



第17回CAESAR講演会
(2024年8月28日)

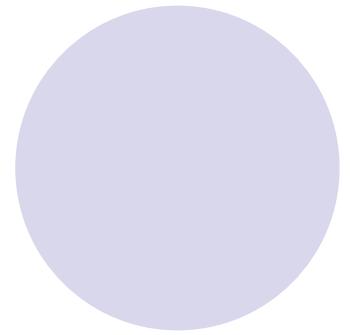
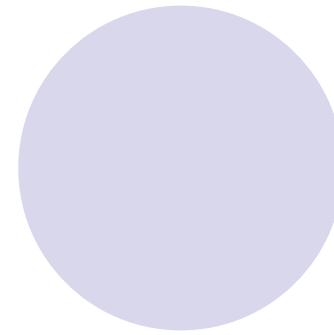


災害大国における道路づくりに 求められること

高橋良和

京都大学 教授

TOPICS



- 自己紹介を兼ねて
～耐震工学への道～
- 防災という科学から考える、
日常を形づくる道路の可能性
- インフラが高度に整備された地震国なら
ではの橋梁デザイン・耐震技術



第2講座(鉄道工学) [M30-S38]

路線施設学講座 [S38-H8]

地震工学分野 [H8-H15]

地震防災システム分野 [H15-H22]

地震ライフライン工学講座 [H22-現在]



田邊[M33-T12]



後藤 [S38-S52]



土岐 [H5-H14]



Scawthorn [H15-H20]



清野 [H21-R5]

第1講座(橋梁工学) [M30-S38]

耐震工学講座 [S49-H8]

構造ダイナミクス分野 [H8-H15]

構造ダイナミクス分野 [H15-現在]

国立大学土木で初めて
「耐震工学」を冠する
研究室の設立



山田 [S50-H5]



家村 [H6-H20]



小池 [H22-H25]



高橋 [R1-現在]

土木工学
教室 [1897(M30)創設]

第5講座(材料) [T10-S38]

土木材料学講座 [S38-H8]

構造材料学分野 [H8-H15]

構造材料学講座 [H8-現在]



近藤 [S3-S33]



高橋 [H29-H31]



耐震基礎部門 [S42-H8]

耐震基礎分野 [H8-現在]



柴田 [S42-S50]



土岐 [S51-H5]



佐藤 [H6-H17]



澤田 [H17-R5]



後藤 [R5-現在]

都市施設耐震システム研究
センター [S61-H8]

都市社会構造分野 [H8-H17]

都市耐水分野 [H15-現在]



亀田 [S61-H14]



五十嵐 [H26-現在]

防災研
究所 [S26創設]

京都大学土木系耐震グループ
担当教授

自己紹介を兼ねて

1994(平成6)年までの耐震工学研の研究テーマ

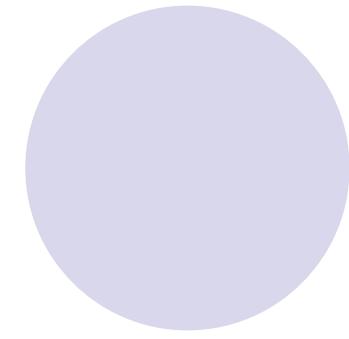
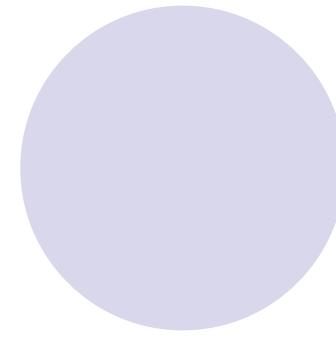
土木システム工学専攻
 ライフライン工学講座 構造ダイナミクス分野
 [旧耐震工学講座]

		S 62	63	H 1	2	3	4	5	6	
研究室スタッフ	教授	山田							家村	
	助教授	家村								
	講師									井上
	助手	野田		伊津野					五十嵐	
	研修員・その他	中西 (技官)								
1.	地震予測と耐震設計法	(Gaussian Beam 法) (地盤振動) 山田・家村・野田・廣瀬 山田・家村・伊津野・稼農 (半経験的手法) 山田・家村・伊津野・岡市・武市								
2.	強震計の精度とアレー観測	(デジタル強震計の精度と補正) 山田・家村・野田・伊津野・土井・山下 (多点入力アレー観測) (明石海峡アレー観測) 山田・家村・伊津野・山下・堀 山田・家村・伊津野・渡辺・石川・城本・Z								
3.	RC 構造の実験的研究	(RC 構造物のサブストラクチャーハイブリッド実験) (中空断面 RC 構造の載荷実験) 山田・家村・伊津野・Tanzo・米山・速藤 家村・井上・五十嵐・高橋 (修復 RC 部材の地震応答実験) (修正圧縮場理論による) 山田・家村・伊津野・荒木・大川 家村・井上・田中								
4.	鋼構造の実験的研究	(箱形橋脚模型のハイブリッド実験) 山田・家村・伊津野・安田・柴原・岡・前田・中山・今村								
5.	地震応答解析手法 (弾塑性)	(構成則に基づいた RC 構造物の地震応答) 山田・家村・伊津野・細川・遠藤・中山・江川 (不規則地震応答) (復元力に基づいた RC 構造物の地震応答) 山田・家村・伊津野・藤澤・近江岸 伊津野・大野・ (修復・耐震補修 RC 部材の地震応答) (中空断面 RC 構造物の) 内橋・見坂 山田・家村・伊津野・岡田・大川 山田・家村・伊津野・藤								
6.	制震	(確率論的最適アクティブコントロール) (可変剛性・減衰システム) 山田・家村・伊津野・五十嵐・岩崎・大野・米山・高田 家村・伊津野・渡辺・成 (入力エネルギー) (制震システムの開発・AMD・ATMD・TLD・TMD) 山田・家村・伊津野・北村 山田・家村・伊津野・米山・高田・見坂・高村・本郷								
7.	免震	(地震入力エネルギー) 山田・家村・伊津野・塚原・野村 (サブストラクチャーハイブリッド実験) 山田・家村・伊津野・田中・Berumen・野村・矢納 (免震装置の履歴モデル) (確率論的) 山田・家村・伊津野・渡辺 家村・五								
8.	動的応答実験手法の開発									
9.	都市公共施設の地震防災	(エキスパートシステム) 山田・家村・伊津野・横溝・杏掛 (ライフライン網の機能評価) 山田・家村・野田・伊津野・古川・東川・竹内・佐藤								

- 橋梁工学・土木設計学の流れを汲む耐震工学研究室では、長大橋を対象とした耐震研究が中心。
- 1993年度の研究テーマは
 - 明石海峡アレー観測
 - 制震システム
 - 中空断面RC構造物の地震応答

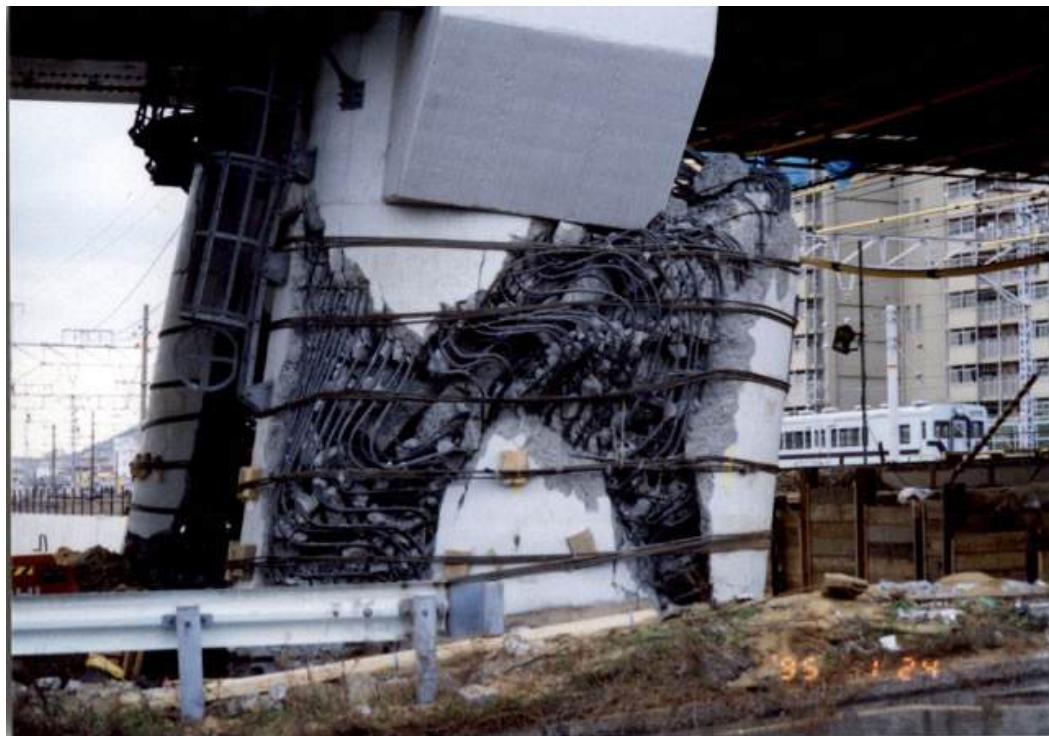
1995年兵庫県南部地震

自己紹介を兼ねて



自己紹介を兼ねて

調査中に自分で撮った写真の一部



1995年兵庫県南部地震

- 1995年1月当時、私は耐震工学研究室に所属する大学院修士1回生の冬。
- 日本の耐震技術に対する自信が一夜にして崩れ去った実体験は強烈。畏れることの重要性。
- 兵庫県南部地震**以前**の耐震工学研究の雰囲気を知り、地震による被害を**自分の目**で見て、**それ以降**の耐震工学研究の変化を目の当たりにしてきた**最後の世代**が、もはや**現場の中堅以上**になっている。

自身が行った地震被害調査

25才 修士1回
助手

- 1995年兵庫県南部地震
- 1999年集集地震, 台湾

30才

- 2000年鳥取県西部地震
- 2001年芸予地震
- 2004年新潟県中越地震
- 2004年スマトラ島沖地震, インドネシア

35才

助教授

- 2005年福岡県西方沖地震
- 2006年ジャワ島中部地震, インドネシア
- 2006年ジャワ島西部地震, インドネシア
- 2007年能登半島地震
- 2007年新潟県中越沖地震

40才

- 2008年四川汶川地震, 中国
- 2011年クライストチャーチ地震, ニュージーランド
- 2011年東北地方太平洋沖地震

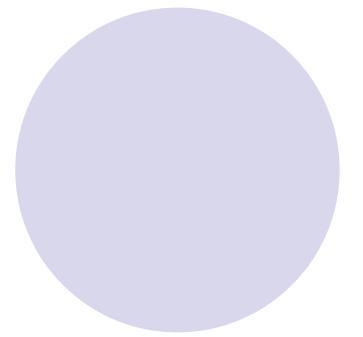
45才

- 2016年熊本地震

50才

教授

- 2016年鳥取県中部地震
- 2024年能登半島地震

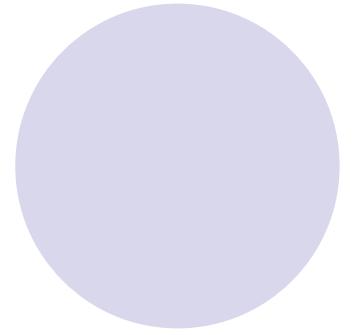
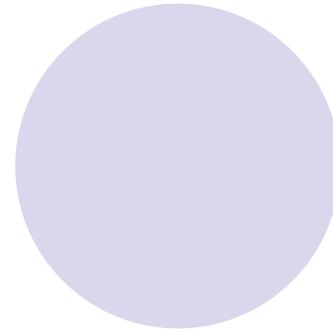
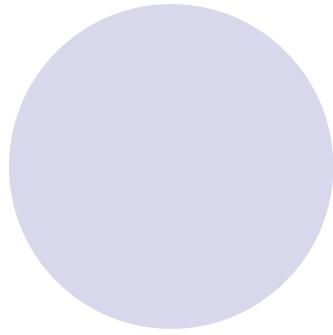


自己紹介を兼ねて

研究テーマ

- 阪神・淡路大震災を研究者としてみた最後の世代としての責任と義務を果たすこと
 - 土木施設（特に橋梁）の動的応答性状と改善
 - 設計基準事象に対する安全性
 - 設計基準外事象に対する危機耐性
 - インフラレジリエンス
- 科学の最先端である土木の学者としての強みを活かすこと
 - 社会のための科学『鈍感系の科学』の構築
 - 成熟した社会を前提として、その次を考える





日常において、土木を意識すること、ありますか？

防災という科学から考える、日常を形づくる
道路の可能性



内からみる土木

- 土木は文明を造り， 建築は文化を造る。
- 土木は社会基盤を整備することにより， 国民の豊かな生活を支えている。
- 土木は聖人がなすべき仕事である。
- 土木工学者は指揮者を指揮する人である。
- Military Engineeringの対義語としての Civil Engineering

土木工学とは？

人類・生物が生存できる豊かな水、土地などを
基盤とする自然環境

社会が発展する、生活基盤を支えるための
物質・文明に関わる社会的環境

人々の交流と活動を知的に促し、アイデンティティの
基盤となる地域固有の文化、風土に関わる文化的環境



土木工学は、自然と調和し、健康で文明的・文化的な生活を
支える環境について、その保全と制御を含めた環境創成を目的
とする学問である。土木工学は、環境の持続可能な発展に
関わるインフラストラクチャーで公共空間を創造する。



日本の社会基盤構造（インフラ構造）

- 私たちの成長の基盤となるインフラは、過酷な環境変化を受け入れるレジリエンスや限られた（天然）資源を有効に活用するアイデアなど、日本人の感性に根ざした独自の創造性と、そのアイデアを具体的な形にする技術力により構成されている。
- Infrastructure, which provides the foundation of our growth, consists of unique creativity rooted in Japanese sensitivity, such as the resilience to accept harsh environmental changes and ideas to make effective use of limited (natural) resources, paired with the technological strength to convert the ideas into tangible forms.

外からみる土木

- 既に文明的な生活を営んでおり、高度にインフラが整備された現在、日常生活で土木を殊更に意識することはない。
(これは**土木屋が目指してきた世界**)
- 社会が**無意識**に土木の成果を享受してきた結果、土木に**無関心**となった。
- 土木を意識する（思い出す）のは、土木が支えてきた社会が危機の時。

