

次世代の耐震・構造技術開発 に向けて

令和元年6月25日
東北大学大学院
運上 茂樹

明石海峡大橋主塔頂部から神戸市を撮影

1

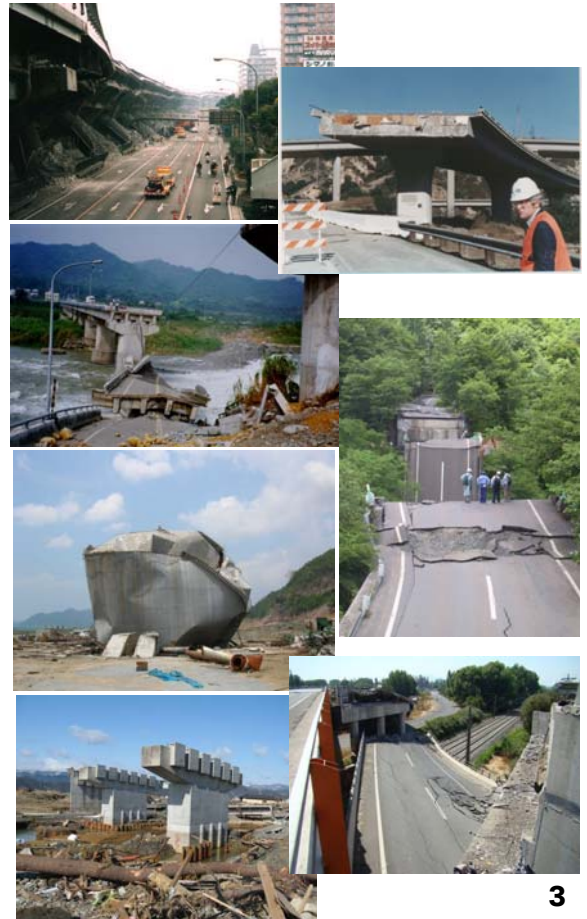
本日の話

一次世代の耐震・構造技術開発に向けてー

- 耐震構造技術の現状
 - ・ 地震被害と耐震技術開発の変遷
- 耐震・構造分野の今後の技術開発
 - ・ 今後の社会：近未来・超未来
 - ・ 技術研究開発テーマ

■ 国内外で大地震の発生

1. 1994年米国ノースリッジ地震
1995年兵庫県南部地震
→ 過去に記録されていない強い地震動
2. 1999年トルココジャエリ地震
1999年台湾集集地震
→ 10m規模の極めて大きな地表断層
3. 2004年スマトラ島沖地震
→ 30m規模の大津波
4. 2008年岩手宮城内陸地震
→ 極めて大規模な斜面崩壊
5. 2008年中国四川省地震
2010年チリ・マウレ地震
→ M8直下～9級大規模地震（広域影響）
6. 2011年ニュージーランド地震
2011年東北地方太平洋沖地震
→ M9の大規模地震と想定を超える大津波（複合災害）
7. 2013年フィリピン・ボホール島地震
8. 2015年ネパール・ゴルカ地震
2016年熊本地震
→ 強震動（震度7@2回）・地盤災害



■ 耐震・構造技術の発展

➤被害経験とともに発展：経験工学の一面

- ✓被害の分析，メカニズム・原因の解明，対応策の選択
- ✓震災：関東，新潟，宮城，阪神淡路，東日本，海外，等

➤新たな現象・被害の出現・被害が無くならない

- ✓最近では，平成28年熊本地震
(平成30年大坂北部地震，平成30年北海道胆振東部地震)
- ✓自然現象を完全には予測，再現できない限界
例えば，地震発生，揺れの大きさ・特性，構造物挙動

