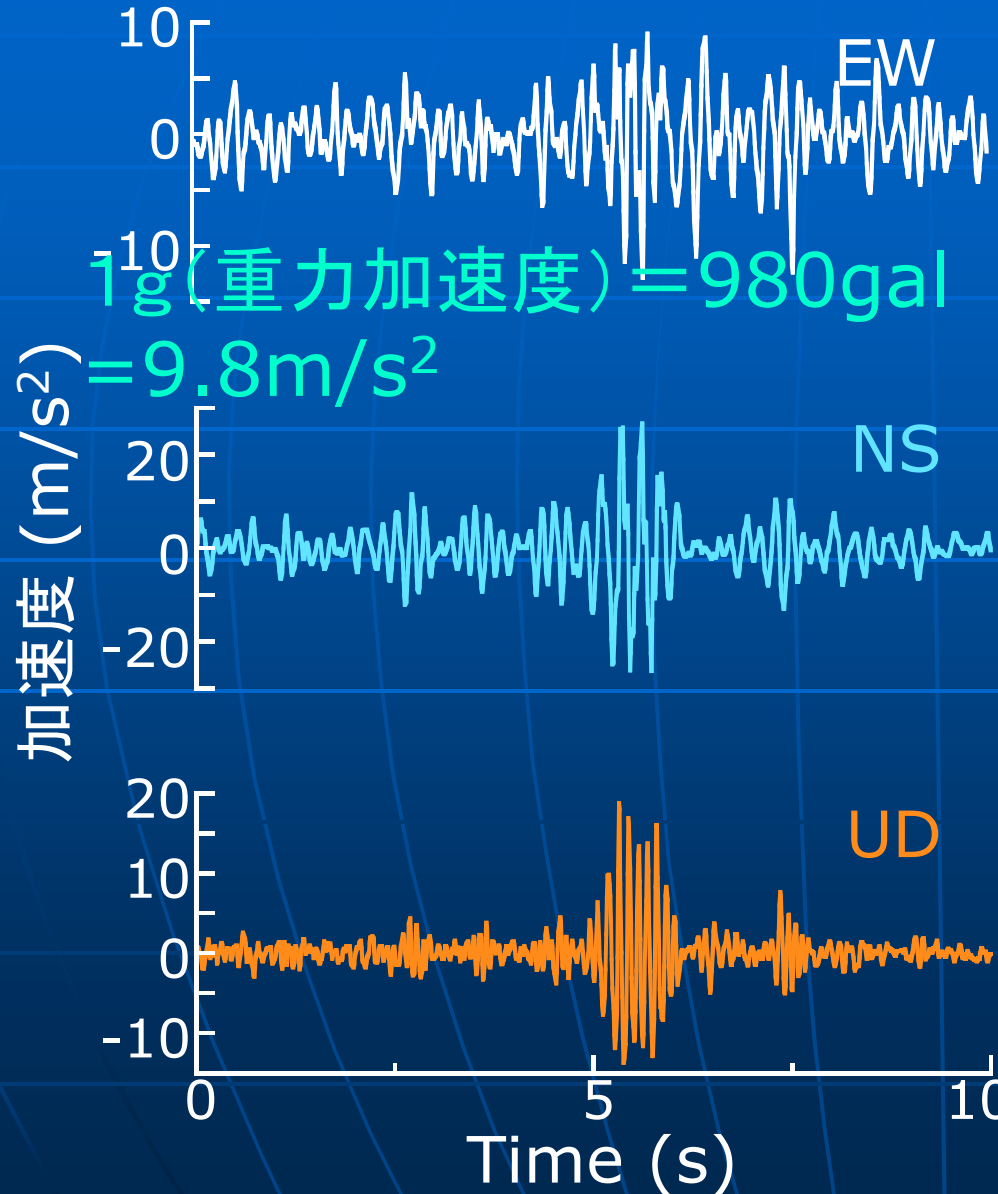


加速度応答スペクトルが最も大きかった築館

震度7

加速度応答スペクトル
= 構造物に生じる慣性力/m
= 構造物加速度

1g(重力加速度) = 980gal
= 9.8m/s²



ほとんど被害が生じなかった築館 被害と相関が薄い気象庁震度



モルタルの剥落

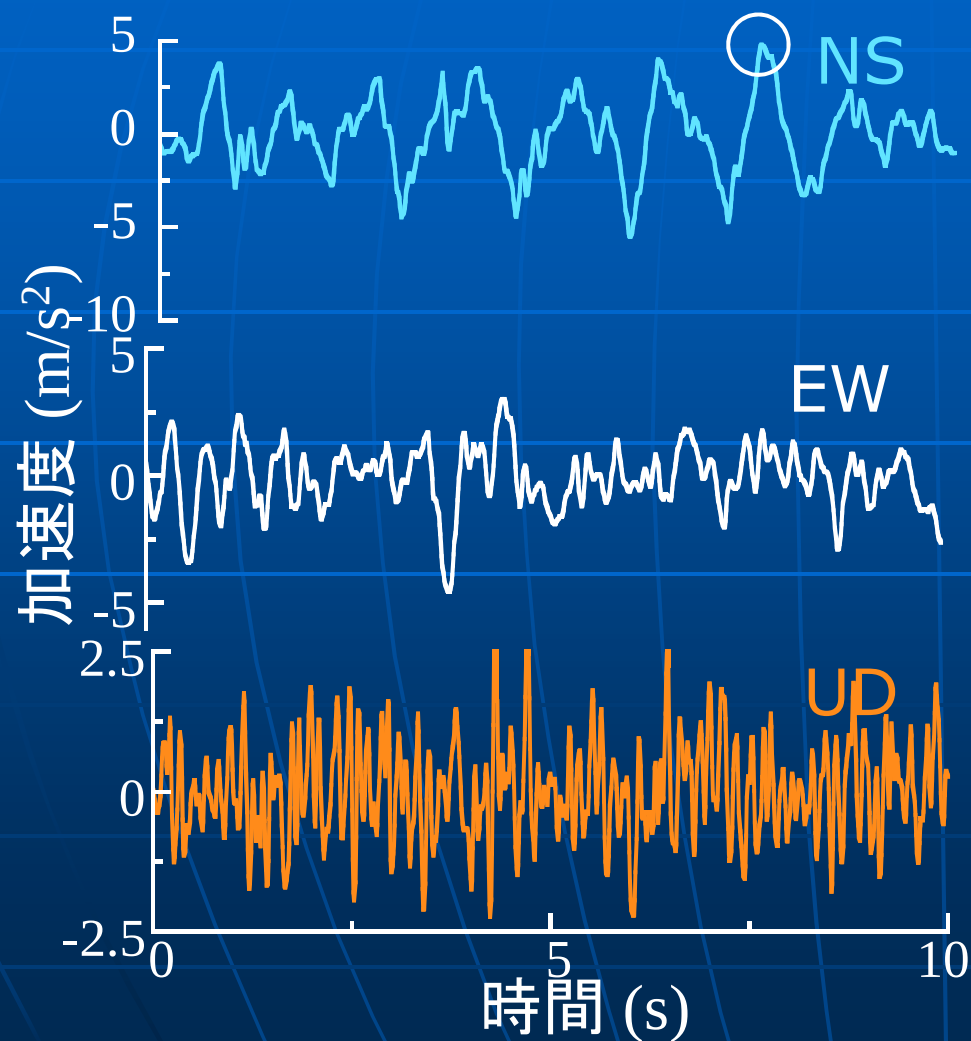


ブロック塀の倒壊

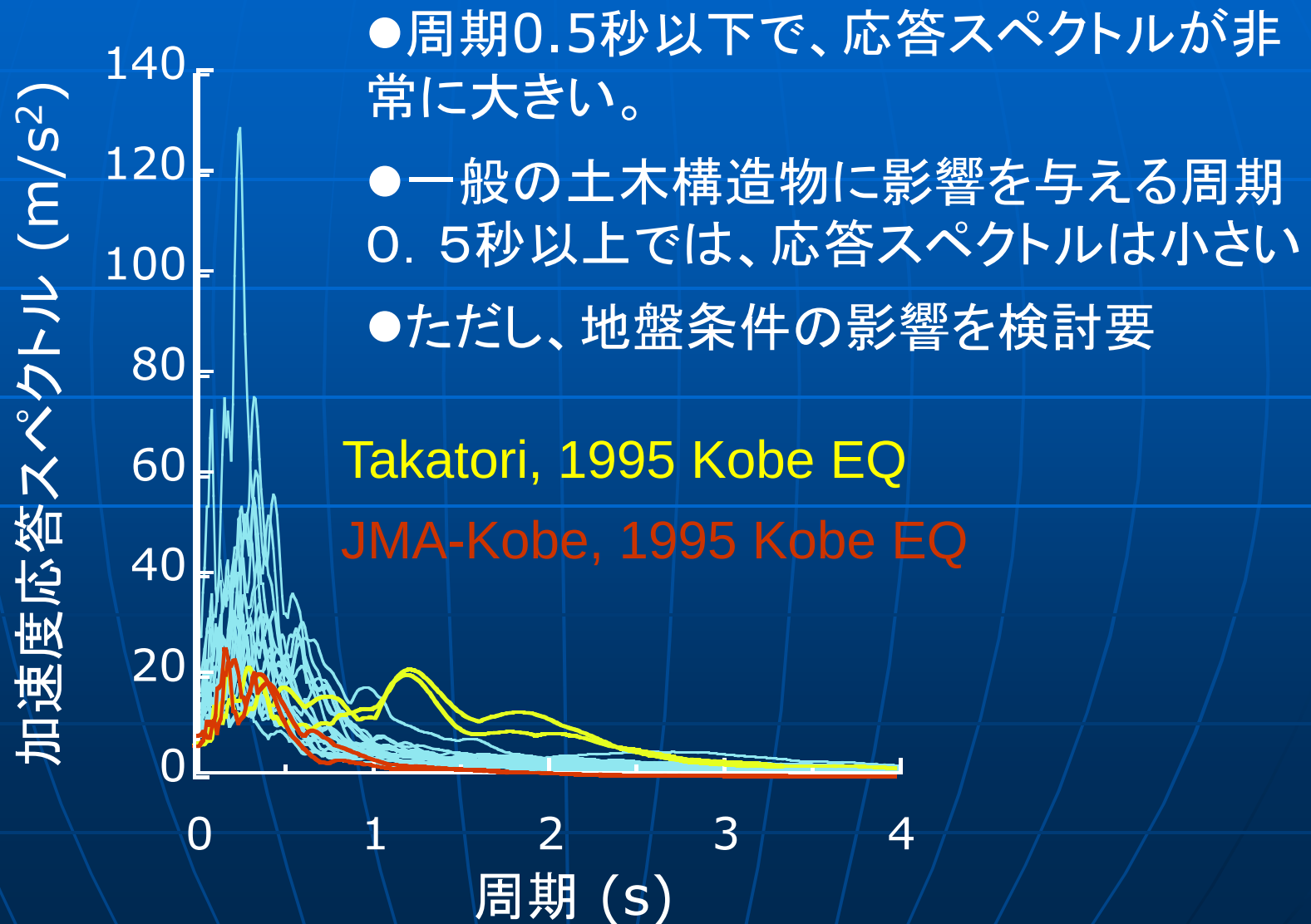
軟弱地盤上の記録はほとんど無いが、こうした箇所
では、1-2秒でも応答はかなり大きい

