

地震リスクと復旧日数の最小化に基づく RC橋梁システムの耐震補強水準の決定

須田 郁慧¹・熊崎 達郎²・西山 聡一郎¹・塩田 啓介³・櫻井 有哉³
・萩原 健一⁴・秋山 充良⁵

¹学生会員 早稲田大学大学院 創造理工学研究科建設工学専攻（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

²正会員 修(工) (株)大林組技術研究所（〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640）

³正会員 修(工) JFEシビル（株）（〒111-0051 東京都台東区蔵前2-17-4）

⁴正会員 JFEシビル（株）（〒111-0051 東京都台東区蔵前2-17-4）

⁵正会員 博(工) 早稲田大学教授 創造理工学部社会環境工学科（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

1. はじめに

既存橋梁の耐震補強が進められている。例えば、緊急輸送道路にあるRC橋脚に関しては、せん断破壊や軸方向鉄筋の段落とし部の損傷を防ぐ耐震補強は完了しつつある¹⁾。一方で、仮にせん断破壊や段落し部の損傷を防いだとしても、補強後のRC橋脚は、現行基準を満足する橋脚に比べて地震時保有耐力が十分ではなく、第二段階目の耐震補強を必要とする場合がある¹⁾。さらに、緊急輸送道路にない橋梁については、耐震補強が未着手の橋梁も多数存在している。耐震補強のために用いることができる予算の制約を勘案すれば、各橋梁が準じた設計規準、部材の破壊モードや重要度、損傷の復旧に要する時間、あるいは、橋梁が置かれる位置の地震ハザードの強弱などに基づいて必要となる耐震補強レベルを検討する必要がある²⁾。

本研究では、地震リスクと復旧日数を考慮した最適補強設計フローを提示し、これを南海トラフ地震の影響を受ける地域にある既存橋梁に適用した。そして、地震リスクと期待復旧日数を最小化できる耐震補強設計例を提示した。

2. 既存RC橋梁システムの最適補強設計フロー

提案する最適補強設計フローを図-1に示す。はじめに、解析対象とする既存橋梁が置かれる地域の地震ハザードを評価する。本研究では、南海トラフの

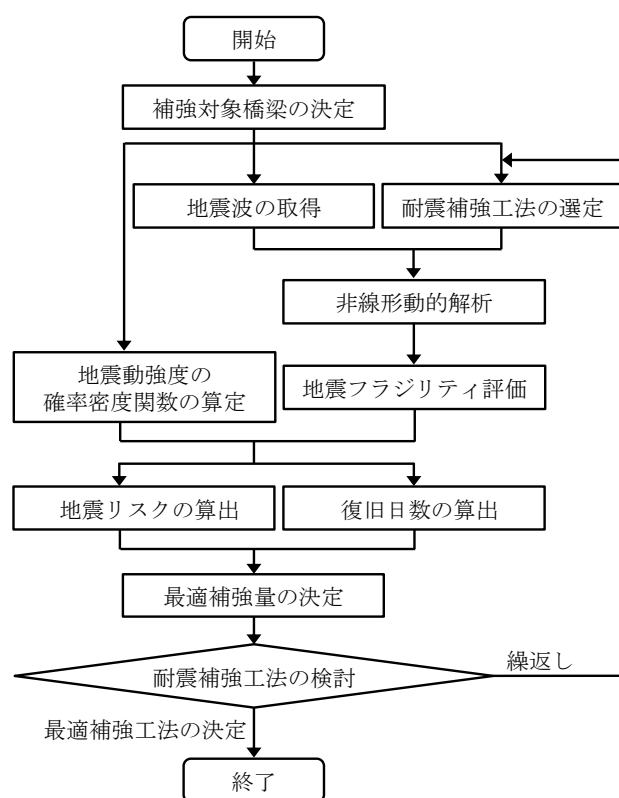


図-1 最適補強設計フロー

生起を前提に、橋梁位置で生じる各地震動強度 I の発生確率を評価する。次に、候補となる耐震補強工法を選定する。地震フラジリティ解析では、庄司ら³⁾の検討を基に、非線形動的解析により得られたRC橋脚と杭基礎の応答値から表-1に従い損傷度 DS_i をA～Dに分類し、フラジリティ曲線を作成した。