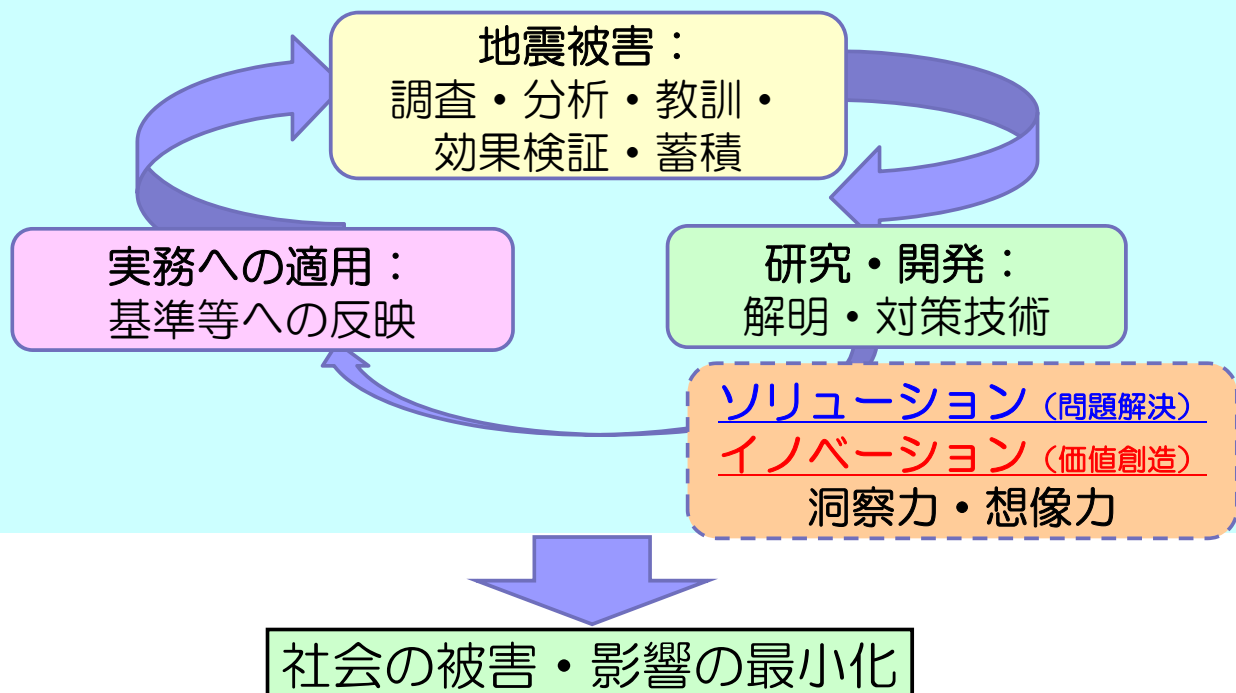


➤継続的なデータの蓄積・分析の必要性

- ✓地震レジリエンス強化サイクルの駆動（教訓を改善に）

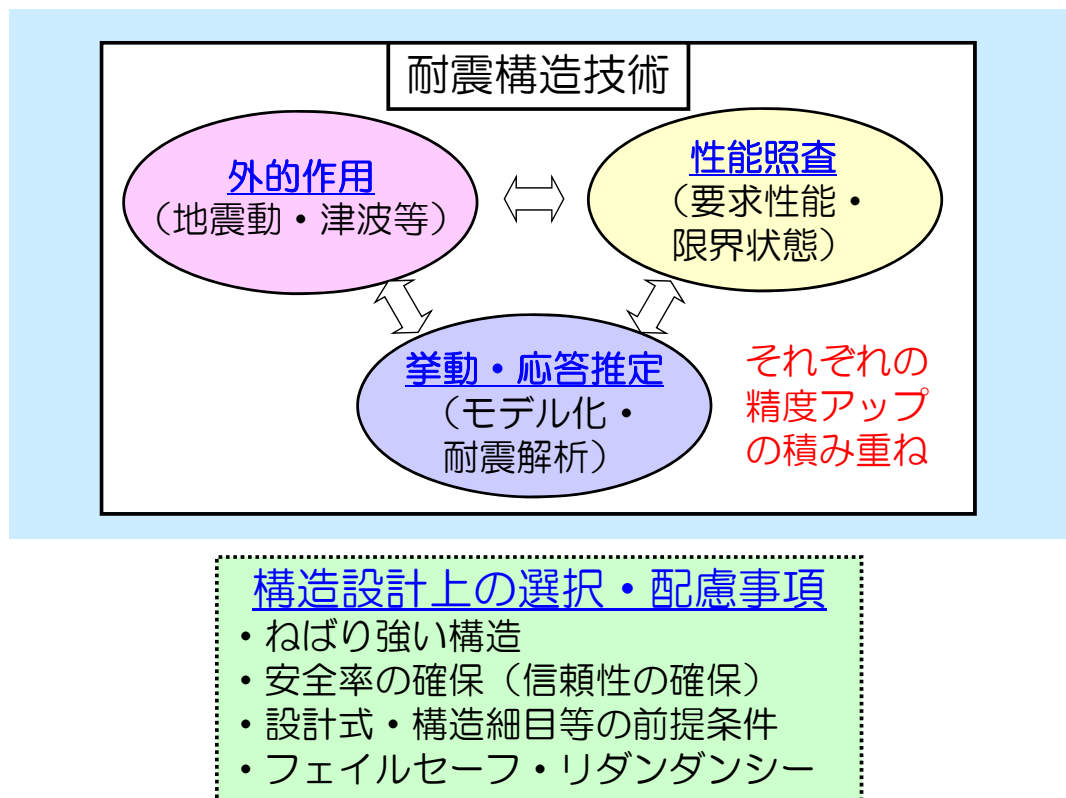
■ 継続的なデータの蓄積・分析

地震レジリエンス強化サイクルの駆動



5

■ 耐震構造技術の基本3要素



6

■ 耐震構造技術とは？

- 設計3要素：「地震力評価」，「性能評価」，「構造物の挙動評価」がもちろん基本。だが…….
- 構造物の耐震構造技術：一言でいうと
 - ✓良い壊し方・壊れ方をどうすればよいかが一番のポイント
 - ✓壊す個所に十分なねばり（効果的なエネルギー吸収）と，構造内の耐力をバランスさせた壊れ方を実現できれば，耐震構造としてはほぼ満点
 - ✓技術力とは，より適切な壊し方，壊れ方の決め方の設定力，さらに，壊れた時の容易な点検・補修方法への配慮

7

■ 良い壊し方：損傷位置の変化と損傷制御設計



基礎・地盤の不安定

下部強化



支承部被害

支承部強化



橋脚被害

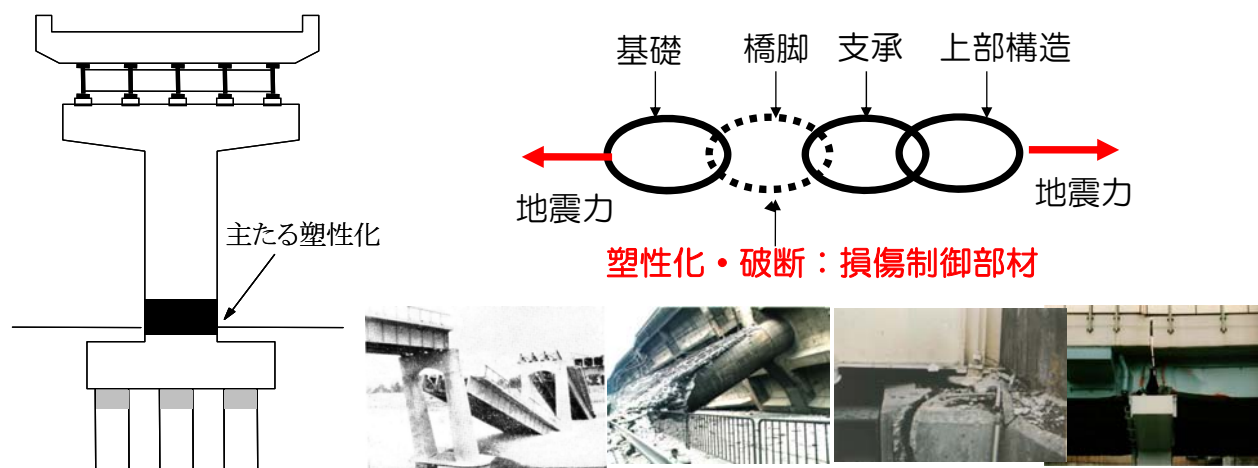
地震は，必ず最も弱い部材を正確に見つけて，そこに損傷を発生させる：実物実験

→なので，設計者もそう考えるべき!!

→同時に構造全体をみる!!

8

■ 良い壊し方：損傷位置の変化と損傷制御設計



➤ 損傷制御設計の考え方

予め地震時にがんばる（あるいは、がんばらずに先にへたる）部材を決める。そして、その部材に対し、

- 所定の耐力を確保する（断面・軸鉄筋で）
- ねばり強くする（配筋細目：帯鉄筋で）
- エネルギー吸収を高める（安定的な履歴）

9

■ 地震被害と耐震技術変遷（1）

主な被害地震	地震作用	耐震要求性能
1923年関東地震 1964年新潟地震 1978年宮城県沖地震 1982年浦河沖地震 1995年兵庫県南部地震 1999年トルコ・台湾地震 2003年十勝沖地震 2004年スマトラ島沖地震 2008年中国四川地震 2010年チリ地震 2011年東日本大震災 2016年熊本地震	関東地震の地震動 ↓ 2段階地震動 L1：中規模 L2：大プレート L2：内陸M7級 断層変位・断層近傍地震動 長周期地震動 津波の影響 内陸直下M8級 巨大地震・広域災害 巨大津波・長時間地震動・複合災害 前震・本震・余震・断層	仕様のな設計 目標性能を明示した設計 L1：健全性, L2：崩壊防止 耐震性能1, 2, 3 (安全性, 供用性, 修復性) ↓ 仕様規定から性能規定へ

10

■ 地震被害と耐震技術変遷（2）

主な被害地震	耐震設計法・性能照査	耐震構造・構造コンセプト
1923年関東地震 1964年新潟地震 1978年宮城県沖地震 1982年浦河沖地震 1995年兵庫県南部地震 1999年トルコ・台湾地震 2003年十勝沖地震 2004年スマトラ島沖地震 2008年中国四川地震 2010年チリ地震 2011年東日本大震災 2016年熊本地震	震度法＋許容応力度法 (弾性設計, 静的設計) ↓ じん性設計 ↓ 震度法 地震時保有耐力法 (RC橋脚の塑性設計) 地震時保有耐力法拡大 (全主要部材) 動的設計：非線形 キャパシティデザイン 変位ベース設計法 ↓ 限界状態設計・信頼性設計 対津波設計：波力・浮力 地上・半地下・地下構造・ 地盤を含む統一耐震設計 地盤変状（断層）斜面崩壊	液状化判定・基礎設計 フェイルセーフ設計：落下防止 RC部材の設計：配筋細目・せん断・段落し 本格的なじん性設計：RC橋脚 免震設計 各種構造部材のじん性構造細目 液状化に伴う流動化設計 高性能構造：高強度材料 制震設計・減震設計・耐震補強 インテリジェント耐震構造 センサーモニタリング ロバスト・リダンダント構造 ABC（急速施工構造） 対津波構造 リスクベース設計 劣化損傷を考慮した構造リスク

11

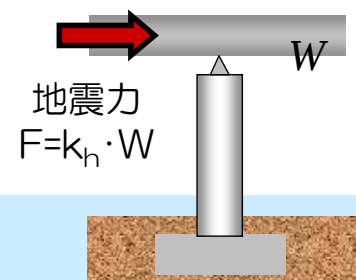
■ 地震被害と教訓(1)



