

被災度と関連づけられた構造物の損傷確率を評価する 手法のRC橋梁への適用

中村 晋¹・秋山充良²・澤田純男³・安中正⁴・西岡勉⁵

¹正会員 工博 日本大学教授 工学部土木工学科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1)

²正会員 工博 東北大学助教授 大学院工学研究科 (〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉06)

³正会員 工博 京都大学教授 防災研究所 (〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

⁴正会員 理博 東電設計㈱ (〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

⁵正会員 工博 阪神高速道路公団 (〒541-0056 大阪市中央区久太郎町4-1-3)

1. はじめに

現在、レベル1地震動に対して構造物が地震時に保有すべき性能を明確にするため、設計体系の構築が試みられている¹⁾。その体系は、地域ごとの地震活動度を踏まえ、安全性は満足するという前提のもとで構造物の初期コストと地震時の修復コストや損傷に伴う損失コストなどの総和を最小にするという規範により、地震時使用性や修復性の照査を行うというものである。つまり、レベル1地震動の照査水準は構造物の地震時使用性や修復性などと定義し、その照査規範をコスト最小とするものである。その体系は、地震ハザード評価、構造物の被災度と関連づけられた損傷度特性の評価、さらに被災度に応じた補修・補強や、その社会的影響度に関する費用の評価の三つの評価で構成されている。この中で被災度とは、地震後に構造物の損傷に伴う撤去再構築、補強や補修などを行うための評価指標を表している。構造物の管理者が補修などのために実施する評価の指標である被災度と構造物の物理的な損傷の程度とを関係づけることが、その評価を実用的に意味のあるものとするために必要となる。

本論では、著者らが示した地震や地盤に応じた地震動の地点および震源依存性を考慮した実用的な構造物の被災度評価手法²⁾の適用事例を示す。その手法は、構造物の再構築や補修・補強が必要な被災状態に対応する限界状態をせん断や曲げなどの物理的な損傷量で表すことにより損傷度と被災度を関連づけ、地震ハザードと断層震源モデルにより算出された地震動とを組み合わせ作成した生起確率付きの

地震動強さに応じた基準地震動群を用い、地震動強さと被災度に応じた損傷確率との関係の評価を行うものである。この手法を、神戸地域における地盤条件の異なる2地点に位置すると想定した道路橋へ適用し、地震動強さと被災度に応じた損傷確率との関係の評価を行う。ここで、対象とした道路橋は杭基礎を有する単橋橋脚形式であり、橋脚の断面性能には米田³⁾らが昭和39年(以後S39橋)、平成2年(以後H2橋)および平成8年(以後H8橋)の道路橋示方書に基づいて試設計した3つの断面モデルを用いた。また、基準地震動、作用地震動という地震動表現はISO23469の定義に基づき用いている。

2. 被災度に対応する損傷確率の評価方法

(1) 損傷確率の定義

構造物に所要の被災度が発生する確率は、所要の被災度に対応する損傷状態の発生確率、つまり損傷確率により表すことができる。すると、その損傷確率は、モンテカルロシミュレーションにより、式(1)に示す応答が対象とする損傷が生じる状態となる場合、つまり状態方程式が負となる際の回数 $n(g \leq 0)$ と全シミュレーション回数 N の比として求めることができる。

$$P_f = \frac{n(g \leq 0)}{N} \quad (1)$$

ここで重要な点は、対象とする構造物系の損傷の程

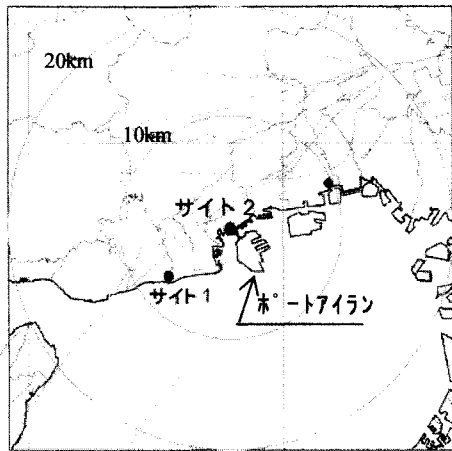


図-1 対象構造物の位置

度が構造物系の再構築，および補修・補強の程度を表す被災度と関連づけられているということにある。さらに，その被災度は，構造的な性能のみならず，構造物の建設地点における地盤特性やその地点に影響を及ぼす地震動の特性に依存していることも適切に考慮されることが必要となる。

(2) 被災度と関連する損傷状態の定義

橋梁の損傷は，損傷の程度や，復旧や補強などの要，不要により複数のクラスに分類されている。道路震災対策便覧⁴⁾による被災度ランクによれば，撤去再構築，補強や補修の必要な損傷のランクは，As, A または B の3つである。ここで，As および A は「倒壊したもの，損傷変形が著しく大きいもの，亀裂，座屈，鉄筋の破断などの損傷，または変形が大きいもの」，B は「鉄筋に一部の破断やはらみだしおよび部分的なかぶりコンクリートの剥離やきれつがみられるもの」と定義されている。地震後の橋梁の損傷に伴う撤去再構築，補強や補修などの評価は，橋梁の機能喪失のみならず，供用時の安全性という視点で実施される。また，その評価は，目視可能であるとともに，複雑な損傷過程の支配要因となる損傷部位の一つである橋脚の損傷度に基づいて行われている。一方，地震による橋梁の被災度の推定は，一般に橋脚の応答，例えば応答塑性率などに基づいて求められている。しかし，それら指標は各被災度ランクの定義を物理的に表す指標となっていないため，被災度が適切に評価されない可能性がある。