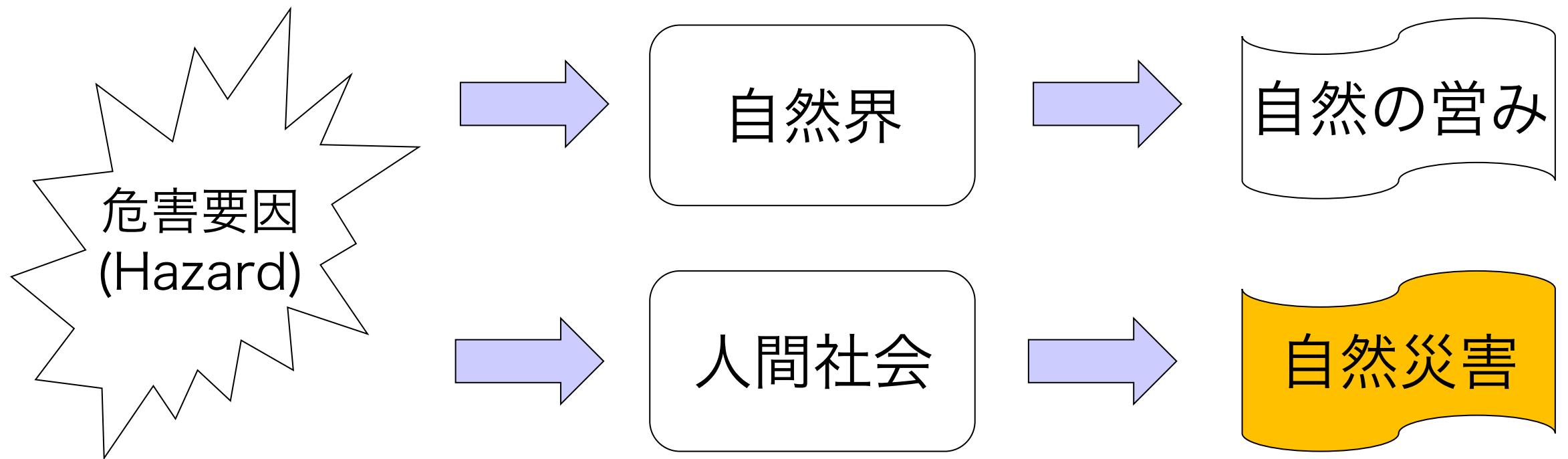
現在、土木を意識するということは、

防災は土木の大きなアピールポイントだが…

災害

自然災害とは？

- 災害は自然条件と社会条件の組み合わせによって発生するもの。



危害要因事例：河川による浸食



グランドキャニオン

自然の営み

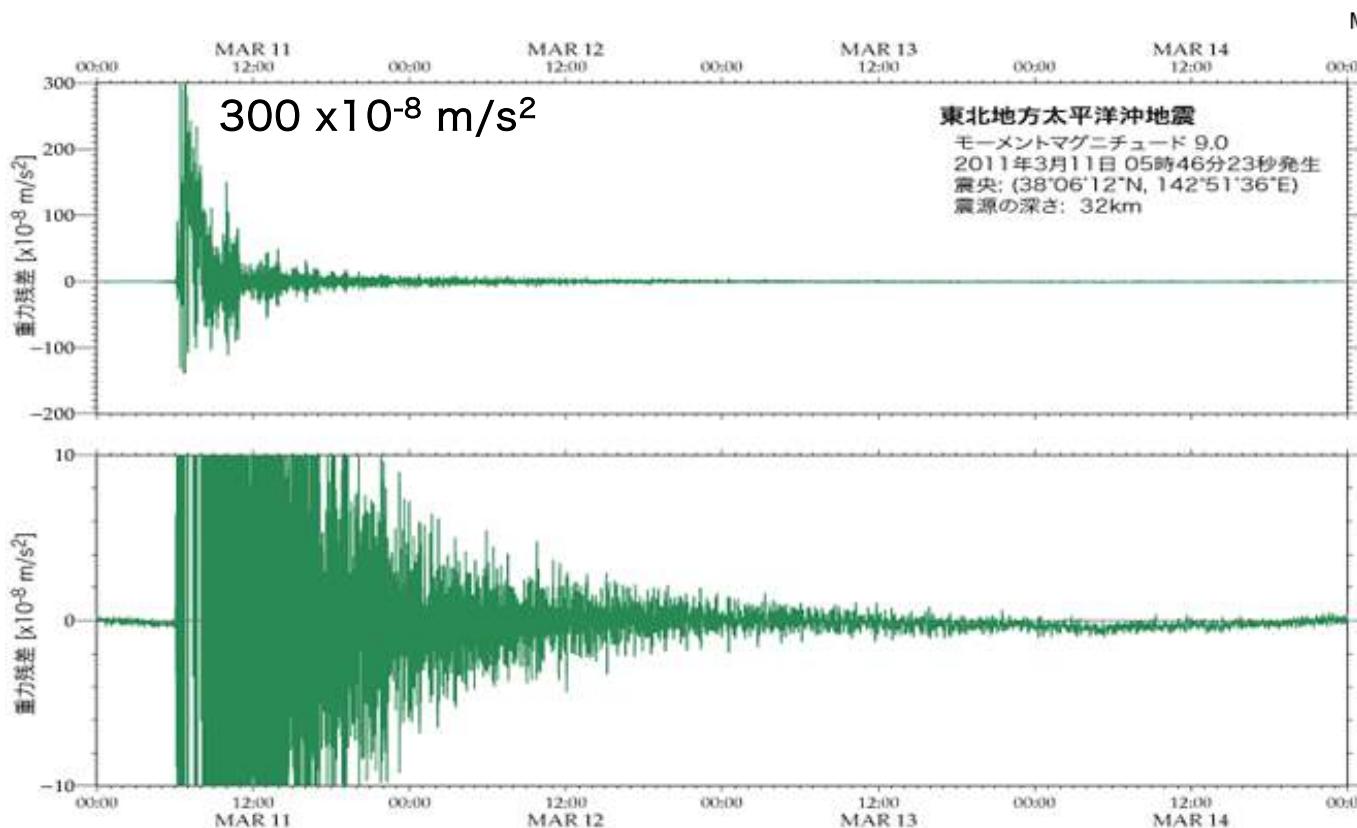


千曲川

自然災害



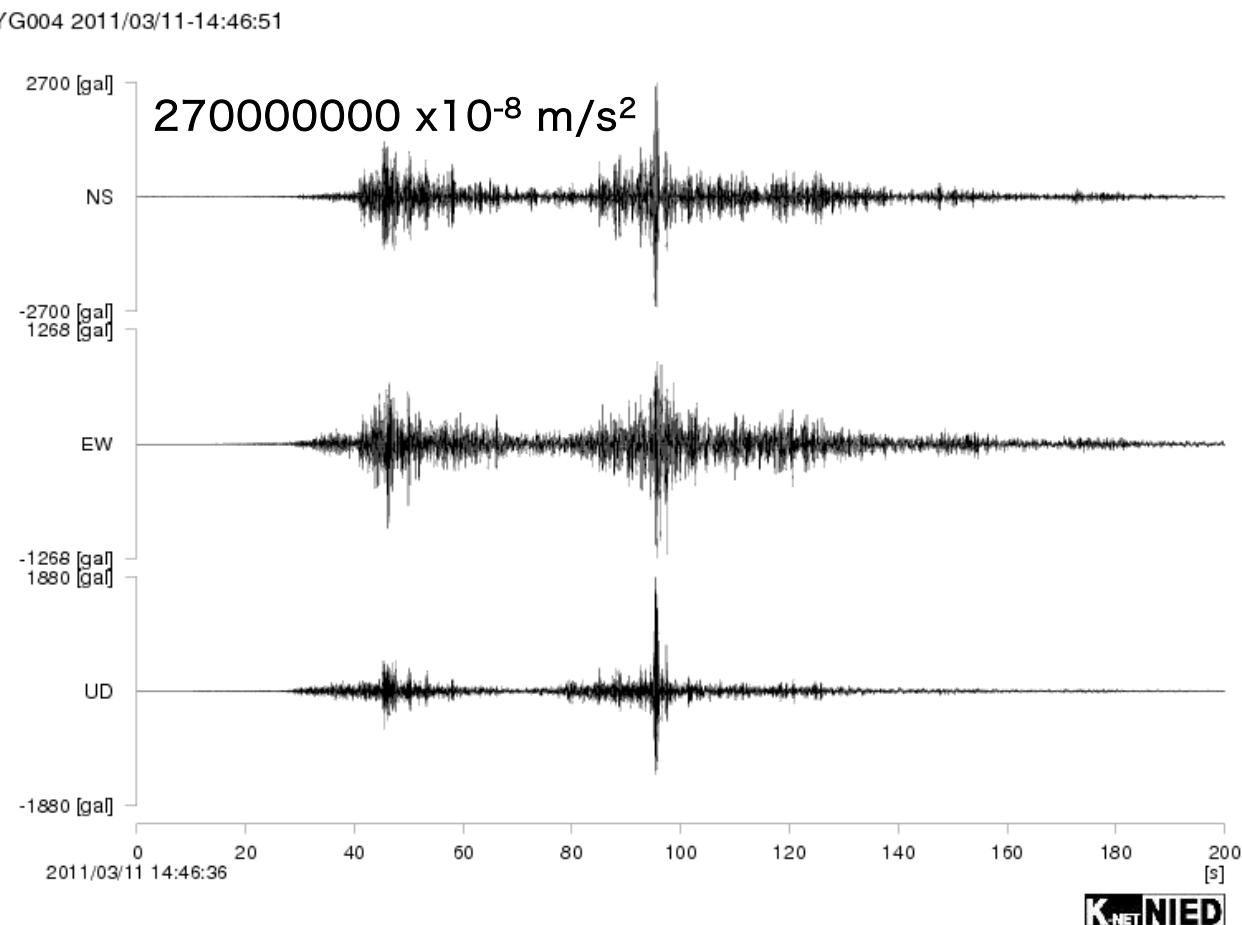
危害要因事例： 2011年東北地方太平洋沖地震



データを分析することで地震のメカニズムや地球内部の様子を探る手掛かりになるよ。

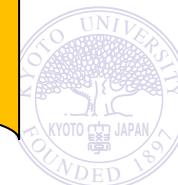
第52次南極地域観測隊越冬隊
による昭和基地での観測記録

自然の営み



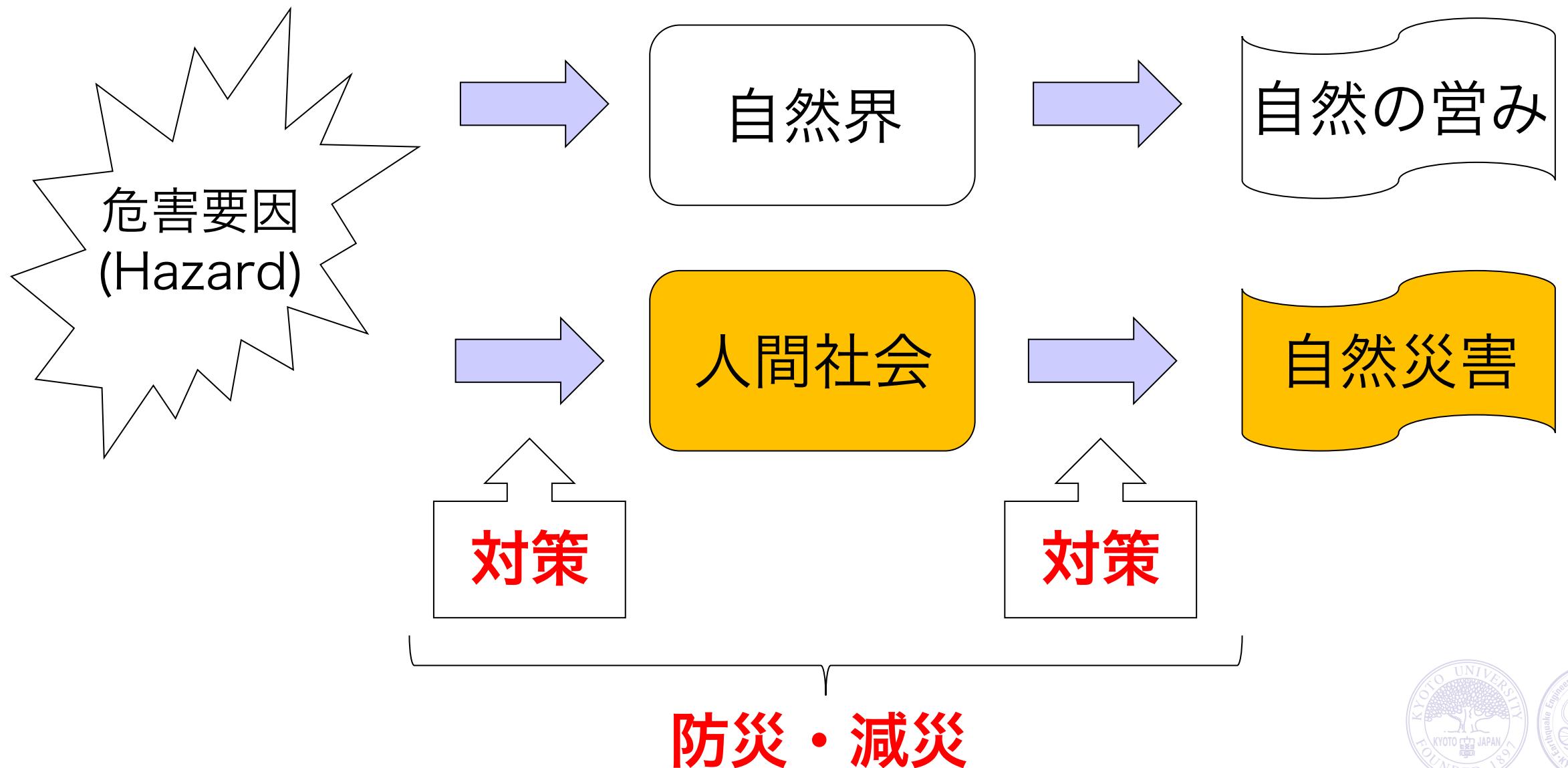
防災科学技術研究所による
宮城県築館での観測記録

自然災害



自然災害とは？

- 災害は自然条件と社会条件の組み合わせによって発生するもの。



失敗科学としての自然災害科学

- 防災以外の自然科学も、同じアプローチ、「失敗を将来へ向けた駆動力」として利用している（真理に到達していないという欠落性が、研究の駆動力となる）。
- しかし、「失敗」が科学者コミュニティに留まらず、明瞭な社会的事実として表面化する傾向が強い自然災害科学は、真理に至る途中の失敗が、素朴に失敗と受け取られる可能性が高い。

防災の埋没効果

- 今日の社会は、自然災害科学の「失敗」とともに、その背後に埋没した無数の「成功」とともにある。
- しかし、防災対策が功を奏しているために、実際の被害が発生していないことにより、防災対策の有効性が社会に実感として理解されない。

現在、土木を意識するということは、

事故・災害… 非常時であるということ。
日常をつくり出す土木が、非常時に「土木も大事」
と主張すべきでない。



土木の埋没効果

- 今日の社会は、土木の先人が成し遂げてきた対策が**功を奏している**ために、日常で文明的な生活を享受することができていることにより、土木の重要性が社会に実感として理解されない。
- では、どうする？

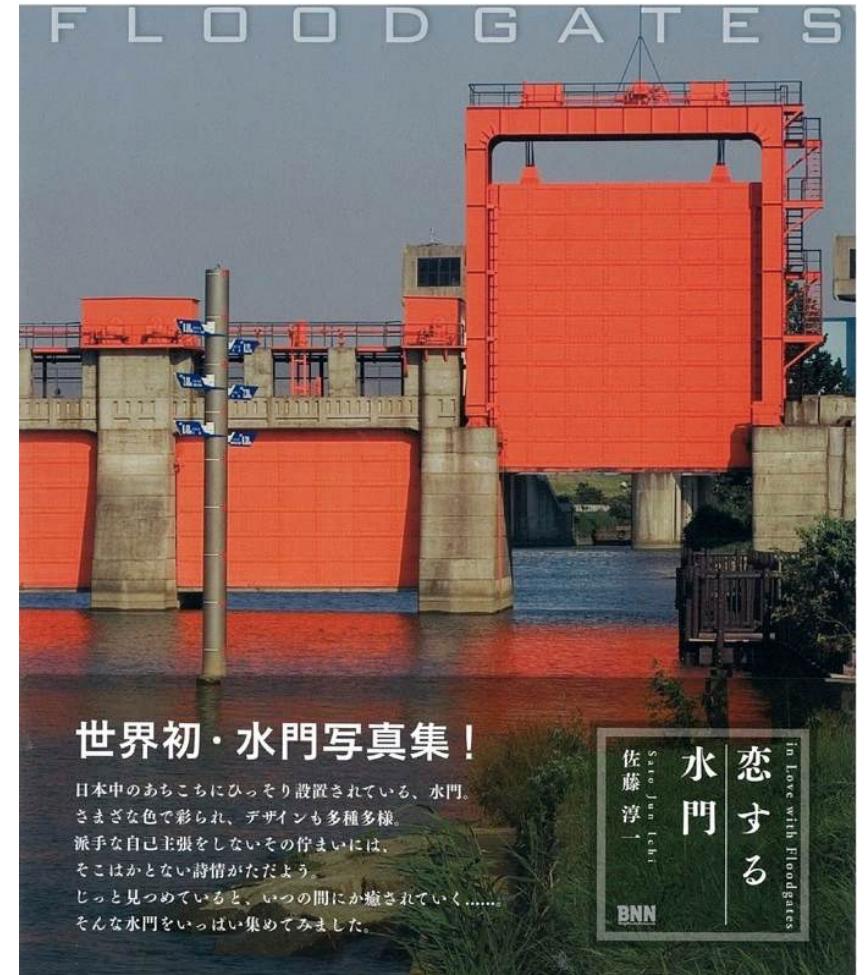
日常＝退屈ではない

- 「日常は退屈で、非日常は楽しい。」と思いがちだが、日常の価値をどのように社会と共有するか？
- 日常に興味をもたせるには、適切なサジェスチョンが有効。
- 日常に関心を持つには、教養が必要。知らなかった軸や補助線を与えることで、同じ日常でも見え方が変わる。

土木のありがたみを主張せずに、 社会との新しい接点を模索する

- 無意識でよいが無関心とならない土木
- 危機をあおらない土木
- 土木の利点，意義をアピールしたところで，既に聞く耳を失っている社会には響かない。
- 土木の宣伝ではなく，社会が土木を気づくいてもらう仕組みを考える。
- 土木屋が社会の変化に気づいているか？
- 土木屋が義務感ではなくワクワクしているか？

