

論文 相関を考慮した信頼性理論に基づく RC 橋脚の地震時安全性評価法に関する研究

松中亮治*¹・山崎康紀*²・秋山充良*³・鈴木基行*⁴

要旨：信頼性理論に基づき、地震荷重を受ける構造物の複数の限界状態と不確定要因である耐力や外力の構造変数間の相関を考慮して破壊確率を算定する方法を提案した。これを基に、複数の限界状態式間の相関ばかりでなく、相関分析により算出した限界状態式内の構造変数間の相関が RC 橋脚の安全性に及ぼす影響を検討し、耐震設計上考慮すべき点について考察を加えた。

キーワード：信頼性、安全性指標、相関、RC 橋脚、耐震、限界状態式、耐力比

1. はじめに

信頼性設計は、限界状態を設定し様々な不確定要因に対し、限界状態を越える確率（以下、破壊確率と略）を算定し、その確率をある許容範囲内に納めるように設計を行う方法である。そして、信頼性設計は確率論に基づいており、その中で用いられる確率変数は一般に相関を有する。

しかし、今まで研究されてきた信頼性理論を用いた構造物の安全性の検討では、構造変数を互いに独立な量として、確率変数間の相関関係は、ほとんど考慮されていなかったのが現状である。実際には、コンクリートの各種強度のように、互いに相関関係を有しているものもあり、確率変数間の相関を考慮することが、より厳密な安全性評価へとつながっていくものと思われる。

そこで、本研究では、著者等により提案された安全性評価¹⁾で考慮した限界状態式間の相関関係に、さらに、それらの限界状態式内の構造変数間の相関を考慮して、より厳密な RC 橋脚の地震時安全性評価を行った。そして、不確定要因の相関を考慮することにより、信頼性理論に基づいた RC 構造に対する新しい耐震設計法の概念を提示した。

2. 不確定要因間の相関

本研究では、構造変数間の相関を考慮した RC 橋脚の安全性評価を行うため、構造変数間の相関を把握する必要がある。そのため、まず RC 橋脚の耐力や変形能に関する限界状態式に含まれている構造変数間の相関を調べた。

3.3 で述べる RC 橋脚の各種限界状態式に含まれている構造変数は、終局曲げ耐力 (M_u)、帯鉄筋以外によるせん断耐力 (V_c)、帯鉄筋によるせん断耐力 (V_s)、軸圧縮力 (N)、釣合破壊時の軸圧縮力 (N_B)、降伏変位 (δ_y)、地震時作用慣性力の最大値 (P_{max})、および地震時応答変位の最大値 (δ_{max}) である。

これらの構造変数間の相関を求めるに当り文献 2)～6) に示されている 11 種の橋脚についてそれぞれ構造変数を算定した。耐力項 (M_u , V_c , V_s , N , N_B , δ_y) は静的弾塑性解析を行い、外力項 (P_{max} , δ_{max}) は地震応答解析を行って算定した。地震応答解析においては、宮城県沖地震や日本海中部地震等の海洋型の地震波と兵庫県南部地震の直下型の地震波の両者を、道路橋示方書⁷⁾に示されているように、スペクトルを調整した波として入力した。

構造変数間の相関は、計算が簡便で相関係数が大きいと精度が良くなる相関分析を用いて算定し、その結果を表-1に示した。これより、入力

*1 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*2 東北大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (正会員)

*3 東北大学助手 大学院工学研究科土木工学専攻, 工修 (正会員)

*4 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻, 工博 (正会員)

表-1 構造変数間の相関係数

変数	相関係数	変数	相関係数
M_u-V_c	0.95	δ_y-N_B	0.55
M_u-N_B	0.93	$M_u-P_{\max}$	0.94
V_c-N_B	0.94	$V_s-P_{\max}$	0.74
M_u-V_s	0.60	$V_c-P_{\max}$	0.90
V_s-N_B	0.50	$N-P_{\max}$	0.83
$N-M_u$	0.77	$\delta_y-P_{\max}$	0.30
$N-V_s$	0.57	$M_u-\delta_{\max}$	0.94
$N-V_c$	0.65	$V_s-\delta_{\max}$	0.74
$N-N_B$	0.72	$V_c-\delta_{\max}$	0.90
δ_y-M_u	0.30	$N-\delta_{\max}$	0.83
δ_y-V_s	0.0027	$N_B-\delta_{\max}$	0.83
δ_y-V_c	0.36	$\delta_y-\delta_{\max}$	0.30
δ_y-N	0.49	V_c-V_s	-

