

土木学会平成27年度全国大会
研究討論会 研-04 資料

橋の耐震設計のゆくえ —機能性・経済性・安全性のバランスと役割—

座長	幸左 賢二	九州工業大学
話題提供者	高橋 良和	京都大学
	星隈 順一	国立研究開発法人土木研究所
	室野 剛隆	公益財団法人鉄道総合技術研究所
	秋山 充良	早稲田大学
	小野 潔	早稲田大学
	庄司 学	筑波大学

日時 平成27年09月16日(水) 14:40~16:40
場所 岡山大学津島キャンパス
教室 I-3 (E11 講義室)

地震工学委員会

プログラム：2015年9月16日（水）14:40-16:40

時 間	題 目	講 演 者
14:40-14:45	趣 旨 説 明	幸左 賢二
14:45-15:00	地震工学分野における 20 年間の研究成果と課題	高橋 良和
15:00-15:15	道路橋分野における 20 年間の研究成果と課題	星隈 順一
15:15-15:30	鉄道橋分野における 20 年間の研究成果と課題	室野 剛隆
15:30-15:45	コンクリート構造分野における 20 年間の研究成果と課題	秋山 充良
15:45-16:00	鋼構造分野における 20 年間の研究成果と課題	小 野 潔
16:00-16:15	対津波分野における研究成果と課題	庄 司 学
16:15-16:40	今 後 の 課 題	各パネラー

橋の耐震設計のゆくえ

—機能性・経済性・安全性のバランスと役割—

座長：幸左賢二

話題提供者：

高橋良和（地震工学）

星隈順一（道路橋） 室野剛隆（鉄道橋）

秋山充良（コンクリート構造） 小野潔（鋼構造）

庄司学（対津波）

時間	趣旨説明	題目	講演者
14:40-14:45	趣旨説明		幸左賢二
14:45-15:00	地震工学分野における20年間の研究成果と課題		高橋良和
15:00-15:15	道路橋分野における20年間の研究成果と課題		星隈順一
15:15-15:30	鉄道橋分野における20年間の研究成果と課題		室野剛隆
15:30-15:45	コンクリート構造分野における20年間の研究成果と課題		秋山充良
15:45-16:00	鋼構造分野における20年間の研究成果と課題		小野潔
16:00-16:15	対津波分野における研究成果と課題		庄司学
16:15-16:40	今後の課題		各パネラー

I. 1995年神戸地震：

1. 被害形態の検討
 2. 基礎・橋脚・支承・桁の橋全体系での照査
- ## II. 2011年東日本大震災：
1. 設計を超える事象への対応

1. 各分野で20年間どのような検討が実施されたか。

2. 今後必要な研究・課題は。

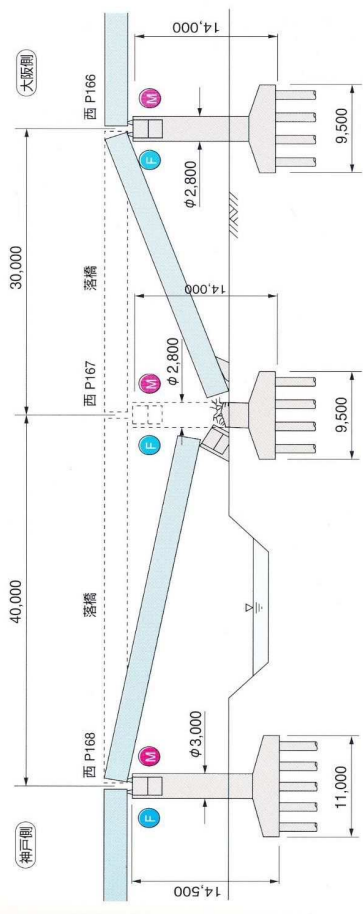




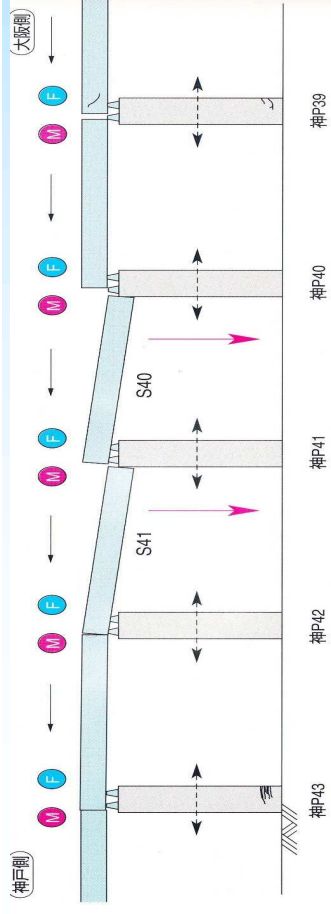
西宮市高潮町：西P167橋脚がせん断破壊



西宮市浜脇町：S40, 41桁が落橋



1. 橋脚の柱中間部および柱基部で破壊し、3つに分断.
2. 破壊形態としては理解.



1. 神P39から43橋脚間の単純箱4径間
2. 神P40,41橋脚上から桁が落下
3. 桁衝突による落橋は理解できず。**検討として重要.**

地震工学分野における 20年間の研究成果と課題

高橋良和
京都大学

1995年当時: 大学院1回生(京都在住)
2011年当時: 大学研究所准教授(京都在住)

自身が行った地震被害調査

- | | | | |
|-----|------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 25才 | 修士1回
助手 | <ul style="list-style-type: none"> ● 1995年兵庫県南部地震 ● 1999年集集地震, 台湾 ● 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 ● 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 ● 2008年四川汶川地震, 中国 ● 2011年クワ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 | <ul style="list-style-type: none"> ● 甚大な構造物被害
/ 初めての被害調査
/ 1994/ノースリッジ
地震時は耐震工学研の4回 ● 甚大な構造物被害
/ 初めての海外被害調査 ● 甚大な中山間部の地盤被害
/ 新幹線脱線/震度7相当 ● 甚大な津波被害 ● 甚大な津波被害 ● 原子力発電所において設計
地震力を超える地震動を観測 ● 甚大な構造物被害 |
| 30才 | | | |
| 35才 | 助教授 | | |
| 40才 | | | |