2010年頃、土木の**非**専門家が新しい楽しみ方を提示してくれはじめていた



- 土木に関連する話題などを議論する場を、一般の人が参加しないまでも、**日常で、せめて目に留まる**ところで行い、土木について色々と考えている (**楽しんでいる**) ことを**共有**したい。
- 土木に関する話題を「つまみ」に、あーでもない、こーでもない、と自由な議論ができる場を提供したい。
- 2010年より関西支部で開始。
- 2012年に土木学会100周年記念事業として提案、全国展開が始まる。

満天北

サイエンス
カフェ

$$E=mc^2$$



ゆるり中崎教室

自転車は
押して通行
してください。

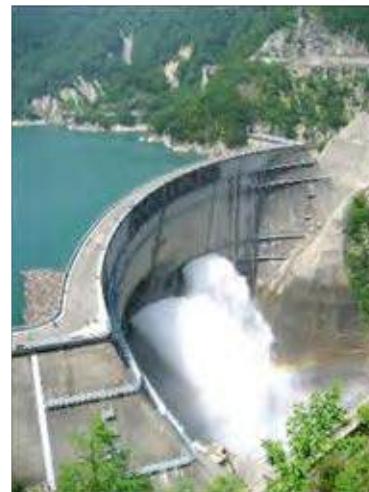
イベント
開催中

イベント
開催中

大阪

第1回の特選メニュー

「どぼくカフェって？」 + 「現代土木は芸術の対象になりうるか？」



話題提供者：高橋良和（京都大学准教授・FCC代表幹事）

その他メニュー

- ・土木に関する面白いことならなんでも

日時：平成22年6月16日（水） 19:00～20:30

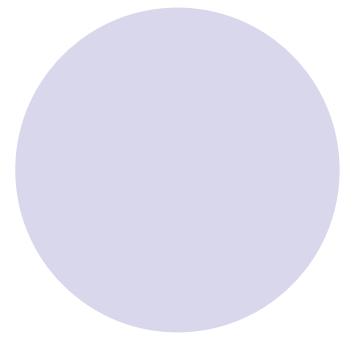
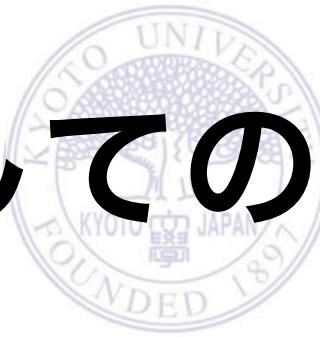
会場：黒崎東商店会 Art & Science Cafe

（天五中崎通り商店街内・大阪市北区黒崎町 8-7）

日常＝道路を切り口に

- 道路は国家・地方・都市の根幹をなす土木構造であるからこそ、日常の土木の代表である道路に関心をもってもらいたい。
- 道路を題材に楽しんでますか？
特に、土木関係者に問いたい。

趣味としての鉄道と道路



● 鉄道趣味

- 魅力あふれるハード
 - ノスタルジックな機関車
 - 最先端テクノロジーの新幹線
 - バラエティあふれる民鉄車両
- 多くの人間ドラマ
 - 駅での出会いや別れ
 - 鉄路の先の新しい生活への希望や不安
 - 旅情や望郷など
- ハード・ソフトともに**非日常を演出する数多くのコンテンツ**が含まれているのである。
- さらに鉄道趣味の世界には、『時刻表2万キロ』の宮脇俊三氏をはじめ、多くの作家がおり、更なる鉄道趣味の魅力をかき立てている。

● 道路趣味

- 家を出ればそこには道路があるように、極めて日常的な存在
- カーエンスーは数多くいれども、それは自動車趣味であり、道路趣味では無い。
- あくまで道路そのもので勝負する必要があるものの、趣味として**分かりやすいコンテンツは少ない**。道路の魅力を味わうには、**日常的な道路に潜む非日常を見つけ出す**努力が必要で、**コンテクスト**が鍵となる。



FCC FORUM 2012

どほくカフェ コクトゥを味わう



国道・酷道・石道・刻道・哭道...

日時：平成24年11月30日（金）18時開演（受付：17時15分予定）

会場：川の駅はちけんや にぎわいXing (<http://r.gnavi.co.jp/k615114/>)
（大阪市中央区北浜東地先、アクセス：京阪電車天満橋駅下車すぐ）

パネリスト：松波成行（国道愛好家）・井出仁雄（大阪府茨木土木事務所）
・辻謙一（京都府建設交通部）・石川悟（奈良県吉野土木事務所）





...the
... ..
... ..
... ..
... ..
... ..
... ..
... ..
... ..
... ..



日本各地で「道が趣味」をテーマに どぼくカフェを開催



どぼくフェスタ in 松山

日時：平成26年5月19日（月）18時開演
会場：松山市大街道商店街(<http://www.okaido.jp/>)
(伊予鉄道松山駅前駅から徒歩10分、大街道駅下車、大街道商店街内を徒歩で南方面へ約400メートル)

話題提供者：平沼義之（オプローダー）
*オプローダーとは、道路関係者の中でも特に道を好んで探検・調査する人のこと（造語）
廣道・廃線など、棄てられて交通路の探索に没頭しているオプローダー、道路全般に造詣が深く、「大研究 日本の道路120万キロ」（2013年 実業之日本社）、「廣道クエスト」（映像作品）（2013年 日活）などの出版多数。
ウェブサイト：<http://yamaiga.com>

コーディネータ：高橋良和（どぼくカフェ主催者/京都大学）

プログラム（その他詳細は<http://jsce100.com>）
1. 「どぼくカフェとは？」高橋良和（どぼくカフェ主催者/京都大学）
2. 「道路の最後と最初を求めて」平沼義之（オプローダー）
3. 「自由討論 極私的 道の楽しみ方」

入場無料、当日自由にご参加ください。

主催：（公社）土木学会100周年事業実行委員会 共催：（公社）土木学会関西支部 協力：（公社）土木学会関西支部 F.C.C.

土木コレクション2014 in 仙台

日時：平成26年6月4日（水）18時開演
会場：せんだいメディアテーク 1F オープンスクエア(<http://www.smt.jp/>)
(仙台市青葉区春日町2-1)

話題提供者：石井あつこ（オプローダー）・のながあつし（道路写真家）
*オプローダーとは、道路関係者の中でも特に道を好んで探検・調査する人のこと（造語）

コーディネータ：高橋良和（どぼくカフェ主催者/京都大学）

プログラム（その他詳細は<http://jsce100.com>）
1. 「どぼくカフェとは？/道の魅力」高橋良和
2. 「廣道から昔と今を思う」石井あつこ
3. 「道の写真が伝える、復興する街にふさわしい“国道”づくり」のながあつし

入場無料、当日自由にご参加ください。

主催：（公社）土木学会100周年事業実行委員会 共催：（公社）土木学会東北支部 協力：（公社）土木学会関西支部 F.C.C.

土木コレクション2014 in 福岡

日時：平成26年6月7日（土）18時開演
会場：エルガーラ・パサージュ広場(<http://www.daimaru.co.jp/fukuoka/>)
(福岡市中央区天神1-4-1 大丸福岡天神店1F)

話題提供者：松波成行（国道愛好家）

コーディネータ：高橋良和（どぼくカフェ主催者/京都大学）

プログラム（その他詳細は<http://jsce100.com>）
1. 「どぼくカフェとは？/道の魅力」高橋良和
2. 「コクドウを味わう」松波成行
3. 「パネルディスカッション 道が趣味とは？」

入場無料、当日自由にご参加ください。

主催：（公社）土木学会100周年事業実行委員会 共催：（公社）土木学会西支部 協力：（公社）土木学会関西支部 F.C.C.

土木学会100周年記念フェスタ in 中部

日時：平成26年7月29日（火）18時開演
会場：オアシス21 銀河の広場(<http://www.sakaepark.co.jp/>)
(名古屋市長区東区一丁目1番1号)

話題提供者：佐藤健太郎（サイエンスライター）・山形みらい（タレント）
・兼岩孝（栄公園振興(株)取締役兼総務部長）

コーディネータ：高橋良和（どぼくカフェ主催者/京都大学）

プログラム（その他詳細は<http://jsce100.com>）
1. 「どぼくカフェって？/道の魅力」高橋良和
2. 「国道名所をめぐる」佐藤健太郎
3. 「名古屋の道も知ってちょよよ」山形みらい
4. 「自由討論：道が趣味って？」佐藤健太郎・山形みらい・兼岩孝・高橋良和

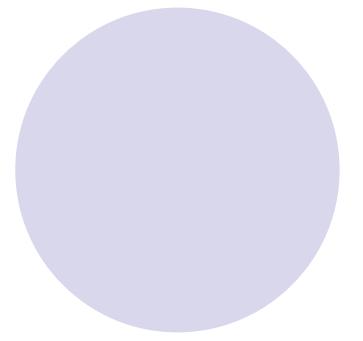
入場無料、当日自由にご参加ください。

主催：（公社）土木学会100周年事業実行委員会 共催：（公社）土木学会中部支部 協力：（公社）土木学会関西支部 F.C.C.

多くの方（土木関係者以外）に参加をいただき、
道は一般の人の興味をひくことができることを確信。



面白そうにしていると、 周りから人が集まってくる



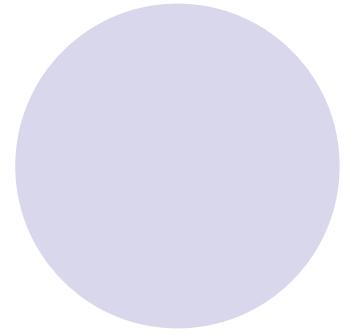
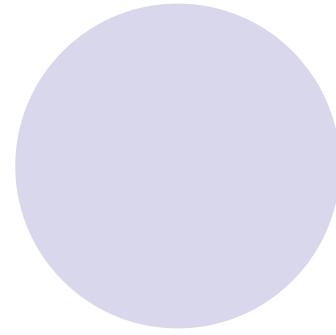
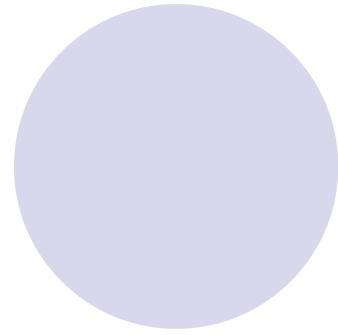
土木をテーマに出演を依頼された番組

- 2015年7月25日 世界一受けたい授業（日本テレビ）
「日本の土木技術は世界一」
- 2019年12月18日 又吉直樹のへウレーカ！（NHK Eテレ）
「オススメ！京都の新名所は鴨川の“橋”！？」
- 2020年9月23日 又吉直樹のへウレーカ！（NHK Eテレ）
「今日から変わる 道路の見方！」
- 2021年5月24日 世界一受けたい授業（日本テレビ）
「世界で活躍する！すごい働くのりもの図鑑」
- 2023年11月25日 世界一受けたい授業（日本テレビ）
「世界で活躍 スゴい働く乗り物図鑑」
- 2024年3月2日 チコちゃんに叱られる（NHK）
「カーブミラーの秘密」



日常＝道路を切り口に 非常時＝災害時の道路を考える

- 道路は国家・地方・都市の根幹をなす土木構造であるからこそ、**日常の土木の代表である道路**に関心をもってもらいたい。
- 日常の道路に関心を持って**初めて**、災害時の道路のことに思いを馳せることができる。
 - 自分の関心事として、考えられるようになる
 - 同じ災害時の光景をみても、心持ちの違いで「災害時に道路が使えない。誰が悪い！」から「日常の道路が当たり前に使えていたのは有り難かったんだ」に変わり得る。



インフラが高度に整備された 地震国ならではの 橋梁デザインと耐震技術



地震危険度が高い先進国の現状

どちらの高架橋に**工学的優美さ**を感じますか？

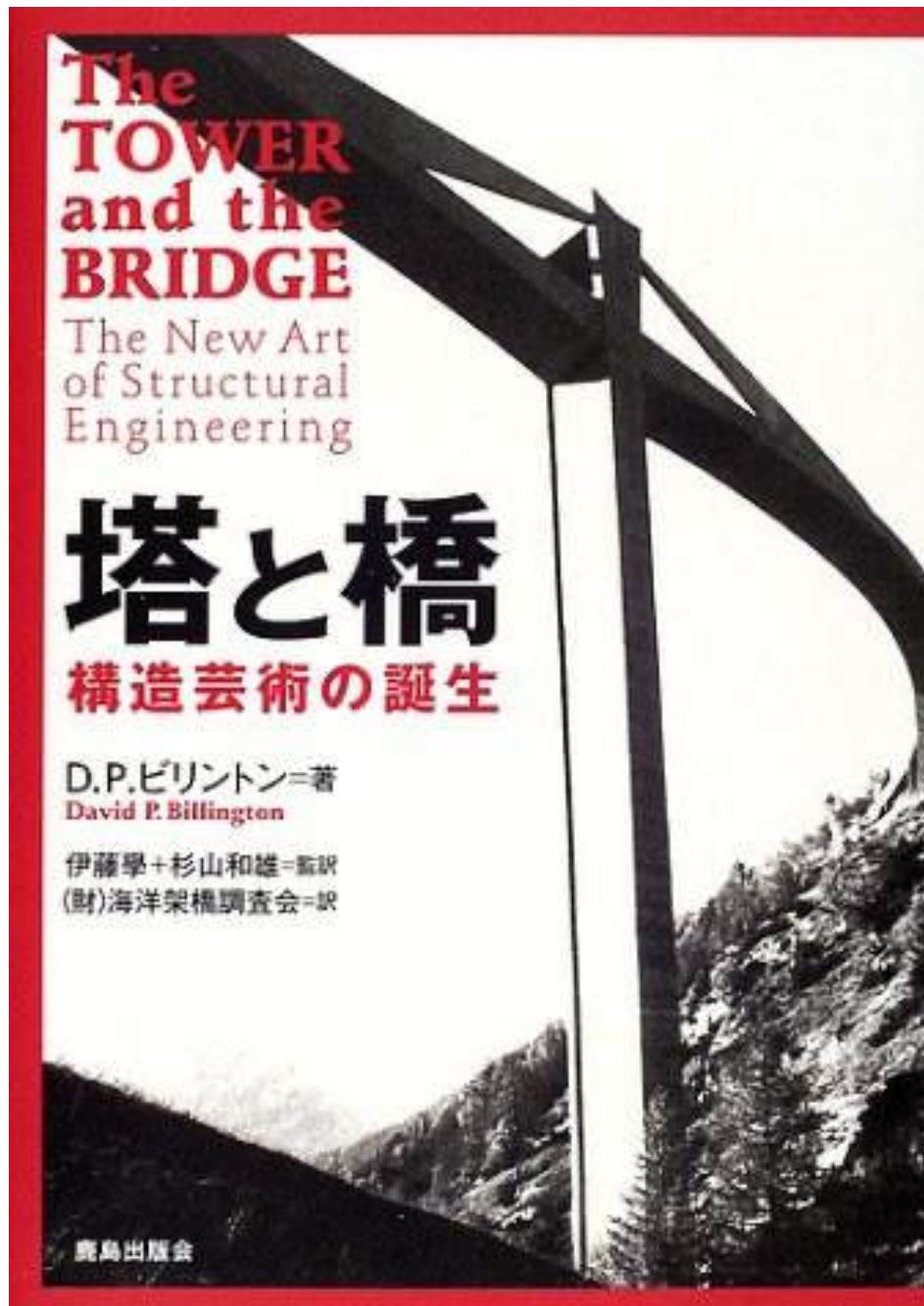


1969年竣工時



1996年再建時

構造芸術 (Structural Art)



- 産業革命後における構造工学を駆使して生み出された近代・現代の洗練された構造物
- 高価で豪華な装飾が施された構造は、公正さと透明性の原則をもつ民主主義社会において、国民の税金を用いて建設される公共構造物の設計哲学と矛盾する。
- 構造芸術の規範は**効率性**と**経済性**であり、その自由度は、工学的**優美さ**のために意識的に美を追究しようとする設計者に、個性を表現することを許す可能性にある。

工学的優美さの三要素

- 機能美 (用)

- 用途と周辺環境との調和。
環境負荷の小さな構造・工法など

- 構造美 (強)

- 構造的な合理性。 シンプルな力の流れ。

- 造形美 (美)

- 機能美・構造美の次にくるもの。
造形は構造的に説明が可能でなければならない。

地震危険度が高い先進国の現状

- 構造設計者は、構造形態を**構造芸術**に昇華させなければならない。
- 構造芸術は単に効率性や経済性という科学的、社会的基準のみに基づいて設計することのみでは実現できない。**工学的優美さを絶えず追求しようとする構造設計者の個性**も含めた表現が加わることで、構造芸術へと昇華できる。
- さて、耐震屋は現状の成果を構造芸術と考えているのか？

