耐震設計に用いる地震動強度に関する一考察

On seismic force for the design of structures considering the seismic risk management

北海学園大学大学院	○学生員	阿部淳一 (Junichi Abe)
北海学園大学工学部	正 員	杉本博之 (Hiroyuki Sugimoto)
北武コンサルタント(株)	正 員	渡邊忠朋 (Tadatomo Watanabe)

1. まえがき

道路橋や鉄道橋のためのわが国の耐震設計規準¹¹は, 発生する確率は高いが強度の低いレベル1地震動と,発 生する確率は低いが強度の高いレベル2地震動による, 2段階照査を行うこととしている.またレベル2地震動 は一般的に,兵庫県南部地震などで得られた強震記録を 基に波形を設定し照査が行われている.しかし,このよ うな地震動が全国統一的に発生することは考え難く,近 年では対象とする地域固有の地震波形を,過去の地震記 録や,地盤データなどを基として算定する研究が行われ ている.²⁾

このような地震動に対する新しい考え方は、波形の算 定だけではなく、構造物の評価方法にも応用される.例 えば伊藤ら³⁾は単柱 RC 橋脚を対象とし、広範囲の地震 動強度による損傷・崩壊の期待値(地震リスクコスト) を構造物の評価値とする研究を行っている.また佐藤ら 4)は実存の橋梁群を対象として地震リスクコストを算定 し、補強計画に応用を行っている. これらの地震リスク コストを算定している論文では、地震動の発生確率をあ らわすハザード曲線と、構造物の損傷確率を表す損傷度 曲線を用いて計算を行っている.^{3),4)}この損傷度曲線は, 過去の被災記録や解析による統計的な処理により算定さ れるが、構造物の損傷を頂部水平変位や塑性率などの一 つの指標で考慮しなければならない.損傷を一つの指標 で定義した場合、その指標と損傷に対応する補修とを詳 細に結びつけることは難しい. たとえば、ある地震動に 対して頂部水平変位が同一, つまり損傷度が同一である としても, 柱の基部が塑性化し変形した場合と, 柱と梁 が塑性化し変形した場合では補修は大きく異なる. さら に地中梁や杭基礎などが塑性化した場合などを考えると, 構造物の損傷を一つの指標で定義することは困難になる. そのため、従来の方法では簡単な構造物に対しての概略 的な検討を行うことしかできないと考えられる.

しかし,詳細な損傷の定義に基づき地震リスクを算定 し,広範囲の地震動強度を考慮し耐震設計を行えば,合 理的な設計を行うことが可能であると考えられる.つま り,低い設計地震強度で設計された構造物は,初期建設 コストは低いが,中程度の地震動でも補修が必要,ある いは崩壊に至るため地震リスクが高くなる.逆に高い設 計地震動強度で設計された構造物は,初期建設コストは 高いが地震リスクが低くなる.よって,初期建設コスト と地震リスクコストの和(トータルコスト)が最小とな る地震動強度が存在することになる.この地震動強度と 設計解が,対象とする構造物固有の最適な解になると考 えられる. さらに,前述した地域固有の地震波形とハザ ード曲線を用いれば,対象とする地域の地震発生確率, 対象とする地盤の地震動特性,対象とする構造物固有の 損傷度から,トータルコストが最小となる最適な解が得 られることになる. この手法は煩雑な作業が伴うが,得 られる解は公共構造物の地震リスク管理という観点から, 長大橋梁などのライフラインとしてより重要な構造物の 設計であるほど,必要性が高くなると考えられる.

しかし、このような解を算出するには、種々の地震動 強度に対する最適解をそれぞれ算定しなければならない. 1 つの地震動強度を対象としても、多次元設計空間内全 ての設計を解析することは不可能であり、試行錯誤的な 方法で求めた最小解では最適性は保証されない.また、 遺伝的アルゴリズム(以下,GA)に代表されるような 最適化手法を用いて計算回数を減らしたとしても、解析 には動的解析が求められるため、計算時間を考えれば現 実的ではない.

一方,筆者らはこれまで,動的解析を必要とする構造 物に最適化手法を応用するため,GA と RBF ネットワ ーク(以下,RBFN)を応用した最適耐震設計システム の提案を行ってきた.⁵この設計システムを用いれば, 任意の設計入力地震動を用いて最適解を算定することが できる.そこで本論文では,この最適耐震設計システム を応用し,地震リスクコストを考慮した最適な設計地震 動強度と設計解を算定する方法の提案を行う.さらに, 簡単な RC 構造物に対して提案する手法を適用し,いく つかのハザード曲線から,最適な地震動強度と設計解を 求める.

2. 最適設計地震動強度と地震リスクコスト

本研究では、広範囲の地震動強度による地震リスクコ ストを考慮し、対象とする地域や構造物に最適な地震動 強度と設計解を算定することを目的とする.ここでは、 最適な地震動強度の算定方法と、地震リスクコストの算 定方法について説明する.