古川市

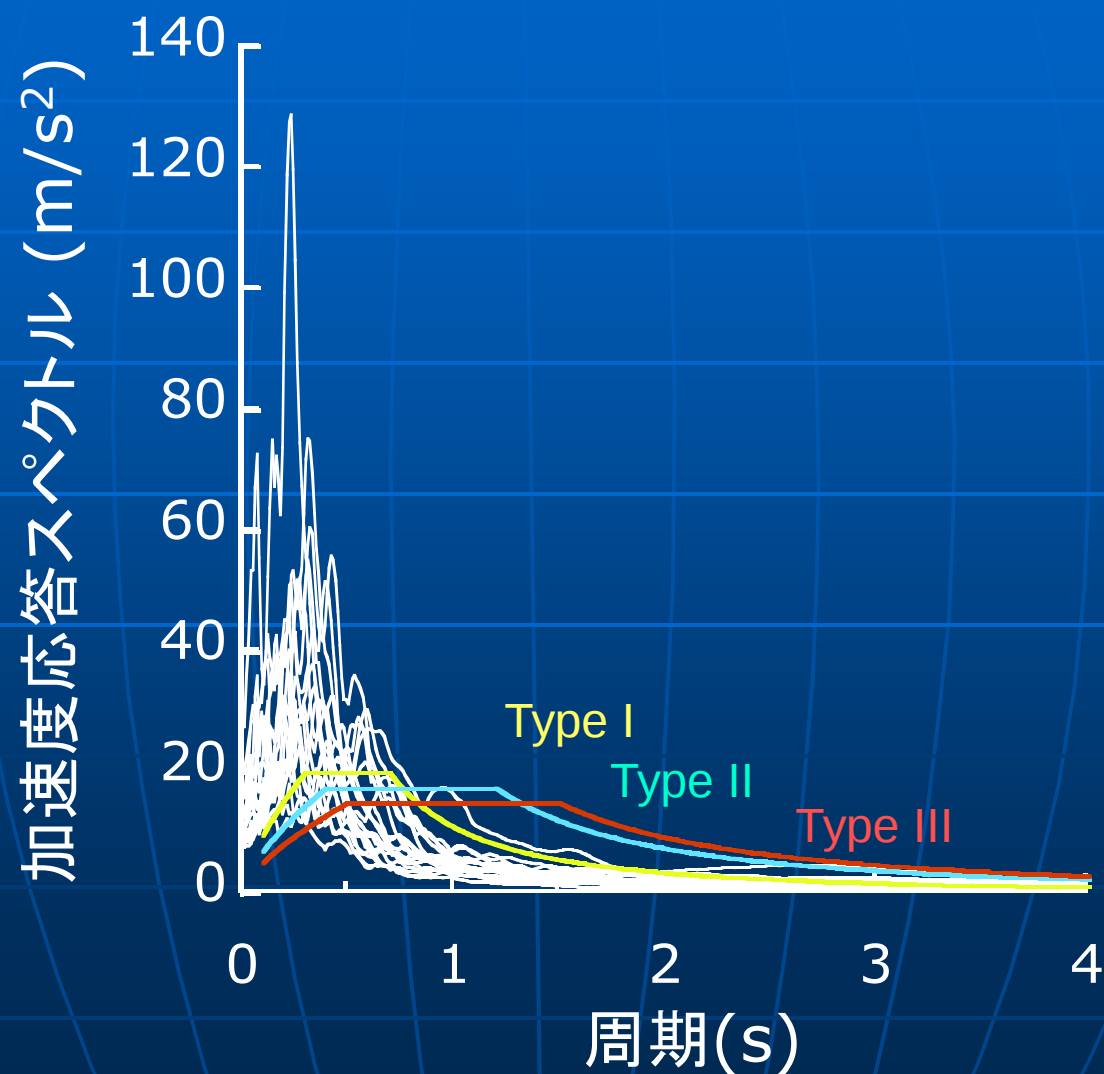
5.49m/s²



1995年兵庫県南部地震による代表的地震動との比較 JMA神戸、及び、JR鷹取駅



道路橋示方書タイプ2地震動との比較



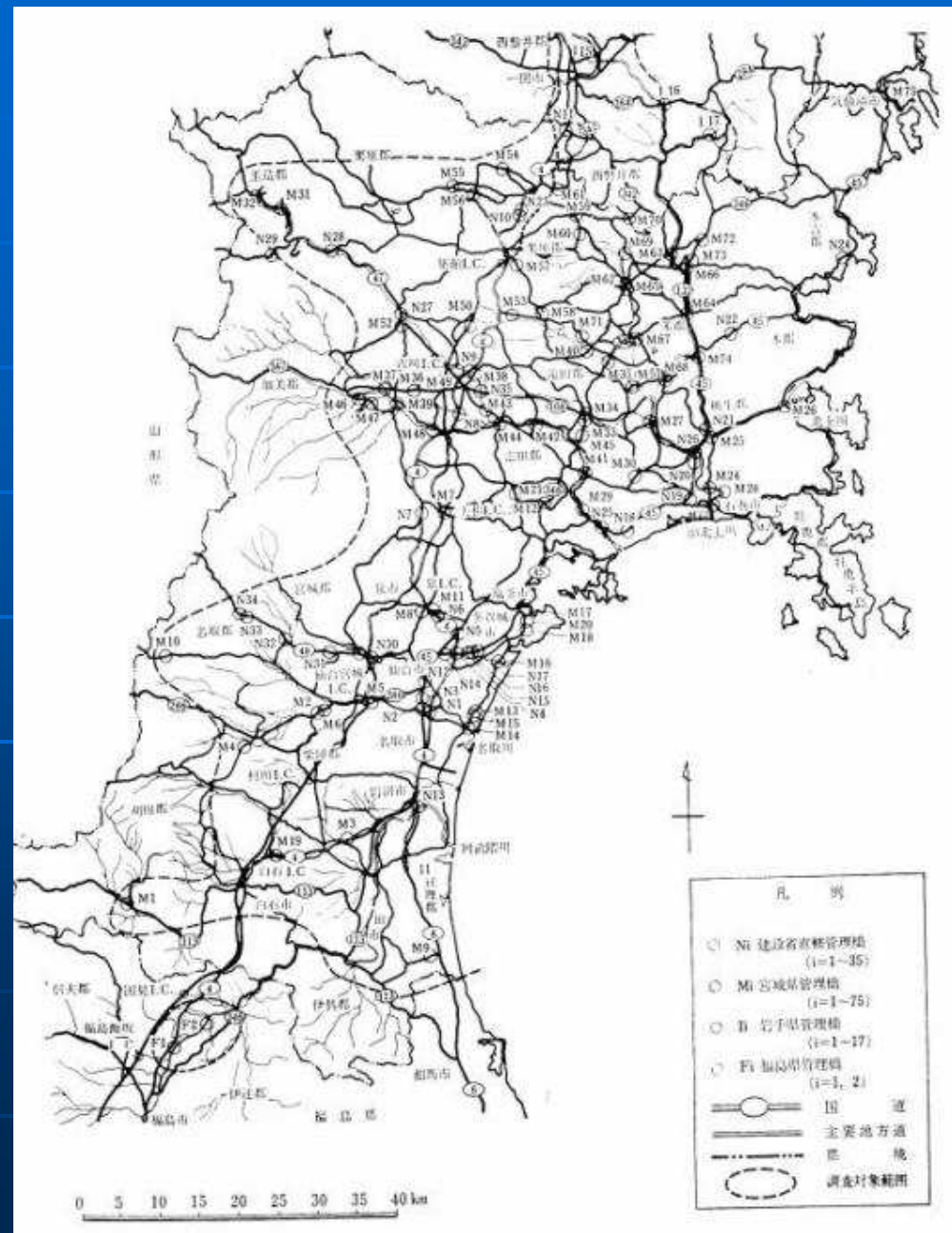
33年前、.....

1978年宮城県沖地震

- 129橋に被害
- 全橋に対して、詳細調査を実施

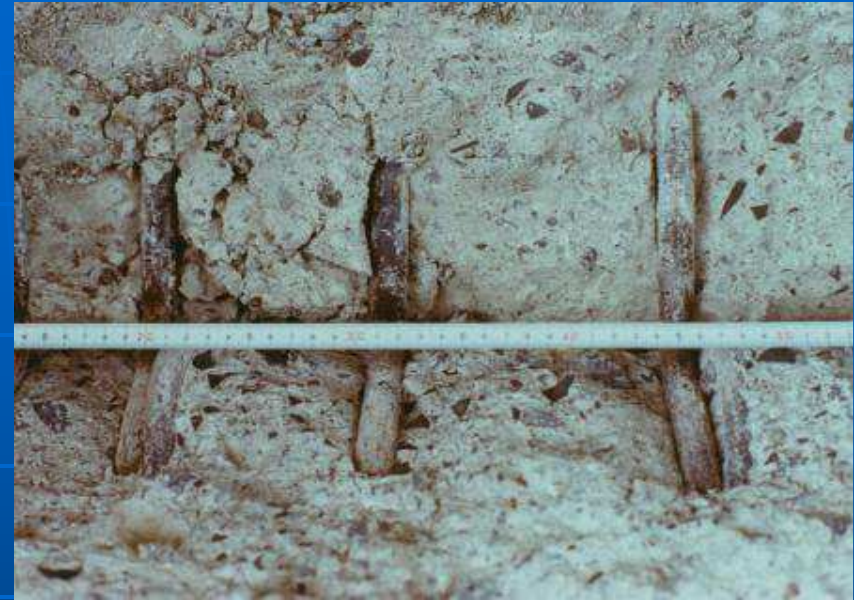
1990年以降の耐震設計法の進歩は被害の軽減に寄与しているか？

1)地震時保有耐力法の導入(平成2年～)、2)積層ゴム支承の導入(平成7年～)、3)免震設計の導入(平成元年あたり～)は、橋梁の耐震性の向上に貢献しているか？



1978年宮城県沖地震ではRC橋脚に被害が多く発生した

千代大橋
国道4号線

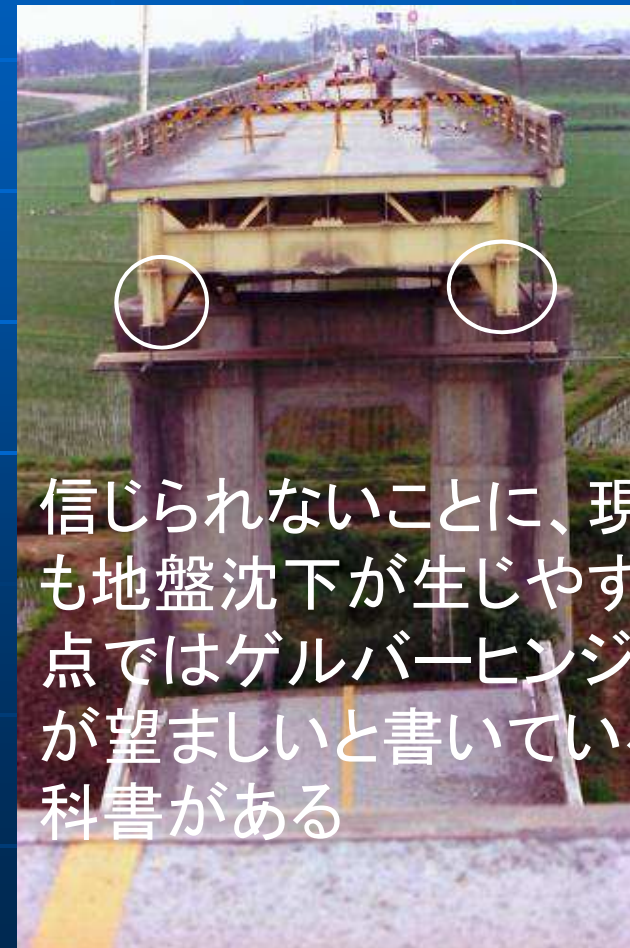


軸方向鉄筋の段落とし位置に生じたせん断破壊



ゲルバーヒンジ部からの落橋 錦桜橋

1988 Miyagi-ken-oki earthquake



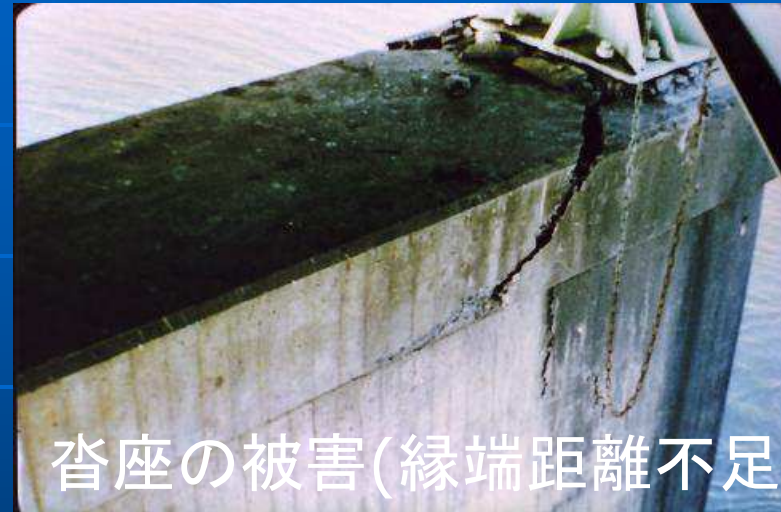
信じられないことに、現在でも地盤沈下が生じやすい地点ではゲルバーヒンジ構造が望ましいと書いている教科書がある

多数の鋼製支承に被害が生じた

- サイドストッパーはほとんど被害を受けた
- ピン、ローラ支承が頑丈そうに見えるが、多数の死傷が多彩な被害を受けた



サイドストッパーの被害



脊座の被害(縁端距離不足)



アンカーボルトの抜けだし



ローラーの逸脱

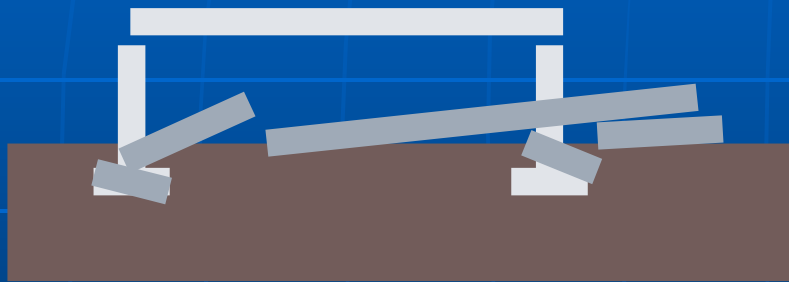


ローラー
の破断

重要なターニングポイントであった 1978年宮城県沖地震

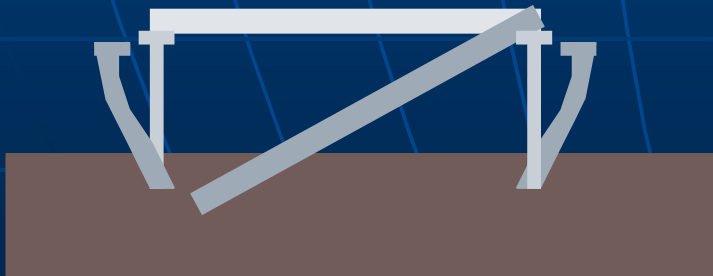
現在までの耐震性の向上の歴史を振り返ってみると、...