地震危険度が高い先進国の現状

- 構造設計者は、構造形態を**構造芸術**に昇華させなければならない。
- 構造芸術は単に効率性や経済性という科学的、社会的基準のみに基づいて設計することのみでは実現できない。**工学的優美さを絶えず追求しようとする構造設計者の個性**も含めた表現が加わることで、構造芸術へと昇華できる。
- さて、耐震屋は現状の成果を構造芸術と考えているのか？



問題意識

耐震安全性の向上に取り組む耐震技術者が用・強に注力し、美に対する配慮が相対的に低いように感じられる

用

強

美

万が一の事態に備えた耐震性
非日常に対する性能

日常生活の文化的役割

用・強・美全ては設計者、技術者により決定
耐震性を高める方策・構造物の造形を利用者は否定しにくい

一般の人は耐震や構造に関する知識が少なく、構造物の視覚的な形状の変化から構造の変化を感じる



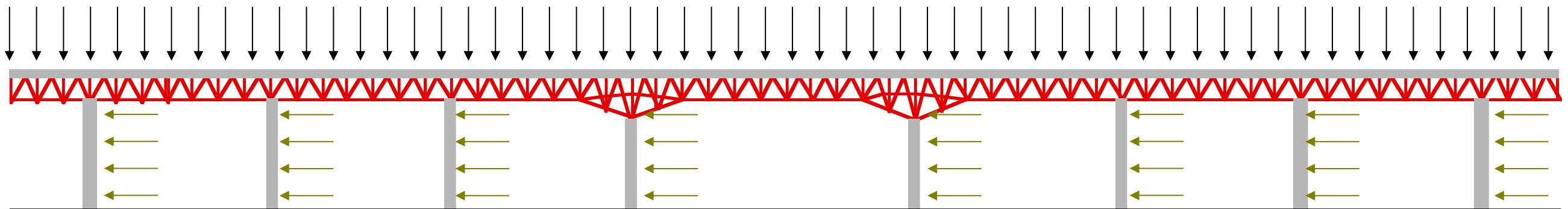
耐震技術者が構造デザインに及ぼす影響は非常に大きい



地震国における構造デザイン

- 構造デザインにおいて，基本となる荷重は重力である。
- 阪神大震災以来の構造物（特に下部構造）の形を決定づける荷重は地震力となった。

上部工：主荷重（自重・活荷重）

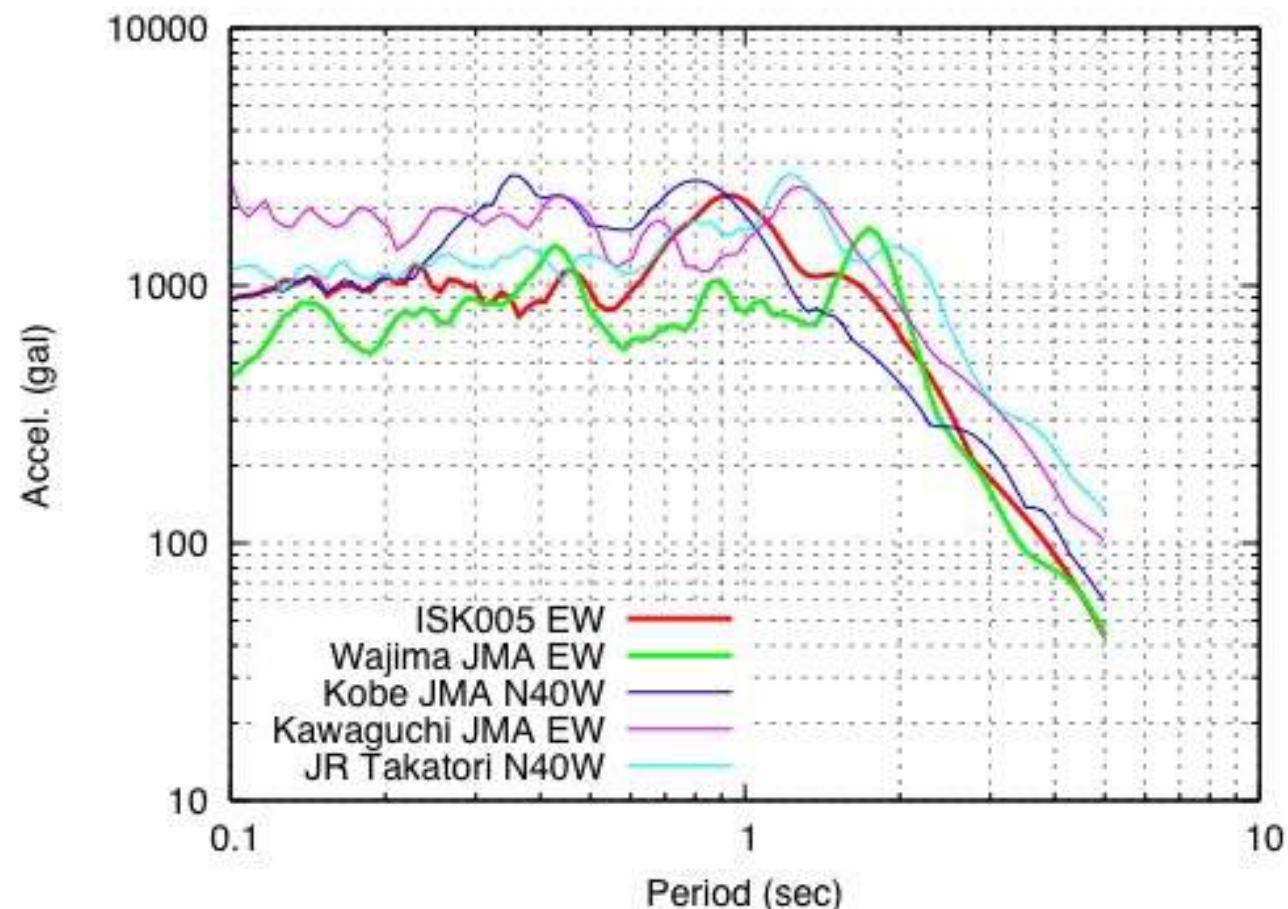


下部工（躯体）：地震荷重

地震荷重は，地震国である日本では，特に重要な荷重となり，外国における構造計画に対し，我が国における構造計画を特徴づけるものとなる。

地震国における構造デザイン

- 阪神大震災以降，弾性応答スペクトルレベルで，設計地震力は**1G（重力）**をはるかに超える。
もはや日本において最適な構造物は，重力に抵抗するものではなく，地震力に抵抗するものである。



地震国における構造デザイン

課題：

- 阪神大震災以降，弾性応答スペクトルレベルで，設計地震力は**1G（重力）**をはるかに超える。もはや日本において最適な構造物は，重力に抵抗するものではなく，地震力に抵抗するものである。
- 地震国における構造デザインは，従来の保守本流の構造設計屋（橋梁屋）ではなく，傍流であった**耐震構造屋が提案すべき時代**である！

どちらを作りたい？



- ピルツ構造の採用理由は、
 - 建設コストが安く経済的であった
 - 国道43号線の多い交通量をさばくためにも多くの車線が必要であった
 - 自動車走行時の騒音や振動が軽減されること
 - 細くて長い橋脚がスレンダーに見えて景観的にもよいこと

- 震災後復旧された構造は、
 - 鋼鉄製の連続桁の採用
 - 免震支承の採用
 - 柱幅は震災前の約2倍（6m）
 - 国道43号線は片側4車線から3車線へ減少

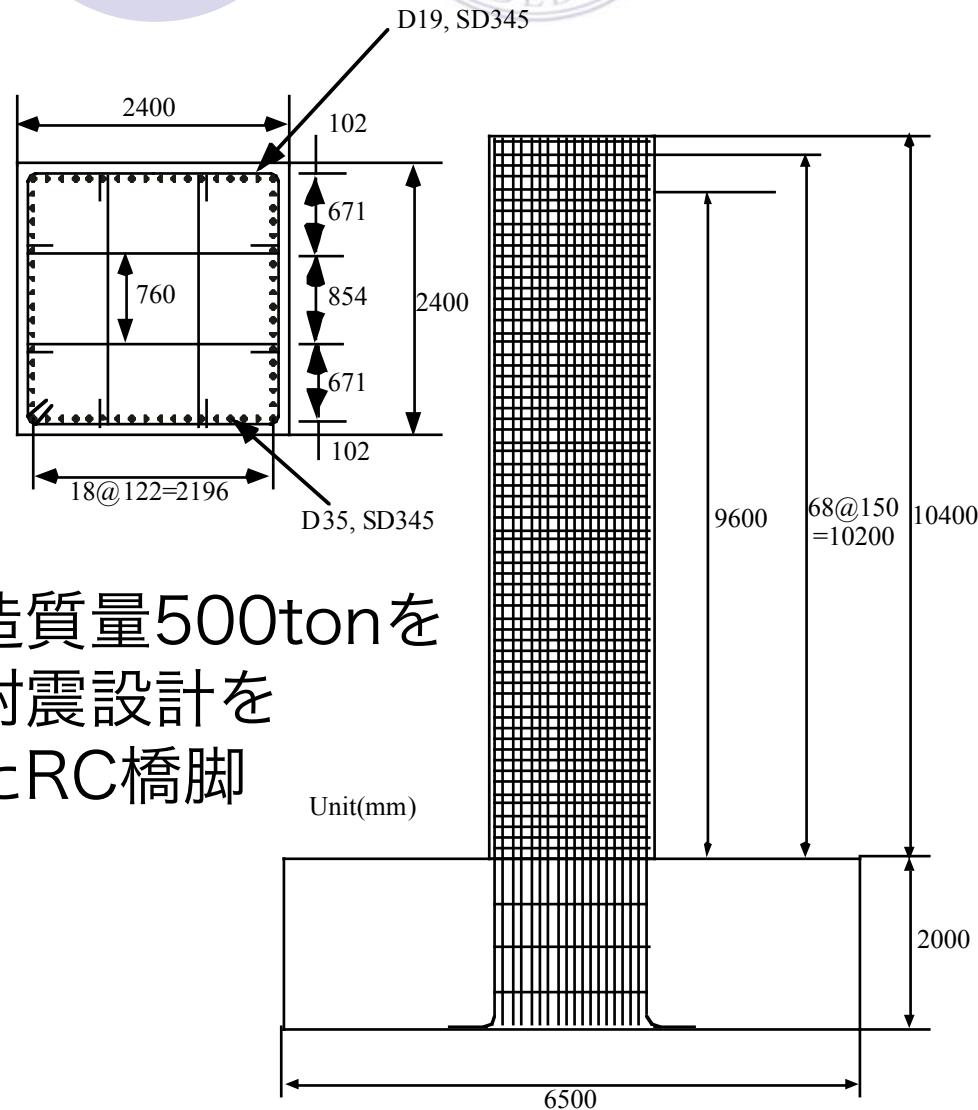
震災後あるいは想定を超える地震に対し、震災前のような形の橋梁は作れないか？



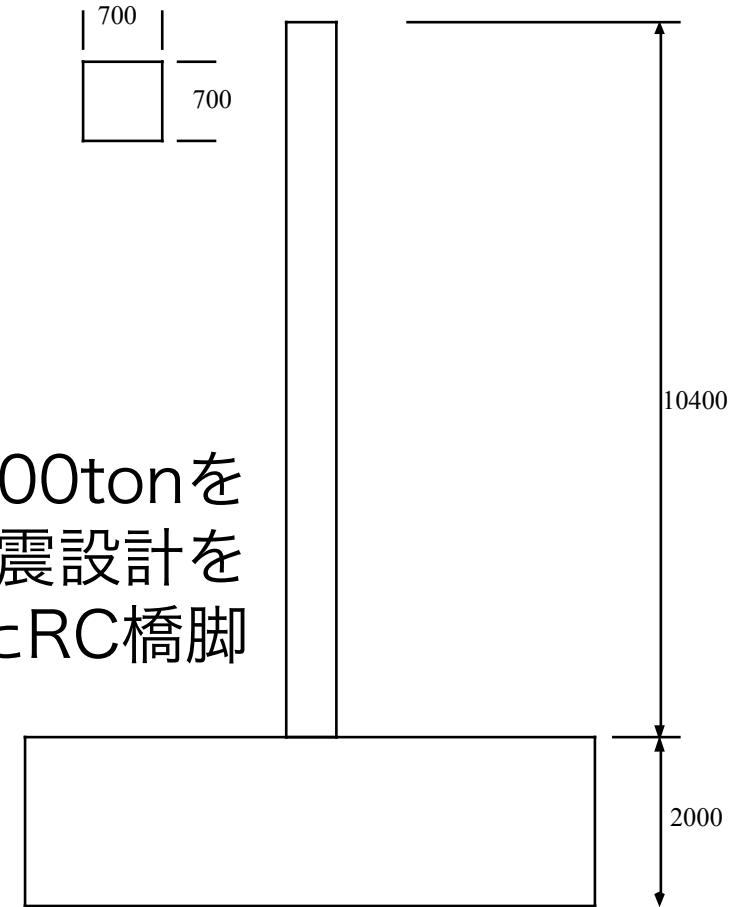
「耐震性が高そうであるから」という課題

- 柱が太いと耐震性が高そう， という事実
は誤りではないが， 一方で， この構造デザ
イン， 景観が， 将来の構造技術者に
とって造りたい構造と納得させてしまっ
ていることを懸念している。
- 「太いから強い」 では感動がない。

地震危険度が高い先進国のチャンス



上部構造質量500tonを有する耐震設計を考慮したRC橋脚



上部構造質量500tonを有する耐震設計を無視したRC橋脚

- 耐震設計が構造形態に及ぼす影響は極めて大きく、また十分手を入れる余地はある。
- 耐震構造屋が地震危険度が高い先進国における構造芸術を生み出す時代となったことを強く意識しなければならない。

重力時代の構造デザイン



構造美

- 構造的な合理性とシンプルな力の流れ
- 力は最短距離を通過して伝達
- 構造美を通して構造工学という「言語」でエンジニアの思想や哲学を読み取ることができる。



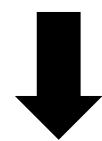
地震国における構造デザイン

- 耐震構造屋が他分野に比べて得意な点は、動的的非線形問題，振動理論を対象としているところ。全体構造系，免震や制震など，構造制御技術。
- 免震や制震技術は、構造物のかたちを変えるポテンシャルを持っていた。建築では地面と建物を分離するパラダイムシフトが起きた。土木では...