地震波によって生じる外力項($P_{\max}$, $\delta_{\max}$)と、耐力項(M_u , V_c , V_s , N , N_B , δ_y)の間では高い相関を示すことが分かった。そして、この表の値のうち、相関係数 0.80 以下のものは、その 2 つの構造変数間には相関がほとんどないと判断して、これらは考慮しないこととした。また、 V_c-V_s の相関も考慮しなかった。これは、3.2 で示す変形能算定式が、 V_s/M_u と V_c/M_u を独立なものとして作られているためである。

3. RC 橋脚の耐震安全性解析法

3.1 概説

ここでは、文献 1) で提案した評価法に限界状態式内の構造変数間の相関を考慮して、RC 橋脚の地震時安全性評価を行った。そして、その照査項目として耐力および変形能を取り上げた。

3.2 解析対象 RC 橋脚の地震応答解析モデルとその耐力および変形能

橋脚と地盤の解析対象系を図-1のようにモデル化し、動的解析を行った。橋脚と上部構造については 1 質点系モデルとし、橋脚躯体の非線形履歴特性を考慮した。その非線形モデルとしては、Degrading Tri-Linear モデルを用いた。また、構造物と地盤の動的相互作用には、動的相

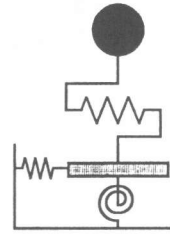


図-1 解析対象モデル

相互作用小委員会の提案⁸⁾を基に、原田らの地盤バネの非線形バイリニア復元力モデル⁹⁾を用いて基礎周辺地盤の非線形性を考慮した。地震応答計算には、Newmark の β 法に基づく増分法を用いた。そして、この動的解析を実施し、限界状態式の中の外力項である作用慣性力および応答変位を算定した。

また、対象橋脚は、1 質点系に置き換えることが可能なものを引用した。対象地盤には東北新幹線地質図から II 種地盤を選定し、宮城県沖地震で観測された地震波を入力地震波として用い、重複反射理論により基礎底面での波を選定した。

耐力項である曲げ耐力は、部材の終局点を静的弾塑性解析により算定した。また、せん断耐力は、帯鉄筋によるせん断耐力算定式は土木学会コンクリート標準示方書の式¹⁰⁾を、帯鉄筋以外によるせん断耐力算定式および変形能の算定式は土木学会靱性評価 WG により提案された式¹¹⁾を用いた。

3.3 限界状態式の設定

曲げ耐力とせん断耐力に対する限界状態式をそれぞれ式(1)、式(2)のように設定した。ここで、曲げによる限界状態に関しては変位により生じる 2 次モーメントも考慮した。また、変形能に関する限界状態式は式(3)のように設定した。

$$g_1 = \alpha_1 M_u - (P_{\max} a + N \delta_{\max}) \quad (1)$$

$$g_2 = \alpha_2 (V_c + V_s) - P_{\max} \quad (2)$$

$$g_3 = \alpha_3 \left[\frac{N}{N_B} + \left(1 - \frac{N}{N_B} \right) \left\{ 12 \left(\frac{0.5 V_c + V_s}{M_u / a} \right) - 3 \right\} \right] - \frac{\delta_{\max}}{\delta_y} \quad (3)$$

ここに、 M_u ：終局曲げ耐力、 V_c ：帯鉄筋以外によるせん断耐力、 V_s ：帯鉄筋によるせん断耐力、 $P_{\max}$ ：地震時作用慣性力の最大値、 $\delta_{\max}$ ：地震時応答変位の最大値、 a ：せん断スパン、 N ：軸圧縮力、 N_B ：釣合破壊時の軸圧縮力、 δ_y ：降伏変位（定義は「軸方向鉄筋に作用している引張力の合力位置が降伏する時の荷重に対する変位」）、 α_1 、 α_2 、 α_3 ：曲げ耐力算定式、せん断耐力算定式、靱性率評価式の持つばらつきを考慮する補正係数。なお、 α_1 、 α_2 、 α_3 の平均は共に1.0、変動係数はそれぞれ10、20、40%とした。