1995年兵庫県南部地震

調査中に自分で撮った写真の一部



1995年1月は私にとって大学院修士1回生の冬。

阪神大震災を研究者(の卵)として見た最後の世代

1995年阪神大震災の教訓

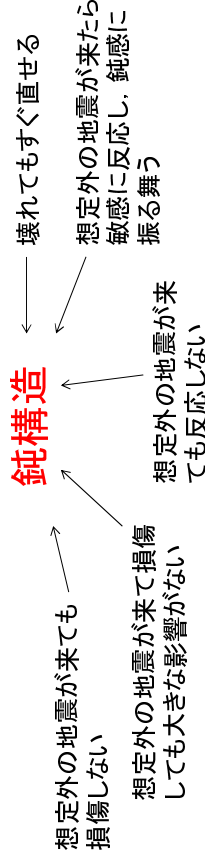
- 設計地震動を大きく超える兵庫県南部地震クラスの地震動を想定できなかったこと。
 - 断層から地震動を推定する**強震動予測**, 工学的地震動の研究が活発となった。
- 実構造物の破壊過程における現象把握・構造物全体系の動的挙動
 - E-デیفフェンスの稼働による**実大実験**
 - **全体系モデル**を用いた**動的耐震設計**
 - **免制震**デバイスの適用

2011年東北地方太平洋沖地震の教訓

- 阪神大震災以降進められてきた耐震基準の改訂や耐震補強によって、構造物の耐震性能が向上したことに疑う余地もない。
- しかし...
 - 耐震補強されていない構造物
(= **耐震補強判定の結果**, 早急に補強の必要がないと判断された構造物)
 - **阪神大震災後の耐震基準において推奨されてきた積層ゴム支承の破断, 亀裂**
 - **阪神大震災以降進められてきた橋梁における地震工学の意義が問われている地震**

大震災を教訓とする地震工学におけるパラダイムシフト

- 関東大震災：剛構造
- 阪神大震災：柔構造（免制震構造）
- 東日本大震災：鈍構造？（想定と異なる地震作用に対する構造性能）



高橋ら：不確定性の高い地震作用に対する構造技術戦略としての鈍構造の提案とその適用事例に関する一考察，土木学会論文集A1，Vol.70，No.4，2014

2011年東北地方太平洋沖地震の教訓

- 設計における想定と異なる事象（地震・津波複合災害など）を想定できなかつたこと。
 - 想定以上の地震に対しても破滅的な被害に繋がらないような**危機耐性**に対する議論
- 耐震設計における要求性能を地震時に満足できなかつたこと。
 - 常時における性能劣化を前提とした地震時性能把握（既存免震支承の載荷実験）
 - 想定する設計振動単位の改良

我が国で大震災と呼ばれる2度の地震を耐震工学者として経験して

- 個々の専門知識の深化は当然として，それを横につなぐ仕組み作り．単なる協働ではなく，根底となる理念（例えば鈍構造）を共有した上での連携．
- 非常時（地震時）のための機能が非常時に正しく・確実に発揮できるかを，どのように保証するか？

平成27年度土木学会全国大会研究討論会

橋の耐震設計のゆくえ ～機能性・経済性・安全性のバランスと役割～

道路橋分野における20年間の研究成果と課題

2015年9月16日

現在：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
(20年前：建設省土木研究所 地震防災部耐震研究室)

星 隈 順一

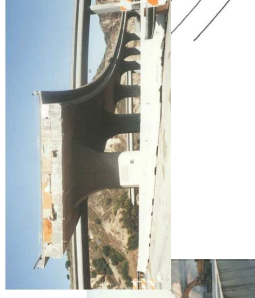


その1年後の兵庫県南部地震における道路橋の被害

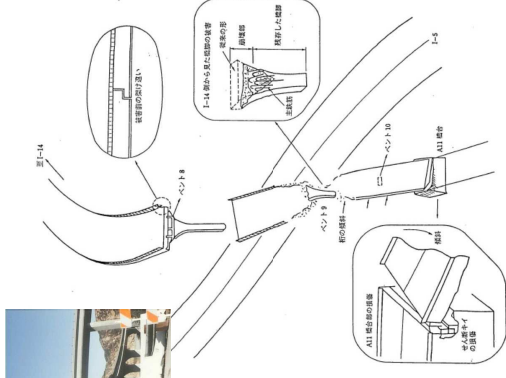


21年前の米国ノースリッジ地震における道路橋の被害

I-5/S-14インターチェンジ



S-118 ミッション/ゴシック S-118 ブルクラーク



出典：川島、蓮上、杉田、星隈、岩崎、吉田、1994年1月ノースリッジ地震被害調査速報、土木研究所資料第3272号、1994年2月

兵庫県南部地震の発生から41日後に「復旧仕様」が策定

阪神淡路大震災よりも前までの震災経験に基づいて新しい耐震設計技術に関する様々な研究が進められていた

1. 地震時保有水平耐力法による橋の耐震設計技術(H2道示～)
 - ・レベル2地震動
 - ・RC橋脚の塑性変形能を考慮した体系
2. 免震支承の開発と免震橋の設計技術
3. 基礎の地震時限界状態設計法
4. 軸方向鉄筋段落し部に対する耐震判定法、耐震補強技術
5. 落橋防止対策技術
 - ・けたかかり長
 - ・落橋防止構造

大型模型実験による部材の耐震性向上とその検証が推進



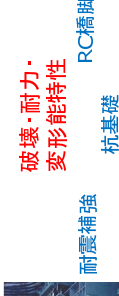
信頼性の高い実験データによる検証に基づき、より実際に近い地震時挙動、より実際に近い部材の耐力・変形能の評価が可能になってきた