橋梁免震の特徴と課題

- 橋梁支承が免震支承に置き換わり通常時機能は不変
- 設置箇所が限定的（接続部）
- 装置数が少ない（冗長性が低い）

設計地震荷重が重力を上回ったのに、橋梁の構造形態に大きな変化はみられなかった。
（専門家からするとスゴイこと！）



しかし、一般人には驚きはない

地震国の耐震設計において、耐震工学の発展を示すために視覚的フォームの多様性を意識した構造デザインが必要



免震・制振時代の構造デザイン

耐力の設計
(静的な力のつりあい)

免制振技術の発達



塑性化を考慮した設計
(エネルギーのつりあい)

- 「直感的にイメージできる力の流れ」はもう古い。
- 竹内徹（日本建築学会会長）は、「エネルギー吸収部材を効率的に配置し、安定して損傷させる構造デザイン」を提案している

不都合な真実 免震・制振技術の地震被害



- 耐震性能を高めるための免震・制震技術が数例であったとしても地震時に期待通り機能しなかったことは、不都合な真実として認識し、信頼性を取り戻すために努力する必要がある。



(NEXCO東日本提供)



2011年東北地方
太平洋沖地震



橋台部

2016年熊本地震



2024年能登半島地震



不都合な真実の解決に向けて

- SIP第2期において、実大免震支承を動的加振可能な試験機（E-アイソレーション）を開発・設置。
- 耐震実験屋として、Society 5.0時代の実験施設の開発により、不都合な真実を解決したい。

E-アイソレーションの仕様

水平方向

最大載荷荷重：5.1MN(510 tonf)

最大変位：±130cm

最大速度：80cm/s

最大加速度：200cm/s²(0.2G)

鉛直方向

最大載荷荷重：30MN(3000 tonf)



不都合な真実の解決に向けて

土木研究所CAESARによる橋梁用実大免震支承実験

2024/2/28

鉛直荷重: 6000kN

せん断ひずみ: **175%** ($\pm 273\text{mm}$)

0.4Hz 正弦波



← 1000mm →

vertical load 6000kN, 0.4Hz sine loading



□ 1000mm
NR G14 ($1.4\text{N}/\text{mm}^2$),
t = 39mm x 4 layer
= 156mm,
S1 = 6.41, S2 = 6.41
Axial Pressure 6MPa

不都合な真実の解決に向けて 土木研究所CAESARによる橋梁用実大免震支承実験

解禁設定：

令和6年2月29日（金）14時

プレス発表資料



令和6年2月29日
国立研究開発法人土木研究所

道路橋用ゴム支承の実証実験（日本初の実大実速度）を実施

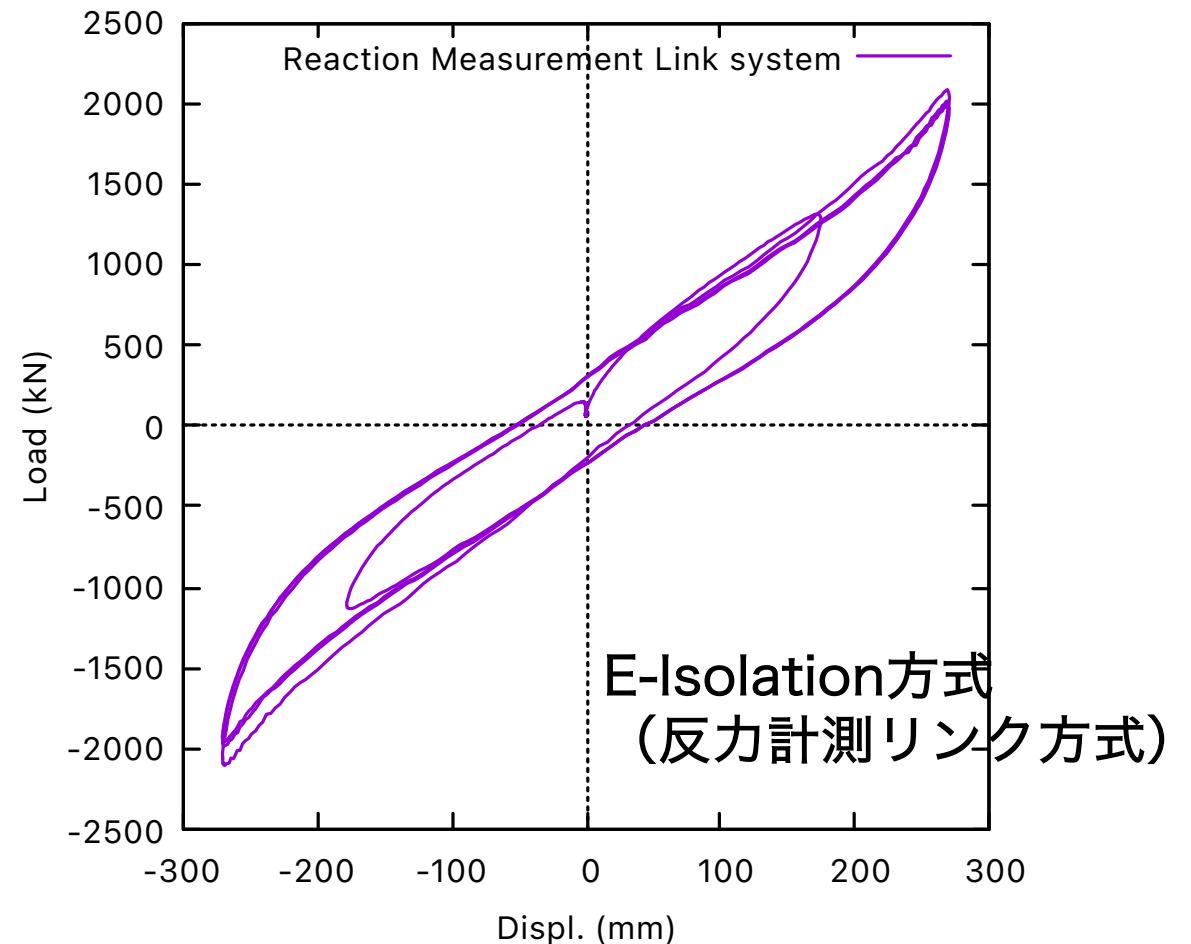
国立研究開発法人土木研究所（理事長：藤田光一）は一般社団法人日本支承協会、一般社団法人ゴム支承協会との共同研究として、日本初の実大実速度による道路橋用ゴム支承の性能検証のための実証実験を実大免震試験施設（E-Isolation）にて行います。

本研究を通じて、これまで縮小模型や緩速により行われてきた性能試験の有効性を検証していく予定です。

- 実施主体**
国立研究開発法人 土木研究所
一般社団法人 日本支承協会
一般社団法人 ゴム支承協会
- 日時**
令和6年3月6日（水）12時15分受付開始（12時45分受付締切）
※取材希望の方は、別添の「プレスご回答用紙」にて、FAXでお申込ください。
- 場所**
一般財団法人 免震研究推進機構 実大免震試験施設
〒673-0515 兵庫県三木市志染町三津田西亀屋 1503-13
- 実験概要**
別紙のとおり
- 本件配布先**
国土交通省記者会、国土交通省建設専門誌記者会、筑波研究学園都市記者会、
文部科学記者会、科学記者会、兵庫県政記者クラブ、三木市政記者クラブ、
大阪科学・大学記者クラブ

問い合わせ先

国立研究開発法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 橋梁構造研究グループ
上席研究員 大住 道生、研究員 小林 巧
TEL：029-879-6773、FAX 029-879-6739
E-mail：caesar@pwri.go.jp



おそらく世界初の橋梁用実大免震
支承の動的試験を実施
（建築用実大免震支承実験は各国
でも実施済）



地震危険度が高い先進国における 耐震工学の挑戦

- 厳しい自然災害環境下において高度に
インフラ構造物が整備された先進国とし
ての戦略
 - 既にインフラが提供される機能を如何に維持さ
せるか？何もないところにインフラを整備しよ
うとする発展途上国とは異なる戦略が必要
 - 災害を教訓に更新される設計基準に対する既存
不適合問題は、構造劣化よりも深刻
 - **使用継続**しながら、耐震性能を**新陳代謝**させる
技術開発

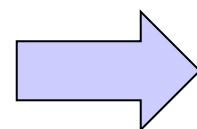
地震危険度が高い先進国で必要な技術

レジリエンス

- 地震後に速やかな回復を可能とすること

サステナビリティ

- 将来改定される基準に対する既存不適格を解消するため、容易に構造性能を改変できること
- 後付けの対策により、新設時の構造デザインを悪化させないこと（柱を太らせるようなメタボリック症候群を避ける）



メタボリズム構造

*メタボリズムは新陳代謝の意味



地震危険度が高い先進国で必要な技術

メタボリズム耐震橋脚



- 供用しながら（軸力支持下で）耐震性能の新陳代謝が可能
可能な柱構造

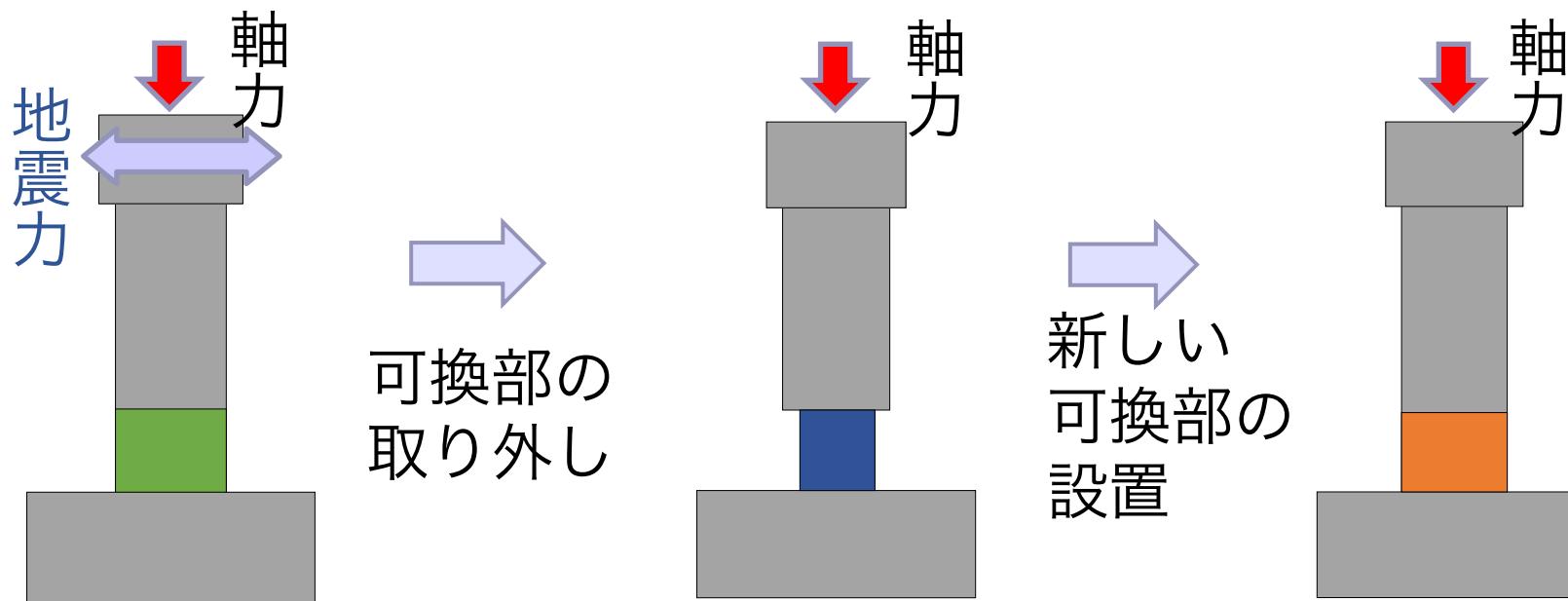
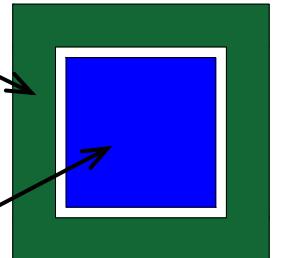
可換部

- 塑性化により地震時のエネルギー吸収性能を期待
- 取替可能な部材

永続部

- 可換部取替時の軸力支持性能を期待
- 地震時に損傷を受けず，繰り返し利用できる

断面図



地震により損傷
or 要求性能の改定

永続部のみで
軸力支持

早期復旧
耐震性能の改変

- 前田紘人，林学，高橋良和：メタボリズム耐震橋脚構造の開発に向けた正負交番载荷及び塑性ヒンジ部取替実験，土木学会論文集A1，Vol. 76，No. 4，pp.l_377-l_392，2020.

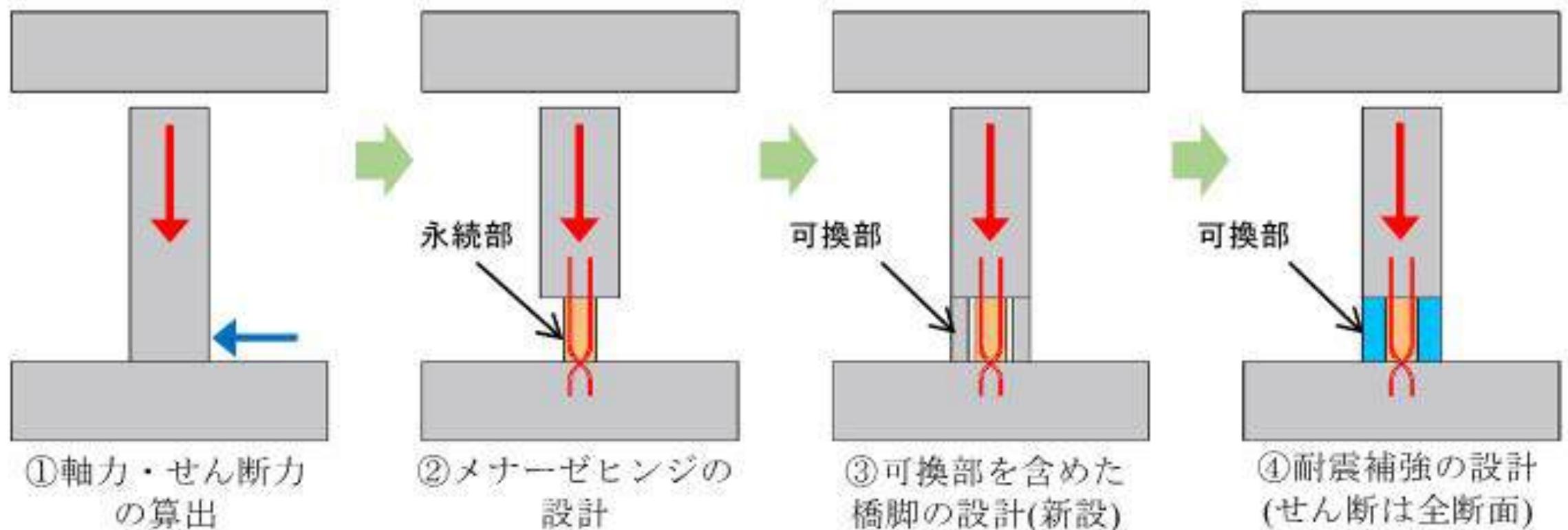


地震危険度が高い先進国で必要な技術

メタボリズム耐震橋脚

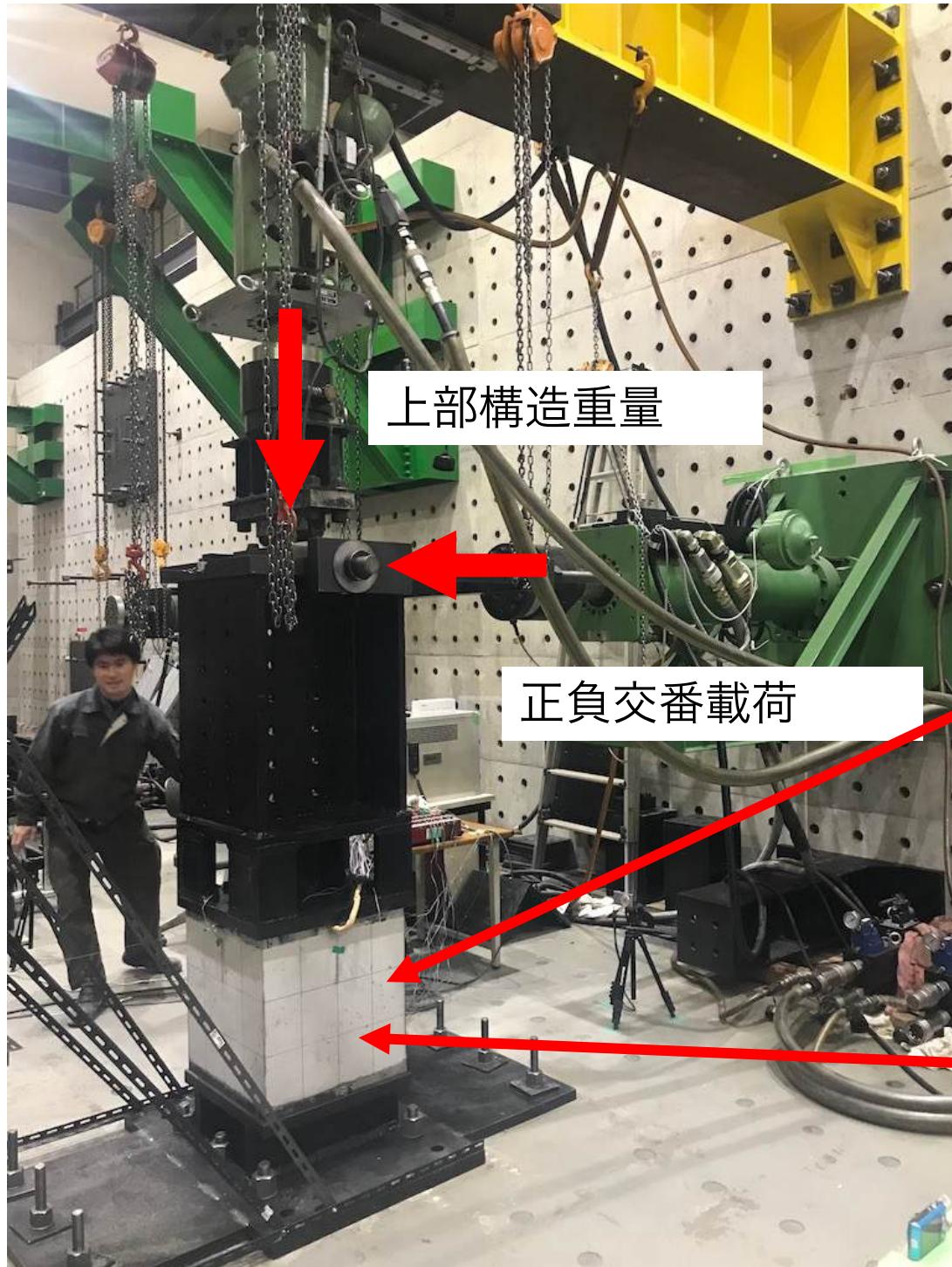


- ① 基本モデルより永続部の設計に使用する軸力・最低せん断力（0.2G相当）を算出
- ② 永続部のみで鉛直力・最低せん断力に抵抗できるように永続部を設計
- ③ 永続部＋可換部により新設時の橋脚を設計
- ④ 地震後修復／耐震補強時には、②で事前に永続部設計をしているため、可換部の交換を速やかに実施可