ここで，橋梁の機能喪失は，損傷によりそれをもたらす構造部位のうち重要な部位の一つである橋脚を対象とし，被災度と関連づけた橋脚の物理的な損傷度を表す限界状態に基づいて評価を行う。撤去再構築の必要なランク As, A, 補強や補修の必要な損傷のランク B の損傷度は，以下に示す限界状態より定義する。ここで，被災度 As, A クラスの残留変位

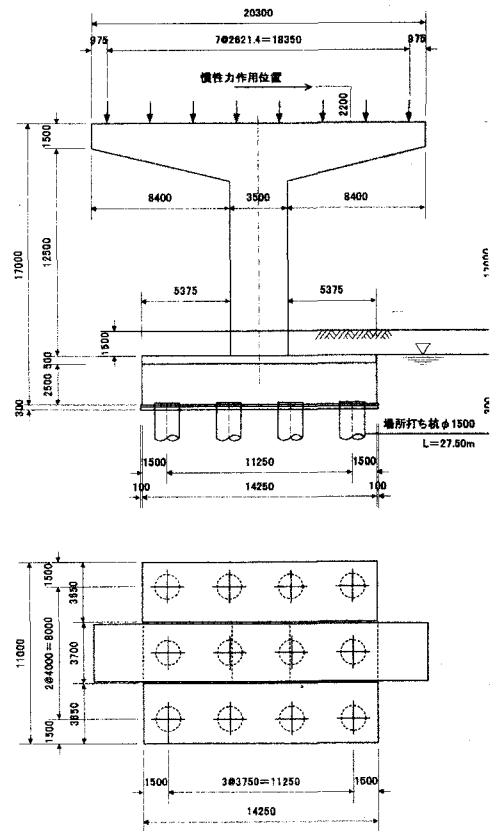


図-2 対象橋脚-基礎系の構造

は道路橋示方書で示された橋脚の残留変形角の限界値1/60を用い，被災度Bクラスの曲げ破壊は終局変位を限界値とした。

<被災度ランク As, A>

残留変位，せん断破壊の照査

<被災度ランク B>

曲げ破壊による照査(H8 橋)

曲げ降伏後のせん断破壊の照査(H8橋前)。

3. 検討対象構造物と地盤のモデル

(1) 検討橋脚と地盤構造・特性

ここで，検討の対象とする構造物は一般的な高架形式の都市内高速道路橋である。また，対象とする道路橋は図-1に示す2つの位置にあると想定する。その道路橋は，図-2に示すRCの単柱式の橋脚を有する高架橋であり，長さ27.4mの場所打ち杭（杭径1.5m）を12本有する杭基礎を基礎形式とする構造である。基礎の特性は検討の対象とする地盤特性によらず同一であると仮定する。

対象とする2つの位置のうち，硬質な地盤を有する位置をサイト1，軟弱な地盤を有する位置をサイ

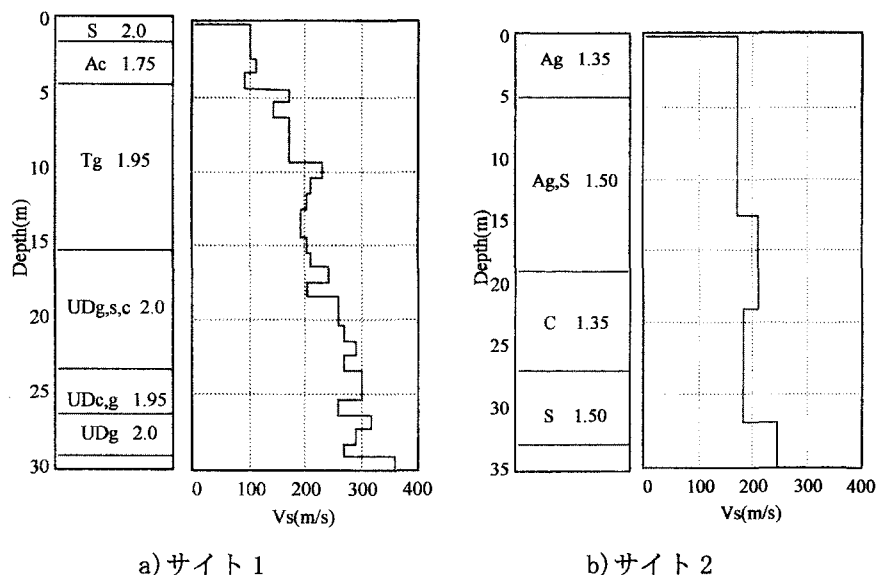


図-3 サイト1, 2の地盤構造およびせん断波速度構造(図中の土質中の数字は質量密度: t/m^3)