表-1 各損傷度における復旧コストと復旧日数

損傷度		D	C	B	A
RC橋脚	塑性率	～2.0	2.0～4.0	4.0～6.0	6.0～
	復旧コスト(万円)	0	100	800	4000
	復旧日数(日)	0	3	21	77
杭基礎	塑性率	～0.9	0.9～1.5	1.5～3.5	3.5～
	復旧コスト(万円)	0	250	1700	2200
	復旧日数(日)	0	2	40	54

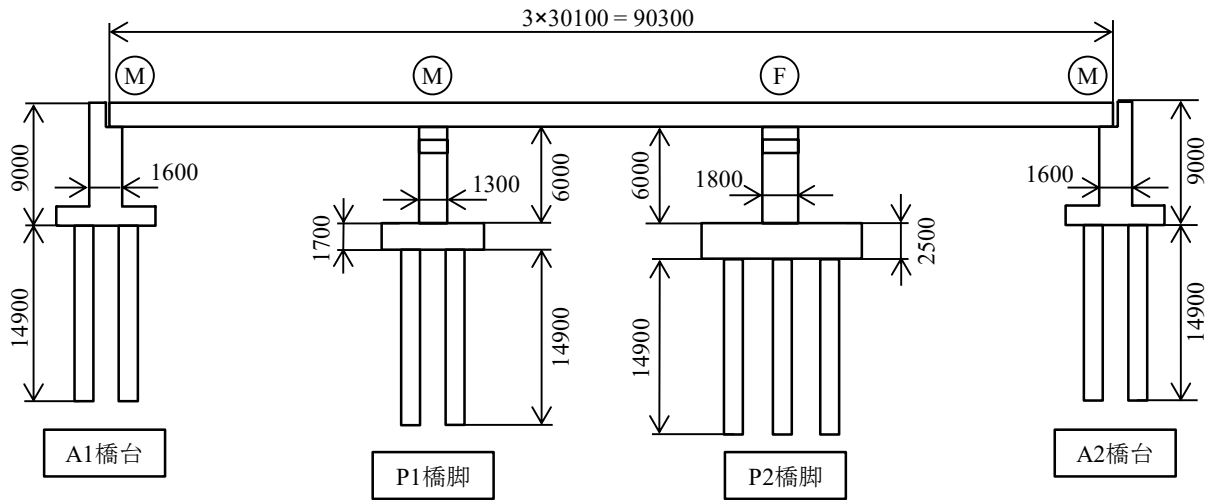


図-2 検討対象橋梁

最終的には、式(1)に示されるように、地震 fragility 曲線 $P(DS_i = ds_i | I = \gamma)$ と検討地点における地震動強度の確率密度関数 $f_I(\gamma)$ を全ての γ に対して掛け合わせることで、橋梁の各部材が損傷度 DS_i となる確率 $P_f(i)$ を算定できる。

$$P_f(i) = \int_0^\infty \{P(DS_I = ds_i | \Gamma = \gamma) \cdot f_\Gamma(\gamma)\} d\gamma \quad (1)$$

地震リスク R および復旧日数の期待値 D は、以下の式(2)および式(3)により求められる。

$$R = \sum_{i=1}^N P_f(i) \cdot C_f(i) + C_R \quad (2)$$

$$D = \sum_{i=1}^N P_f(i) \cdot D_f(i) \quad (3)$$

ここに、 $C_f(i)$ および $D_f(i)$ は着目する部材の損傷度 DS_f が ds_i となる場合の復旧コストおよび復旧日数、 C_R は着目した部材の耐震補強にかかるコストである。

この2つの指標を比較検討し、最小化を試みることで最適な耐震補強量を決定する。具体的には、候補とした耐震補強工法を適用した橋梁に以上のフローを繰り返し適用し、各工法により得られる地震リ