1923年関東地震酒匂橋

【耐震設計していない橋の被害パターン】

水平力を考慮していないため、下部・基礎構造の転倒・傾斜による落橋等



1923年関東地震

- ・大正15年 道路構造に関する細則案
→ **耐震設計の導入（震度法＋許容応力度法）**
($k_h = 0.1 - 0.40$)
- ・昭和14年 鋼道路橋設計示方書案($k_h = 0.2, k_v = 0.1$)
- ・昭和31年・昭和39年 鋼道路橋設計示方書
($k_h = 0.1 - 0.35, k_v = 0.1$)

12

■ 地震被害と教訓(2)



1964年新潟地震
昭和大橋
液状化による大変位
落橋防止構造なし

1964年新潟地震

- ・昭和46年 道路橋耐震設計指針

→ 地域・地盤に応じた設計震度

$$k_h = \beta(\text{増幅率}) \cdot v_1(\text{地域}) \cdot v_2(\text{地盤}) \cdot v_3(\text{重要度}) \cdot k_0(0.2) \\ (=0.1 - 0.3)$$

液状化に対する設計法

落橋防止構造 (フェイルセーフ: 下部構造縁端距離 S , 連結装置)

13

■ 地震被害と教訓(3)



RC橋脚・支承部周辺等ねばりの少ない部位の損傷

1978年宮城県沖地震

- ・昭和55年 道路橋示方書

→ RC構造配筋細目 (段落し部・せん断), RC橋脚の変形性能照査,
落橋防止構造 (桁かかり長 S_E , 連結装置等の具体的な設計法)

- ・平成2年 道路橋示方書

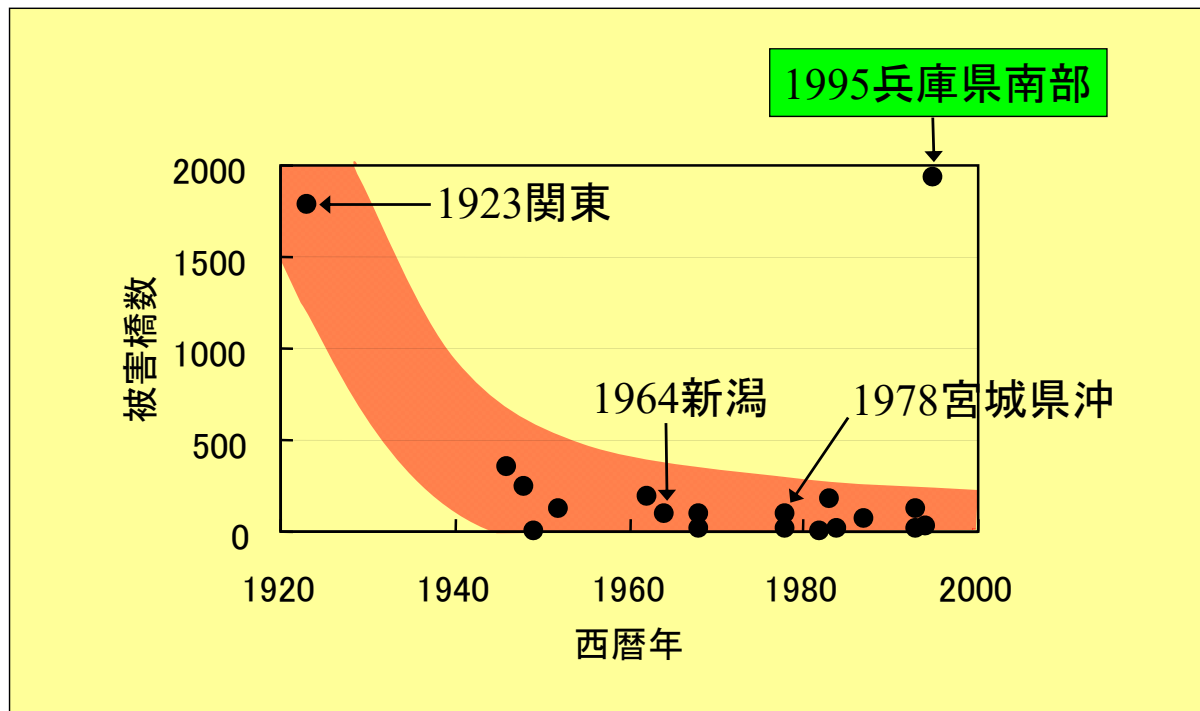
→ 地震時保有水平耐力法

(レベル1地震動、レベル2地震動 (関東地震) を考慮した 2段階設計法)
(RC橋脚の具体的なじん性設計法)

14

■ 耐震技術の発展の効果

被害経験に基づく耐震技術の整備により地震による被害
橋数は大きく減少



15

■ 兵庫県南部地震：従来を大きく超える地震動



1995年兵庫県南部地震

多くの橋で落橋，倒壊等の甚大な被害

1995年兵庫県南部地震

- 平成7年 被災地の復旧のための仕様

- 神戸地震への緊急対応（地震発生約1か月後の2月27日に通知）
- レベル2地震として海洋型・**内陸直下型地震**の考慮

内陸直下型地震は、従来の2倍の強度の地震動（**神戸の観測地震動**）

地震時保有水平耐力法の適用拡大：損傷制御設計

（RC・鋼製橋脚，支承，基礎等）

- 平成8年 道路橋示方書→**復旧仕様を踏襲・充実**
- 平成14年 道路橋示方書→**性能規定型基準体系**
- 平成24年 道路橋示方書→**東日本大震災対応（津波，南海トラフ地震等）**
- 平成29年 道路橋示方書→**熊本地震対応（斜面崩壊等，部分係数設計法）**