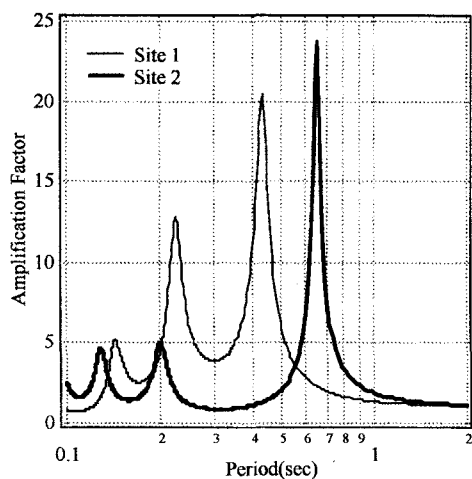


図-4 両サイトの周波数応答関数

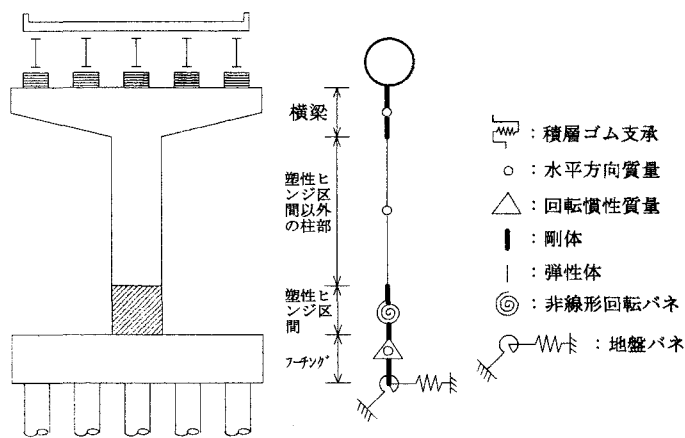


図-5 橋脚-基礎-地盤系の解析モデル

ト2とする。図-3に両地点の土質およびせん断波速度構造を示す。サイト1におけるGL-9.35m以深の層は、洪積の砂、粘土および砂礫の互層構造であり、せん断波速度200m/s程度以上となっている。また、サイト2は埋め立て地盤であり、GL-19m以深に海成粘土が厚く堆積している。両サイト地盤構造に基づき、算出した周波数応答関数の比較を図-4に示す。これより、サイト1、サイト2における1次固有周期は、それぞれ0.64秒、0.42秒であることが分かる。

(2) 地盤—構造物系のモデル

図-5に橋脚-基礎-地盤系の解析モデルを示す。基礎-地盤間の動的相互作用には簡易モデルであるSRモデルを用い、杭基礎は損傷しないと仮定した。

橋脚の断面性能は、既往の耐震設計規準を満足するように試設計³⁾のRC橋脚の断面性能を用いる。その断面性能は、昭和39年、昭和46年、平成2年、お

よび平成8年の道路橋示方書に準拠している。想定された地盤種別はII種地盤である。各橋脚の断面図を図-6に示す。参考文献³⁾に詳述されていない断面諸量(かぶり厚さ等)は、文献に明示される曲げおよびせん断耐力が整合するように、その諸量を決定した。地盤-構造系の非線形動的解析では、RC橋脚の端部要素にて非線形を考慮する。その要素の非線形履歴モデルには、Takedaモデル⁵⁾を用いた。

前項で示した2つの地盤モデルと組み合わせると、両サイトともS39橋の1次固有周期は約0.99秒、S46橋は約0.87秒、H2橋は約0.84秒、そしてH8橋は約0.63秒である。なお、S46橋とH2橋は、得られる荷重-変位関係に大差なく、以降では、S39橋、H2橋、およびH8橋を解析対象とする。

(3) 不確実性のモデル化

橋脚を構成するRC部材の耐力に関する不確実性は、既往の実験結果の回帰分析により得られたその耐力

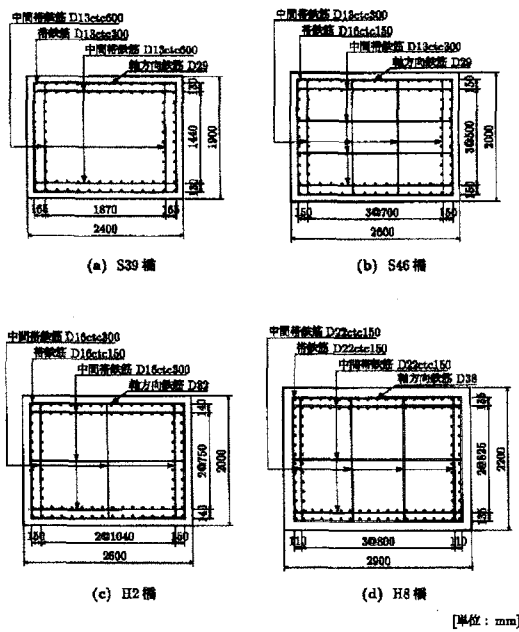


図-6 解析対象RC橋脚の断面図
(上下方向が橋軸方向に相当)

や変形性能評価式と精度((実験値)/(計算値)の平均、変動係数など)に基づいて設定する。また、地震応答に関する不確実性には、解析に用いる部材の復元力特性のばらつきを考慮し、応答解析法自体の精度の不確実性は考慮しない。部材の復元力特性として初期剛性、降伏強度および終局強度はコンクリート強度および鉄筋強度のばらつきとして考慮する