地震危険度が高い先進国で必要な技術

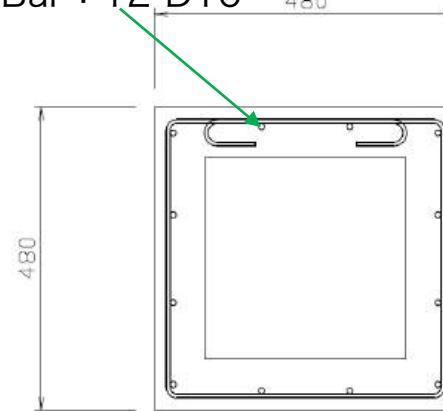
メタボリズム耐震橋脚のコンセプト検証実験



可換部

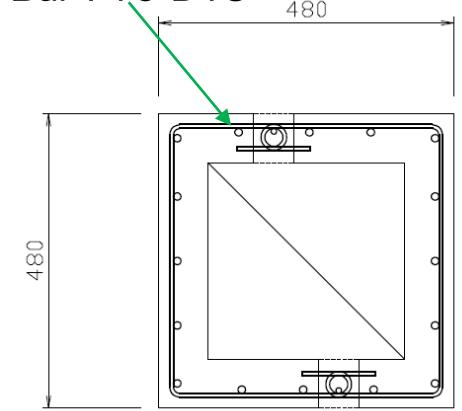
プレキャストRC構造

Longitudinal Bar : 12-D10



1996年道示準拠の断面

Longitudinal Bar : 16-D13



2012年道示準拠の断面



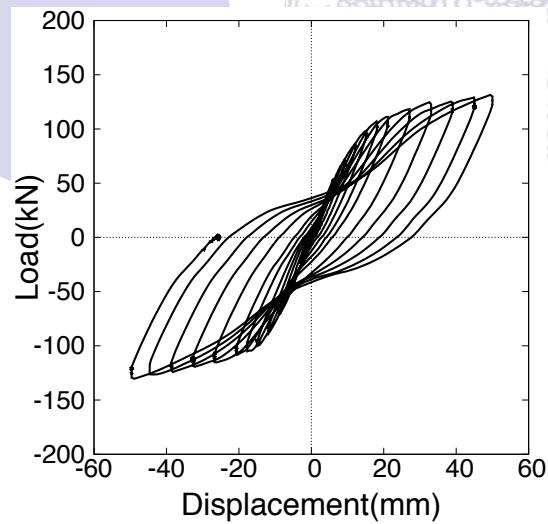
永続部

鉛直力とせん断力を伝達する「構造ヒンジ」としての固定積層ゴム支承

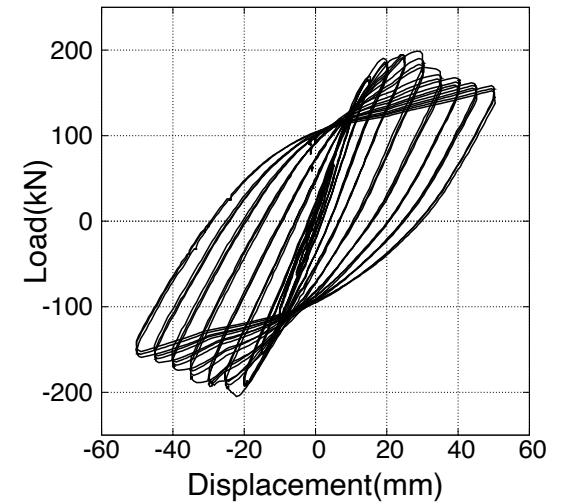


メタボリズム耐震橋脚のコンセプト検証実験

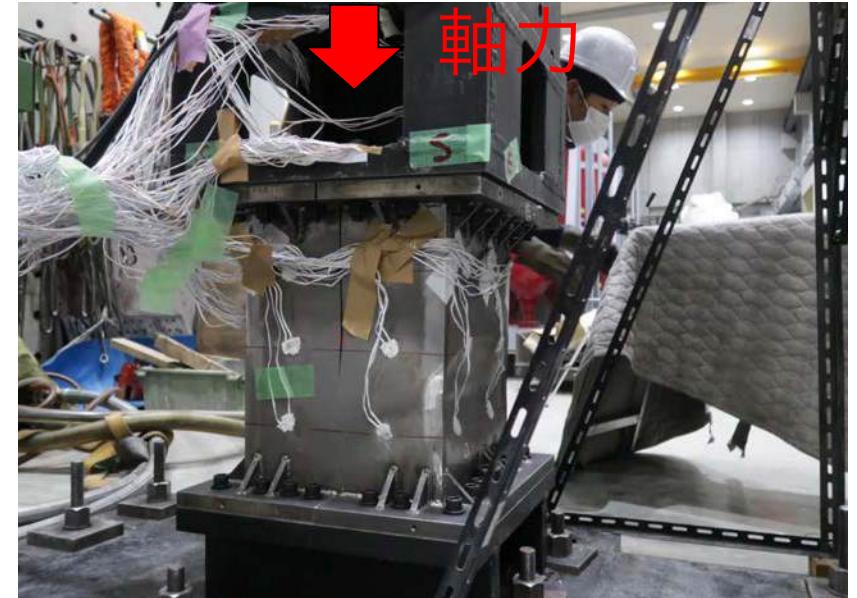
可換部
プレキャスト
RC構造



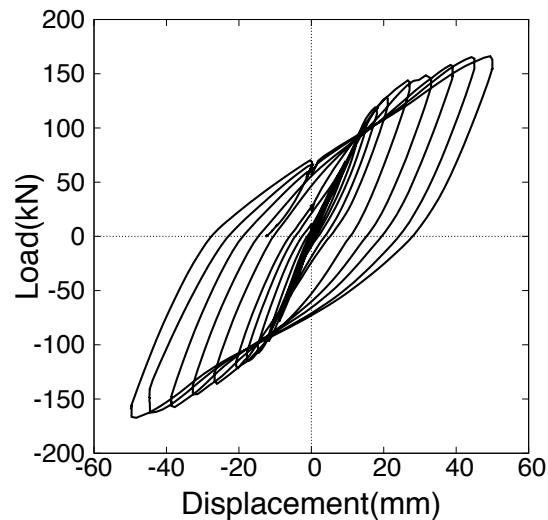
可換部
鋼構造



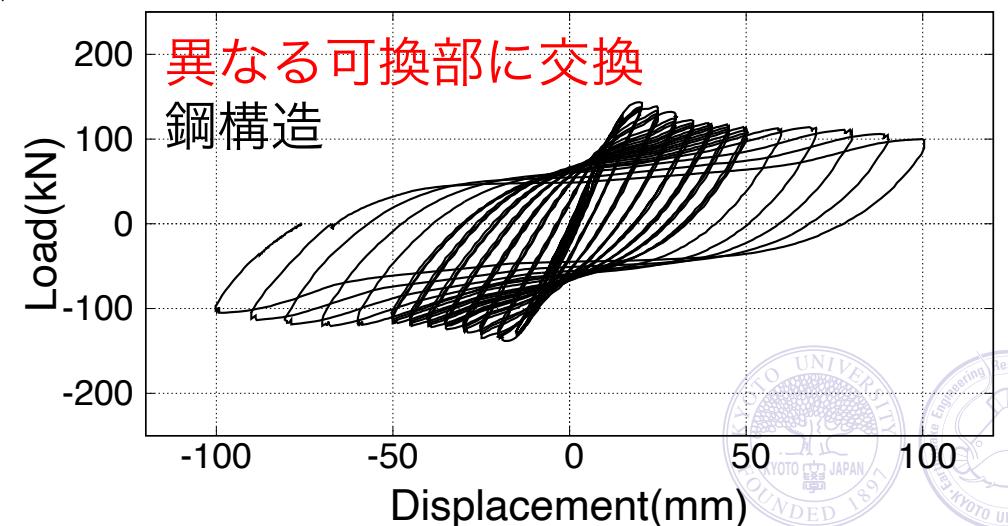
永続部
鉛直力とせん断力を伝達する「構造
ヒンジ」としての
固定積層ゴム支承



異なる可換部に交換
プレキャスト
RC構造



異なる可換部に交換
鋼構造

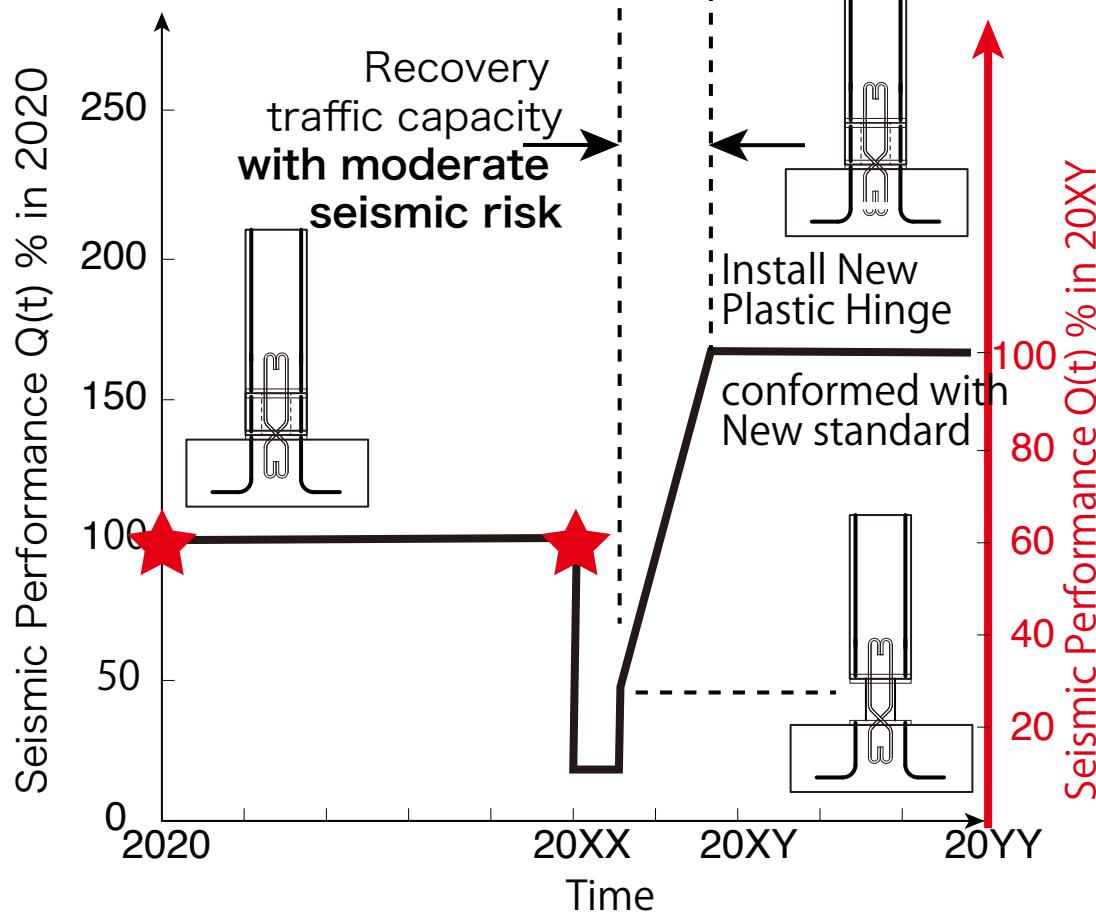
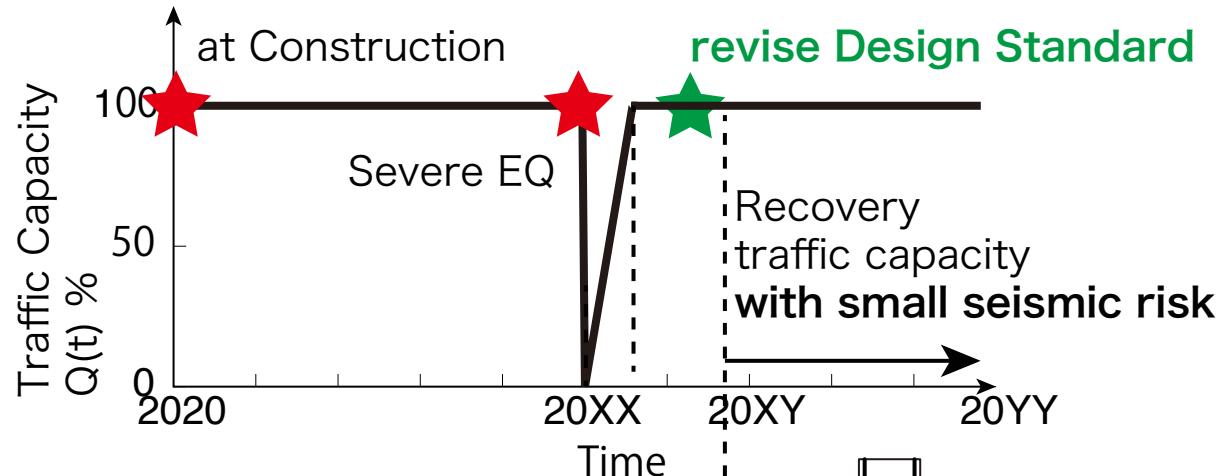