耐震設計されていないか、耐震設計されていても耐震設計が不十分な時代(1923年関東地震～1948年福井地震)



基礎の転倒、滑動、沈下
——>落橋

液状化の影響が知られておらず、落橋防止構造が考案される前の時代(1964年新潟地震)

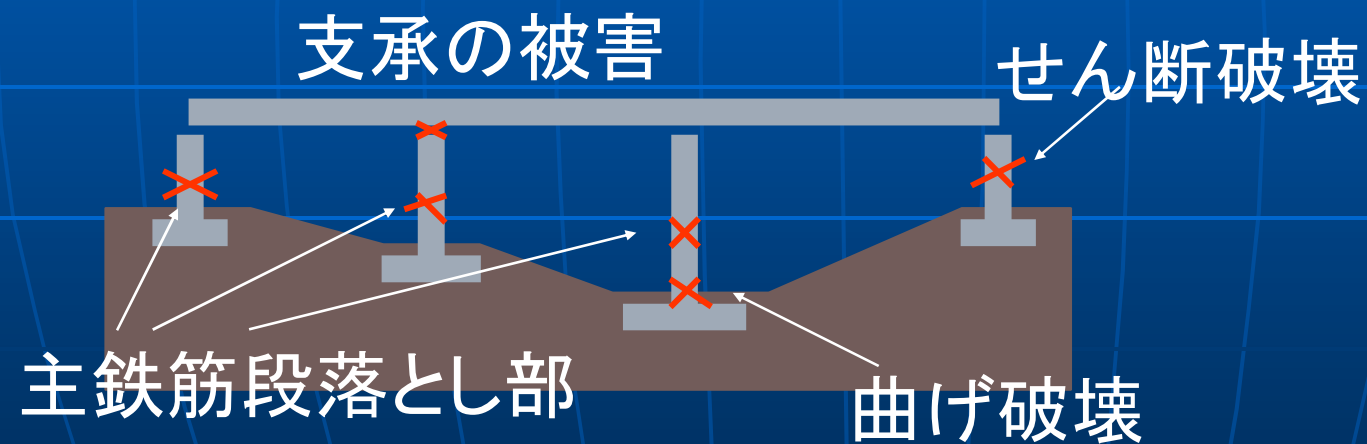


液状化、流動化による過
度な相対変位——>落橋

重要なターニングポイントであった 1978年宮城県沖地震(2)

橋脚の変形性能や地震時保有耐力法の重要性が知られていなかった時代

橋脚、支承部の被害が目立ちだした時代(1978宮城県沖地震、1982浦河沖地震)



これが、1995兵庫県南地震の被害へと進展していった

18径間ピルツ橋の落橋

阪神高速深江高架橋

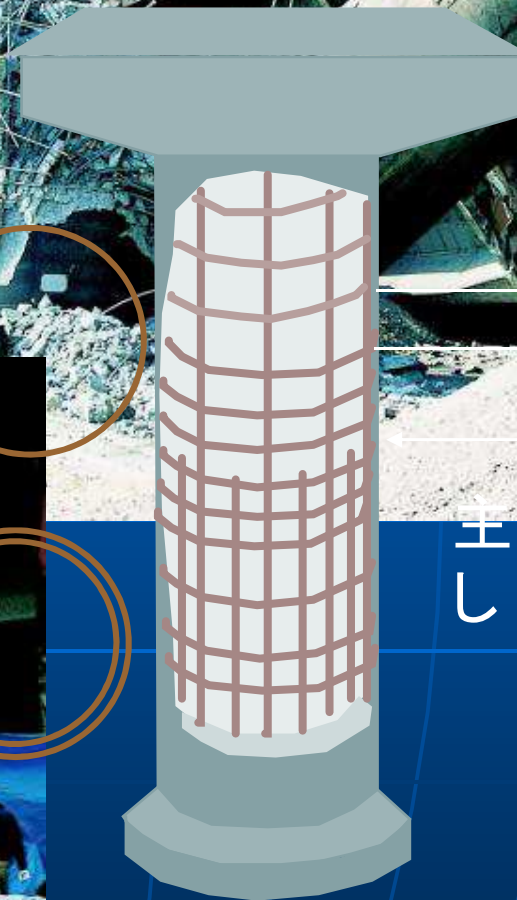
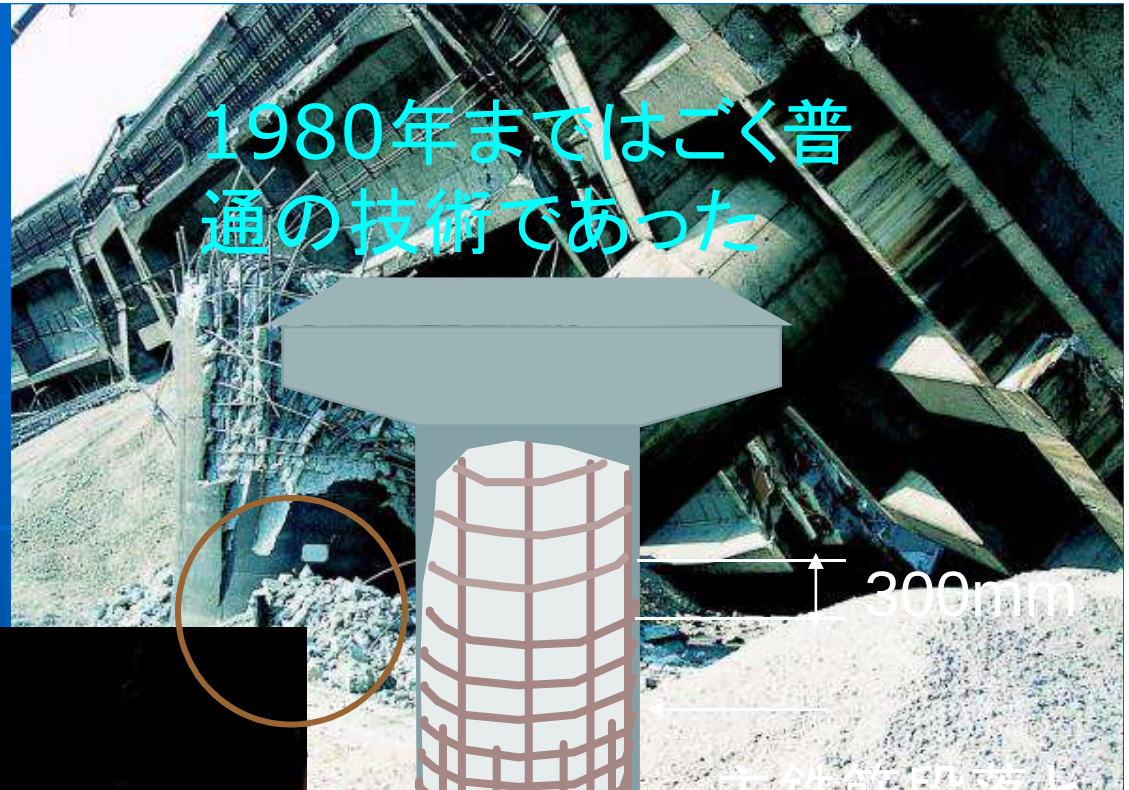


主鉄筋段落とし部の せん断破壊

1980年まではごく普
通の技術であった

↑ 300mm

主鉄筋段落と
し



RC橋脚のせん断破壊 壊による落橋

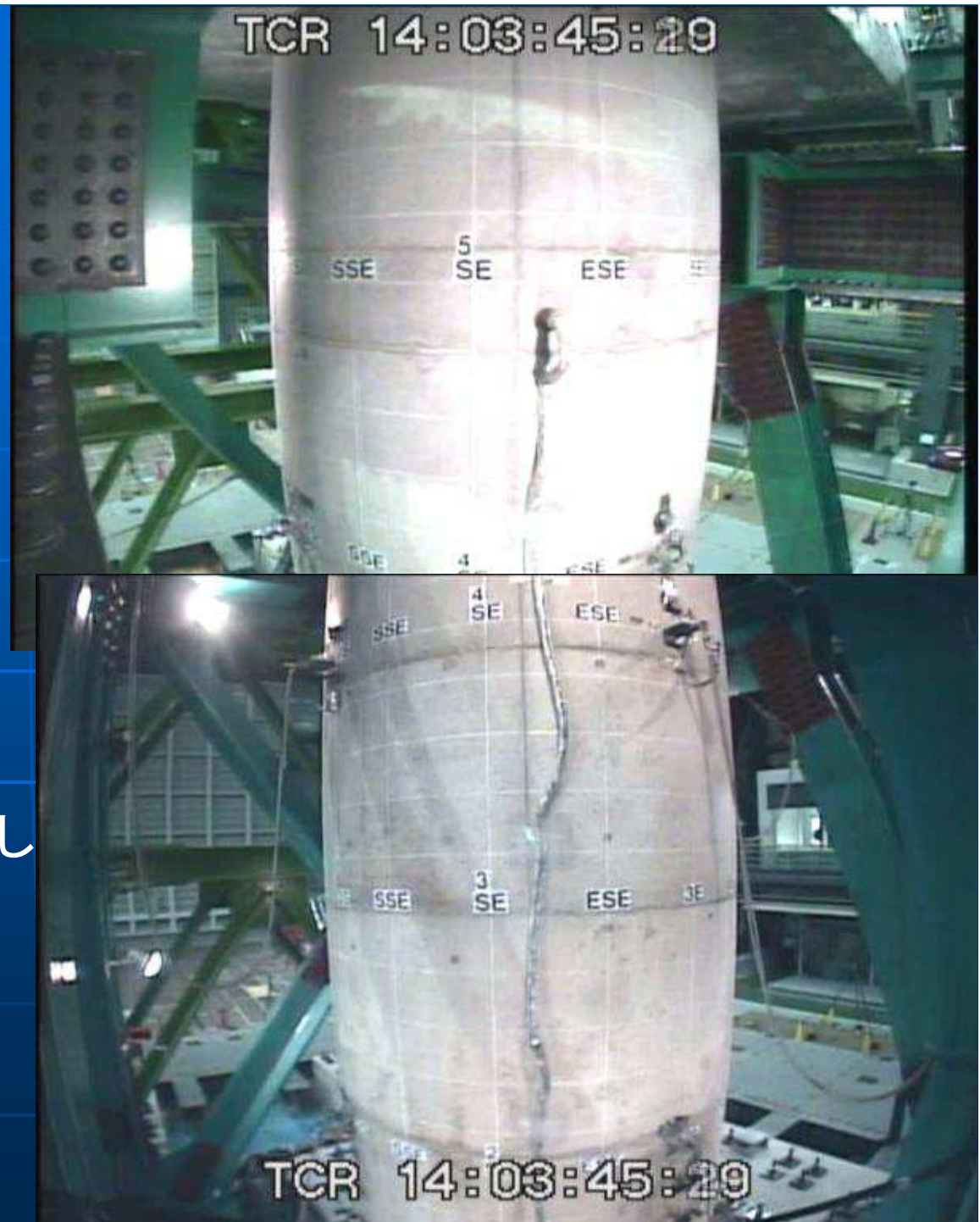
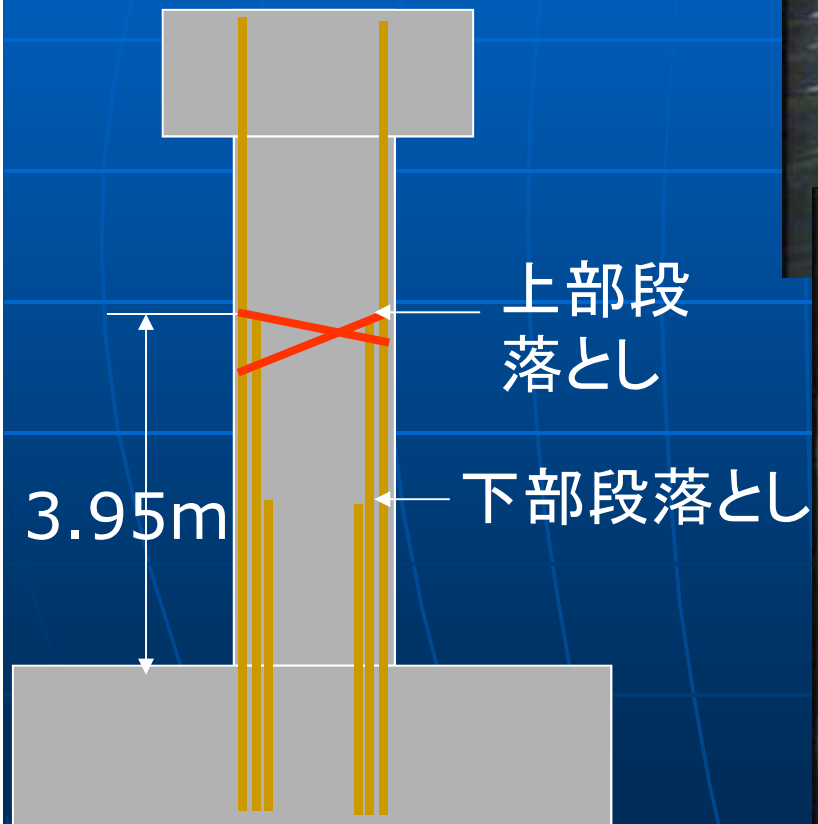


主鉄筋段落としを有する橋脚 C1-2模型



主鉄筋段落としのあるRC橋脚

C1-2橋脚



1970年代の橋脚(c1-1)

現在の橋脚(C1-5)