16

■ 兵庫県南部地震：橋脚の被害メカニズム



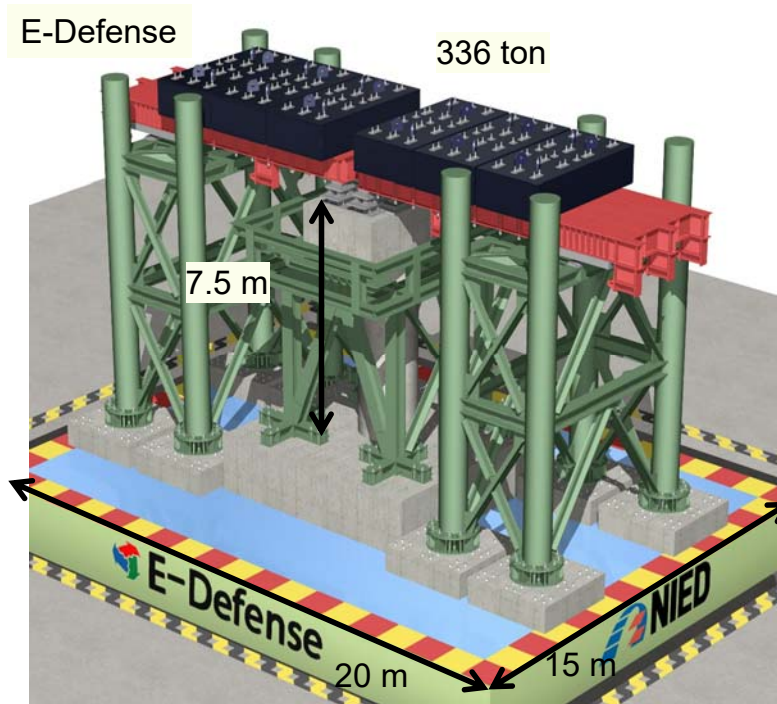
倒壊・落橋した
橋のほとんどが、
段落し部での破
壊に起因

→ **ねばりの
少ない破壊**

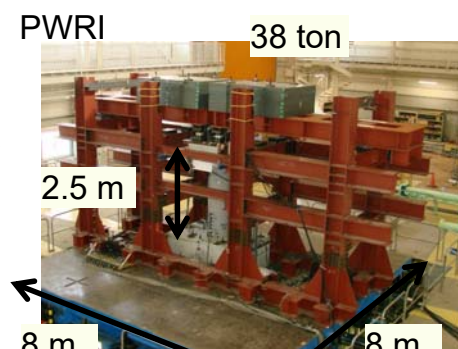


17

■ 振動台（E-Defense/PWRI）を用いた 兵庫県南部地震によるRC橋脚の被害再現実験



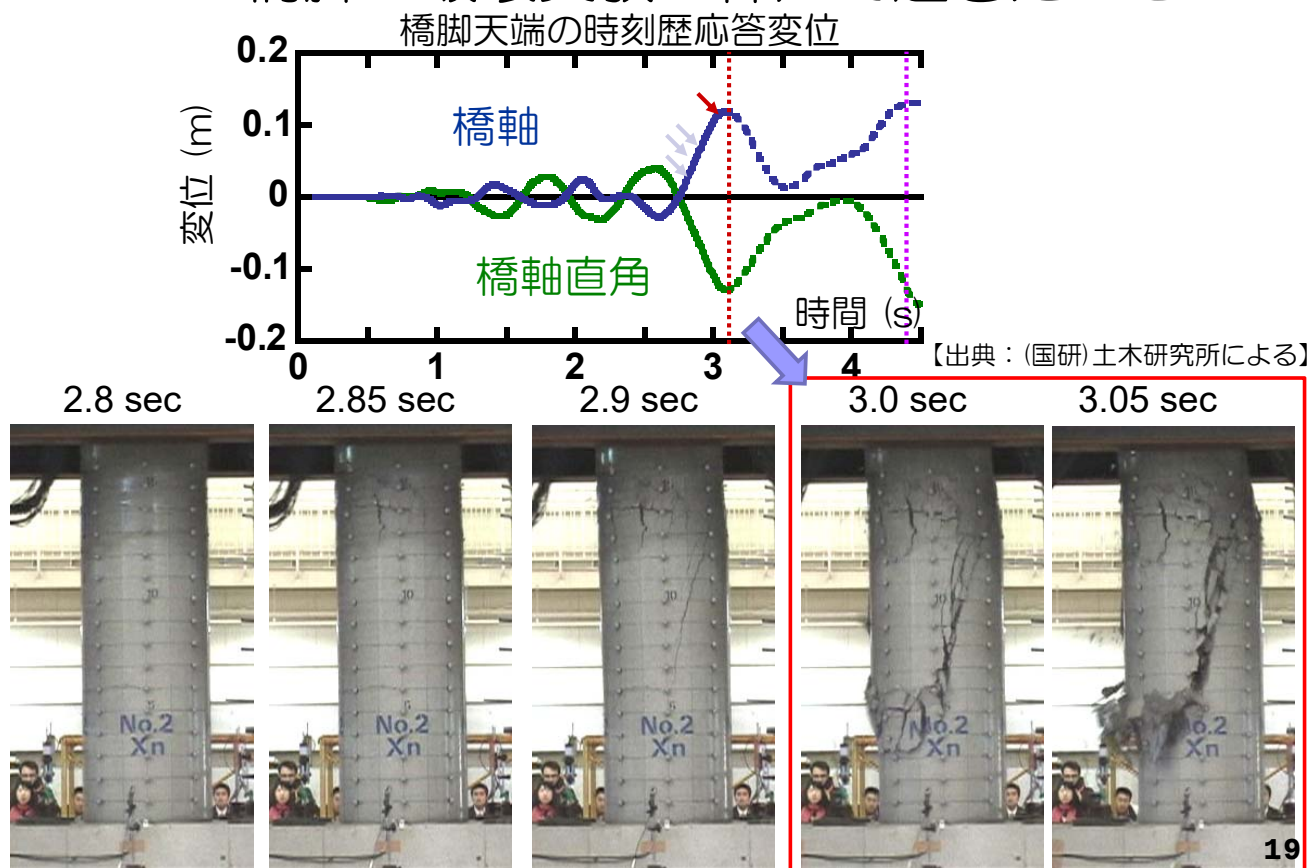
最大積載荷重：1,200tf



最大積載荷重：300tf

18

■ R C 橋脚の破壊実験：神戸で起きたこと



■ R C 橋脚の破壊実験：神戸で起きたこと



■ 得られた教訓の反映：耐力・ねばりの確保

兵庫県南部地震より前

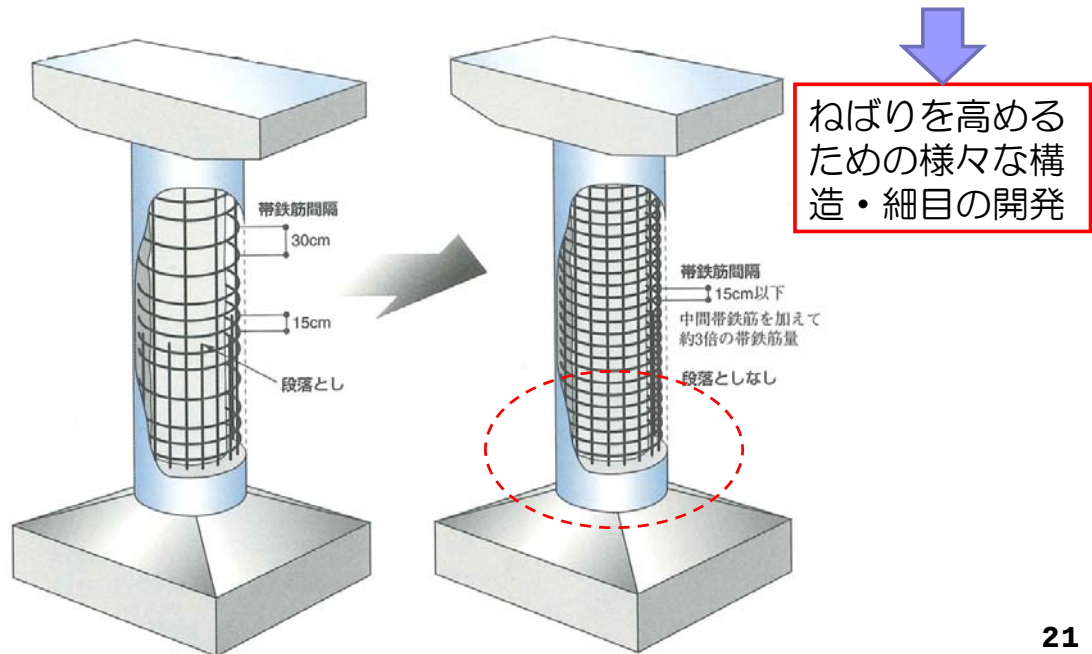
弾性設計のため、具体的な損傷位置を意識しない設計

→ 段落し部に損傷が発生、落橋

兵庫県南部地震以降

弱点部となる段落し部をなくし、橋脚基部に損傷を誘導

→ 帯鉄筋を密にしてねばり強い構造



21

■ 当時の耐震設計の考え方に関する議論

➤ 議論

- 橋の耐震設計ではいったい何を目標にしていたのか？
- もともと、こういう地震力を考えていた → 今回、これを超過した → だから破壊が進展した、と言えるのか？

➤ 平成2年道示の地震時保有水平耐力法によって説明

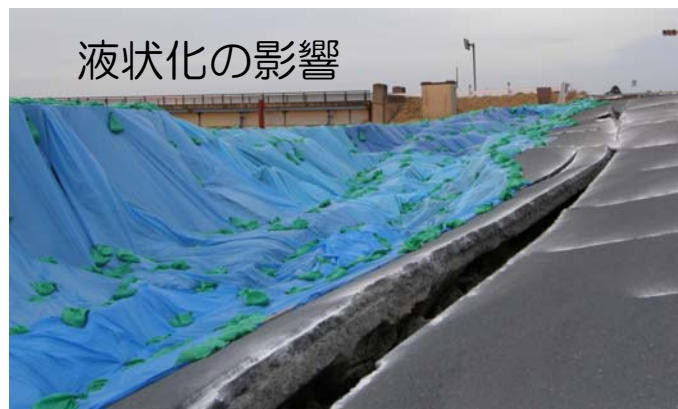
- 対象とする地震とその強度（関東地震：1.0G）が明記
- その地震に対して、どういう状態を確保すべきかが明記
- 設計震度0.2を考えた弾性設計だけでは、どの程度の地震力の超過で破壊が進展したかが説明できない。