4. 不確定要因の相関を考慮した RC 橋脚の耐震安全性評価

4.1 概説

各限界状態式内の構造変数間の相関を考慮した文献1)に従い、RC 橋脚の地震時安全性評価を行った。

解析対象橋脚として、せん断耐力と曲げ耐力の比（以下、耐力比と略）1.32を有する曲げ破壊先行型の橋脚を採用した。

まず表-1に示した相関関係を考慮して安全性評価を行った。その結果、安全性に大きな影響を及ぼした構造変数間の相関は、 M_u-V_c と M_u-N_B であった。 M_u-V_c の相関は、断面寸法やコンクリート強度等確率変数間の相関から生じるものである。また、 M_u-N_B の相関は、鉄筋コンクリート柱においては高い相関関係が認められている。その他の構造変数間の相関は、それらを考慮しても安全性にほとんど影響を与えなかった。ここで、 M_u-V_c と M_u-N_B に相関がある場合、 V_c-N_B にも相関関係があるため、帯鉄筋以外によるせん断耐力 V_c と釣合破壊時の軸圧縮力 N_B の相関も考慮して、以下に示すRC 橋脚の安全性評価を行った。

4.2 解析対象 RC 橋脚の安全性評価

地震波を、選定した地盤モデルの基盤面に最大入力加速度を拡大・縮小して入力し、構造変数間の相関関係を踏まえて、その最大入力加速度の大きさ毎にRC 橋脚の安全性評価を行った。そして、曲げ耐力、せん断耐力、および変形能

に対するそれぞれの安全性指標 β と、これら3つの限界状態を同時に考慮したときのRC 橋脚の安全性指標（以下、RC 橋脚の安全性と略） β を導いた。

図-2には相関を全く考慮しない場合を、そして、図-3には M_u-V_c 、 M_u-N_B 、 V_c-N_B の3つの構造変数間の相関関係を同時に考慮した場合のRC 橋脚の安全性、曲げ耐力、せん断耐力、および変形能に対する安全性をそれぞれ示した。

この2つの図から、RC 橋脚の安全性は、構造変数間の相関を考慮すると、相関を全く考慮しない場合に比べて上昇している。この原因として、変形能に対する安全性が上昇したことが挙げられる。また、ここで用いている M_u-V_c 、 M_u-N_B 、 V_c-N_B の3つの相関関係は、3.3で示している変形能に対する限界状態式にのみ含まれており、曲げ耐力とせん断耐力に対する限界状態式には含まれていない。このため、曲げ耐力とせん断耐力に対する安全性は、相関の有無に関わらず変化していない。

そこで、変形能に対する安全性について検討する。図-2と図-3から、相関を考慮した場合、考慮しない場合に比べ、変形能に対する安全性が急激に上昇しているが、これは、長¹²⁾が限界状態を構成している構造変数を多く含んでいる場合や、構造変数の偏微分係数が異符号で相関係数が非常に高い場合、安全性指標 β の値は高くなると述べている。本研究で用いた変形能に対する限界状態式には複数の構造変数が含まれており、中でも M_u 、 V_c 、 N_B の3つの構造変数が分母・分子の位置関係にあり、さらに表-1に示したように、 M_u-V_c 、 M_u-N_B 、 V_c-N_B の3つの相関係数が高い。このため、これら3つの相関関係を考慮することによって、変形能に対する安全性が急激に上昇したものと思われる。

また、解析対象としたRC 橋脚の安全性は、最大入力加速度が300 gal以上の範囲では、相関を考慮することにより、曲げ耐力に対する安全性がより支配的になることが分かる。しかし、相関を全く考慮しない場合には、変形能によっても影響を受ける可能性もあり、それに伴ってRC 橋脚全体の安全性も減少している。これは