地盤特性の不確実性は、サイト1のみ考慮し、非線形モデルの基本パラメータであるせん断波速度のばらつきとして考慮する。また、強度定数は、本来不確定量として取り扱うべき量であるが、ここでは動的変形特性を非線形モデルとして用いているため、直接考慮しないこととする。他の地盤定数のうち、単位体積重量は一般にばらつきが小さいことから、ここでは確定量として扱う

5. 地震作用の特性

(1) 基準地震動

ここで、基準地震動は、対象位置に影響を及ぼす地震断層により、断層破壊過程の不確実性の影響を考慮し香川の方法⁶⁾により算出した解放基盤上($V_s=300\text{m/s}$ 相当地盤)での複合波とする。その際、図-1に示した2地点に影響を及ぼす内陸の活断層として、有馬-高槻構造線、中央構造線、大阪湾断層、六甲断層、上町断層、山崎断層の6つ、さらに、海溝型地震として、中央防災会議⁷⁾の断層面を参照し、東南海地震域と南海地震域にそれぞれ2枚の断層面

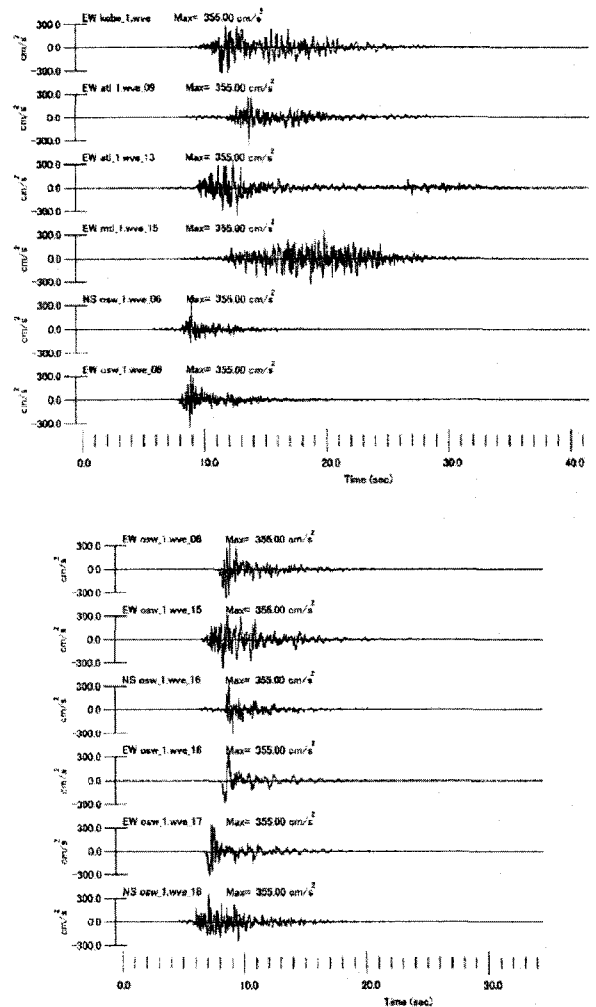


図-7 所要の年超過確率を与える最大加速度で基準化された基準地震動の例(最大加速度 355cm/s^2)

を考慮した。内陸の活断層の地震規模 M は7.1から7.7程度であり、海溝型地震の地震規模は東南海地震が8.1前後と南海地震が8.4前後となっている。断層の破壊過程の不確実性を考慮し、144の基準地震動を算出した。

次に、安中ら⁸⁾による最大加速度の距離減衰式を用い、両サイトで基準地震動の最大加速度に関する地震ハザードを算出した。地震ハザードは、対数軸上での一目盛り、例えば 0.1m/s^2 から 1.0m/s^2 区間を10等分割となるように設定した最大加速度(0.56m/s^2 から 35.46m/s^2 まで19個)について算出した。最大加速度毎に先に得られた144波より20波の地震動を抽出し、地震動の最大加速度をその値に基準化した。抽出された最大加速度毎の地震ハザードが保有する生起確率が付与された地震動群(以後、生起確率付き地震動群と呼ぶ)を基準地震動として用いる。生起確率付きの地震動群の一例を図-7に示す。最大加速度は同じでも、震源位置や震源の破壊過程