➤ 仕様規定から性能設計へ

- 要求性能を具体的に明示するという性能設計の先駆け
- 特に、地震は頻度が少なく、実検証の機会が少ないため、考え方を明確にしておく必要性

22

■ 東日本大震災：津波，強震動，液状化被害



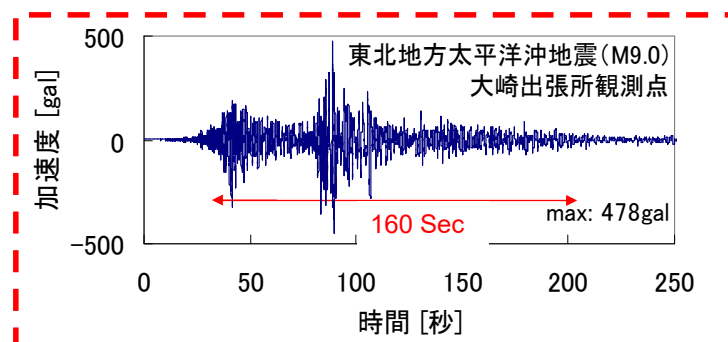
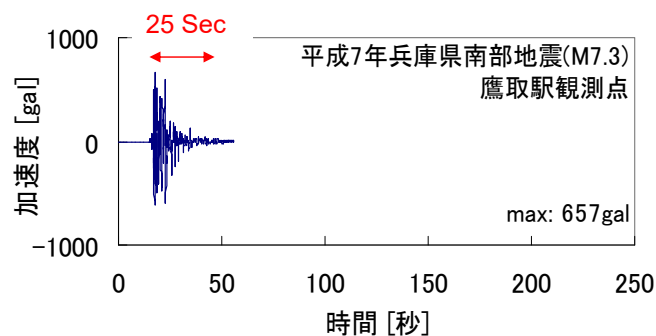
【出典：(国研)土木研究所による】

24

■ 強震動の特徴

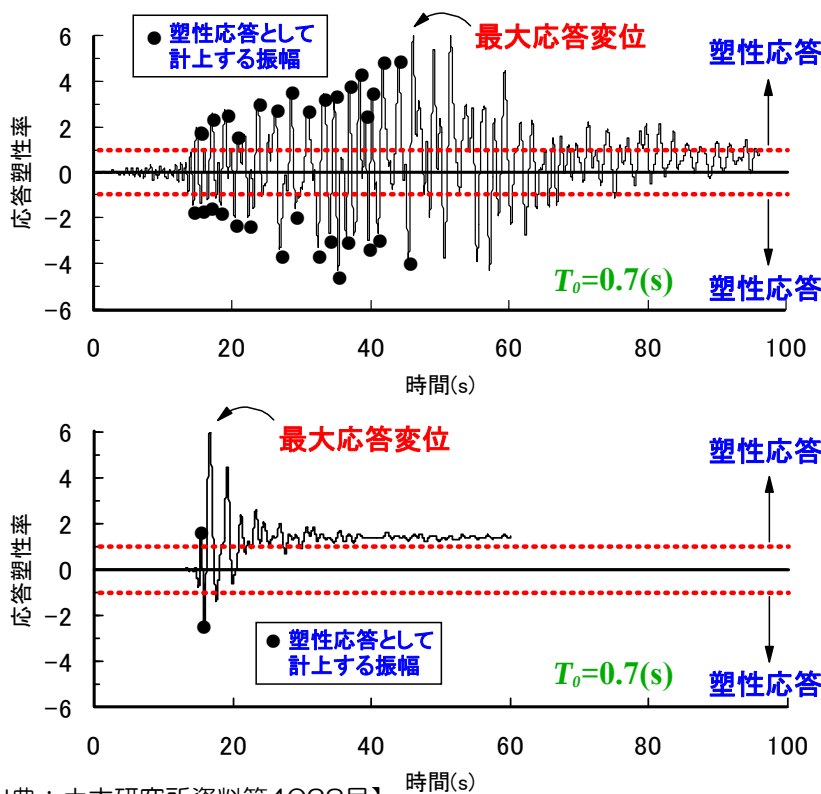
長時間地震動：兵庫県南部地震の6倍（巨大断層に起因）

→ 多い繰返しのため破壊が大きく進展したのではないか？



24

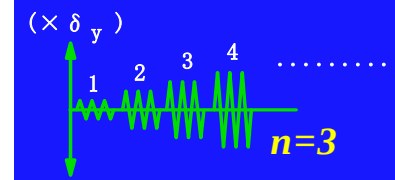
■ 塑性応答の繰返し回数の評価：RC部材への影響



最大応答変位が発生する時刻よりも前の塑性応答回数をカウント

過去の25の地震で観測された95の強震記録)をもとに繰返し回数を統計分析

性能評価に用いる載荷実験の繰返しパターン
(変位漸増載荷：3回)



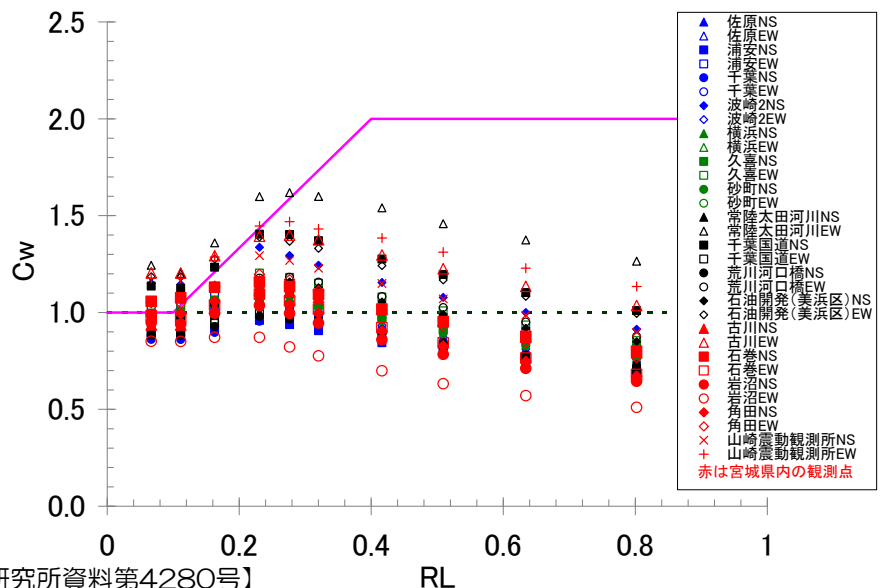
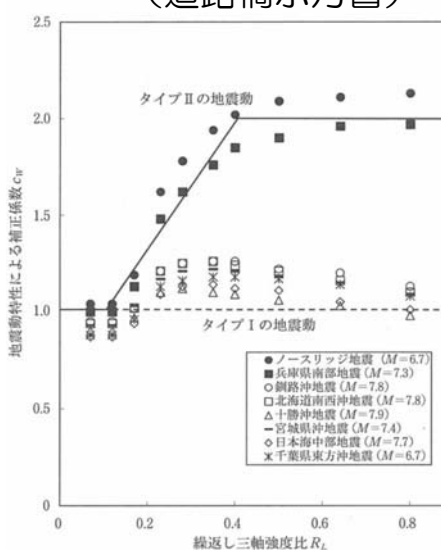
【出典：土木研究所資料第4023号】