地震危険度が高い先進国で必要な技術

メタボリズム耐震構造

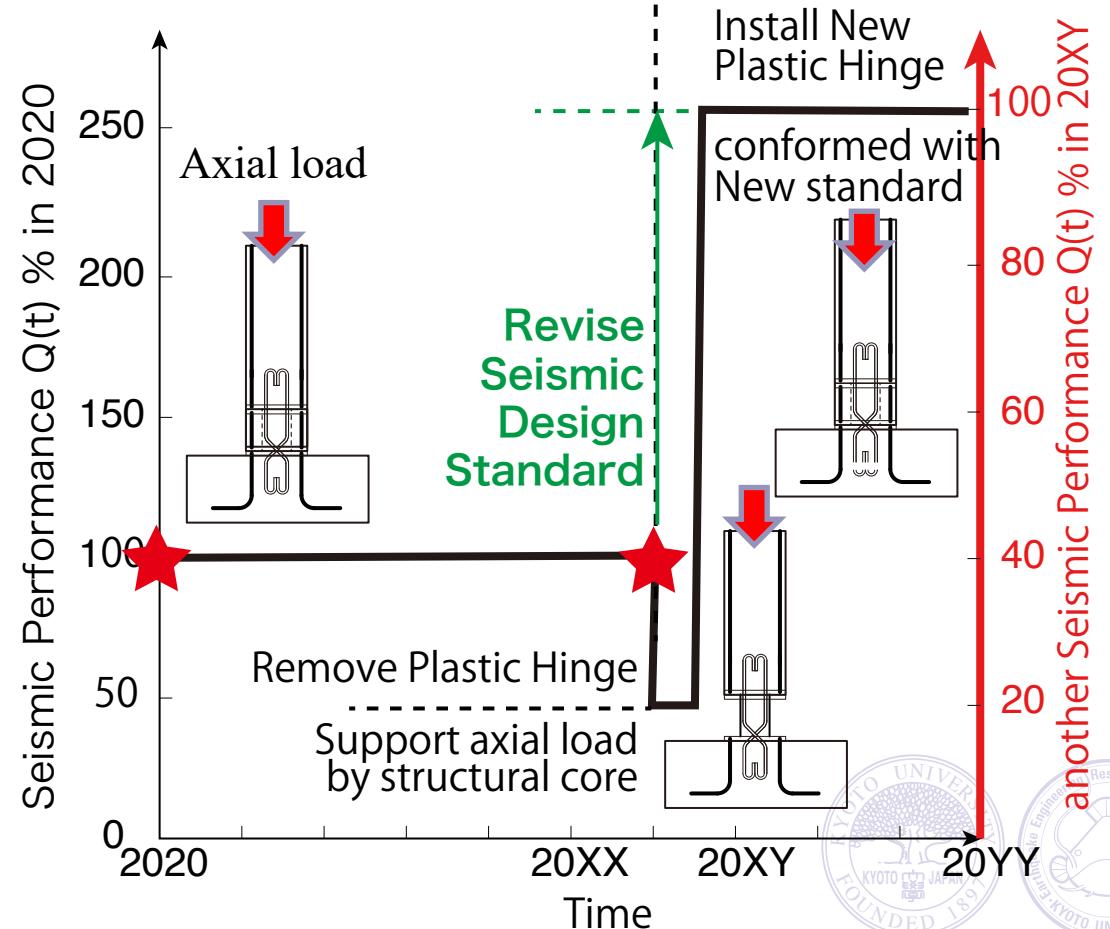
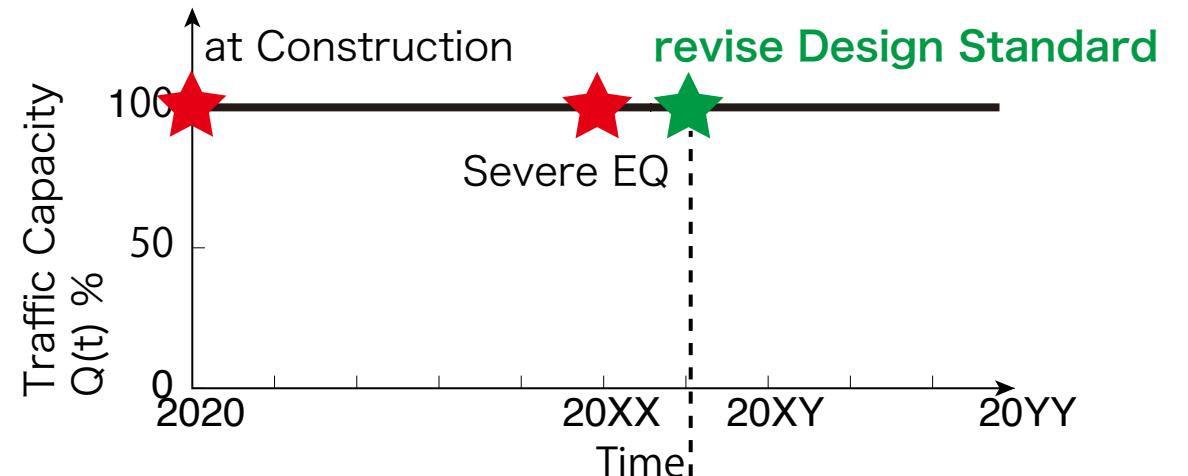
シナリオ1

余震リスクを勘案しながらすばやい交通機能の回復



シナリオ2

改定された設計基準に容易に対応

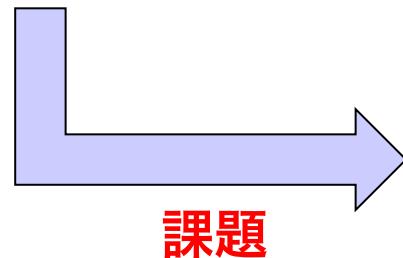
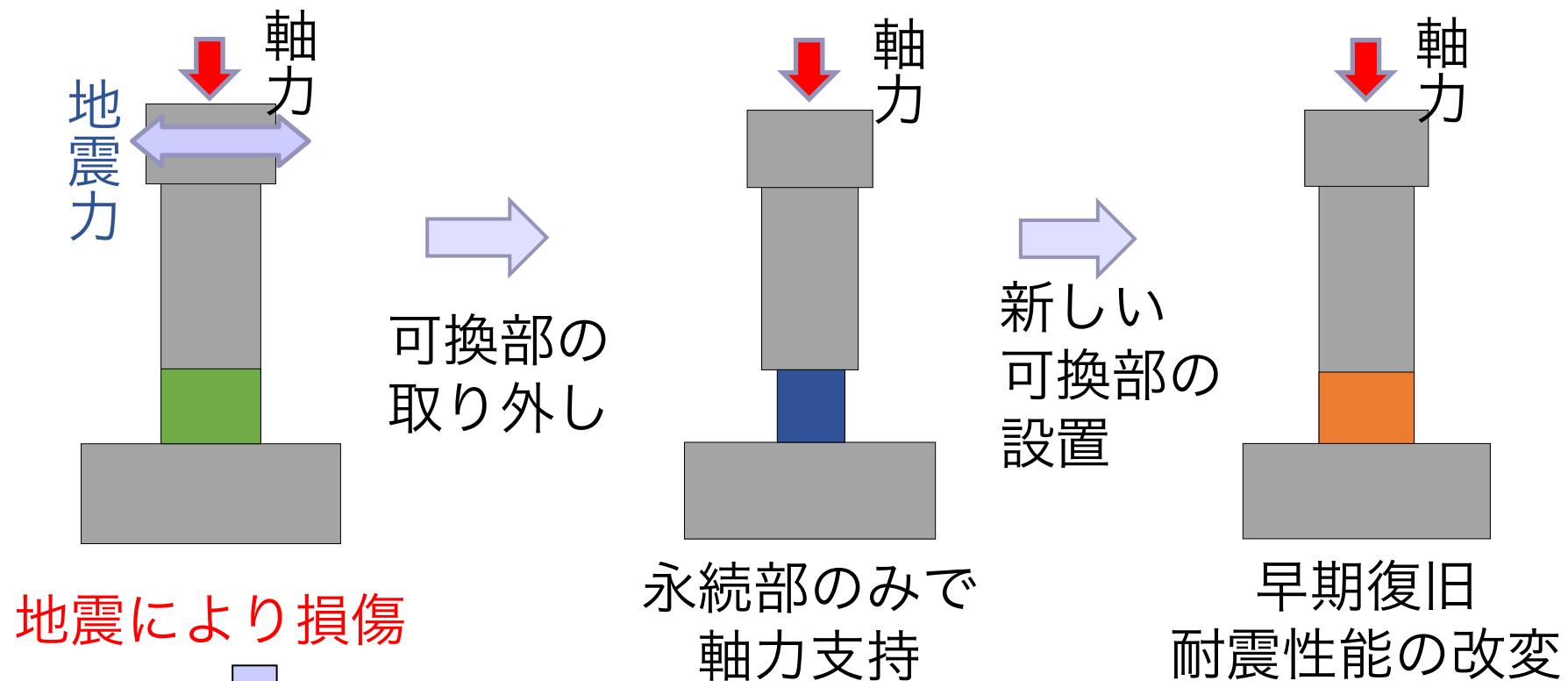


地震危険度が高い先進国で必要な技術

メタボリズム耐震橋脚



- 供用しながら（軸力支持下で）耐震性能の新陳代謝が可能な柱構造



残留変位をゼロにするために外部機構が必要.

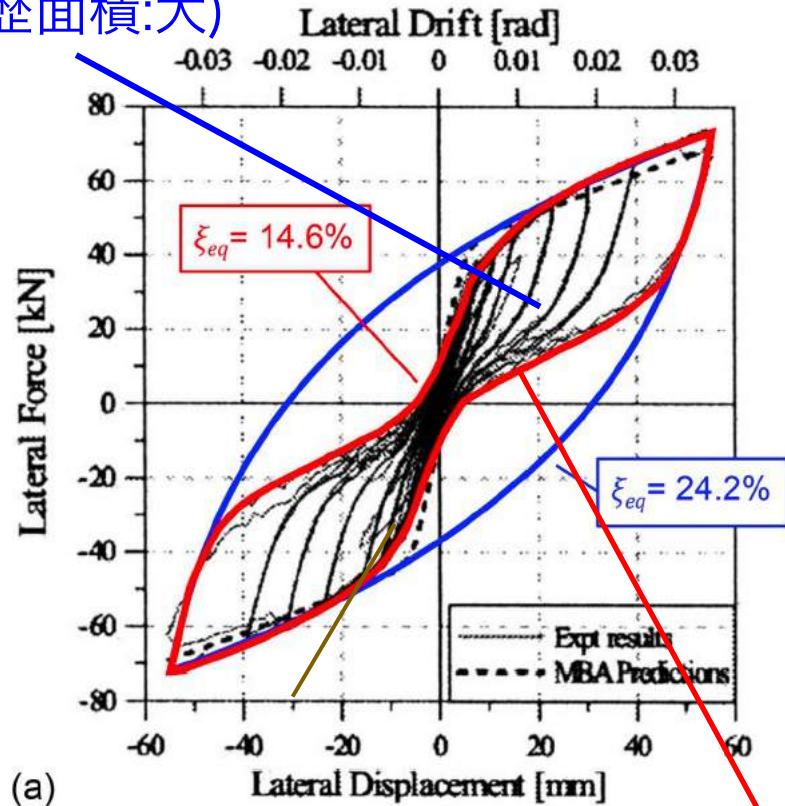
- 永続部に原点指向型の復元力特性を有するセルフセンタリング構造を採用
- 残留変位をゼロにする作業が不要



地震危険度が高い先進国で必要な技術

永続部の復旧時セルフセンタリング機構

従来RC柱
(履歴面積:大)



セルフセンタリング柱
(履歴面積:小)

建造物の履歴特性における原点指向性を高めるPC柱, ロッキング柱などのセルフセンタリング柱は、エネルギー吸収性能が低くなり、従来RC柱と比較して、地震応答が増加する。

地震危険度の高いわが国では、基本性能としてはエネルギー吸収性能を求めたい。

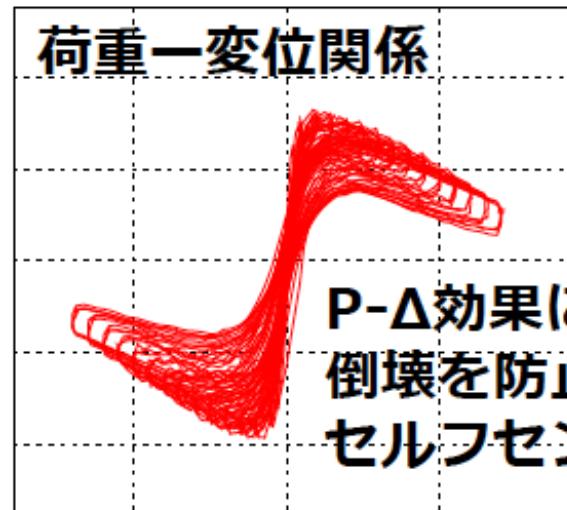
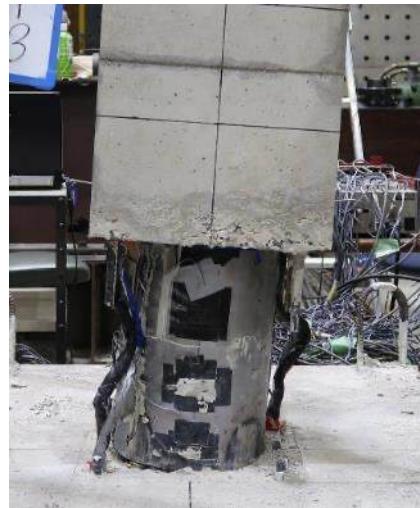
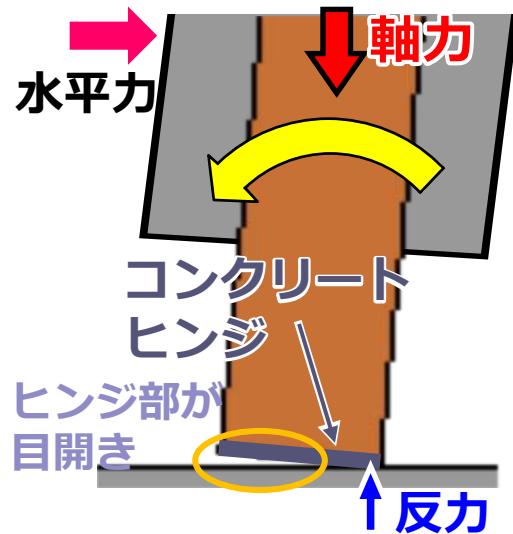
地震時には大きなエネルギー吸収性能を、
復旧時にはセルフセンタリング性能を。

地震危険度が高い先進国で必要な技術

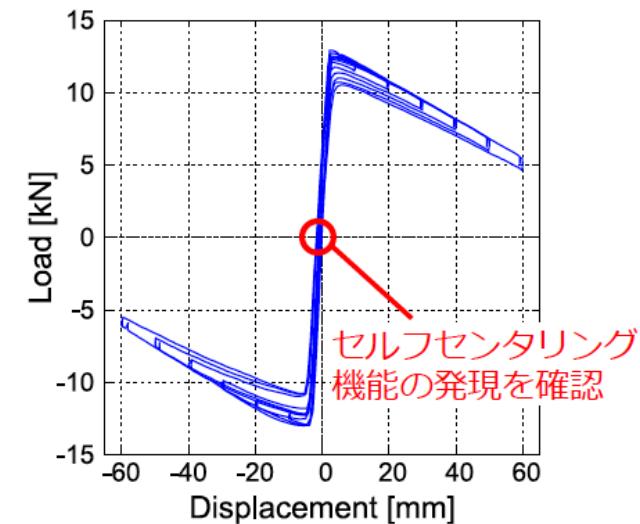
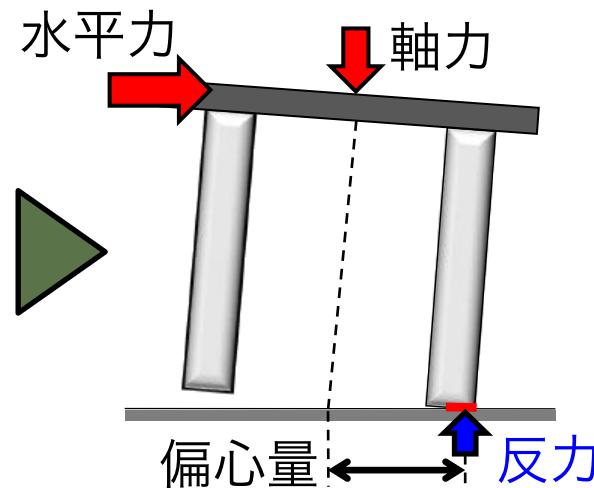
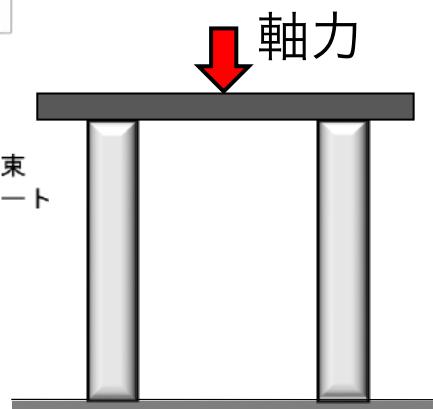
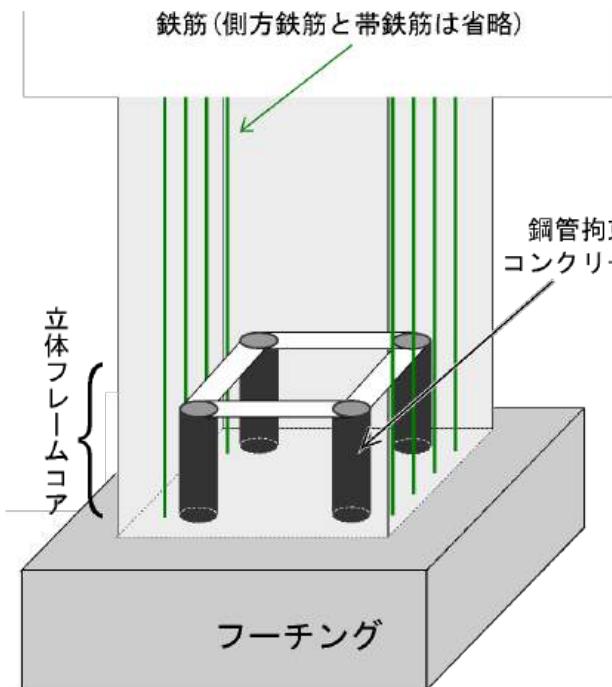
復旧時セルフセンタリング機構