第1回目の加震



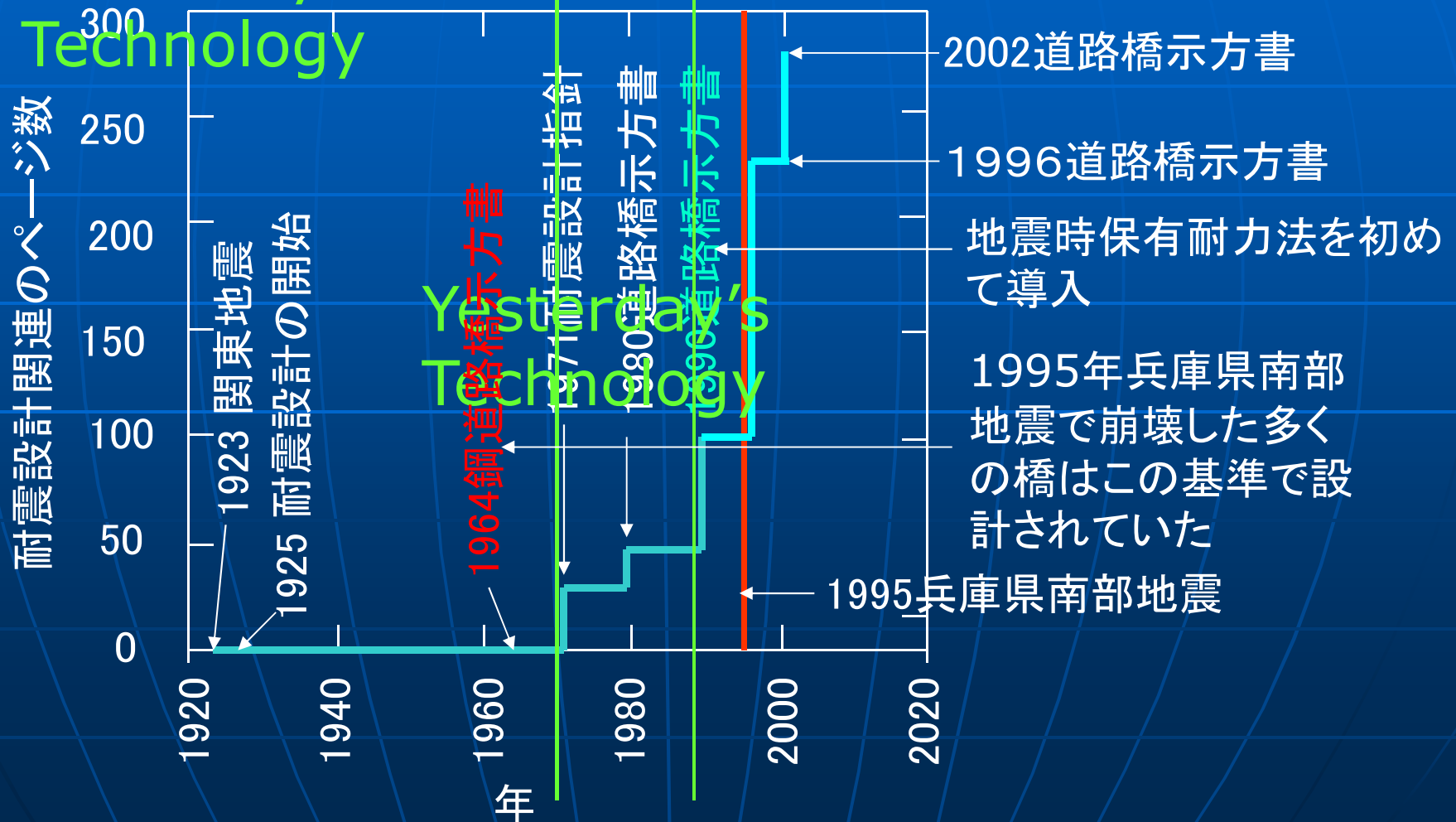
第2回目の加震



世界一流とはいいが、歴史の浅い耐震技術

The Day before
Yesterday's
Technology

Today's Technology



地震時保有耐力法に用いられる設計地震動

●タイプⅠ地震動(平成2年以降)

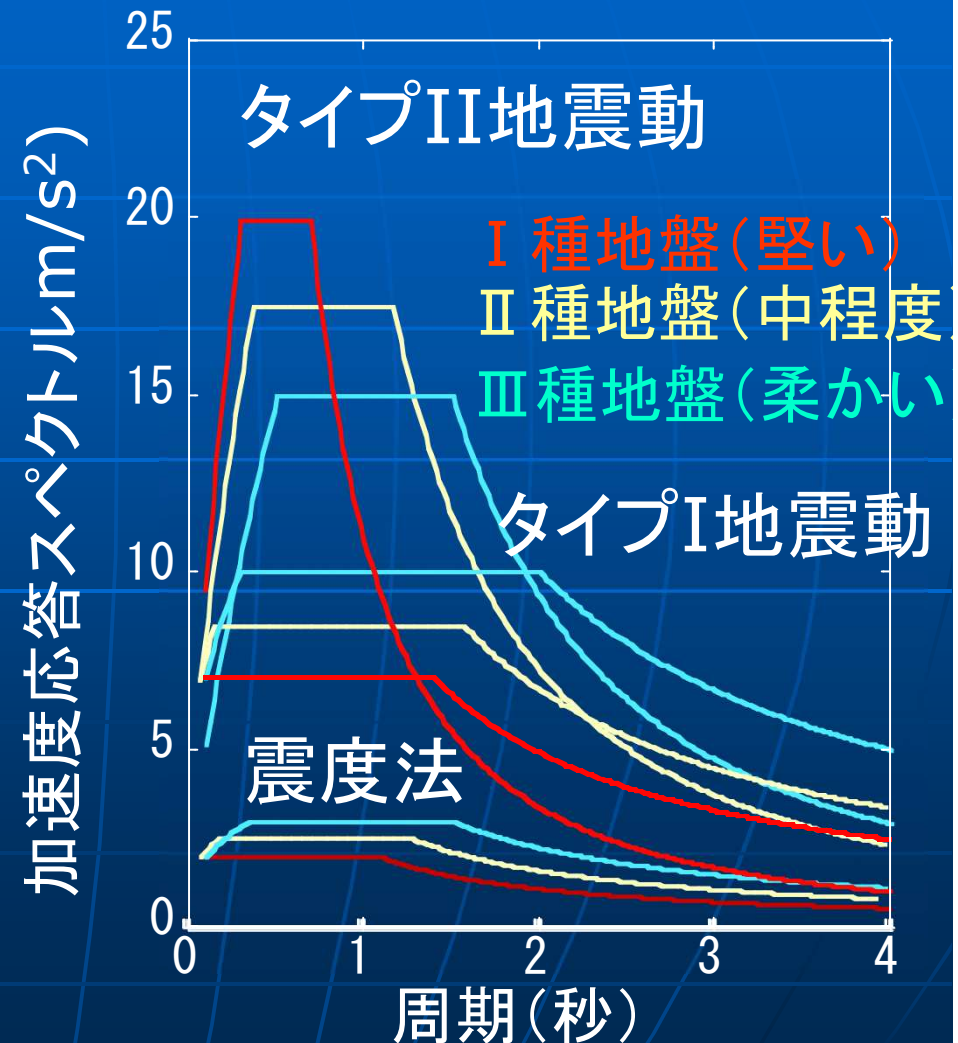
✓M8クラスのプレート境界型の大地震による中程度の距離の地震動

✓継続時間が長く、強い地震動

●タイプⅡ地震動(平成7年以降)

✓M7クラスの内陆直下型地震による断層近傍地震動

✓継続時間が短いが強烈な地震動



1990年以降の耐震設計法の著しい改良

一昨日か昨日の耐震基準

RC及び鋼製橋脚に対するじん性の強化

残留変位の照査

免震設計の導入 地震力

積層ゴム支承の導入
(LRB及びHDRを含む)

落橋防止構造

現在の耐震基準 (1990年基準以降)

静的非線形解析(地震時保有耐力法)

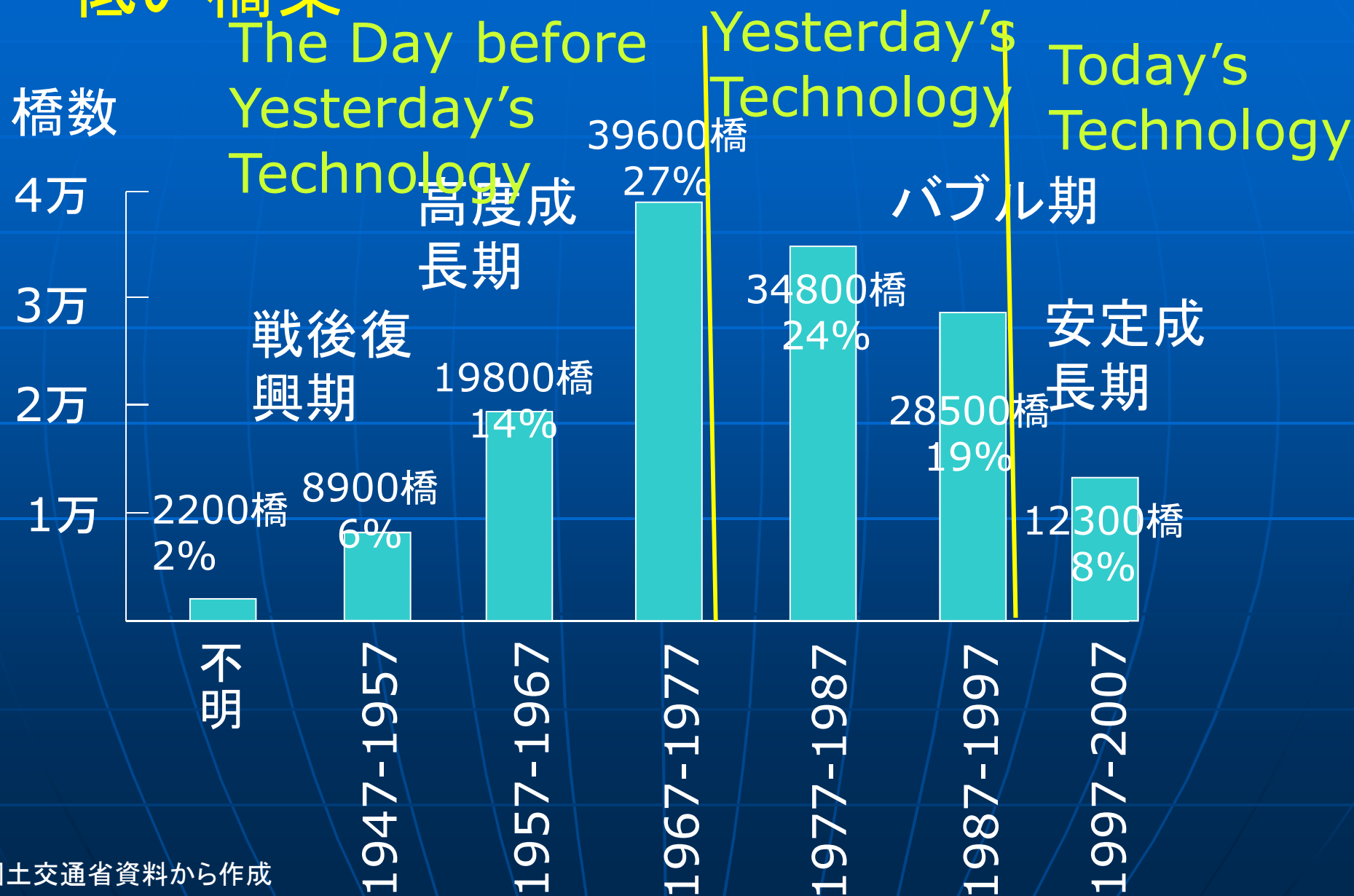
0.7-2.0 g 設計地震力 (L2)

線形及び非線形動的解析

強化された落橋防止構造

連続橋に対する慣性力の算定

我が国の基幹インフラを支える耐震性の低い橋梁



平成元年頃から免震設計、積層ゴム支承の適用が開始された

- 1988年道路橋の免震設計ガイドライン(案)、国土開発技術センター
- 1992年道路橋免震設計マニュアル(案)、建設省土木研究所及び民間47社共同研究
- 1995年兵庫県南部地震で被災した道路橋の設計に関する基準、建設省
- 1996及び2002年道路橋示方書・V耐震設計編
- 免震設計以外に、地震時水平力を分散する構造として、兵庫県南部地震以降のほとんどの橋梁に積層ゴム支承が使用されるようになっている。

1978年宮城県沖地震後、不十分に復旧された橋
では、2011年東日本大震災で再び同じ箇所が被
害を受けた 閑上大橋

1978年宮城県沖地震

2011年東日本大震災

2011東日本大震災



1978年宮城県沖地震で被害を受けた鋼製支承は 今回の震災ではまた被害を受けた

天王橋、国道45号線



アンカーボルト
の抜け上がり

2011年東日本大震災

RC巻き立てによる復旧
1978年宮城県沖地震



毎回、同じ被害が生じる鋼製支承

地震時保有耐力法の視点から見れば、生じるべき被害が繰り返されている



トラス橋の中には、横斜材に被害を受けた橋がある

天王橋
国道45号

がセット部での下横斜材の破断





溶けて無くなっている固定側

普段からのメンテナンスが重要



1978年宮城県沖地震で落橋した錦桜橋

宮城県沖地震で落橋、その後、新設

旧のまま



旧

宮城県沖地震後、架け換えられたトラス

縁端距離不足の落橋防止構造の定着



震度法のコネプトに基づく復旧





縁端距離の短い構

縁端距離不足のため、せん断破壊した
橋脚頂部



破断したサイドブロック
このような構造で、橋軸、橋軸直角
方向の移動を止められる訳がない

まだ主鉄筋段落とし部の耐震補強がされていなかった橋では、せん断破壊が起きた

藤橋
岩手県



RC巻き立て



カーボンファイバー巻き立て



主鉄筋段落とし部の被害



1995年兵庫県南部地震の際のピルツ橋を連想させる被害



1990年以降の耐震基準に従って耐震補強された橋では、ほとんど被害を生じなかった



1990年以降の耐震基準に従って設計された橋では
被害は生じなかった



東松山橋、国道45号線



新天王橋、三陸自動車道



1996年耐震基準以降の強化された落橋防止構造には被害は生じなかった



鋼製支承とは異なり、積層ゴム支承は上下部構造間の相対変位を吸収したため、ほとんど被害を受けなかった

1) 鋼製支承は吸収できる変位量が小さすぎ、機能を失う



アンカーボルトの抜けだし



ローラーの逸脱

鋼製支承とは異なり、積層ゴム支承は上下部構造間の相対変位を吸収したため、ほとんど被害を受けなかった(2)