25

■ 塑性応答の繰返し回数の評価：液状化への影響

地震動特性による補正係数 c_w
(道路橋示方書)

東日本大震災の地震観測データに対する分析
(32記録)



【出典：土木研究所資料第4280号】

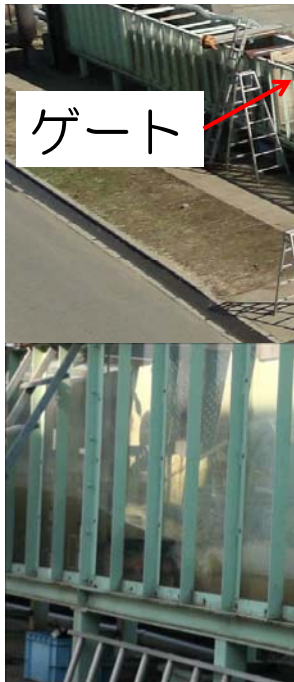
○地震動波形の繰返し特性について既往地震との比較

- ・ 波形によってばらつきがある (全体としては低めの値)
- ・ $R_L < 0.4$ 程度： c_w は同程度， $R_L > 0.4$ 程度： c_w は低めの傾向

26

■ 段波状の津波の影響に関する実験・解析研究

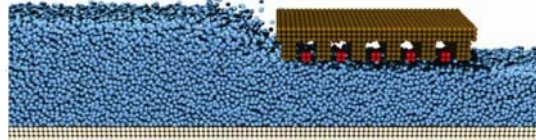
水路全長30m



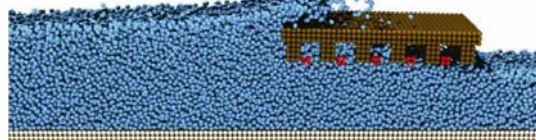
ゲート

116.31秒時

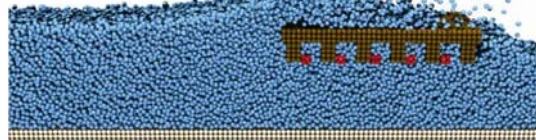
構造物への影響評価のための
シミュレーション技術



117.02秒時



117.72秒時



【出典：(国研)土木研】

実施

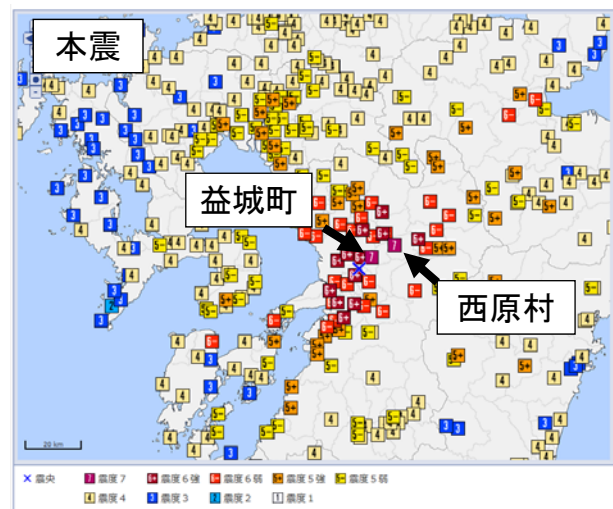
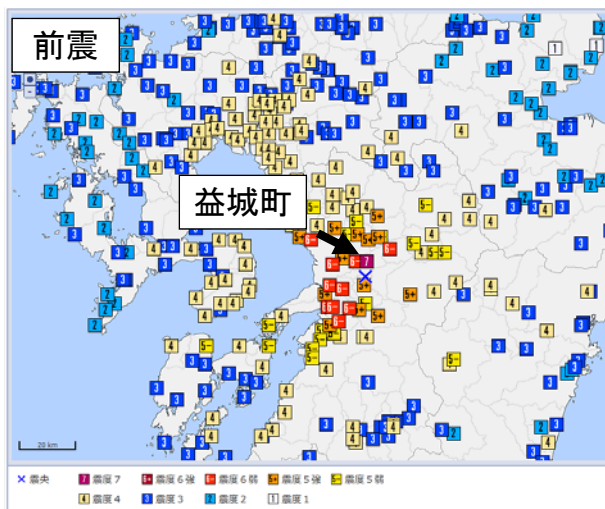
29

■ 熊本地震：前震・本震による2度の震度7観測

■ 前震（4月14日21時26分，M6.5）：益城町

■ 本震（4月16日 1時25分，M7.3）：益城町，西原村

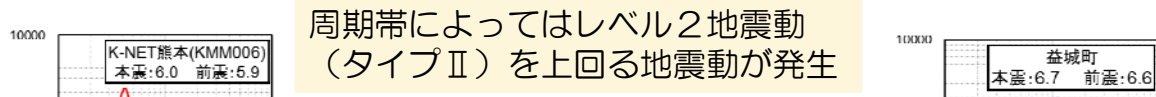
【参考】新潟県中越地震（M6.8）：川口町（本震：震度7 → 同日余震（M6.5）：震度6強）
東北地方太平洋沖地震（M9.0）：築館（本震：震度7 → 4 / 7余震（M7.2）：震度6強）
鉾田（本震：震度6強 → 同日余震（M7.6）：震度6強）



【出典：社会資本整備審議会道路分科会道路技術小委員会資料】

28

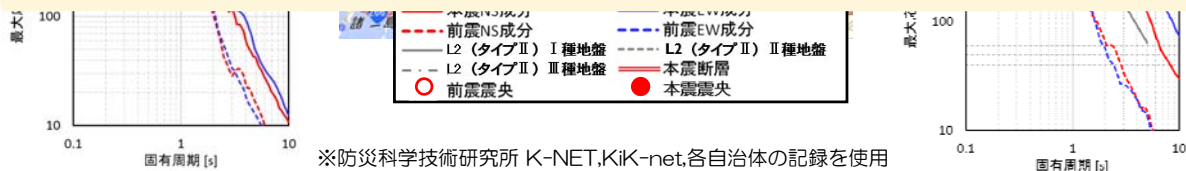
■ 代表的な観測地震動：加速度応答スペクトル



Q：設計スペクトル・地域係数は、妥当なのか？

- ①地震動そのものの大きさはどうであったか？
- ②地震動の影響によって橋に生じた状態は目標とする耐震性能を満足するものであったかどうか？

- ①全体的には、兵庫県南部地震の地震動に基づき設定された設計スペクトルと同程度レベルと評価
- ②地震動による影響だけでなく、地盤変状に伴って下部構造の移動の影響が加わって生じた被害



※防災科学技術研究所 K-NET, KiK-net, 各自治体の記録を使用
【出典：社会資本整備審議会道路分科会道路技術小委員会資料】

29

■ 基準対応：平成29年道路橋示方書

1.4 架橋位置と形式の選定において耐震設計上考慮する事項

橋の耐震設計にあたっては、想定される地震によって生じ得る津波、斜面崩壊等及び断層変位に対して、これらの影響を受けないよう架橋位置又は橋の形式の選定を行うことを標準とする。なお、やむを得ずこれらの影響を受ける架橋位置又は橋の形式となる場合には、少なくとも致命的な被害が生じにくくなるような構造とする等、地域の防災計画等とも整合するために必要な対策を講じなければならない。



30

■ 次世代・社会の様相：近未来

➤ 社会形態の変化

- ・ 少子・高齢化
- ・ 労働力人口減少
- ・ 人口減少・経済縮小
- ・ 産業構造の変化
- ・ 生活形態・様式の変化
- ・ 国際化・分業
- 戦略的に、いかに伸ばし、いかに捨てるか
- そして、社会とそれを支えるインフラの在り方