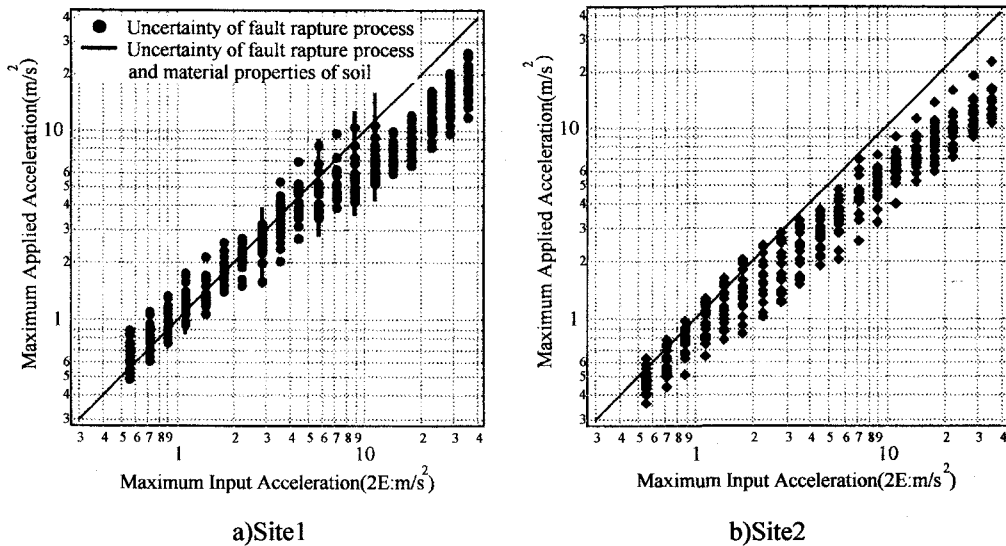


図-8 基準地震動の最大加速度と作用地震動の最大加速度の関係

の差異により波形形状が波毎に異なることが分かる。

(2) 地震作用

橋脚-基礎-地盤モデルへ作用する地震動には、構造物周辺地盤の非線形性を考慮した1次元地震応答解析により得られる構造物位置の応答加速度時刻歴を用いた。地盤の非線形地震応答解析には、手法に応じた推定誤差が既知⁹⁾である1次元非線形応答解析法¹⁰⁾を用いる。両サイトにおける地層構造は層厚1.0m程度を基本に地層分割を実施した。各層の地盤材料の非線形性として、沖積層の砂質土、粘性土、洪積層の砂質土、粘性土および砂礫層は拘束圧依存性を考慮した動的変形特性モデル¹¹⁾を用いた。

また、サイト1については、確定地盤モデルに加え、基準地震動の最大加速度が112, 281, 562, 891, 1122m/s²の5区間について地盤物性の不確定性の影響を考慮する。

各最大加速度について20波の地震動を用いた確定地盤モデルの地震応答解析により得られた作用地震動の最大応答加速度と基準地震動の最大加速度の関係を図-8に示す。図には、地盤物性のばらつきを考慮して算出した作用地震動の最大加速度の分布も合わせて棒線を示す。硬質地盤であるサイト1の方がサイト2より、最大加速度の増幅度が大きいことが分かる。特に、サイト2では基準地震動の最大加速度が3.0m/s²より大きくなると、作用地震動の最大値は基準地震動より小さな値となっている。これは、サイト2における基礎下のせん断波速度がサイト1に比べ小さく、地盤材料の非線形化の影響が現れたものと考えられる。また、地盤物性のばらつきの影響は、基準地震動の最大加速度の大きな891,

1122m/s²にて若干認められるが、作用地震動のばらつきは基準地震動のばらつきと同程度となっている。

5. 被災度に応じた損傷確率およびリスク特性

対象橋脚の被災度に応じた損傷確率と基準地震動の最大加速度の関係を以下に示す。動的解析は、最大加速度毎に、20波の作用地震動と材料強度や耐力のばらつきによる復元力特性のばらつきを考慮した構造モデルとをランダムに組み合わせて作成した1000個のデータに対して実施した。

(1) 地震動および構造性能の不確定性の影響

3つのRC橋梁モデルについて、サイト1における被災度A, Bに対する3つの限界状態個々の損傷確率、および被災度B以上の損傷確率を図-9に示す。ここで、被災度B以上の損傷確率とは、被災度B以上の損傷が生じる限界状態のうちいずれかが生じた場合の損傷確率であり、限界状態個別の損傷確率とは異なっている。また、この結果は、地震動および構造性能の不確定性を考慮した結果であり、地盤物性の不確定性の影響は含まれていない。S39橋では、基盤位置での最大加速度が5.0m/s²程度で既に損傷確率が1.0に近い値となるのに対し、H8橋では、40.0m/s²近い地震動の作用に対しても損傷確率は0.4程度である。また、H2橋では、最大加速度が4.0m/s²前後にて、曲げ耐力に達する限界状態の被災度Bのみならず被災度Aのせん断破壊も生じている。このことは、曲げ耐力に達するときの作用せん断力とせん断耐力の比較を行い、せん断破壊型