既設橋の耐震性能の合理的な評価へも活用



地震応答特性

支承部

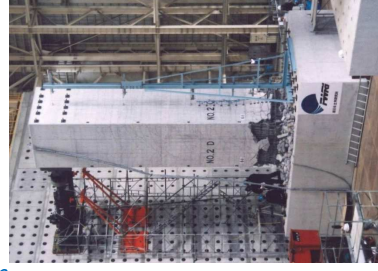
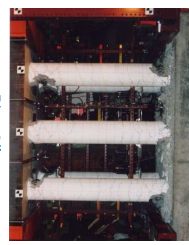


耐震補強

破壊・耐力・変形能特性

RC橋脚

杭基礎



研究成果が生かされた橋脚の耐震設計，耐震補強技術



日本の震災経験と耐震技術を海外へ発信

- ✓2010年2月チリ地震による橋梁の被害を受け、土木学会調査団として被害調査を実施
- ✓チリ公共事業省に対して、日本の震災経験とこれを踏まえた耐震設計技術を紹介
- ✓2010年7月にチリの道路橋の暫定耐震基準が策定され、日本の耐震設計技術が反映



チリ国公共事業省橋梁技術職員とのチリの道路橋の耐震性向上策に関する討議

CHILE

2. Disposición sísmica a implementar en forma inmediata

3. Ancho mínimo de la mesa de apoyo

$S_E \geq 0.7 + 0.005L$

日本の最小けたかかり長の設定式が導入

支間30m、橋脚高さ10mの直橋で試算すると、従来のチリ基準よりも1.7倍以上のけたかかり長を確保

【参考】チリにおける従来の最小けたかかり長の評価式(直橋)

$S_E \geq 0.305 + 0.0025L + 0.01H$ (m)

国土強靱化に向けた耐震技術の研究開発

1. レジリエンス設計

- 想定を超える地震作用に対して構造物としての機能低下の最小化を図る技術
 - 地震の影響を受けにくい(鈍感な、インセンティブな)構造計画
 - 進行性破壊を防止・軽減できる構造システム
 - 致命的な破壊への進展を食い止めるためのダメージコントロール
- 迅速な復旧を可能とする技術
 - これまでの震災対応経験に基づく迅速な復旧の実施のための技術スキルアップ
 - 迅速な復旧を予め想定した構造の工夫
 - 急速施工技術
- マルチハザード
 - 異種の事象が同時あるいは連続して発生(例：地震動と津波)

2. 既設橋の耐震性能の評価技術

- より実際に近い部材、地盤の特性に基づいて橋全体としての耐震性能を評価する手法の構築
- 構造部材の劣化と橋の耐震性能への影響

3. 現場ニーズ等を踏まえた既設橋の耐震補強技術

- 施工性の改善
 - 既設部材への削孔量の軽減が可能な技術
 - 現場での品質管理がしやすい技術
 - 部材の取替え(支承の交換、ダンパーへの取替え)
- 確実性の向上
 - 免震制震デバイスにおける各種依存性の明確化とその影響を最小化した技術

橋の耐震設計のゆくえ
—機能性・経済性・安全性のバランスと役割—

鉄道橋分野における20年間の研究成果と課題

(公財)鉄道総合技術研究所
室野 剛隆



①バランスの取れた素直な耐震設計の必要性

■兵庫県南部地震までは、こう教えられていた…

震度法と許容応力度法の組合せ

- 許容応力度に安全率が見込まれているから震度は0.2でよい…
- 震度0.2を採用しているが、本当はもっと大きな地震力に耐える…

『パッケージ化』された規定

- 地震力/応答値/限界値に対して最新の知見反映できず

これを正当化するために各種の“解釈”がなされる

■兵庫県南部地震を経験して…

地震力、応答値、照査(限界値)を、より現実に近いものにする努力&高度にバランスを取ることが重要

- L2地震動の導入(サイト依存の地震動の重要性)
- 非線形応答と動的解析
- せん断破壊と曲げ破壊

鉄道構造物等設計標準(耐震設計) 平成11年制定



①(私が)地震から学んだこと…

1995年 兵庫県南部地震

- ①地震力・計算法・照査のバランスが取れた**素直(正直)**な設計法の必要性を学ぶ
- ②地盤と構造物の動的相互作用の重要性を再認識

2004年 新潟県中越地震

- ③走行中の新幹線が初めて地震で脱線。地震により列車の脱線の可能性を**素直**に受け入れる必要性を学ぶ
- ④耐震補強の効果(恩恵)を体感

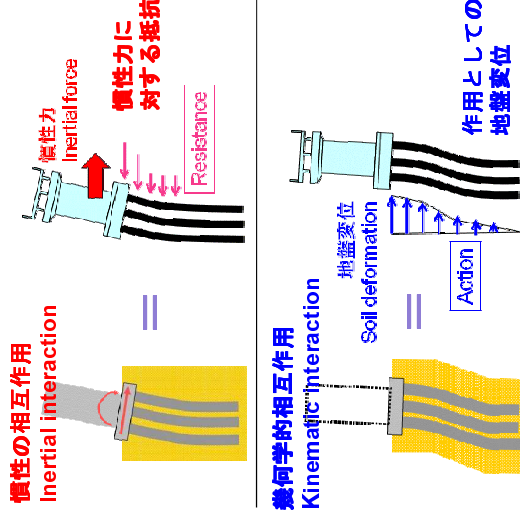
2011年 東北地方太平洋沖地震

- ⑤設計で想定した外力を超過する可能性があるという事実を**素直**に受入れることの必要性を学んだ

等々…



②動的相互作用効果の積極的な導入



- 耐震設計の主眼は慣性の相互作用であったが、杭の損傷

- 幾何学的相互作用の重要性を再認識

- 応答変位法の高度化に関する研究が進展

- 慣性力と地盤変位の組合
- 地盤変位の作用法
- 非線形性の扱い方

- 鉄道耐震設計では標準化! 他の設計基準では?