➤ 技術イノベーション

- ・ 技術革新による経済成長：建設分野
- ・ 付加価値の高いインフラ
- ・ 高生産性：合理性・効率性・自動化
- ・ IOT/BOT・AI・シミュレーション
- ・ レジリエントなインフラ施設
- ・ 異分野も融合した最適化

33

■ 次世代・社会の様相：超未来？

➤ 社会形態の変化

- ・ 資源枯渇、病原菌発生等、地球上の人類居住環境の悪化
- ・ 惑星衝突等
- 地球外への移住
(イーロン・マスク氏：火星移住計画、100万人が時給自足)
- 人類を支えるインフラが劇的に変化するかもしれない。

➤ 様々な技術イノベーション・ニーズ

- ・ 移動・物資輸送（ロケット、スペースX、宇宙船）
- ・ 資材製造（3Dプリンター）
- ・ 無人建設技術（ロボット技術）
- ・ 生命維持システム（空気、水、食料）
- ・ エネルギー生産・完全リサイクル
- ・ 居住施設（宇宙ステーションの陸上版）
- ・ 環境対応・環境創成
(完全密閉、重力、大気、宇宙線、隕石衝突、
テラフォーミング)

34

■ 平成29年改定道路橋示方書の方向性

- 平成29年7月改定・通知（解説：同年12月発刊）
- 改定の主旨：生産性を向上，良質で長寿命な道路橋の実現



33

■ 平成29年改定道路橋示方書の方向性

➤ 改定のポイント

1) 設計供用期間：100年を基本

- ・適切な維持管理を前提に、所要の性能発揮を設計において目標
- ・耐久性（疲労，腐食等）に対する信頼性の向上

2) 照査体系（耐荷性能）：限界状態設計法・部分係数設計法

- ・橋をどのような状態や損傷に留めたいかを明確化して設計
- ・したがって、従来の構造形式，材料によらず設計可能な体系（データの質・量に基づく部分係数の設定）

3) 長寿命化

- ・各部材の維持管理法を設計時点で具体的に考慮
- ・適用性・信頼性が明らかな技術を用いること

4) 熊本地震対応：大規模な斜面崩壊の影響による被災の教訓

- ・より被災しにくく，復旧しやすい構造を目指す

34

■ 継続的なデータの蓄積・分析

リアクション対応から アクション対応へ

- ✓ 外的作用
- ✓ 耐震設計
- ✓ 構造コンセプト

■ 地震被害と耐震技術変遷（１）

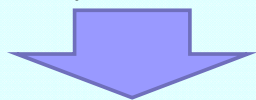
主な被害地震	地震作用	耐震要求性能
1923年関東地震 1964年新潟地震 1978年宮城県沖地震 1982年浦河沖地震 1995年兵庫県南部地震 1999年トルコ・台湾地震 2003年十勝沖地震 2004年スマトラ島沖地震 2008年中国四川地震 2010年チリ地震 2011年東日本大震災 2016年熊本地震	関東地震の地震動 ↓ 2段階地震動 L1：中規模 L2：大プレート L2：内陸M7級 断層変位・断層近傍地震動 長周期地震動 津波の影響 マルチ・ハザード (オール・ハザード) 超過外力・複合作用 南海トラフ巨大地震 千島海溝・首都直下地震	仕様のな設計 目標性能を明示した設計 L1：健全性, L2：崩壊防止 耐震性能1, 2, 3 (安全性, 供用性, 修復性) ↓ 仕様規定から性能規定へ レジリエンス性能 (人命第一・被害最小化・ 早期復旧)

■ 地震被害と耐震技術変遷（2）

主な被害地震	耐震設計法・性能照査	耐震構造・構造コンセプト
1923年関東地震 1964年新潟地震 1978年宮城県沖地震 1982年浦河沖地震 1995年兵庫県南部地震 1999年トルコ・台湾地震 2003年十勝沖地震 2004年スマトラ島沖地震 2008年中国四川地震 2010年チリ地震 2011年東日本大震災 2016年熊本地震	震度法＋許容応力度法 (弾性設計, 静的設計) ↓ じん性設計 ↓ 震度法 地震時保有耐力法 (RC橋脚の塑性設計) 地震時保有耐力法拡大 (全主要部材) ↓ マルチ・ハザード（オール・ハザード）対応 巨大外力 シミュレーション能力 レジリエンス性能設計 社会システムを含む大規模モデル・全体性能評価 設計AIの活用：設計者の在り方	液状化判定・基礎設計 フェイルセーフ設計：落下防止 RC部材の設計：配筋細目・せん断・段落し 本格的なじん性設計：RC橋脚 免震設計 各種構造部材のじん性構造細目 液状化に伴う流動化設計 被害最小化：ダメージコントロール, ダメージフリー 修復し易い構造・迅速復旧 超耐久性構造 環境適応構造 インテリジェント耐震構造 (自己診断・自己修復・自己適応構造)

■ 被害・損傷等実現象に則した構造論研究

- 平成7年兵庫県南部地震～平成23年東日本大震災：災害が進化・変化，常に新たな課題・教訓，被害がなくなるない。
- 何故に被害・損傷が発生し，何故に発生しなかったのかという現象・メカニズムに対して，1つ1つ明らかにしていく研究への取り組み。
- 被害・損傷から学ぶことは，実現象に対して合理性を有する構造技術の確立のために不可欠。



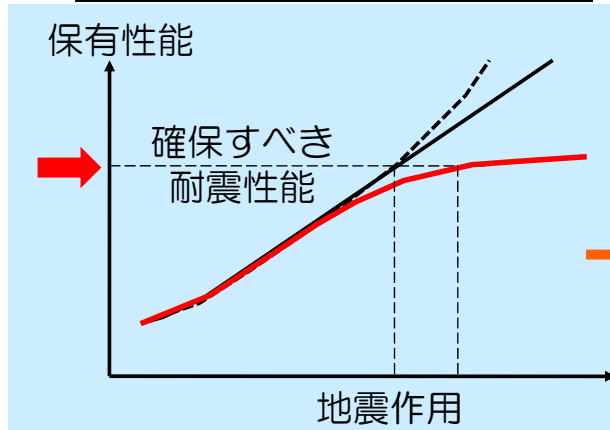
- 損傷制御設計論，想定外に備える設計論，安全余裕確保によらないダメージフリー構造論，インテリジェント構造論の開発への取り組み



■次世代構造技術論：ダメージフリー・インテリジェント化

1. 地震被害を受けない、あるいは、受けにくい耐震構造
→ ダメージフリー構造（地震感度の低い構造）・被害最小化
2. 地震被害を自己検知・自己表示する耐震構造
→ 自己診断機能（インテリジェント・モニタリング）
3. 地震被害を受けても容易に復旧可能な耐震構造
→ 自己修復機能・早期復旧
4. 早期に構築できる構造→急速施工（ABC）・プレキャスト化（高耐久性）

➤ ダメージフリー構造論



【従来の耐震構造】
地震作用が大きくなるとそれだけ保有性能を大きくしなければならない

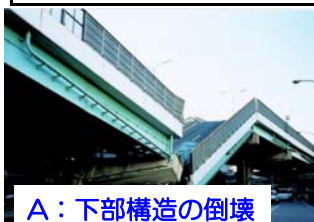
【次世代の耐震構造】
地震作用の大きさにセンシティブではない構造 **コンセプト**