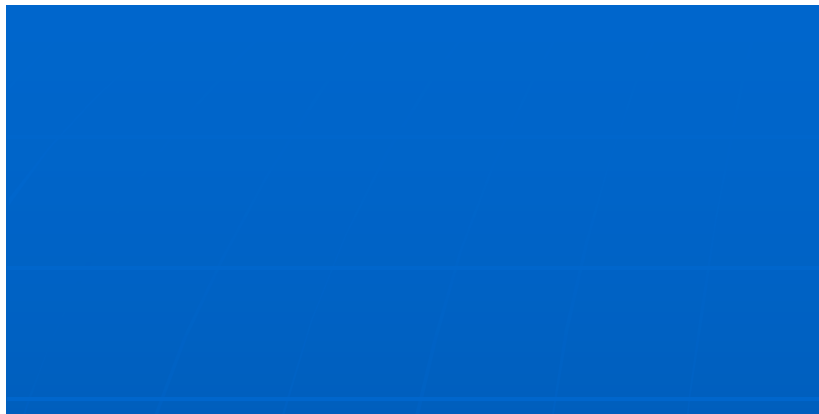
- 橋台の前傾や橋脚の傾斜等により、地震後、残留変位を生じた積層ゴム支承もある。
- しかし、これは支承のせいではない。相対変位を許容できなければ、鋼製支承のように破壊するしかない。



積層ゴム支承は全体としてよく被害の軽減に寄与した。しかし、おかしな被害も生じている

仙台東部道路、NEXCO東
東部高架橋





橋軸直角方向

NEXCO東による

支承被災箇所

鋼板とゴム間の接着が切れている

鋼版が2回折れ曲がっている

交互に橋軸直角方向の地震動を受けた

従来の載荷実験では鋼板とゴム間の接着が切れたことはない



- 支承に生じたせん断歪みはどの程度？
- 製作に問題はなかったか？

津波による橋梁の被害

- 道路橋示方書には、流水圧は規定されているが、津波に対する規定は設けられていない
- 戦前には津波による橋梁被害はあったが、おそらく、津波は自然災害であり、これを設計に見込むことが可能とは考えられなかったためと考えられる。
- 戦後、日本海中部地震、北海道南西沖地震で人的被害が生じたが、橋梁の流出といった被害は生じなかったことから、津波が設計に考慮されないままになっていたと考えられる。

歌津大橋

国道45線

陸前高田市



RC巻き立てで耐震補強された橋脚1基に曲げ圧縮破壊が生じた

損傷の影響は落橋に対して小さいと見られる

国道45号線 歌津大橋



歌津大橋 国道45号線 ビデオが存在する

水門の頭部







国道45号線

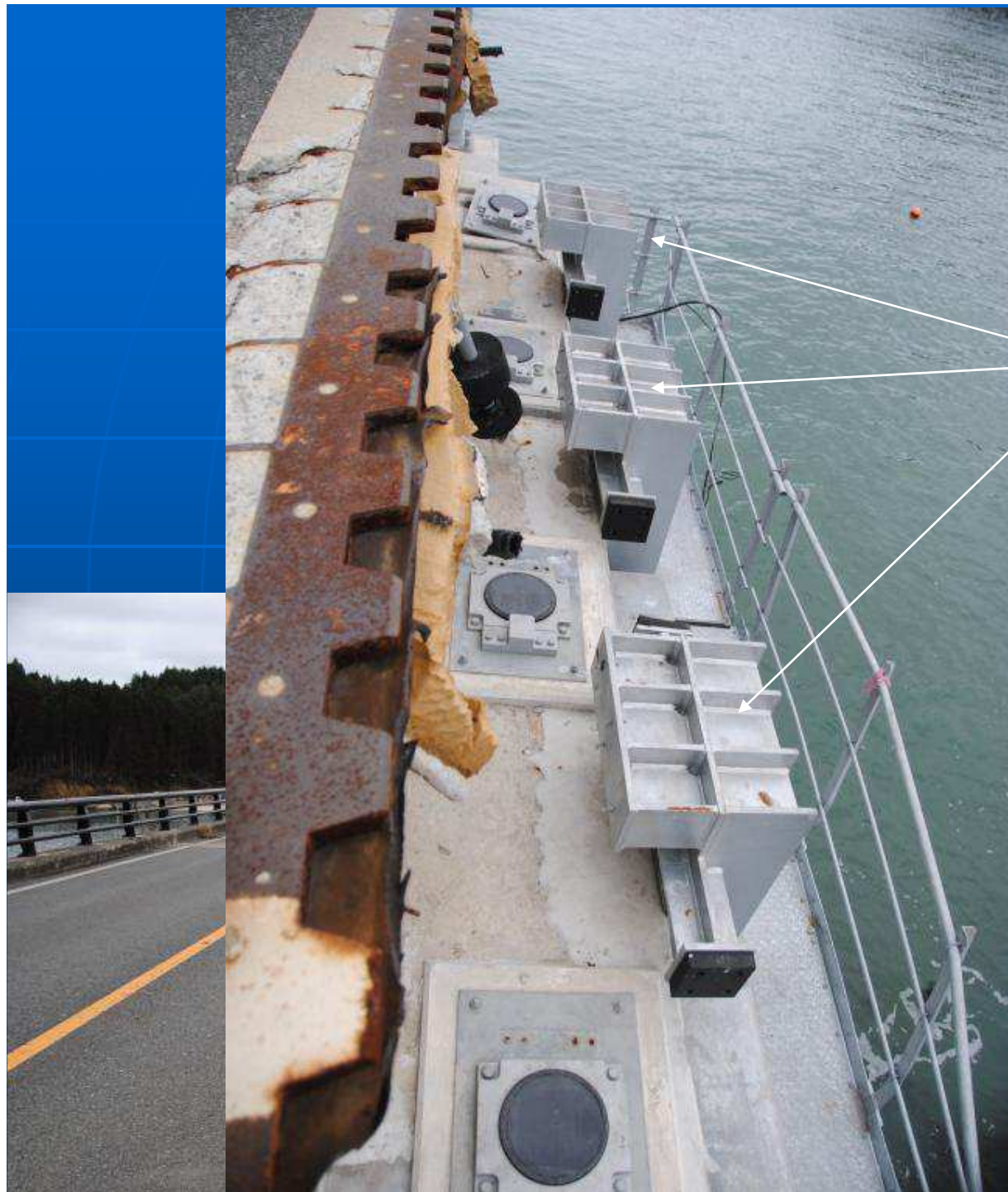
津波到達点

津波は1階部分を貫通した



歌津大橋の落橋の目撃者





橋軸方向の移動制限装置＋
橋軸直角方向の移動制限機構

鋼製桁移動制限装置が設置されていたが、これらは津波による桁流出には機能しなかった。桁が津波による上揚力により流出したことを示している。

橋軸方向の過度な桁移動を拘束するためのストッパー



縁端距離を確保するための鋼製ブラケット



橋台側面のブロック

沼田跨線橋

国道45

陸前高田

- 橋軸方向桁移動制限装置が6基付いていたが、桁流出には効果がなかった
- 桁が持ち上げられない限り、桁流出は起こりえない



完全に津波にのみ込まれながら、流出しなかった橋も多数ある 釜石市 45号線矢ノ浦橋(甲子川)



澤田幸三氏による(サンデー毎日 東日本大震災2)

矢ノ浦橋

津波にのみ込まれたが流出した



下水道管橋は横にあり、一部区間が流出した

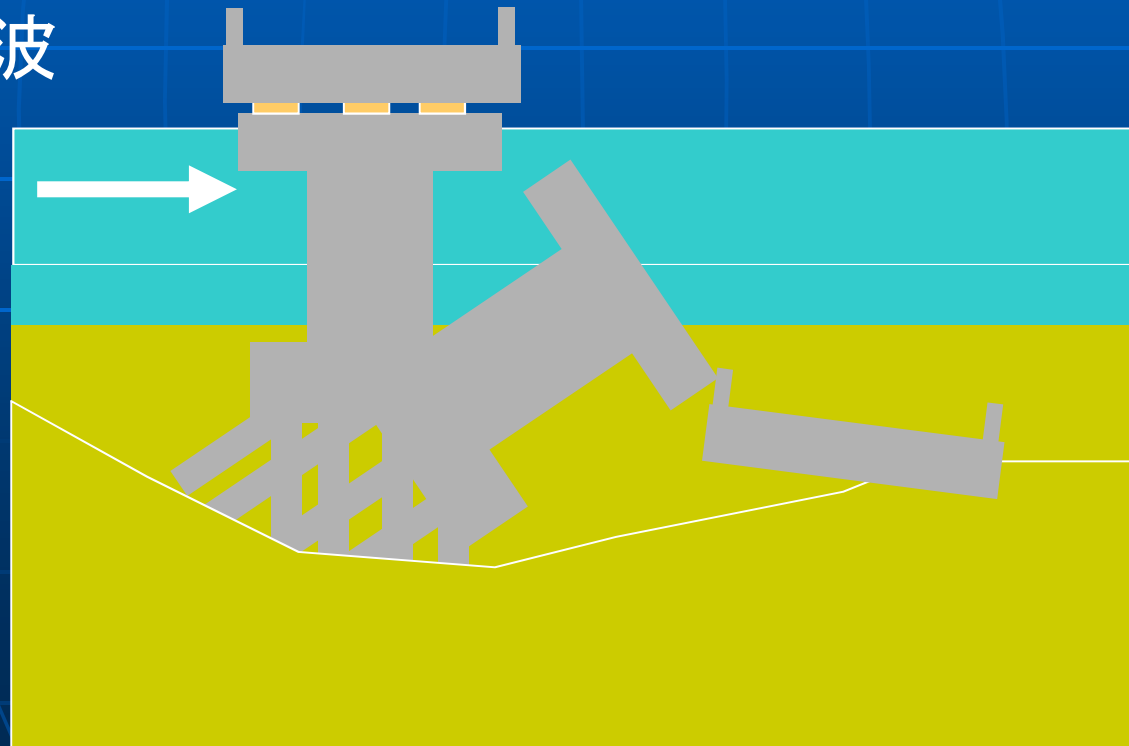
矢ノ浦橋の左岸側にあった建物の被害



津波による被災メカニズム

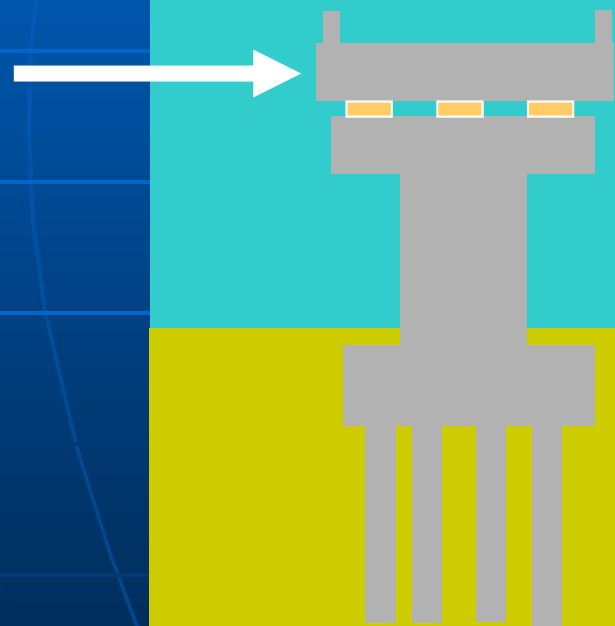
(1) 洗掘: この形態の被害は、相当過去に建設された鉄道橋には見られるが、道路橋ではこのタイプの被害は生じていない。