③列車の走行安全性

大きな地震動を受けたため、車輪の上昇量がフレンジ高さを超え、また、車輪とレールの左右相対変位が限界を超えたことにより本件列車が脱線したことによるものと推定される。

運輸安全委員会「鉄道事故報告書」より

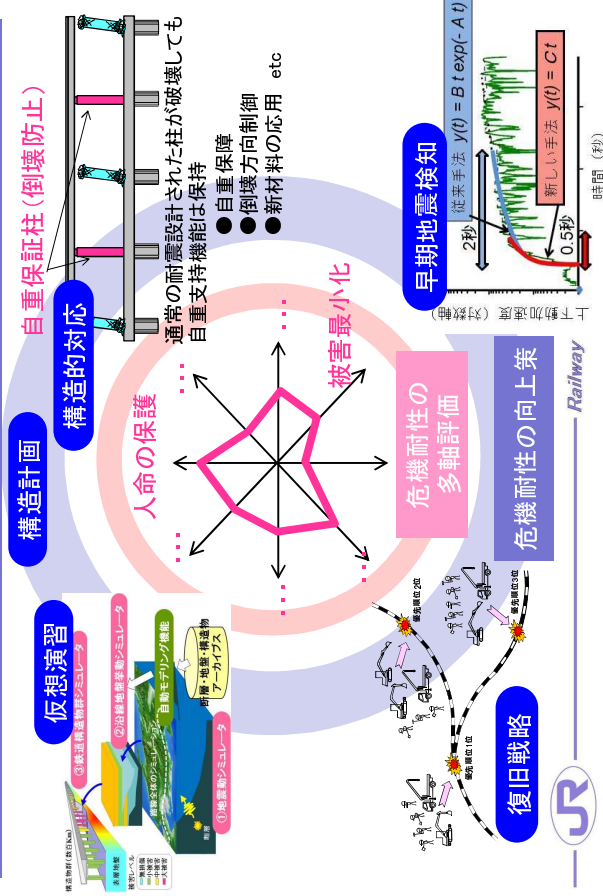
- 地震時の車両挙動解析の進展
 - ⇒ 構造物の挙動と車両の挙動の関係
 - ⇒ 隣接構造物間の不同変位の影響
- 走行安全性に係る変位制限
 - ⇒ 変位制限標準の制定(H18)
- 各種の脱線対策技術の研究開発と導入



④耐震補強の有効性を実感

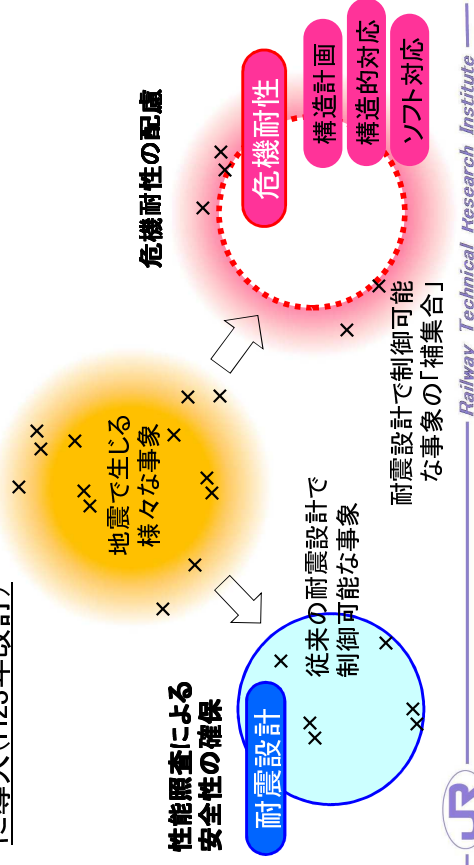
- 鋼板巻き立て補強済みの高架橋上に地震時に新幹線が通過。耐震補強の有効性を実感

今後必要な課題① - 危機耐性の向上 -



⑤危機耐性の導入

● 危機耐性(=想定以上の地震が発生した場合にも破局的な状態に至るのを回避する事)に配慮することを鉄道の設計基準に導入(H23年改訂)



今後必要な課題② - 継続的耐震化 -

低頻度巨大災害 耐震補強の効果が検証されるよう大地震の発生確率はかなり低いのは事実!

- 耐震性を強化しても、その効果が表れるのは、大地震が起きてから⇒経営的側面からの効果を実感し難い
- 中小地震は相当な頻度で発生しており、大地震を対象とした耐震補強の補強効果を中小地震でも感じられるようにすることが重要

新しい敵に翻弄される耐震化

- 新しい地震が起きるたびに、新たな耐震補強を強いられるのでは?という不安感
- 危機耐性への配慮が効果的では

土木学会平成27年度全国大会
研究討論会 研-04資料

橋の耐震設計のゆくえ
—機能性・経済性・安全性のバランスと役割—

コンクリート構造物を対象に
兵庫県南部地震後に組み組んだ研究内容と
今後の展望

早稲田大学 秋山充良

1995年兵庫県南部地震

1995年1月：東北大学・卒業論文提出間際...