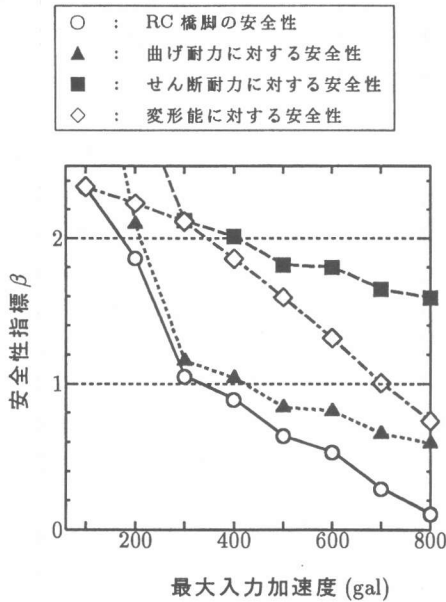


図-2 相関を考慮しない場合の安全性指標

相関を考慮しない場合、ある一つの限界状態のみでRC橋脚全体の安全性を検討することができず、安全側の設計となり、不経済となることがあることを意味している。これより、耐力比1.32を有する橋脚においては相関を考慮することで、曲げ耐力に対する安全性のみでRC橋脚全体の安全性を評価することができるとと思われる。RC橋脚の支配的な限界状態を決定づけるのは、構造物の保有する耐力比が大きく影響していると思われる。

4.3 モデルの不確かさがRC橋脚の安全性に及ぼす影響

4.2でも述べたが、本研究では、変形能に対する限界状態式内でのみ構造変数間の相関を考慮している。ここで、設定した靱性率評価式に対する補正係数 α_3 の変動係数、つまりばらつきの程度40%を変化させ、ばらつきの程度がRC橋脚全体の安全性にどの程度の影響を与えるかを検討した。

そこで、 α_3 のばらつきを、設定した40%から50%に変更した。そして、 M_u-V_c 、 M_u-N_B 、 V_c-N_B の3つの相関を同時に考慮した場合の最大入力加速度と、曲げ耐力、せん断耐力、およ

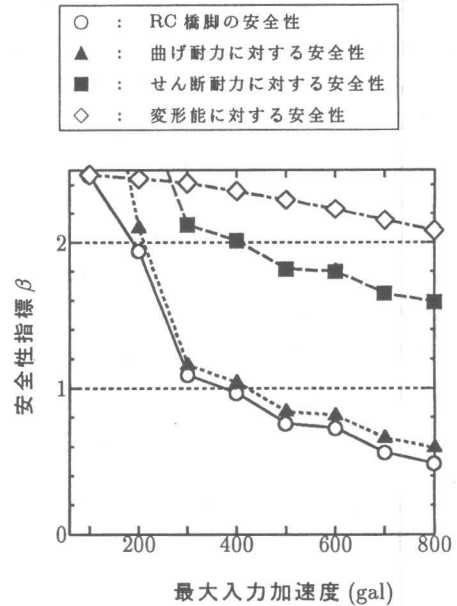


図-3 相関を考慮した場合の安全性指標

び変形能に対するそれぞれの安全性指標 β とRC橋脚の安全性指標 β の関係を調べ、その結果を図-4に示した。この図には α_3 の変動係数が40%の時のRC橋脚の安全性指標 β と変形能に対する安全性指標 β の値も併せて示した。また、曲げ耐力とせん断耐力に対する安全性は α_3 の変動係数を変化させても全く変わらなかった。

この図から、 α_3 の変動係数が40%から50%に変わると、変形能に対する安全性が大きく減少している。しかし、 α_3 の変動係数が40%と50%におけるRC橋脚の安全性には、ほとんど変化がなかった。これは、ここで用いた橋脚が相関を考慮したことにより既に、RC橋脚全体の安全性が曲げ耐力に対する安全性で支配されているためである。

従って、設定した α_3 の変動係数を変更しても、RC橋脚全体の安全性にはほとんど影響がないと思われる。また、耐力比1.32を有する曲げ破壊先行型のRC橋脚のように、曲げ耐力が卓越している場合には、靱性率評価式の持つばらつきにより安全性に影響を与えることはほとんどないことが分かった。