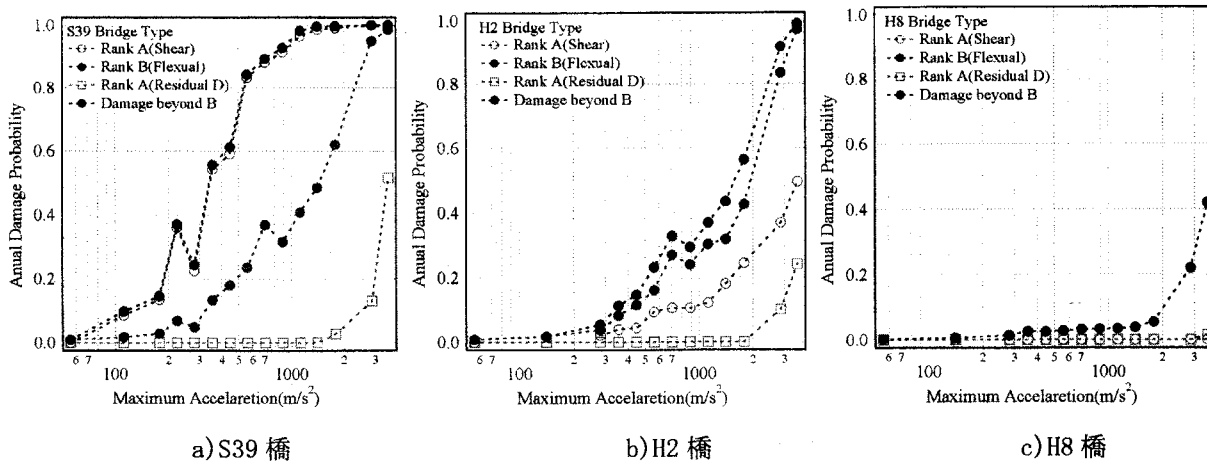


図-9 サイト1における被災度に応じた損傷度特性

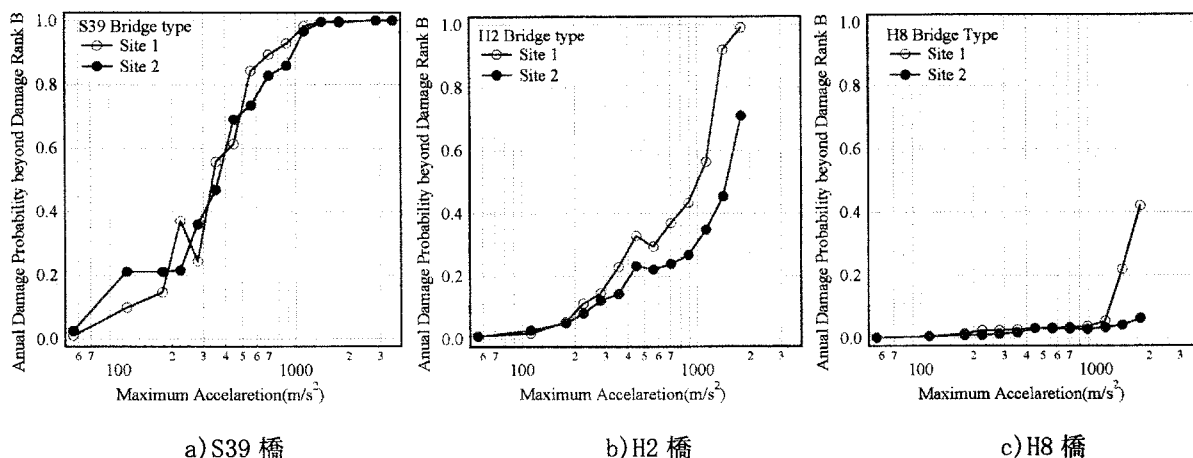


図-10 サイト1および2における被災度B以上となる損傷度特性の比較

や曲げ破壊型と判定されていたとしても、種々の不確実性を考慮することにより、設計時の想定と異なる破壊モードを示す可能性があることを示している。さらに、個別の限界状態ではなく被災度 B 以上の損傷が生じる限界状態に着目すると、S39 橋は主にその限界状態を被災度 A のせん断破壊とし、H2 橋は被災度 B の曲げ耐力に達する状態のみならず被災度 A のせん断破壊の影響も認められる。さらに、H8 橋では、主にその限界状態が被災度 B の曲げ耐力に達する状態となっている。このことは、今後、基礎や支承も含めた全体構造系を対象に同様の検討を行う際、このような被災度としての評価が個別の限界状態の評価に加えて重要となってくる。なお、本解析では、せん断破壊は単にせん断耐力と作用せん断力の差から比較しているため、せん断耐力を超過するせん断力が作用した後に、曲げ耐力に達した場合でも、その応答解析結果は、変形性能に対する照査から求められる限界状態超過確率に寄与すると判断している。

次に、サイトの差異が被災度に応じた損傷確率に及ぼす影響を把握するため、被災度 B 以上となる両サイトの損傷確率の比較を図-10 に示す。これより、

S39 橋には、顕著な地点毎の差異が認められないものの H2 橋には顕著な差異が認められる。この差異は、基準地震動に対する作用地震動の特性が両サイトにて異なる最大加速度 $4.0m/s^2$ 前後で現れており、地盤特性の差異の影響といえる。S39 橋では、損傷確率が最大加速度 $4.0m/s^2$ 前後で既に 0.6 程度と大きな値となっており、地盤特性の影響が現れる前に損傷が生じていることが分かる。さらに、H8 橋では $10.0m/s^2$ を超える大きな加速度レベルにて、地盤の比較的硬質なサイト 1 の損傷確率が大きくなっている。サイト 2 ではサイト 1 に比べ地盤が軟質であるため、地盤材料の非線形性により、地震動の増幅率が小さく、作用地震動がサイト 1 に比べて小さいため、被災度の差異が現れたものと考えられる。これも、サイトに応じた地盤特性の影響と考えられる。

最後に、被災度 B 以上となる損傷に着目し、被災度 B 以上となるリスク特性を図-11 に示す。これより、被災度 B 以上の生じる可能性は、地点によらず、S39 橋から H8 橋と基準が新しくなるにつれ、大きく改善されていることが分かる。S39 橋は、最大加速度が 1.0 から $3.0m/s^2$ 、H2 橋は最大加速度が 3.0 から $4.0m/s^2$ にてリスクがピークとなり、リスクの