「累積損傷を考えた鉄道RC橋の耐震安全性評価に関する基礎的研究」



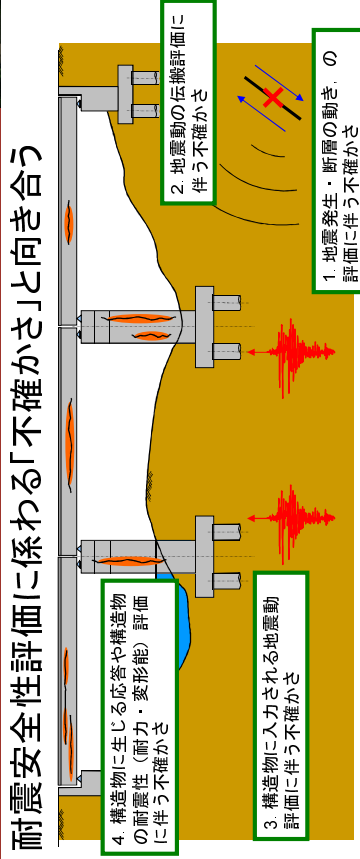
1978年宮城県沖地震での観測波を用いた鉄道RC単柱・

ラーメン高架橋の耐震性評価より、耐震性は十分との結論



「1995年阪神・淡路大震災スライド集」日本建築学会／土木学会

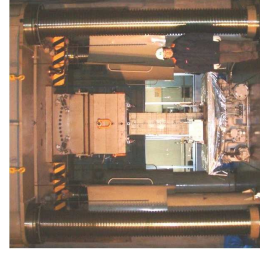
兵庫県南部地震後に行った
RC構造物の耐震安全性に係わる研究1
耐震安全性評価に係わる「不確かさ」と向き合う



- 地震動評価(図中1と2)に伴う不確かさが圧倒的であり、耐震安全性を確かなものとするには、何よりも超高性能な部材開発が必要
⇒超高性能耐震構造部材の開発・ダメージフリー橋の開発
- 耐震設計時に想定した限界状態を超えるイベントの生起は否定できず、限界状態を超えた後の影響度評価が必要
⇒地震リスク評価・危機耐性

兵庫県南部地震後に行った
RC構造物の耐震安全性に係わる研究2

高耐力構造
じん性構造
に係わる構造実験

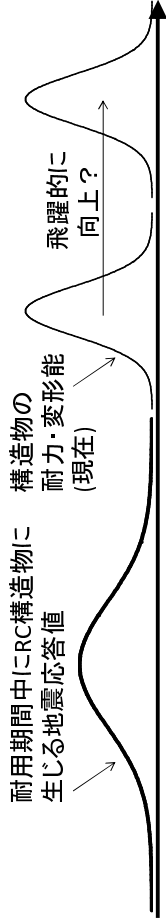


- RC構造の弾性応答限界を材料の高強度化により拡大するための諸課題に取り組む(⇒高強度材料の扱いの難しさ・他部材に大きな力を伝達してしまう)
- RC構造の塑性変形能の改善に取り組む(⇒地震中の安全性は確保できても、修復性の問題を抱える)

現在の取り組み～今後の課題 構造形態の工夫・ダムージブリー構造

ダムージブリー構造の必要性

視点①:地震動評価に伴う不確かさを打ち消すほどの高性能化



視点②:二段階設計法からの脱却



耐震設計法の基本:脆性的な破壊を防ぎ、十分な塑性変形能を与えた犠牲部材を定め、そこを確実に破壊させて地震エネルギーの吸収を図る。

地震動のレベルに関係なく、地震後の即時の供用再開を可能にする部材開発。

視点③:途上国でも使用可能な材料・構造であり、経済性を有する

現在の取り組み～今後の課題 ライフサイクル地震工学の必要性



竣工後数十年先の耐震性をどのように確保するのか?

問題1:腐食ひび割れを有する構造物はどの程度

初期状態より耐震安全性が低下しているのか?

問題2:あと何年間、耐震性を有するのか?

(余寿命は何年か?)

問題3:どのような点検・検査結果が得られた場合が

倒壊の危険信号か?

問題4:適切な補修・補強の実施時期は?



膨大なサンプルの蓄積
⇒点検・検査に基づき、患者の
状況に応じた適切な診断

竣工から倒壊までの劣化の変状をモニターした事例が皆無
⇒点検・検査に基づきインフラ構造の余寿命評価が現時点で困難

現在の取り組み～今後の課題 ライフサイクル地震工学の必要性



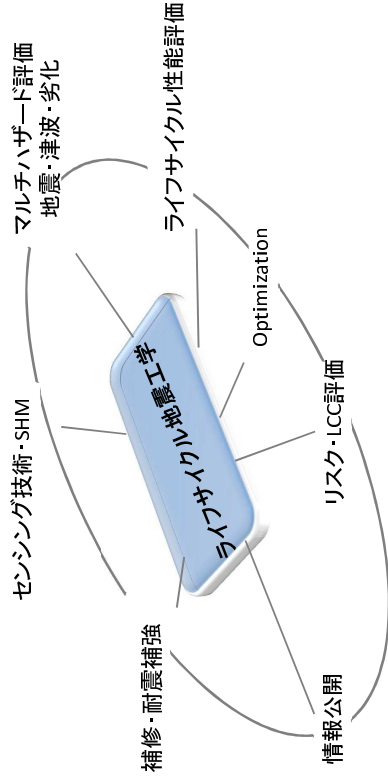
2011年東北地方太平洋沖地震後の調査
⇒材料劣化の変状が観察される

- ・材料劣化が橋梁の地震時挙動や耐震安全性に及ぼす影響評価?
- ・耐震部材や装置類の点検や検査方法?
- ・耐震性照査に時間軸の導入?



現在の取り組み～今後の課題 ライフサイクル地震工学の必要性

ライフサイクル地震工学の構築に向けて
様々な要素技術のインテグレーション



100年先の耐震安全性を確保する仕組み作り



土木学会 平成27年度全国大会 研究討論会 研-04資料
 「橋の耐震設計のゆくえん—機能性・経済性・安全性のバランスと役割—」

鋼構造分野における20年間の 研究成果と課題

早稲田大学 理工学術院
 小野 潔

兵庫県南部地震における鋼製橋脚の被害例



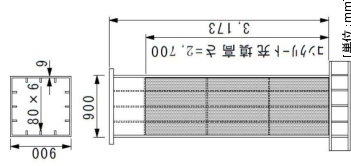
[出典：兵庫県南部地震災害対策委員会・兵庫県南部地震における道路橋の被災に関する調査報告書]

[出典：阪神高速道路公園監修、震災から復興まで]