津波

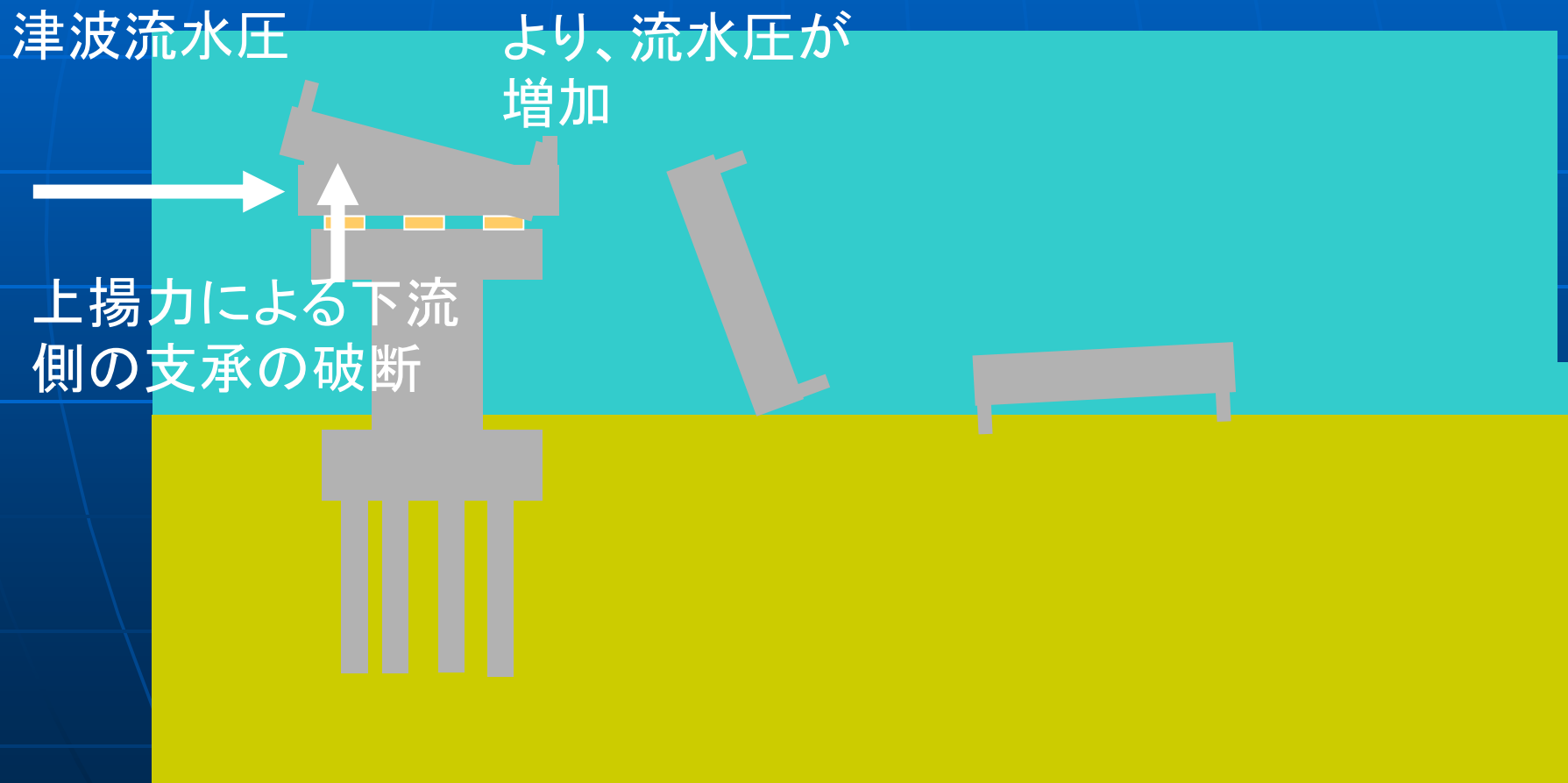


(2) 津波により、持ち上げられ、流出

津波による流水圧



(3) 多くの橋では、津波により、下流側が持ち上げられ、流水圧がさらに大きくなった結果、流出したと考えられる。



被害の特徴

- 地震動による橋梁の被害は、平成2年以降の地震時保有耐力法適用前の橋において著しい。特に、耐震補強のレベルが十分ではなかったり、遅れていた道路橋、新幹線高架橋に大きな被害が生じた。
- この意味において、平成2年道路橋示方書に取り入れられた地震時保有耐力法、L2地震動、連続橋としての慣性力の算出法、残留変位の照査、積層ゴム支承の採用、落橋防止構造の強化、免震設計の採用は今回の地震による橋梁の被害軽減に大きく貢献した。
- 同様に、平成2年以降の耐震基準を満足するために実施されてきた橋梁の耐震補強も今回の地震による橋梁の地震被害低減に大きく貢献した。

被害の特徴(2)

- 多数の橋が津波により流出した。このメカニズムとしては、津波による上揚力によって桁が持ち上げられ、そのまま流出したものと、桁が回転して流出したものがある。また、鉄道橋では多数の橋脚の流出が生じたが、道路橋ではほとんどの下部構造は流出しなかった。なお、津波に完全に飲み込まれながら、ほとんど無傷で生き残った橋も存在する。

One Year after 2011 Great East Japan (Tohoku) Earthquake

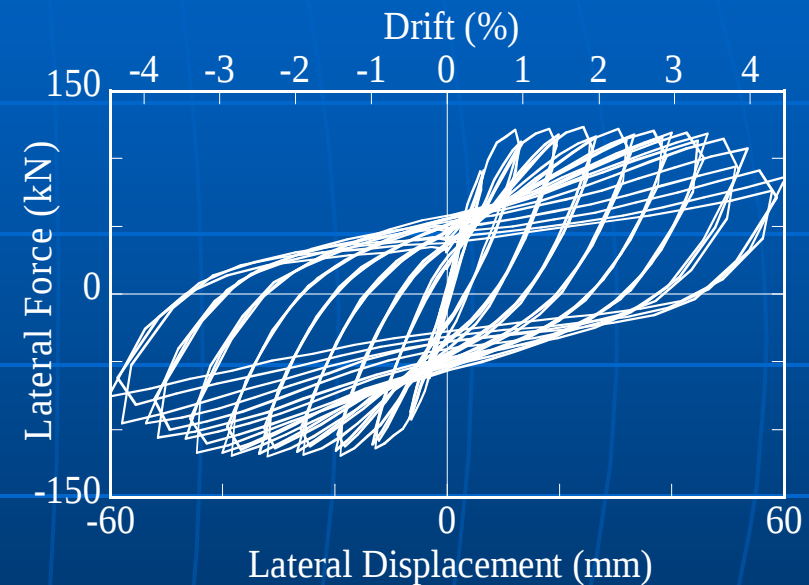
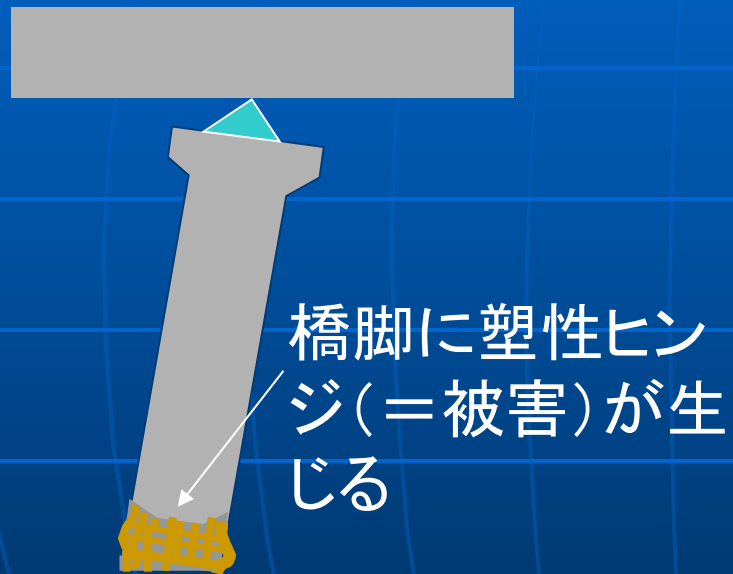
-International Symposium on Engineering Lessons Learned from the Giant Earthquake -

- March 3-4, 2012, Tokyo, Japan
- All engineering topics are covered
- Two day technical site visit on March 1-2
- Organized by Japan Association for Earthquake Engineering, Architectural Institute of Japan, Japan Society of Civil Engineers, Japanese Geotechnical Society, The Japan Society of Mechanical Engineers, Seismological Society of Japan
- http://www.jaee.gr.jp/event/seminar2012/eqsympo/Great_East_Japan_EQ_Symposium.pdf

「免震設計」と「耐震設計」は異なる 方向を目指しているのか？

- 耐震設計：強度や変形性能で地震に抵抗
- 免震設計：変形により地震の作用を受け流す
- 我が国では、許容応力度設計法に基づく震度法が長く用いられてきた。震度法では、地震力に“抵抗する”という発想しかなかったため、耐震設計と免震設計は異なった考え方に基づく設計法という誤解を生んできた

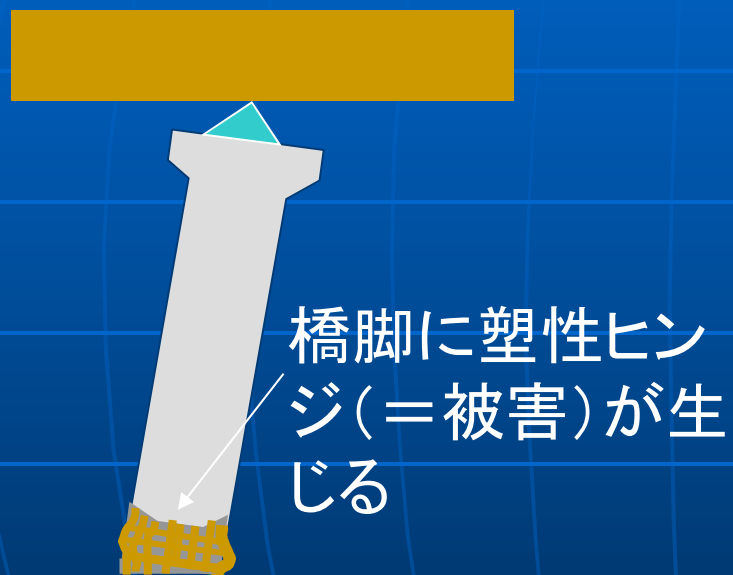
地震時保有耐力法では、構造部材の変形はどのようにとらえられているか？



- 損傷 → 剛性の低下 → 長周期化
- 損傷 → エネルギー吸収 → 減衰の増大

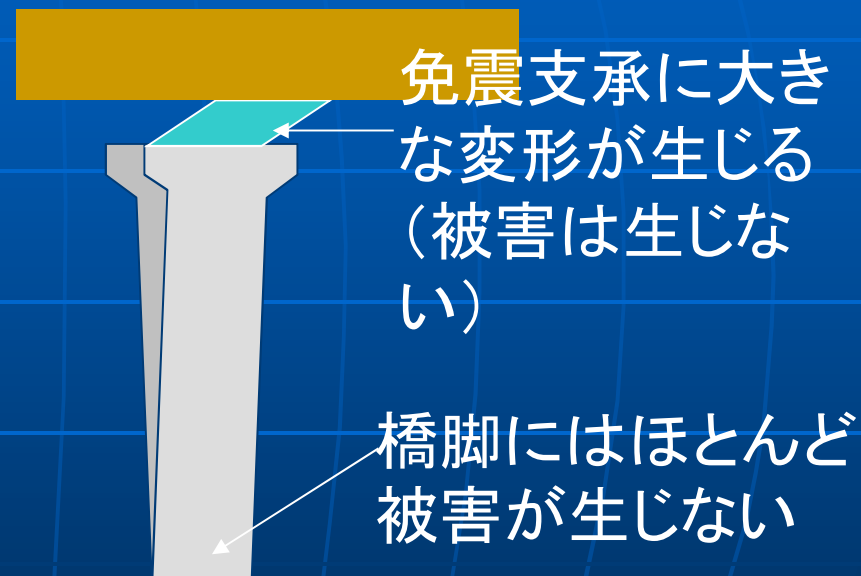
地震時保有耐力法に基づく、 耐震設計と免震設計は何が異なるか？

耐震設計



塑性ヒンジで安定した
剛性低下とエネルギー
吸収できるようにする

免震設計



橋脚の塑性化の役割を免震
支承に期待している

免震設計と耐震設計は、 コンセプトの異なる設計法なのか

耐震設計：強度や変形性能で地震力に抵抗

免震設計：変形により地震力を受け流す

- 耐震設計では、橋脚の塑性ヒンジで安定して塑性耐力とエネルギー吸収ができるようにするために、帯鉄筋等を配置し、安定した曲げ耐力の確保と変形性能を高める

震度法という視点では、免震設計の本質は理解できなかった。どういう設計体系を採用するかが、技術開発の方向に影響を及ぼす。震度法の壁を突き破るために、コンピューターが使用できるようになった後、なお、長い時間を要した。

にあり、耐震設計と免震設計は同じルーツの設計法である。

橋梁の免震技術の開発経緯

昭和61年

昭和62年

昭和63年

平成元年

平成2年

平成3年

平成4年

・

・

昭和61年：ニュージーランドの免震橋視察
国土開発技術研究センター：免震装置を有する道路橋の耐震設計研究委員会（道路公団、首都公団、阪神公団、本四公団（当時）委託）

建設省土木研究所＋28社：道路橋の免震構造システムの開発に関する官民連帯共同研究

建設省（当時）：免震橋パイロット事業（7橋の建設）

平成3年：我が国発の免震橋（宮川橋、静岡県）

平成4年：我が国初のHDBを使用した免震橋（山あげ橋、栃木県）

道路橋の免震設計法 ガイドライン(案)

(財)国土開発技術研究
センター

平成元年

*Guideline for Base-isolation of
Highway Bridges, 1989*

道路橋の免震設計法ガイドライン(案)

(免震装置を有する道路橋の耐震設計研究報告書)

平成元年 3 月

(財) 国土開発技術研究センター

道路橋の免震設計法マニュアル(案)

建設省

平成4年

官民連帯共同研究
道路橋の免震構造システムの開発
報告書

平成4年10月

建設省



建設省
道路橋の免震設計法
マニュアル(案)

財団法人 土木研究センター

東京湾横断道路で初めて導入されたL2地震動(昭和57年)が免震設計法ガイドライン(案)、マニュアル(案)に引き継がれた

- 構造物の設計上の耐用年数内に1～2回生じることが期待される程度の地震動に対しては、構造物が本質的な機能を失うような損傷を受けてはならない。
- 当該地点にまれに発生するような大地震に対しては、構造部材に相当な損傷が生じることは受認するが、人命に係わるような構造物の崩壊は防止しなければならない。
- L1, L2という名称は、荒川直士氏(当時、土木研究所振動研究室長)が命名。