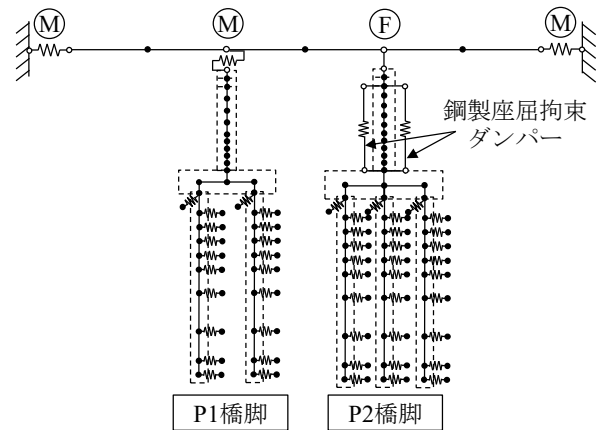


図-3 動的解析モデル

スクの低減効果と期待復旧日数を比較することで最適な耐震補強工法が同定される。

3. 解析対象橋梁と想定する耐震補強工法およびその動的解析モデル

図-2に検討対象橋梁，図-3に動的解析モデルを示す。想定するシナリオ地震は南海トラフ地震である。

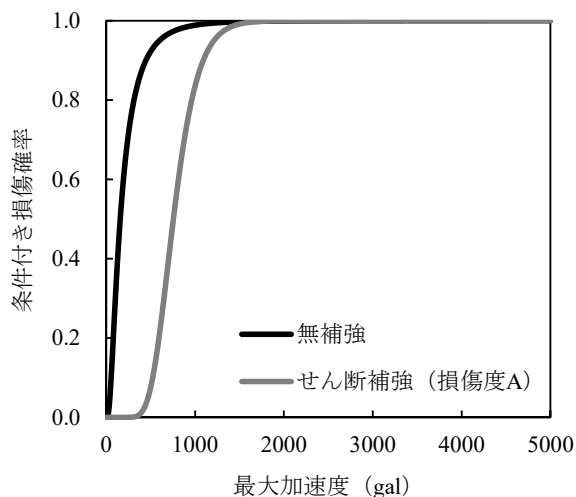


図-4 P2 橋脚フラジリティ曲線(無補強, せん断補強)

解析対象地点は、三重県尾鷲市と高知県黒潮町とした。黒潮町は、南海トラフ地震により生じる強震動がより大きいと予想されている都市である。検討対象橋梁は、昭和55年道路橋示方書以前に設計されたモデル橋梁⁴⁾を参考に橋脚の断面を決定した3径間連続鋼4主鈑桁橋であり、P2橋脚はせん断破壊先行型である。非線形動的解析を実施するにあたり、橋脚梁部およびフーチング部は線形梁要素、橋脚柱部および杭体は非線形梁要素とした。なお、橋脚柱部および杭体の非線形履歴特性は曲げモーメントー曲率関係でモデル化し、その履歴則はTakedaモデルとした。また、本検討の範囲では、橋脚に先行して杭の塑性化が生じないように杭基礎と橋脚には耐力格差を設けている。地盤種別はII種である。

本研究で想定した耐震補強工法は、せん断補強として鋼板巻立て、また、曲げ・靱性補強として鋼製座屈拘束ダンパーを脚柱とフーチング間に設置する案⁹⁾を採用した。

入力地震動には、参考文献6)が公開している基本ケースのうち、解析対象都市（三重県尾鷲市・高知県黒潮町）の中心位置約30km四方の領域の想定地震動を用いる。各地震動は、地震動強度（最大加速度） I を有するように、振幅調整する。

4. 地震フラジリティ曲線

三重県尾鷲市に位置する検討対象橋梁における各部材ごとの地震フラジリティ曲線について考察する。せん断補強したP2橋脚（損傷度A）と無補強状態のP2橋脚（損傷度A）のフラジリティ曲線の比較を図-4に示す。ここで、せん断破壊は脆性的な破壊モードであるため、橋脚が無補強状態でせん断破壊する