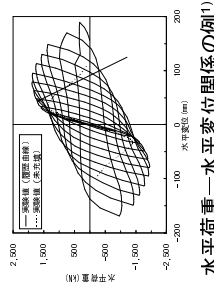
鋼製橋脚の耐震設計法・補強法開発のための研究



鋼製橋脚の正負交番載荷実験の例
 (写真提供：土木研究所)



供試体の例¹⁾



水平荷重—水平変位関係の例¹⁾



屈曲モードの例

鋼構造物の耐震設計法の高度化に向けて(1)

(鋼製ラーメン橋脚の耐震設計法・耐震補強法に関する研究例)



鋼製ラーメン橋脚の実験例¹⁾



はり部の実験例¹⁾



隅角部の実験例

[写真1提供：名古屋高速道路公社]

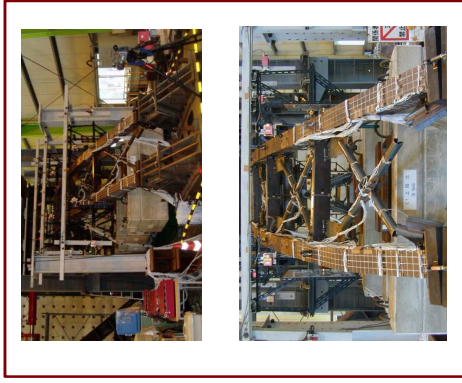
鋼製橋脚の耐震性能に関する多くの研究の知見を活用して、鋼製橋脚の具体的な耐震設計法、耐震補強法が開発されている。

[出典1)：建設省土木研究所、首都高速道路公園、阪神高速道路公園、名古屋高速道路公社、(社)鋼材倶楽部、(社)日本橋梁建設協会、道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究報告書]

鋼構造物の耐震設計法の高度化に向けて(2)

(ピボット支承の耐震補強法、鋼アーチ橋の耐震設計法に関する研究)

ピボット支承を有する旧式鋼橋の例
壊れると構造物が不安定
耐力・変形性能が不明
ピボット支承(球面状凹凸を組合せた鋼製支承)
実態からの撤去品を用いた実荷重荷試験
ピボット支承(一定)
水平荷重(減少し)
上下

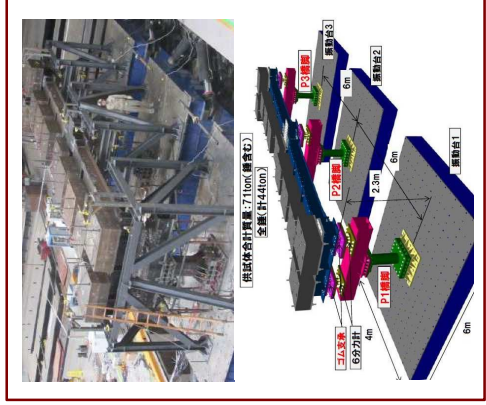


ピボット支承の研究例
(資料提供:鉄道総合技術研究所)

鋼アーチ橋の研究例
(写真提供:横河ブリッジ)

鋼構造物の耐震設計法の高度化に向けて(3)

(多方向入力、低サイクル疲労に関する研究)



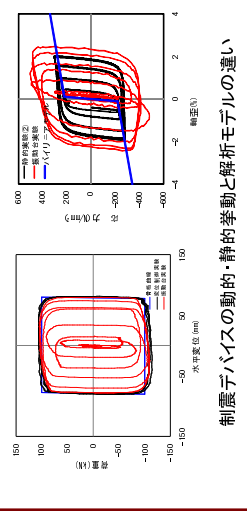
2方向入力の研究例(振動台実験)
(資料提供:名古屋工業大学 後藤芳顕先生)

ウエブ
フランジ
変位計
繰返し載荷
き裂発生
繰返し載荷
き裂進展
破断
N=4.5
N=18
N=18.5

低サイクル疲労の研究例
(資料提供:名古屋大学 判治剛先生)

今後の研究課題の例

(制震デバイス、鋼上部構造の耐震設計法に関する研究)



【制震デバイス】
設計で用いようとしている解析モデルが動的な挙動に対して検証されているかの確認等
(図の出典:(独)土木研究所他、橋梁に用いる制震ダンパーの性能検証及び設計法に関する共同研究報告書(その1)「制震ダンパーの動的挙動に関する振動台加振実験」,共同研究報告書,第438号,2012年3月)



【鋼上部構造】
L2地震動に対するより合理的な鋼上部構造の耐震設計手法の開発
(写真、図の出典:小森、蓮上、坂、星、岡、地震による鋼上部構造液状化の損傷解析と耐震補強に関する研究第一報、第13回地震時短周期耐震力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2010)

地震による鋼上部構造の被害例

今後の課題

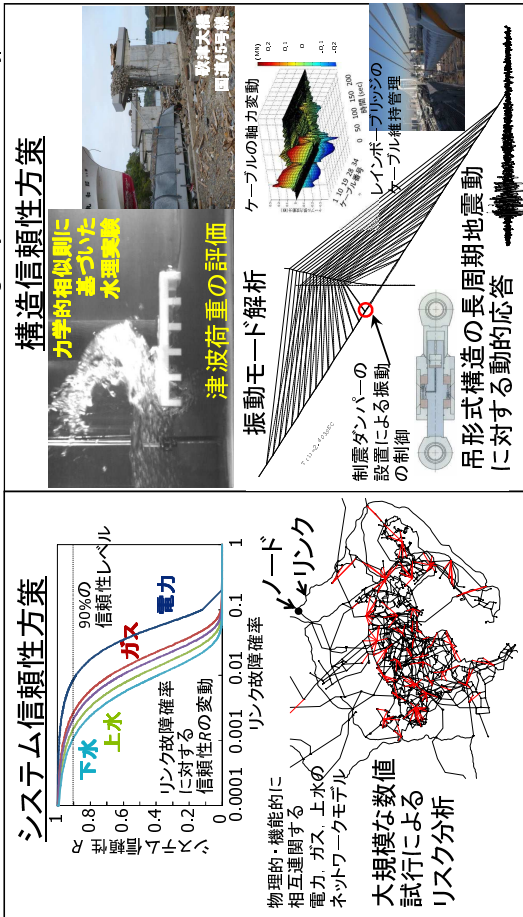
- 研究活動を盛り上げていくには、若手の研究者、技術者の参加が不可欠である。
- 兵庫県南部地震を経験した私達の年代は、鋼構造の耐震の研究も多く存在する一方で、鋼構造(その他の分野も?)の耐震のセクションに参加するメンバーは、いつものおなじみのメンツ、ということも結構ある。
- また、鋼橋の耐震関連の研究については、建築分野、材料の分野でも同様の研究を実施している場合もあり、参考となる例も多い。