荒川、川島:解析用入力地震動の設定法、土木研究所資料、第2120号、昭和59年3月

L2に対する性能目標

東京湾横断道路

当該部材が破壊した場合の影響 補修・補強の 取り替えの難易	影響範囲が局所的であり、全体系の安定性は確保できる	影響が広範囲に及ぶか、もしくは全体系の安定性が減少する
比較的容易、もしくは取り替えが容易な構造	破壊してもよい。	損傷は許すが、破壊は防止する。
困難	損傷は許すが、破壊は防止する。	軽微な被害に限る。

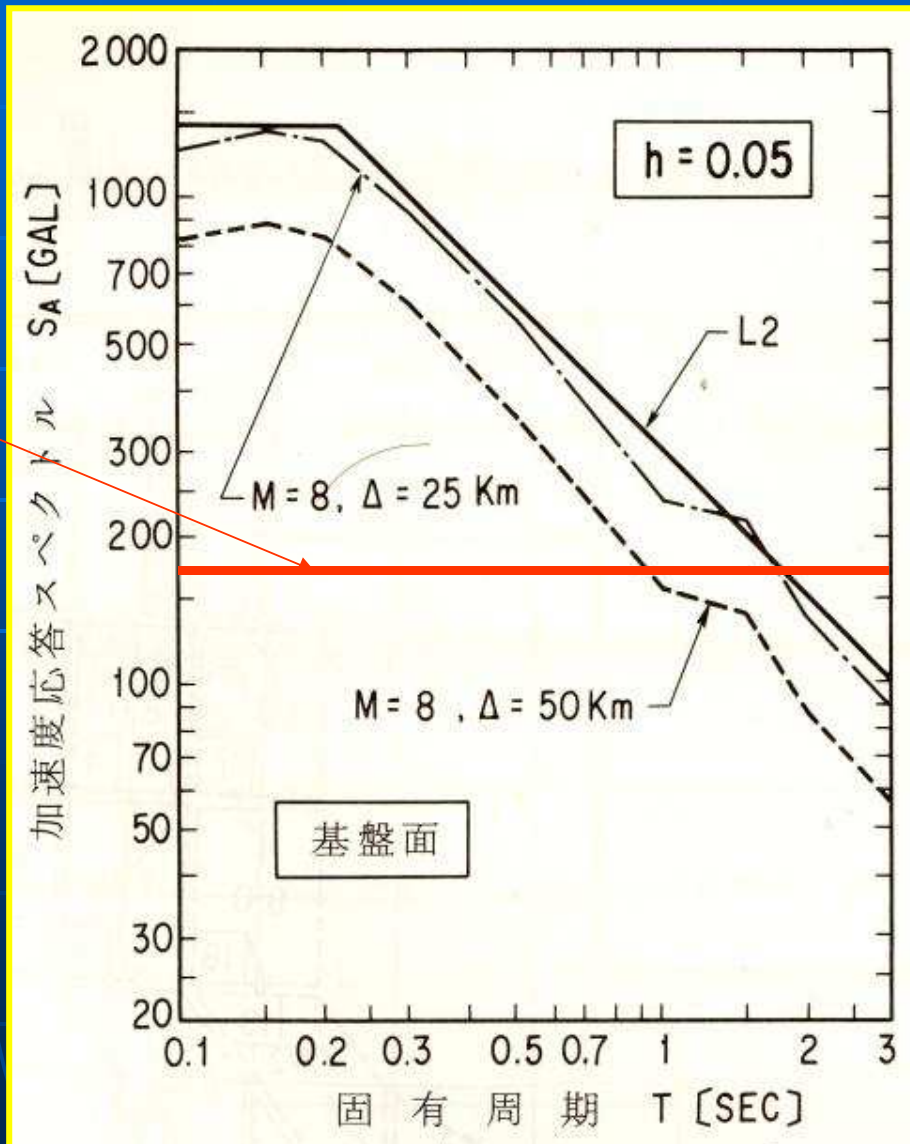
東京湾横断道路の設計地震動

土木構造物で最初のL2地震動の導入

昭和57年

再現期間475年

この当時の基盤地震動



土木構造物(橋梁)に対するL2地震動導入の経緯

- 昭和57年に東京湾横断道路で初めてL2地震動が導入された。
- 平成元年の免震設計法ガイドライン、平成4年の免震設計法マニュアルでポリッシュアップされ、現在のL2地震動(タイプⅠ地震動)が導入された。
- 平成2年道路橋示方書に地震時保有耐力の照査に導入された。
- 平成7年の復旧仕様にL2として導入された。
- 平成8年道路橋示方書にL2として導入された。

以上のように、平成7年兵庫県南部地震以降に土木学会の提言に基づいてL2が導入されたわけではない。

荷重低減係数に直接組み込まれた免震装置の効果—我が国独自の設計法

水平地震力 F_{eq}

$$F_{eq} = \frac{F}{R_E \cdot R_\mu}$$

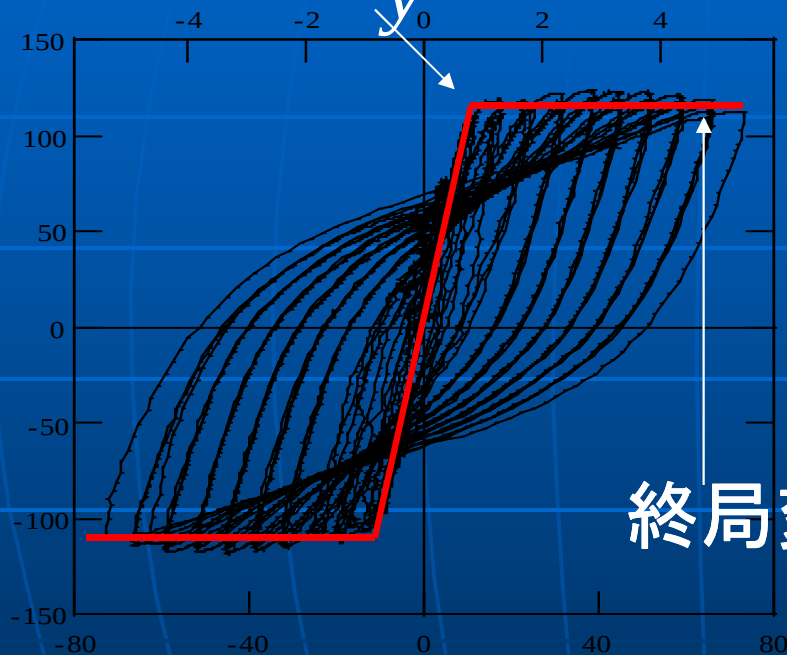
R_E = 橋脚の非線形性に基づく荷重低減係数

R_μ = エネルギー吸収性能の増大に基づく
荷重低減係数

橋脚に許容する塑性変形

一般橋に比較して橋脚の塑性変形を押さえる

降伏変位 u_y



終局変位 u_u

一般橋

$$\mu = 1 + \frac{u_u - u_y}{\alpha \cdot u_y}$$

免震橋

$$\mu_m = 1 + \frac{u_u - u_y}{\alpha_m \cdot u_y}$$
$$\alpha_m = 2\alpha$$

重要性	タイプI	タイプII
一般	3.0	1.5
重要	2.4	1.2

エネルギー吸収性能の向上の影響

エネルギー吸収の向上に基づく荷重低減係数

1次モードの減衰定数 ξ	荷重低減係数 R_E
$\xi < 0.1$	1.0
$0.1 \leq \xi < 0.12$	1.11
$0.12 \leq \xi < 0.15$	1.25
$0.15 \leq \xi$	1.43

各部の減衰定数に基づく1次モードの減衰定数の計算

$$\xi = \frac{\sum \xi_k \cdot \phi_k^T \cdot k_k \cdot \phi_k}{\sum \phi_k^T \cdot k_k \cdot \phi_k}$$

K番目の構造要素の
減衰定数

減衰定数の推定

各部の減衰定数に基づく1次モードの減衰定数の評価

$$\xi = \frac{\sum \xi_k \cdot \phi_k^T \cdot k_k \cdot \phi_k}{\sum \phi_k^T \cdot k_k \cdot \phi_k}$$

K番目の構造要素の減衰定数

構造要素	減衰定数 ξ_k
桁	0.03-0.05
免震支承	等価減衰定数
橋脚	0.05-0.1
基礎	0.1-0.3

宮川橋

我が国最初の免震橋
平成3年

静岡県



宮川橋に使用された 鉛プラグ入り積層ゴム支承

鉛プラグ

担当技師 原 広司氏(当時)



山あげ橋の公開振動実験

我が国最初の高減衰ゴム支承を用いた免震橋

平成4年

栃木県



強制振動実験

山あげ橋

起振機による加振



William Robinson博士

鉛プラグ入り積層ゴム支承の開発者



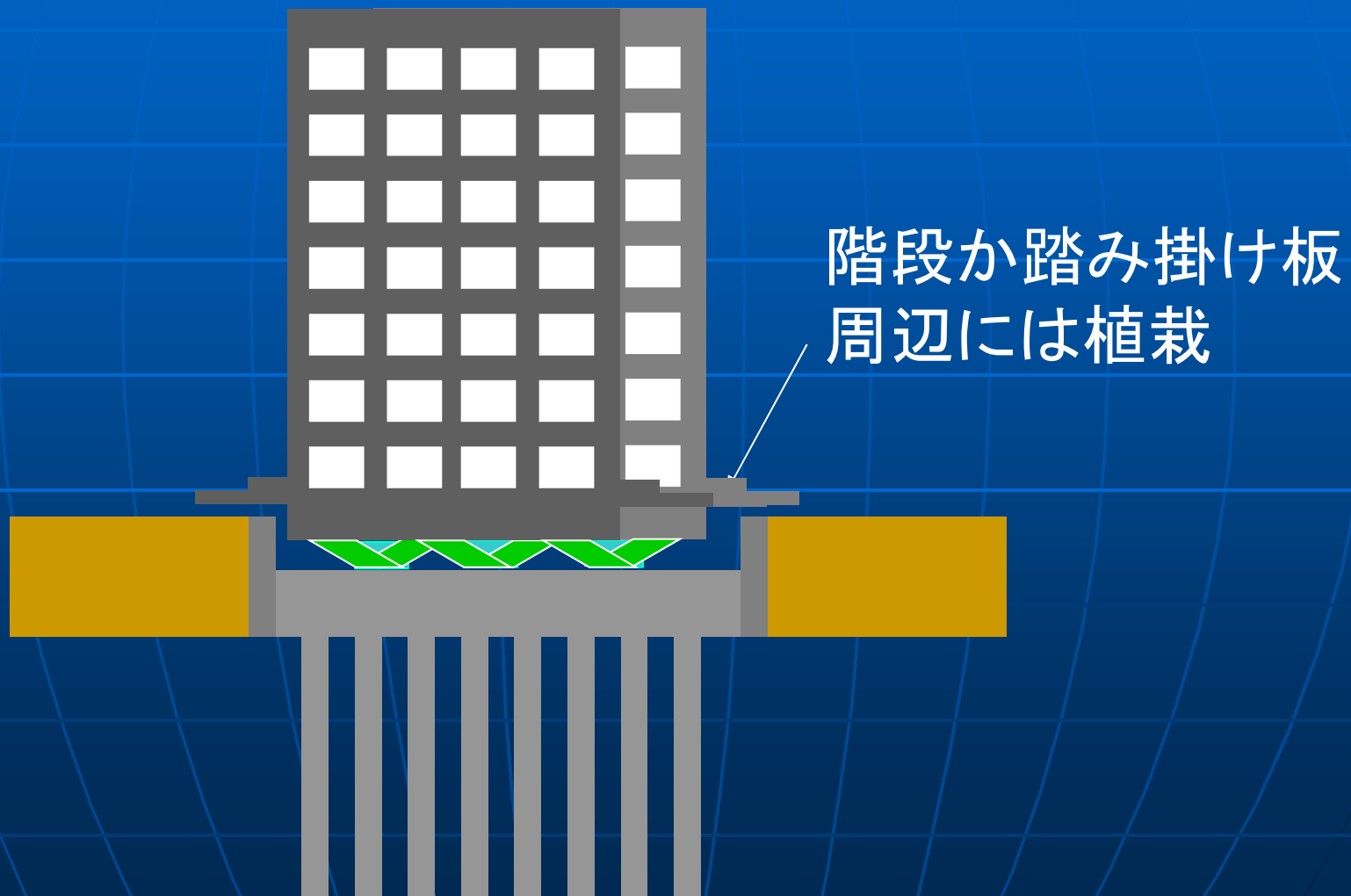
免震設計の問題点は何か？

1) 桁間の衝突や伸縮継ぎ手の作用に対する配慮

- 通常規模の免震橋でも、応答変位は $\pm 30\text{cm}$ 以上、地震動によっては $\pm 50\text{cm}$ 以上になる。
- 応答変位は容易に桁間や桁と橋台間の遊間を上回る大きさであるため、桁間や桁と橋台間で衝突が生じる
- 伸縮継ぎ手もこれに影響する。破壊した伸縮継ぎ手が噛み込んだりすると、橋の応答に大きな影響を与える



建築物では、衝突は一般に問題とはならない



桁間衝突の何が問題か？

- 免震設計では、桁が初期に想定する変位（設計変位）だけ移動し、この場合の等価剛性と等価減衰定数を用いて設計している。したがって、桁間衝突で想定通り桁が移動できない状態は望ましくない。
- 限られた過去の事例に基づくと、桁衝突が生じても、衝突面の損傷は著しいものではない。しかし、一方の桁の慣性力が他方の桁に伝達される結果、この桁を支持する支承や橋脚等が被害を受ける可能性はある。
- 桁衝突により伝達される慣性力、桁間間隔が十分大きいのか、十分小さければ、大きいものではない。むしろ、桁間隔は小さくし、桁衝突が起こった方が良いという見方もある。このあたりは、まだ、十分研究されていないし、震災経験もない。