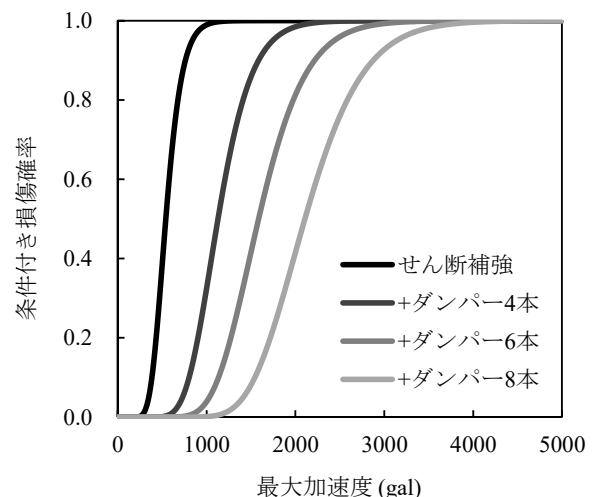


図-5 P2 橋脚フラジリティ曲線(せん断補強, 曲げ・靱性補強)

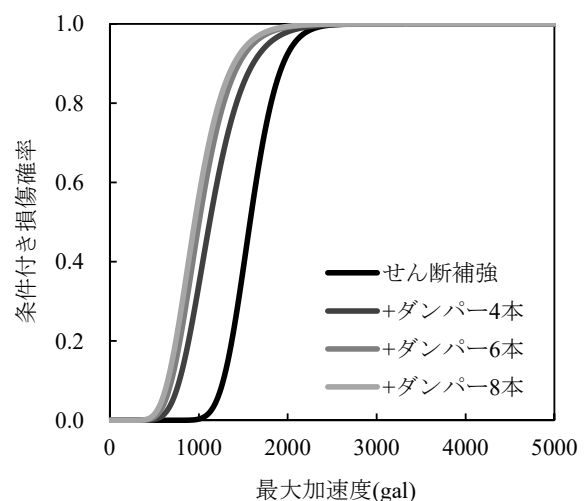


図-6 P2 杭基礎フラジリティ曲線(せん断補強, 曲げ・靱性補強)

場合は損傷度を無条件にAとしている。P2橋脚は曲げ降伏よりせん断破壊が先行するため、得られるフラジリティ曲線は一種類のみである。図-4から分かるように、せん断補強を実施することで損傷度Aに対するフラジリティ曲線が大きく右に移動している。つまり、せん断補強を実施することで損傷度Aに対する損傷確率が減少するといえる。

ダンパーによる曲げ補強の効果を確認するため、せん断補強のみ実施したP2橋脚（損傷度B）とダンパーで補強した場合のP2橋脚（損傷度B）のフラジリティ曲線の比較を図-5に示す。図-5より、ダンパーの本数を増やすと橋脚の保有水平耐力が増加するため、橋脚の損傷度Bに対する損傷確率は減少することになる。

一方で、RC橋脚に取り付けるダンパーの数が増え、保有水平耐力が大きくなり、地震中に大きな慣性力が杭基礎に伝達されるようになる。図-6に

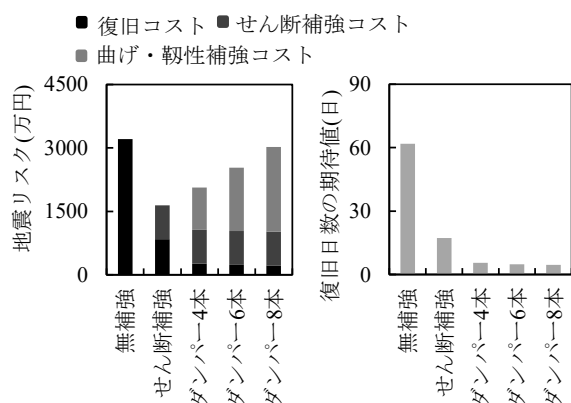


図-7 リスク評価(三重県尾鷲市：ハザード小)