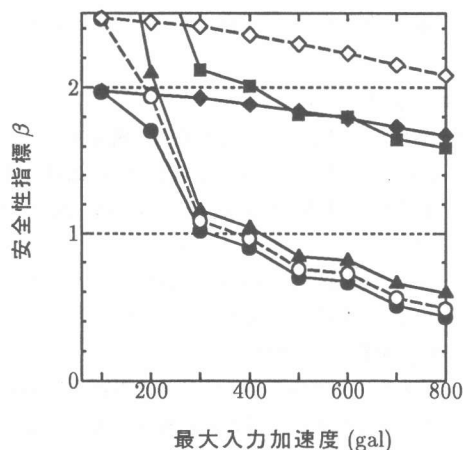
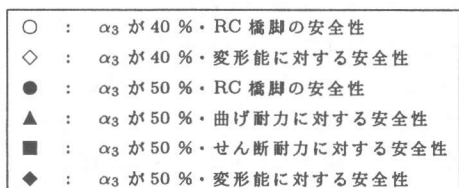


図-4 α_3 の変動係数を 50 % に設定

4.4 耐力比が RC 橋脚の安全性に及ぼす影響

RC 橋脚の軸方向鉄筋量や帯鉄筋量を変化させることにより、 M_u-V_c 、 M_u-N_B 、 V_c-N_B の 3 つの相関を考慮した場合と考慮しない場合で、耐力比が RC 橋脚の安全性に及ぼす影響について検討した。

ここでは、耐力比 1.32 を有する曲げ破壊先行型の RC 橋脚の主鉄筋量に対して、まず、帯鉄筋量一定のもとで軸方向鉄筋量を 20 % ずつ上昇させ、曲げ耐力を大きくし、耐力比を小さくさせた。次に、軸方向鉄筋量一定のもとで帯鉄筋量を 25 % ずつ上昇させ、せん断耐力を大きくし、耐力比を大きくした。そして、地震波を地盤モデルの基盤面に 800 gal に拡大して入力した。耐力比と RC 橋脚の安全性指標 β の関係を図-5 に示す。なお、曲げ耐力とせん断耐力に対する安全性は、相関の有無によっては変化しなかった。

この図から、3 つの構造変数間の相関関係を同時に考慮することにより、RC 橋脚の安全性

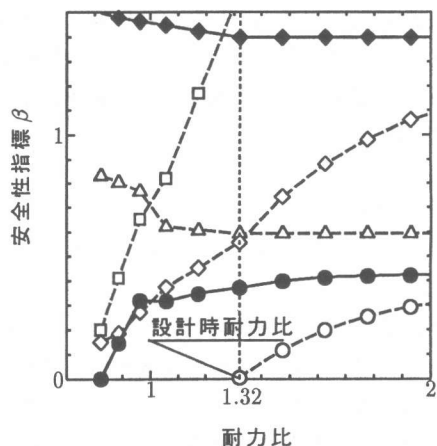
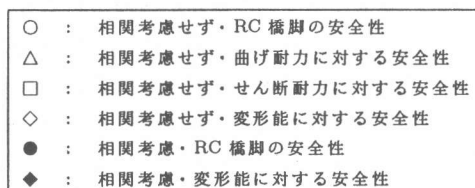


図-5 耐力比と安全性指標の関係

が全体的に上昇した。そして、耐力比が設計時耐力比 1.32 から 1.4 以上になると、RC 橋脚の安全性はほぼ一定になり、曲げ耐力に対する安全性に徐々に近づいている。しかし、その開きは安全性指標 β で約 0.2 程度であるが、これを破壊確率 P_f に換算すると、 β が 0.4 のとき P_f は約 0.66、 β が 0.6 のとき P_f は約 0.73 となり、その差は約 7 % 程度であることが分かった。

そして、この図から、相関を考慮することにより、耐力比が 1 付近から下がるにつれて RC 橋脚の安全性が極端に低下する。これは、石橋等¹³⁾が実験により、耐力比が 0.9 ぐらいで曲げ降伏し、その後せん断破壊をしたことにより、耐力比が 0.9 未満であればせん断破壊先行型、0.9 以上であれば曲げ破壊先行型と定めているが、この図でも、耐力比 1 付近を境にして、この傾向を裏付ける結果となった。さらに、耐力比が 1 よりも少し大きいところでは、変形能が支配的な限界状態となっている。このように帯鉄筋量等で決まる耐力比の各値で支配的な限界状態を推測できる。