どの分野でも同じであるように思われるが、人材、研究内容ともに裾を広げることが一番の課題。

橋の耐震設計のゆくえー機能性・経済性・安全性のバランスと役割ー
対津波分野における研究成果と課題: 現象の理解が肝要

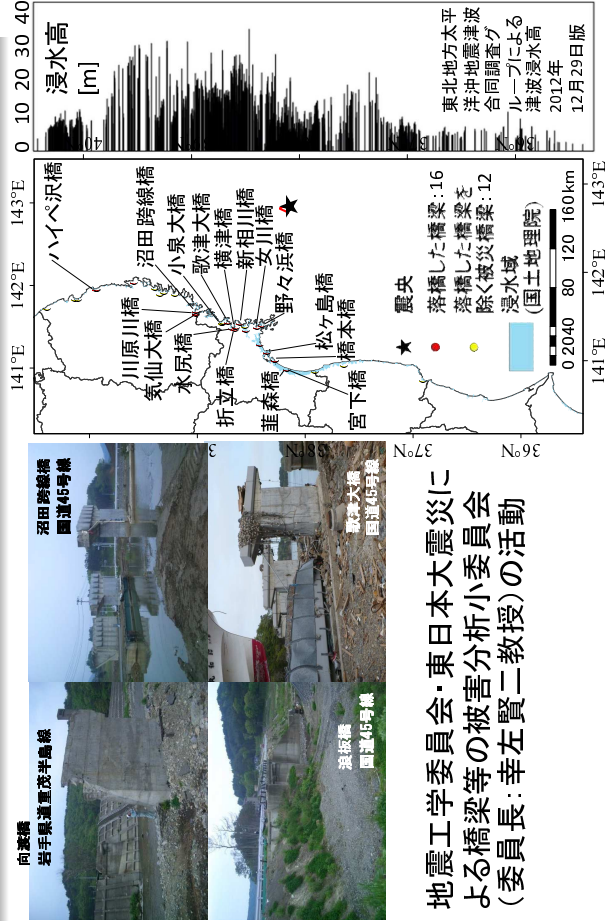
筑波大・庄司学 gshoji@kz.tsukuba.ac.jp



インフラ・ライフライン防災の時代変遷・位置付け

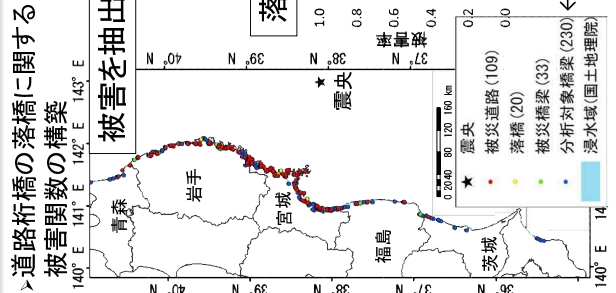
- 揺籃・隆盛期：拡張 **生まれた頃**
 - ・1971年サンフェルナンド地震
 - ・1978年宮城県沖地震
 - ・大都市直下型：頭打ち
 - ・1994年ノースリッジ地震
 - ・1995年兵庫県南部地震
 - ・テロ/津波/ハリケーン：機能化
 - ・2001年WTC
 - ・2004年インド洋大津波
 - ・2005年ハリケーンカトリナ
 - ・2007年新潟県中越沖
 - ・2008年中国四川地震
 - ・巨大複合災害 **40代**
 - ・東北地方太平洋沖地震
- 構造被害：柱・橋脚・埋設管路
地盤変状,機能支障→復旧過程
 - ・1983年日本海中部
 - 大学：明石ケークーブル**施工**中
 - 大学院 強烈な地震動と構造被害
- 膨大・基大な末梢系の被害
学位論文: 免震橋梁
Critical infrastructure protection
“リスク”の時代
 - ・2004年新潟県中越
 - ・2007年新潟県中越沖
 - ・2008年岩手・宮城内陸
 - 巨大津波: 上位系のcatastrophe
 - 広域地盤変状: 末梢系のcatastrophe
 - 「経年化」という追い討ち

橋梁の基大な津波被害

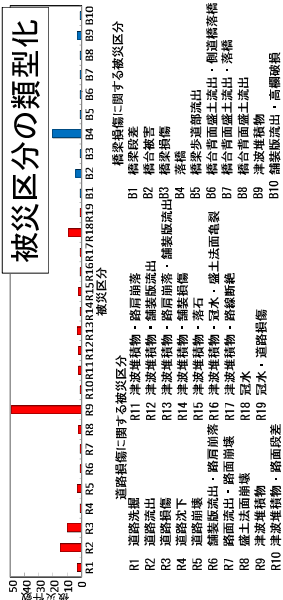


地震工学委員会・東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会 (委員長: 幸左賢二教授) の活動

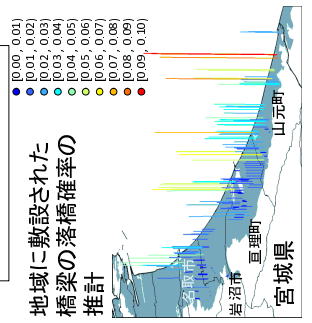
落橋の確率?