どう実現していくか

39

■ 経験的に致命的な被害を受けにくい構造

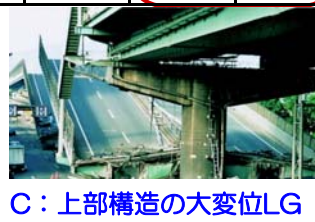
出典：土木研究所資料 第4158号 地 震	落橋数	径間数	径間数					
			両端に橋台を有する単純桁橋		複数径間を有する単純桁橋		多径間連続橋	
			シナリオ A	シナリオ B,C,D	シナリオ A	シナリオ B,C,D	シナリオ A	シナリオ B,C,D
1923年関東地震	6	38	1	----	35	2	----	----
1946年南海地震	1	6	----	----	----	6	----	----
1948年福井地震	7	116	----	----	116	----	----	----
1955年二ツ井地震	1	3	----	----	----	3	----	----
1964年新潟地震	4	7	----	----	1	6	----	----
1978年宮城県沖地震	1	1	----	----	----	1	----	----
1995年兵庫県南部地震	12	49	----	----	26	6	17	----
2000年鳥取県西部地震	1	1	1	----	----	----	----	----
2008年岩手宮城内陸地震	1	3	----	----	----	----	3	----
合 計	34	224	2	0	178	24	20	0



A：下部構造の倒壊



B：下部構造の大変位



C：上部構造の大変位LG



C：上部構造の大変位TR

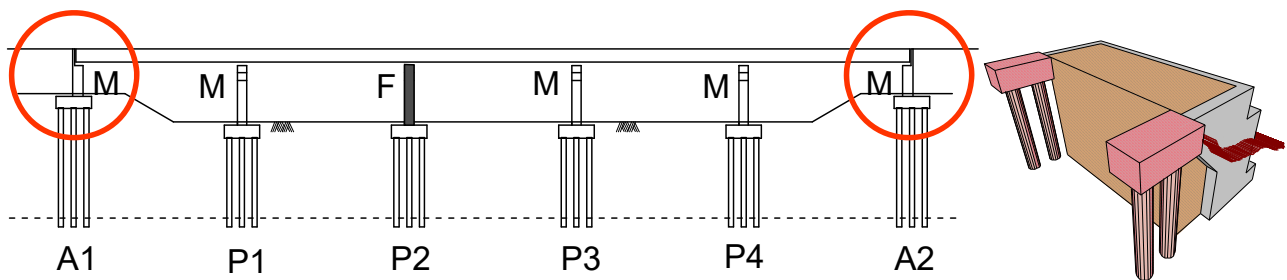
■ 経験的に致命的な被害を受けにくい構造

➤ 地震被害を受けない、あるいは、受けにくい耐震構造

→ 例えば、構造計画的に、

- 橋台構造と土工部との連成構造
- 地盤でエネルギー吸収（橋台構造の強化）
- 背面沈下等対応（応急復旧は容易）

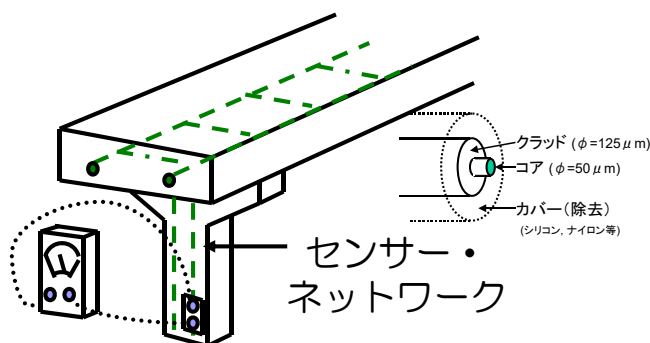
■ 両端部の橋台による上部構造振動の制限・吸収



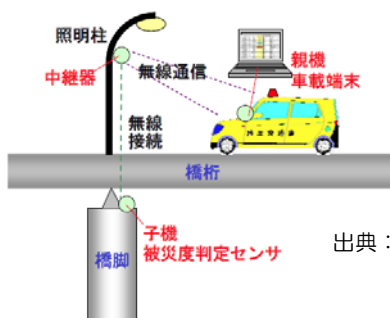
43

■ 次世代設計技術論：ダメージフリー・インテリジェント化

➤ 自己診断機能：被災診断



素材：Optical Fiber, CFGFRP, Shape Memory Alloys, TRIP鋼材, MEMS等



迅速なデータ
取得による
被災診断

出典：土木研究所報告
第213号



地中部などの被災→被害の発見が困難
→ 継続使用の被災診断が困難

42

■ 次世代設計技術論：ダメージフリー・インテリジェント化

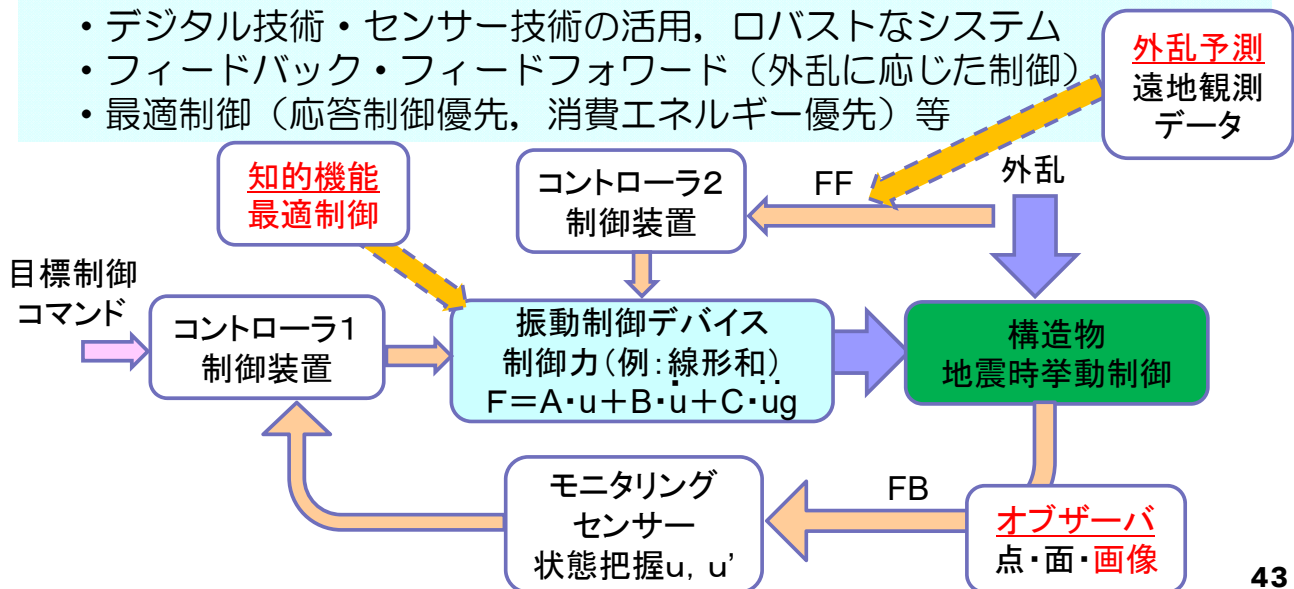
➤ 自己診断：インテリジェント・モニタリング

✓ 状態把握技術 → 監視見守り技術

- ・モニタリング技術
- ・オブザーバ：少ないセンサーで構造物の全体挙動把握

✓ 地震応答制御技術

- ・デジタル技術・センサー技術の活用，ロバストなシステム
- ・フィードバック・フィードフォワード（外乱に応じた制御）
- ・最適制御（応答制御優先，消費エネルギー優先）等



43

■ 長寿命化・高耐久構造

➤ 社会資本整備において高耐久構造が前提

今後は戦略的に徹底的に良いもの

（特に，高耐久性，維持管理に手をかけなくてよいもの）
を選択して建設する方向（H29新道示の方向性）

➤ どういう構造・技術になるのか？

例えば，

- ・支承なし，伸縮装置なし
- ・品質の優れたコンクリート（工場生産プレキャスト部材）
- ・長寿命鋼材・塗り替え不要鋼材
- ・センサー系，AI系と連動可能な構造
- ・点検が容易，補修が可能
- ・災害に強く，発見しやすいもの，直しやすいもの，
- ・既設構造物の延命・長寿命化技術
- ・機能停止の影響が小さい更新技術

44