また、限界状態式内の構造変数間の相関を考慮していない文献¹⁾では、耐力比1.7以上でRC橋脚の安全性が曲げ耐力に対する安全性に収束しているが、相関を考慮したこの図では収束していない。しかし、RC橋脚の安全性と曲げ耐力の安全性の破壊確率での誤差約7%が近似できる許容範囲であれば、相関を考慮することにより、設計時耐力比1.32以上でRC橋脚の安全性が曲げ耐力に対する安全性に近似できるものと思われる。

5. 結論

本研究により得られた主な結果は次の通りである。

- (1) 計算が簡便な相関分析を用いて、設定した各限界状態式内の構造変数間の相関関係を算定した。その結果、コンクリート強度や断面寸法などの影響を受けたいくつかの耐力項同士の相関や、耐力項と外力項の相関は高い値を示した。
- (2) 各限界状態式内の構造変数間の相関を考慮したRC橋脚の地震時安全性評価を行った。その結果、耐力比1.32を有するRC橋脚の安全性は、相関の影響を受けた変形能に対する安全性の影響により上昇し、曲げ耐力の安全性照査で代表させることができた。
- (3) 靱性率評価式に対する補正係数の変動係数を変更することで、その変動係数がRC橋脚の安全性へ与える影響を調べた。その結果、設定値を変更することでRC橋脚全体の安全性はほとんど変化せず、耐力比が1.32である場合、靱性率評価式の精度が安全性に影響を与えることがないことが分かった。
- (4) 橋脚の主鉄筋量を変化させ様々な耐力比に対して、相関を考慮することによって、その耐力比が安全性へ与える影響を検討した。その結果、曲げ耐力のおよそ1.3倍の耐力比を与えることで橋脚の安全性を高めることができた。また、耐力比1付近での破壊形態を確認することができた。

本研究から、不確定要因の相関を考慮することによりRC橋脚の安全性が上昇することが分かった。これは、今までの相関を考慮しない設計法が過剰な設計であるとも言える。また、不確定要因の相関が安全性に大きな影響を与えることが確認されたので、これを合理的に取り入れて設計することが重要であると思われる。

参考文献

- 1) 鈴木基行・秋山充良・山崎康紀：構造系の安全性評価法およびRC橋脚の耐震設計への適用に関する研究，土木学会論文集，No.578/V-37，pp.71-87，1997.11
- 2) 日本道路協会：「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に関わる仕様」の準用に関する参考資料（案），1995.6.
- 3) 兵庫県南部地震道路橋震災対策委員会：兵庫県南部地震における道路橋の震災に関する調査，平成7年3月
- 4) 日本国有鉄道仙台新幹線工事局：'78宮城県沖地震特集号，せんかんこう，1979.12
- 5) 建設省土木研究所：平成5年釧路沖地震被害報告，土木研究所報告，第193号，平成6年1月
- 6) 建設省土木研究所：平成5年北海道南西沖地震被害報告，土木研究所報告，第194号，平成6年7月
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，平成8年12月
- 8) 土木学会 耐震工学委員会 動的相互作用小委員会：基礎・地盤・構造物系の動的相互作用，1992.9.
- 9) 原田典彦・広瀬利光・山田清朗：基礎の動的線形復元力評価におけるウィンクラーモデルの適用，宮崎大学工学部研究報告，第34号，pp.17～25，1988.6.
- 10) 土木学会：コンクリート標準示方書〔耐震設計編〕，1996
- 11) 土木学会：阪神淡路大震災被害分析と靱性率評価式，コンクリート技術シリーズNo.12，1996.8.
- 12) 長尚：確率変数間の相関が安全性に及ぼす影響，構造工学論文集，Vol.33A，pp.735-742，1987.3.
- 13) 石橋忠良・吉野伸一：鉄筋コンクリート橋脚の地震時変形性能に関する研究，土木学会論文集，第390号，pp.57-66，1988.2