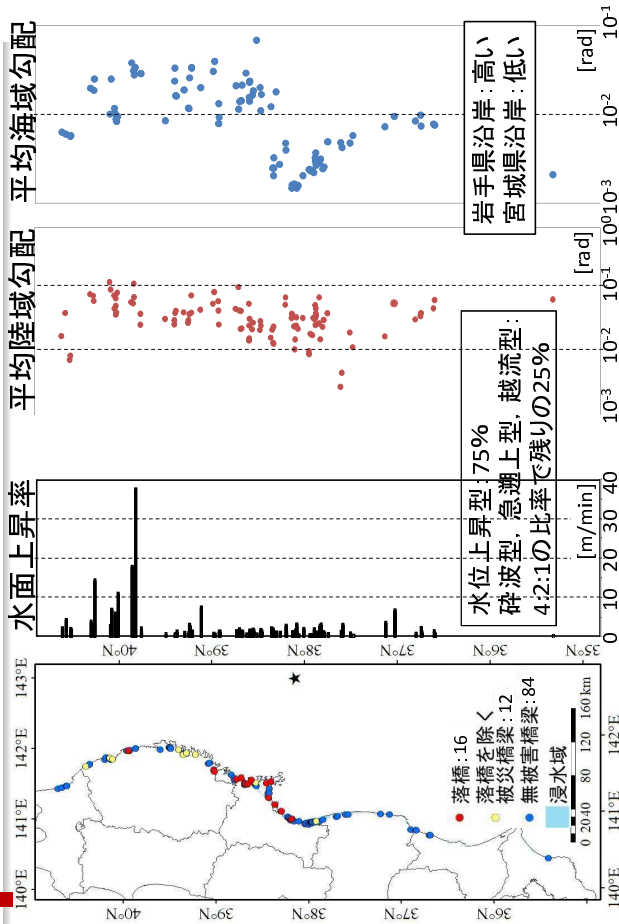
被災区分の類型化



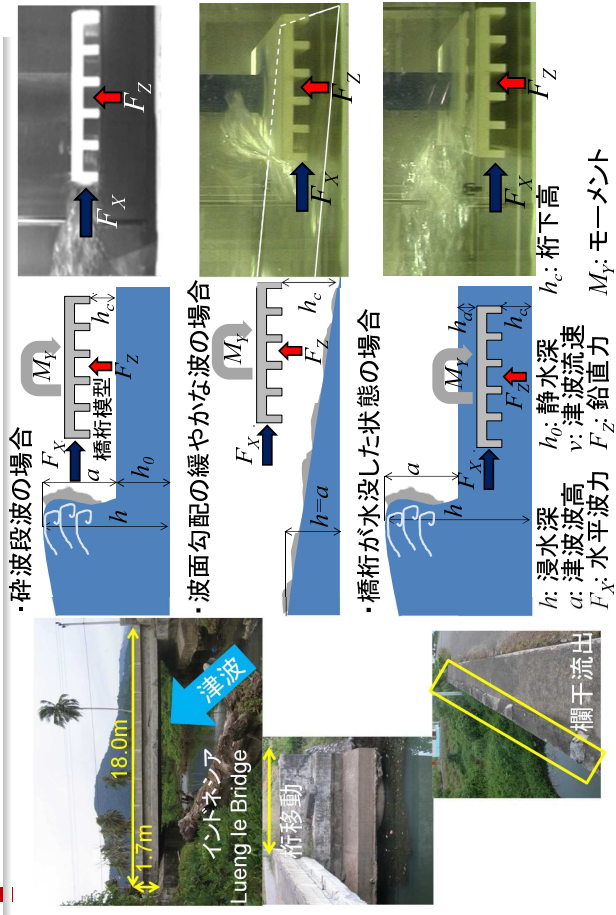
被害関数の適用



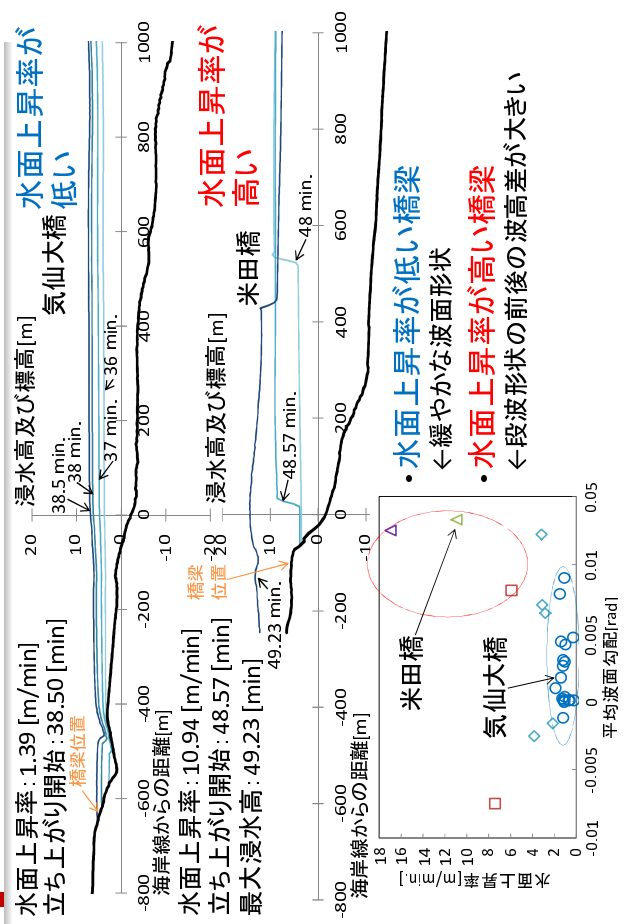
地形が波に与える影響



様々な波面が作用した場合の水平波力・鉛直力



橋梁位置・橋桁の高さ位置で異なる波面形状



鉛直力の評価が大きな課題 + 流速ベースの評価