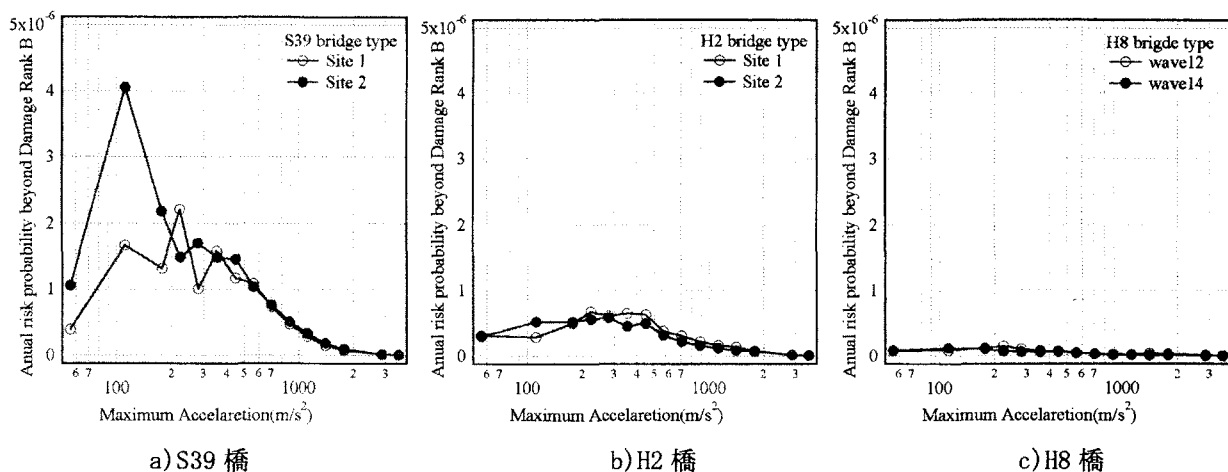


図-11 サイト1および2における被災度がB以上となるリスク特性の比較

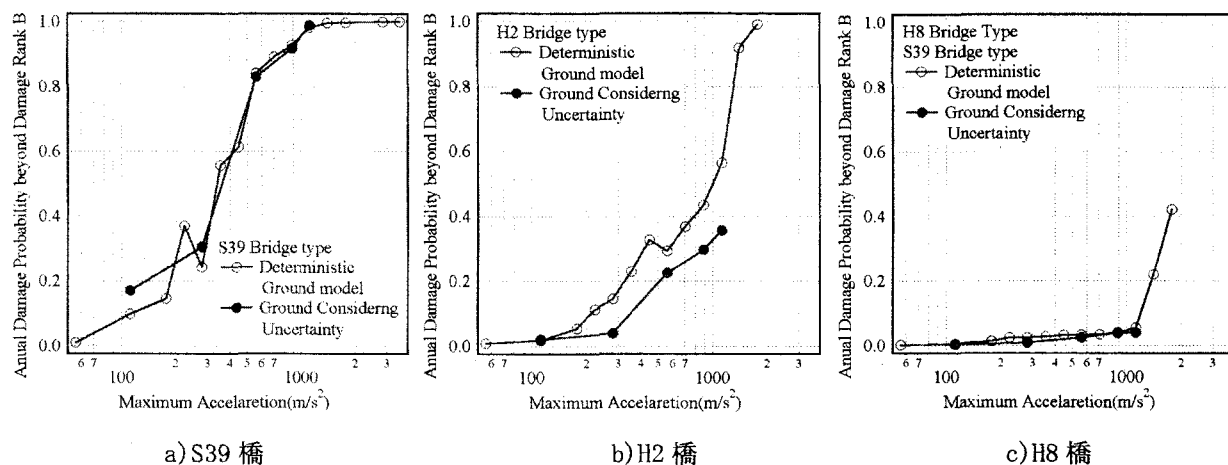


図-12 サイト1における被災度がB以上となる損傷度特性に及ぼす地盤媒質の不確実性の比較

ピークを与える最大加速度は、基準を改定した年度の新しいH2橋が若干大きくなっている。しかし、H8橋は、各最大加速度に対するリスクが 2×10^{-7} 程度以下と他の基準改定年代のリスクに比べ小さく、最大加速度が 30.0 m/s^2 以下で明確なピークを示していない

(2) 地盤物性、地震動および構造性能の不確実性の影響

被災度B以上となる損傷確率について、図-10に示した地震動および構造性能の不確実性を考慮したケースと、それに地盤物性の不確実性を考慮したケースとの比較を図-12に示す。これより、S39橋およびH8橋の被災度B以上となる損傷確率には、地盤物性の不確実性を考慮した場合と考慮していない場合との差異がみられない。しかし、H2橋については、両者の被災度B以上となる損傷確率に差異が認められ、それを考慮した場合の損傷確率は、考慮しない場合に比べ、最大加速度が 3.0 m/s^2 以上で小さな値となっている。一般に、地盤物性の不確実性を考慮することにより、地盤中に強度を平均特性より小さ

く評価する層が存在し、その非線形応答の影響により、加速度応答を小さく評価する傾向が見られる¹²⁾。このことから、地盤物性の不確実性を考慮した作用地震動の最大加速度の平均値は、それを考慮しない場合に比べ小さいと考える。すると、地盤材料の非線形化の影響が現れる最大加速度 3.0 m/s^2 近傍にて損傷確率の大きくなるH2橋では、顕著にその影響が現れたものと推定される。これらのことは、被災度に応じた損傷確率に及ぼす地盤物性の不確実性の影響は、地盤の非線形性の影響が現れる加速度レベルと構造物の損傷が現れる加速度レベルとの関係に依存していることを示していると考えられる。