重力によるセルフセンタリング

・ 鋼管拘束コンクリートヒンジ



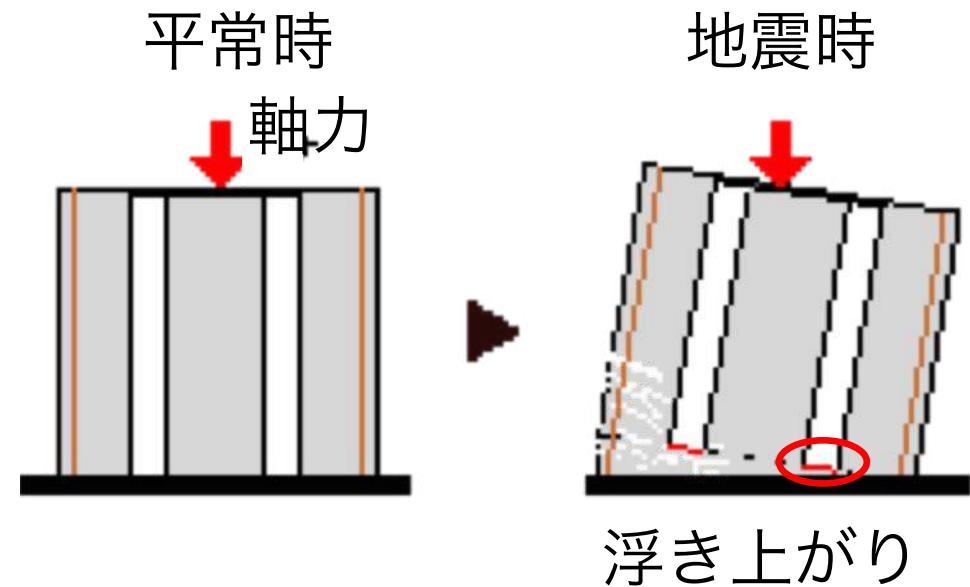
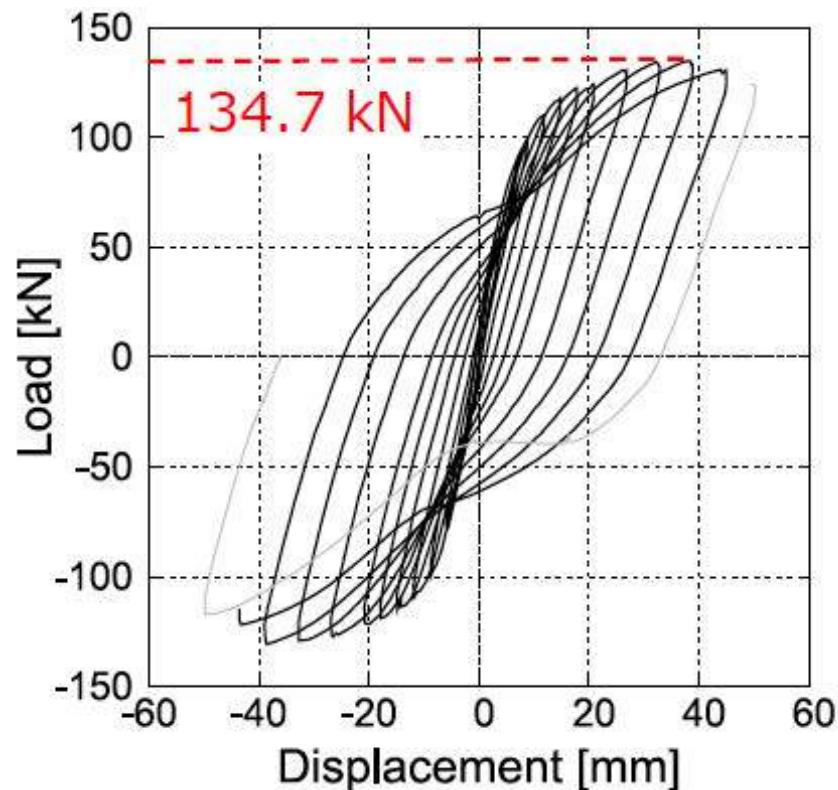
・ 立体フレームコア (大断面橋脚に採用可能)



実験で得られた荷重-変位関係

復旧時セルフセンタリング機構を有する メタボリズム耐震橋脚のコンセプト 検証実験

可換部取替前



- RC柱特有の紡錘型の復元力特性が得られ、大きなエネルギー吸収性能を発揮
- 立体フレームコアによる履歴形状への影響はほぼ無い。

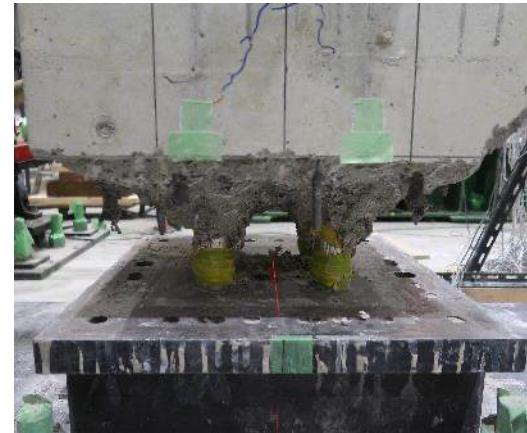
復旧時セルフセンタリング機構を有する メタボリズム耐震橋脚のコンセプト検証実験



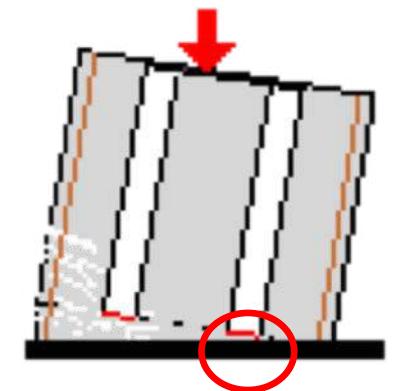
コンクリートのはつり



軸方向鉄筋の切断



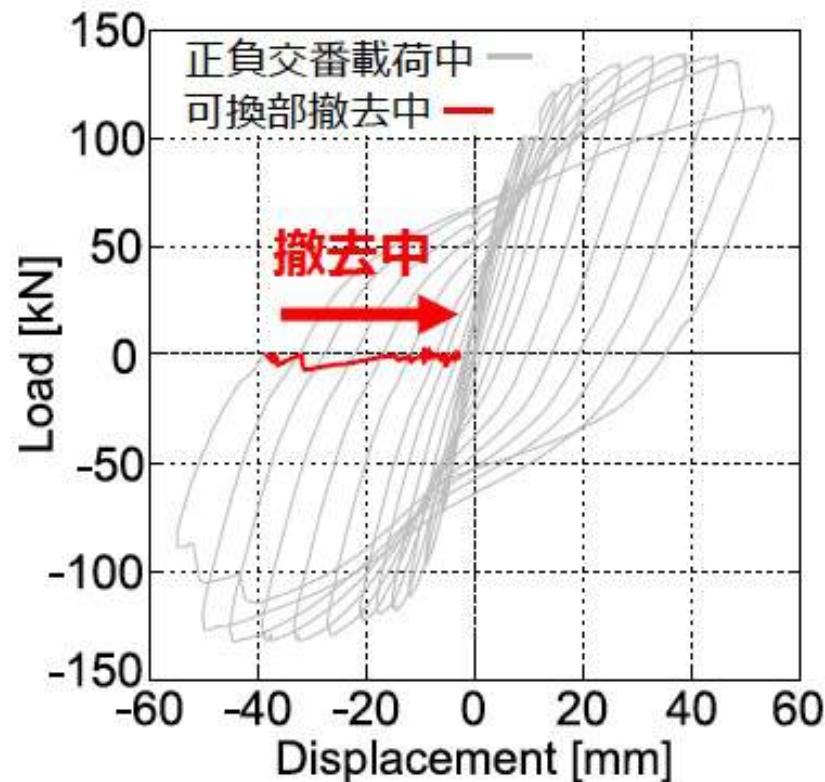
立体フレームコア周りの
コンクリートを撤去



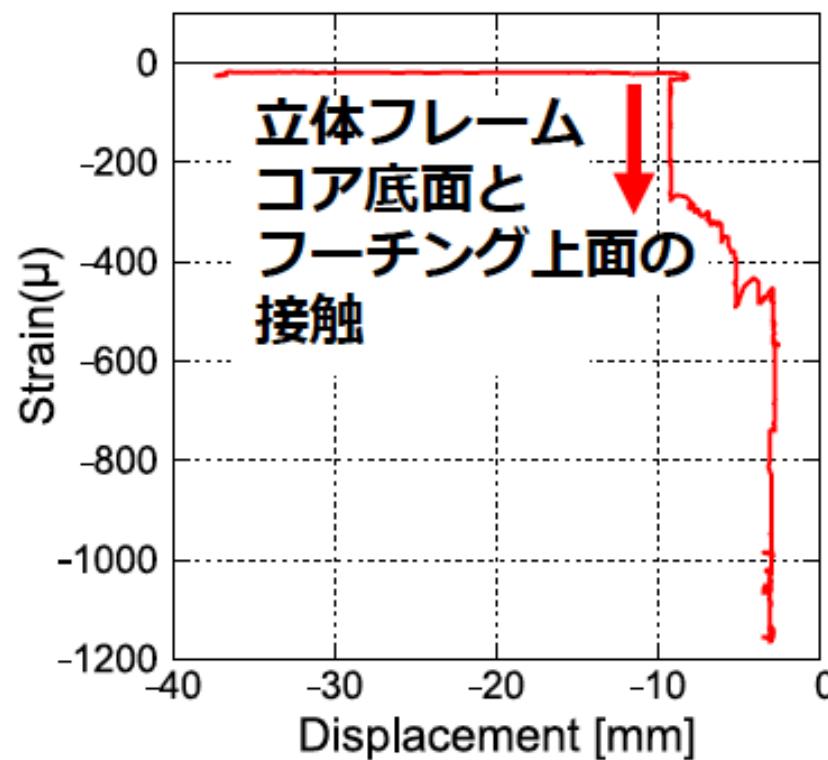
地震時

浮き上がり

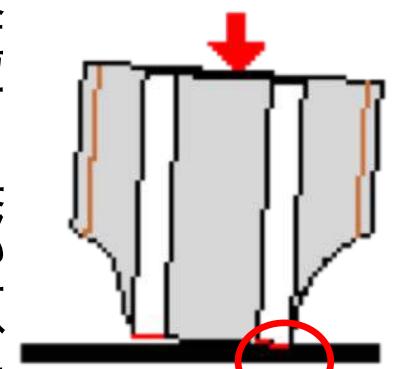
撤去中の荷重—変位関係



立体フレームコア基部の
ひずみと水平変位の関係



損傷可換部撤去時

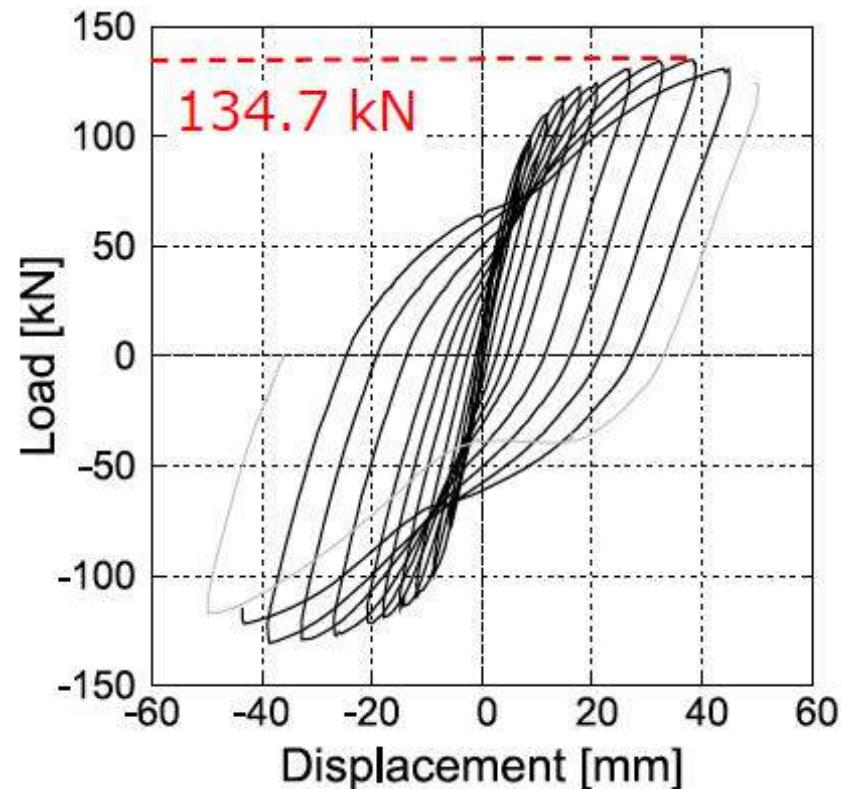


接触

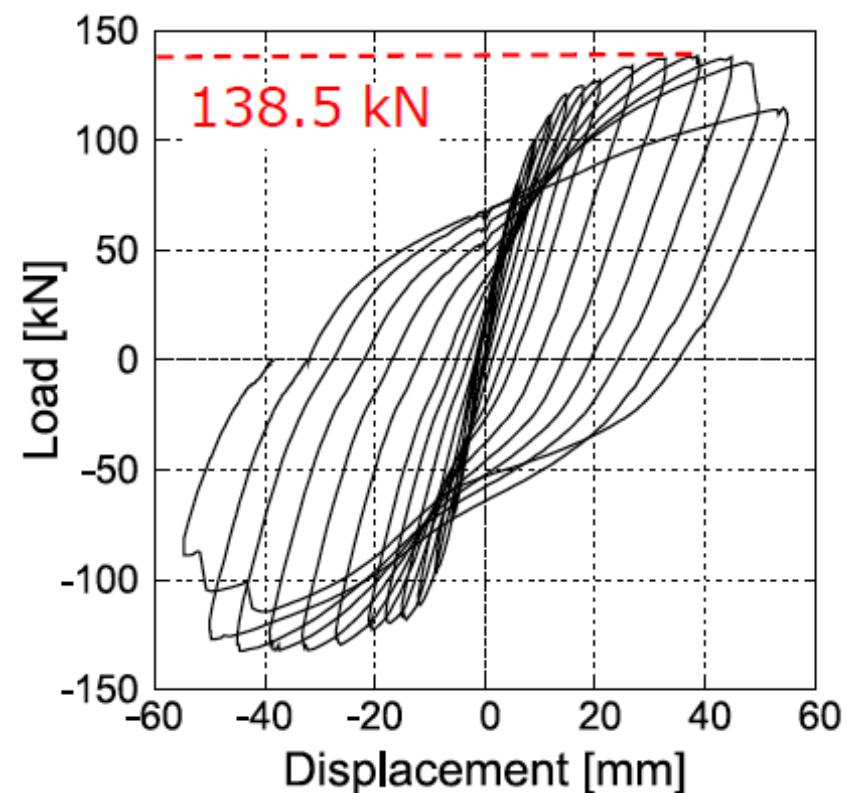
残留変位:37.5mmから3.1mmに低減 ▶ セルフセンタリング機能の発現

復旧時セルフセンタリング機構を有する メタボリズム耐震橋脚のコンセプト検証実験

可換部取替前



可換部取替後



- 可換部取替前後で同等の復元力特性・最大水平耐力が得られた。
- 塑性化した可換部を撤去する過程でセルフセンタリング機能が発現し、復旧時の残留変位の低減を確認。

建設と維持管理

- 文明化を目指していた時代の土木は建設（新設）が求められた。土木の日常は建設であり、土木による創造が、直接、社会の人々の目で見えた。
- 文明化された時代の土木の日常は維持管理。維持管理は、直接社会の人々の目に触れない。だからこそ、その魅力の伝え方を考えねばならないし、そもそも土木工学者が面白いと実感しなければ伝えられない。

改めて地震危険度が高い先進国の現状

日常を**新陳代謝**する**維持管理**

- 維持管理ということ「新設時の性能を経年劣化することをいかに遅らせるか」と考えられがちだが、それでは**面白くない**。
- 土木インフラとしての機能は維持しなければならないが、その手段は日々進歩しており、更新（**新陳代謝**）が必要。
- **わたしたちの生活を止めることなく社会を新陳代謝**するために、既にある都市の機能や快適さを損なわない**新しい発想や知恵が必要**で、新設よりも高度な技術が必要。

まとめ



- 耐震設計で重力をはるかに上回る地震力を考えなければならなくなった現在、**うまく壊す**設計をしなければならず、設計想定と異なる事象をも考えなければならなくなった。この時代において、新しい創造性を発揮できるのは耐震技術者である。
- 災害大国であることは必ずしもマイナスばかりではない。災害対策を単なる安全性の向上(義務感)ではなく、新しい構造芸術を生み出す時代となったことを意識し、ワクワクして取り組むべきである。
- 日常（メンテナンス）を**面白く**する研究を土木研究所CAESARに期待します。