免震橋の固有周期

道路橋示方書

$$\frac{T}{T_0} \approx 2$$

- JR鷹取駅記録のように、長周期領域で卓越する地震動もあるので、地盤条件や地震動条件に配慮して決めることが重要
- 地盤の特性値 T_g は、微小ひずみ領域における地盤の固有周期を与えるだけ。せん断剛性のひずみ依存性を考慮する必要がある。
- 耐震設計上の基盤より深い地盤が固有周期に与える影響も考慮しなければならない。

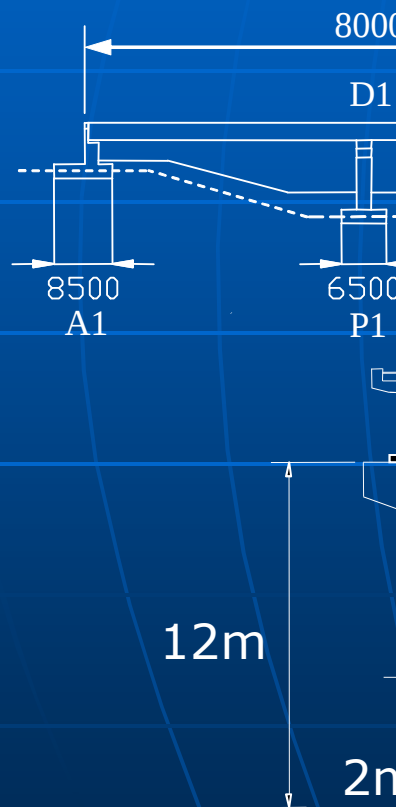
エネルギー吸収性能のより一層の向上を図ることが重要

- 兵庫県南部地震以降、LRBやHDRを用いた免震設計が採用されているが、今後、さらに橋梁の減衰性能を高めることが重要
- これにより、桁間衝突の影響を低減し、橋梁の耐震性を高めることが可能となる。
- 地震時水平力の分散構造においても、天然ゴム支承ではなくLRBやHDRを使用することが重要。エネルギー吸収性能のない支承を使用することは推奨できない。

現状の免震橋よりもさらに高減衰化すること
の効果はどの程度あるか？

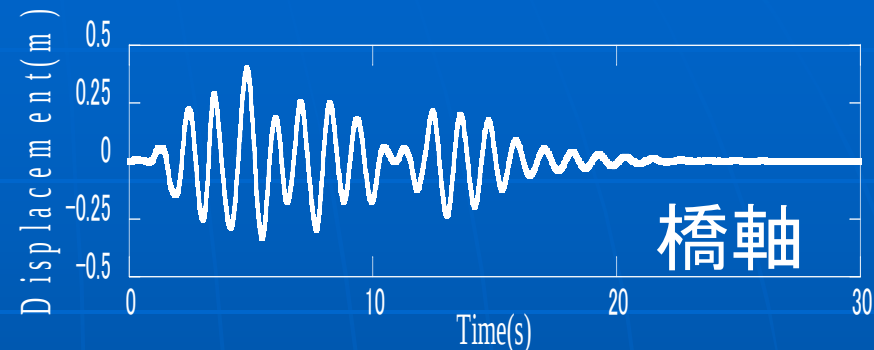
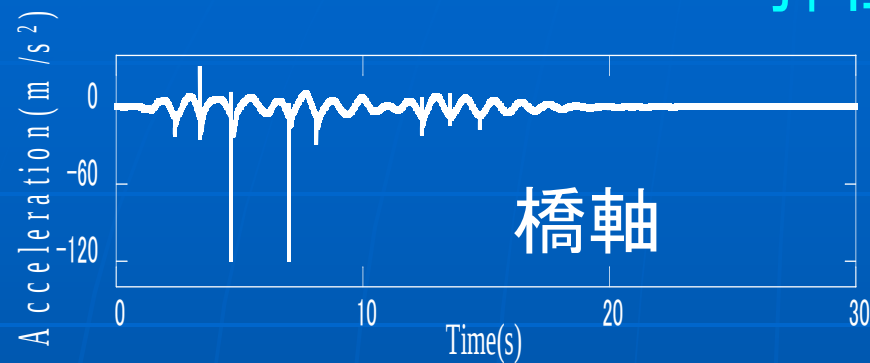
解析対象橋

U型免震ダンパー

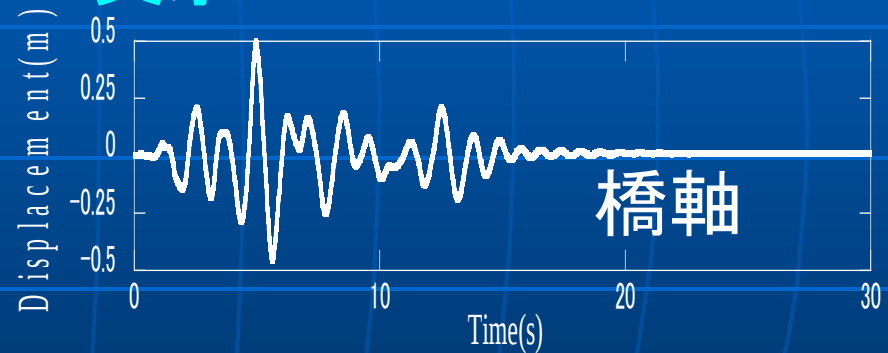
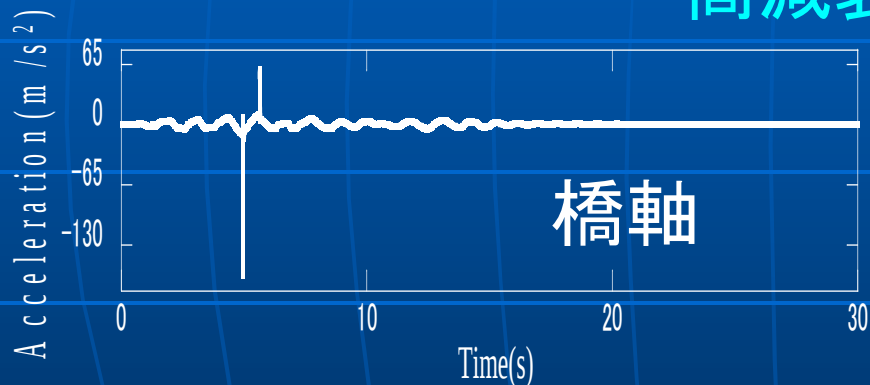


U型ダンパーによる高減衰化は有効か？

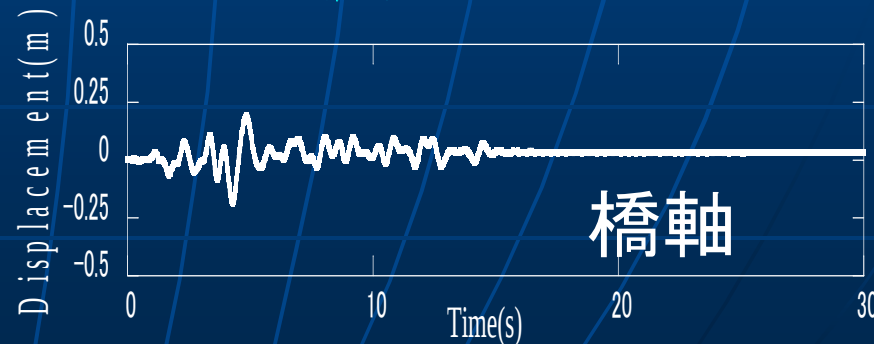
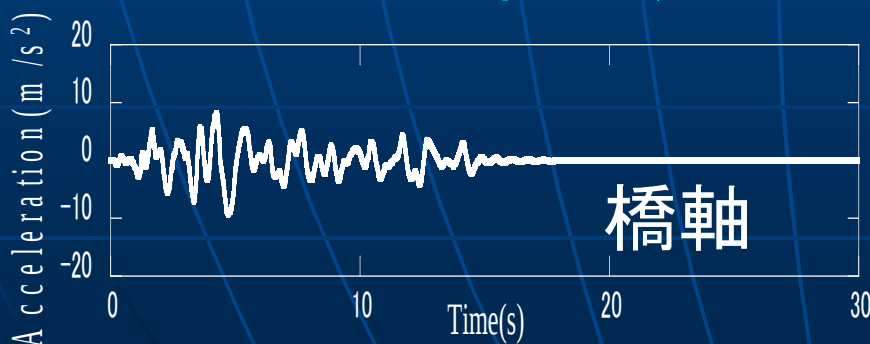
弾性ゴム支承



高減衰ゴム支承



高減衰ゴム支承＋U型免震ダンパー



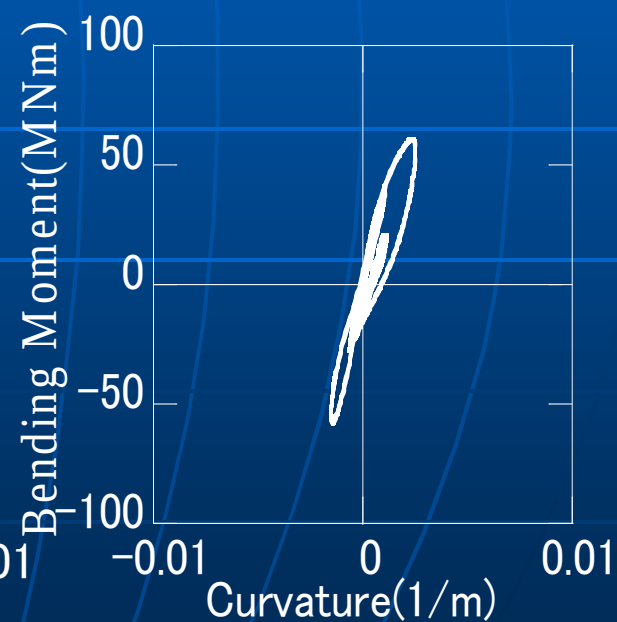
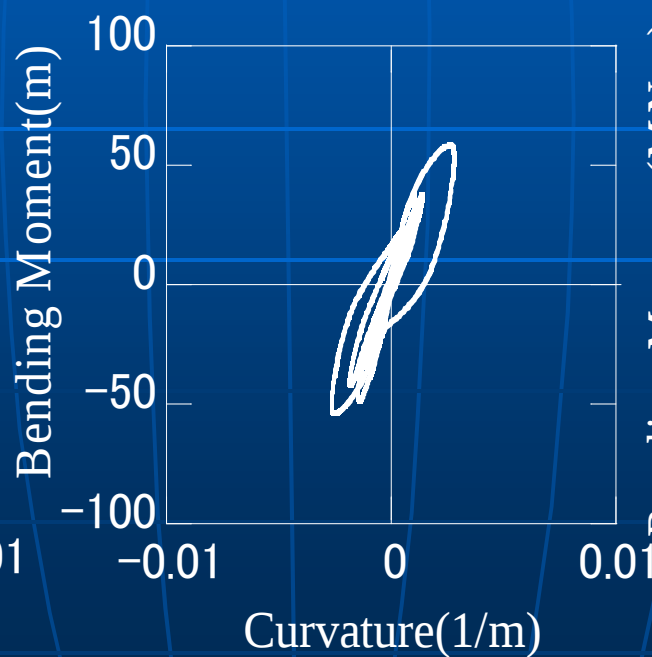
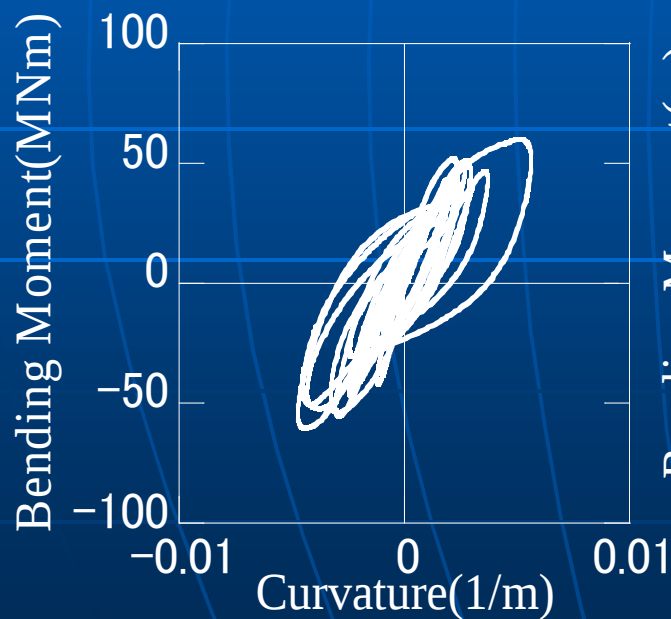
U型ダンパーによる高減衰化は有効か？

塑性ヒンジ区間の曲げモーメント～曲率の履歴
橋軸方向

弾性ゴム支承

高減衰ゴム支承

高減衰ゴム支承
+ U型免震ダンパー



まとめ

- 免震設計は、大地震時の被害を軽減するために有効な方法である。しかし、まだ建設の歴史が浅く、震災経験がないことから、以下の点には細心の注意が必要である。

- ✓地盤条件、地震動条件に応じた固有周期の設定

- ✓桁間衝突の影響と伸縮継ぎ手の作用

- 現状の免震構造よりもさらに高減衰化することが有効であり、この方向の技術開発を推進する必要がある。

- 地震時水平力分散構造も含めて、エネルギー吸収性能のある支承を使用することが重要である。