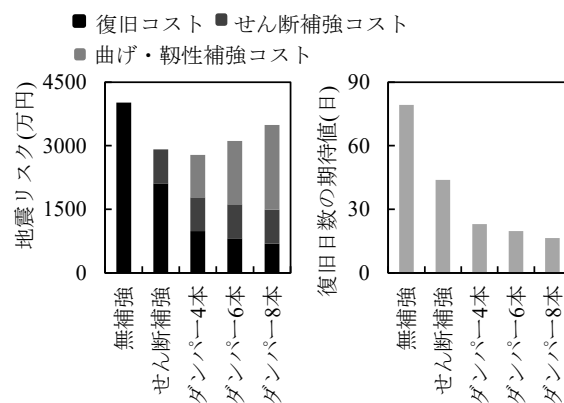


図-8 リスク評価(高知県黒潮町：ハザード大)

せん断補強のみとダンパーで補強した場合のP2杭基礎（損傷度B）のフラジリティ曲線の比較を示す。

図-6から、ダンパーの本数が増加するにつれて、杭基礎の損傷度Bに対する損傷確率も増加していくことが確認できる。RC橋脚の曲げ耐力を増加させる耐震補強を施すと、杭基礎が損傷し易くなるため、その違いがフラジリティ曲線に表れる。

5. 検討結果

三重県尾鷲市における地震リスクと復旧日数の検討結果を図-7に示す。図-7の地震リスクに注目すると、三重県尾鷲市に対象橋梁があると想定した場合、地震ハザードが弱いために少量の補強で地震リスクの改善が可能であることが示されている。地震リスク最小化の観点からは、せん断補強が最適補強工法として選択される。一方で、復旧日数の期待値に着目すると、曲げ・靱性補強を実施することで復旧日数のさらなる低減が可能である。例えば、早期の復旧が望まれる重要度の高い橋梁においては、せん断補強に加えてダンパー4本を用いた曲げ・靱性補強も補強案の候補となる。最終的には、地震リスクに加えて、復旧日数をどれほど重視するのかに応じて補強案を決定することになる。

次に、高知県黒潮町の地震リスクと復旧日数の検討結果を図-8に示す。黒潮町は地震ハザードが強い（大きな地震動強度 I が生じる確率が大い）ため、せん断補強のみでは不十分であり、ダンパー4本を用いた耐震補強工法が最も地震リスクを小さくできる結果となった。なお、ダンパーの本数を増やしても、復旧日数の大きな低減は見込めない結果となったことから、復旧日数の最小化の観点からも、せん断補強+ダンパー4本を用いた曲げ・靱性補強が最適な補強工法と言える。

6. まとめ

同じシナリオ地震（南海トラフ地震）を想定する場合であっても、地域により、予想される地震動強度には違いがあり、その地震ハザードに応じて最適な耐震補強工法を選択する必要がある。本研究では、この検討において、単に地震リスクの最小化を図るのみではなく、復旧日数も目的関数として加え、最適補強量の検討を行った。

参考文献

- 1) 張広鋒, 星隈順一, 堺淳一, 運上茂樹: 炭素繊維シートと鋼板を併用したRC橋脚の耐震補強工法とその効果, 土木学会論文集 A1, Vol.67, No.2, pp.430-445, 2011.
- 2) 佐藤忠信, 吉田郁政, 増本みどり, 金治英貞: ライフサイクルコストを考慮した道路橋の補強戦略, 土木学会論文集, No.784/IV-66, pp.125-138, 2005.
- 3) 庄司学, 藤野陽三, 阿部雅人: 高架道路橋システムにおける地震時損傷配分の最適化の試み, 土木学会論文集, No.563/I-39, pp.79-94, 1997.
- 4) 星隈順一, 堺淳一, 安藤滋芳, 岡田慎哉: 耐震補強として支承部に水平力分担構造を設置した橋の地震時挙動の評価に関する研究, 土木研究所資料第4265号, 2013.
- 5) 熊崎達郎, 竹中孔信, 秋山充良, 塩田啓介, 萩原健一, 櫻井有哉: 脚柱とフーチング間に座屈拘束ダンパーを設置した既存RC柱の耐震性能評価, 土木学会第70回年次学術講演会, pp.617-618, 2015.
- 6) 内閣府「南海トラフの巨大地震モデル検討会」: (第二次報告) 強震断層モデル編—強震断層モデルと震度分布について—, 2012.