6. あとがき

本論では、著者らが提案した構造物の被災度と対応する損傷確率を実用的に評価する手法を道路橋に適用した事例を示した。対象とした構造物は、道路橋示方書の昭和39年、平成2年および平成8年における改訂年度別に試設計された3つの橋脚断面を有す

る杭基礎形式のRC橋梁である、事例に基づく評価により、提案した手法は、RC橋梁の損傷状態に応じた被災度の損傷確率の算定までの流れの実効性を有していることが示された。さらに、以下のことが明らかとなった。

- (1) 構造物の耐力や復元力特性、さらに種々の不確実性に応じ、設計時にせん断破壊型や曲げ破壊型と判定されていたとしても、設計時の想定と異なる破壊モードが生じる可能性がある。
- (2) 被災度に応じた損傷確率は、サイト毎の基準地震動に対し、作用地震動の地盤特性に応じた増幅特性の差異に起因して異なる。その差異は、地盤のせん断波速度の大小などの地盤特性の差異に応じた地盤材料の非線形性の影響によって生じている。
- (3) 被災度に応じた損傷確率は、それと関連する幾つかの損傷状態のうち単一の損傷状態による被災度の損傷確率と必ずしも等しくならない場合もあり、関連するすべての損傷状態に対する損傷確率を評価することが望まれる。
- (4) 対象地点におけるRC橋梁は、S39橋、H2橋およびH8橋とその改訂年代が新しくなるにつれ、被災度がB以上となる最大加速度毎の1年当たりのリスク特性が、小さくなっている。特に、H8橋は、他の年代に比べ、1年当たりのリスク特性が著しく小さな値となっている。また、リスクの値が大きくなる最大加速度は、S39橋とH2橋で、1.0から3.0m/s²、3.0から4.0m/s²と大きくなっているものの、その差異は小さい。

ここで得られる損傷状態に応じた被災度の損傷確率の特性は、対象構造物固有の地点および震源依存の特性であり、ある地域全体での同種構造物の損傷度また損傷度曲線とは異なるものである。また、損傷確率の評価に際して、損傷確率の大小と最大加速度の大小に整合性が取れていない結果が一部で含まれている。構造物の応答解析により得られた極端な値の影響を強く受けた結果であり、基準地震動の数や、Monte Carlo法による試行回数とあわせて今後の課題であるといえる。

謝辞：本論は(社)土木学会地震工学委員会内に設けられた耐震基準小委員会経済性WG(主査：澤田純男・京都大学)・損傷評価Gの活動の一部を報告するものである。議論や意見をいただいた委員各位(西村昭彦、前川宏一、佐藤尚次、長尾毅、室野剛隆、鈴木誠、矢部正明、江尻譲嗣、酒井久和、石川裕、

香川敬生；敬称略、順不同)、さらに本活動の委託者である阪神高速道路公団に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 耐震基準小委員会編. 土木構造物の耐震性能設計における新しいレベル1の考え方, (社)土木学会地震工学委員会, 2003, <http://www.jsce.or.jp/committee/eec2/taishin/Level1.html>
- 2) 中村晋, 秋山充良, 澤田純男, 安中正, 西岡勉, 土木構造物の被災度と関連づけられた損傷確率の評価手法に関する一考察, 応用力学論文集, Vol. 8, pp. 823-831, 2005. 9
- 3) 米田慶太, 川島一彦, 庄司学, 藤田義人: 試設計に基づく耐震技術基準の改訂に伴うRC橋脚およびくい基礎の耐震性向上度に関する検討, 構造工学論文集, Vol. 45A, pp. 751-762, 1999
- 4) (社)日本道路協会, 道路震災対策便覧(震災復旧編), 2002
- 5) Takeda, T., Sozen, M. A., Nielsen, N. M., Reinforced concrete response to simulated earthquake, J. of Structural Division, Proc. ASCE, Vol. 96, No. ST12, pp. 2557-2573, 1970
- 6) 香川敬生, ハイブリット合成法に用いる統計的グリーン関数法の長周期帯への拡張, 日本地震工学会論文集, 第4巻, 第2号, pp. 21-32, 2004
- 7) 中央防災会議, 「東南海・南海地震に関する専門調査会」, <http://www.bousai.go.jp/JISIN/chubou/nankai/16/sankousiryou>
- 8) 安中正, 山崎文雄, 片平冬樹, 気象庁87型胸神経記録を用いた最大地動および応答スペクトル推定式の提案, 第24回地震工学研究発表会論文集, pp. 161-164, 1997
- 9) 中村晋, 吉田望, 周波数領域での地盤の非線形地震応答解析の精度と課題, 応用力学論文集, Vol. 7, pp. 823-831, 2004. 8
- 10) 中村晋, 吉田望, 周波数領域での地盤材料の動的変形特性に基づく地盤の非線形地震応答解析法の提案, 土木学会論文集, Vol. 722/III-61, pp. 169-188, 2002
- 11) 建設省土木研究所, 地盤地震時応答特性の数値解析法-SHAKE:DESRA-, 土研資料第1778号, 1982
- 12) 中村晋, 秋山充良, 澤田純男, 地盤材料の不確実性を考慮したSRモデルへの作用地震動の評価手法について, 第40回地盤工学研究発表会講演概要集, 2005