(1) 最適地震動強度の算定

前述したように、広範囲の地震動強度を考慮して耐震 設計を行った場合、低い地震動強度で設計された構造物 は、初期建設コストは低いが地震リスクコストは高く、 逆に高い地震動強度で設計された構造物は、初期建設コ ストは高いが地震リスクコストは低い.この初期建設コ ストと地震リスクコストの和であるトータルコストと、 地震動強度の関係を算出すれば、最適な地震動強度と設 計解が得られる.以下に、最適な地震動強度と設計解を

平成18年度 土木学会北海道支部 論文報告集 第63号



図-1 トータルコストと設計地震動強度の関係

得るための詳細を示す.

1) 地震動強度範囲の設定(図-1参照)

最適な地震動強度と設計解を得るための地震動強度範囲を設定する.地震動強度分割幅△Sとし、地震動強度 分割数 N_sを算定する.

2) 設計地震動強度の設定

1) で設定した地震動強度範囲から,最適耐震設計の ための設計地震動強度 *S_i* (*i*=1~*N_S*) を設定する.

3) 最適耐震設計

地震動強度 S_i に対して最適耐震設計を行う.最適解の探索方法の詳細は、参考文献に示される.得られた最適設計解の初期建設コストを C_i^0 とする.

4) 地震リスクコストの算定

3) で得られた最適解に、1) で設定した地震動強度範囲に対し、地震リスクコスト C'_i を算定する. 地震リスクコストについての詳細は後述する. ある地震動強度 S_i に対する設計解の評価は、上記の C_i^0 と C'_i からトータルコスト C'_i として以下の式より算定する.

$$C_{i}^{t} = C_{i}^{0} + C_{i}^{r} \tag{1}$$

5) 最適地震動強度の算定

2)~4)の過程を N_s 回繰り返し,各地震動強度のトー タルコストが算定される.各 C'_i のうち,最小となるト ータルコスト C'_{min} を算定し,その地震動強度が最適地 震動強度となる.

このように、本研究では地震動強度 *S_i* に対する最適 設計解のトータルコスト *C^tmin* を算定し、図-1 に示す ような地震動強度とトータルコストの関係から最適な設 計地震動強度を決定する.各地震動強度の最適解の探索 には比較的煩雑な作業が伴うが、全て自動化された設計 システムを作成している ⁵⁾ ため、設計者の負担は少な いと考える.

また,式(1)より各地震動強度のトータルコストは, 初期建設コストと地震リスクコストの和から算定される. 一般的に地震リスクコストは,損傷度曲線とハザード曲 線を用いて算定されるが,前述したように損傷度曲線は 構造物の損傷を詳細に定義することができず,直接設計 に組み込むことができない.そこで本研究では,詳細に 構造物の損傷を計算するため,非線形性を考慮する全て の部材,箇所でそれぞれ損傷度を定義し,地震リスクコ ストを算定する.次に RC 構造物を対象とした損傷度の 定義と地震リスクコストの算定方法について示す.



表-1 損傷マトリクスの例

節点	地震動強度(gal)									
畨号	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
1	1	1	2	2	2	3	3	3	4	4
2	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
3	1	1	1	2	2	2	2	3	3	4
4	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
5	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2

(2) 損傷度の定義

本研究ではより詳細に構造物の損傷を算定するため、 非線形性を考慮する全ての部材、箇所でそれぞれ損傷度 を定義する.そのため、RC 部材のモデル化はコンクリ ート標準示方書⁶¹より、図-3 に示すトリリニアモデル の $M - \theta$ 関係を用いる.図中の My は降伏時の曲げモ ーメント、 M_m は最大曲げモーメント、 θ y は降伏時の 部材角、 θ_m は M_m を維持できる最大の部材角、 θ n は M_v を維持できる最大の部材角である.

損傷度は動的解析から得られる最大応答回転角に対し て、図-3の骨格曲線より、 θ_y 以下であれば損傷度 1、 θ_m 以下であれば損傷度 2、 θ_n 以下であれば損傷度 3、 θ_n を越えれば損傷度 4 と定義する.

(3) 損傷マトリクスの算定

地震リスクコストの算定には、ある地震動強度に対す る構造物の損傷度を判定し、地震損失コストを算定する 必要がある.前述したように、一般的には地震動強度と 構造物の損傷度の関係には損傷度曲線を用いるが、本研 究では構造物の損傷を詳細に定義するため、損傷マトリ クスを用いて考慮することとした.

表-1に RC ラーメン橋脚1基を対象とした,損傷マ トリクスの一例を示す. RC ラーメン橋脚の場合,非線 形性を考慮する塑性ヒンジが発生するのは,柱部材の上 下端部と梁部材の左右端部の計6箇所となる.表は行に 節点番号,列に地震動強度を示し,ある設計解に対し各 地震動強度を入力した場合の損傷度をマトリクス表記し たものである.この損傷マトリクスを,各地震動強度で 得られた最適解に対して,設定した範囲の地震動強度を 入力し算定することになる.

(4) 地震リスクコストの算定

上記に示した損傷マトリクスとハザード曲線を用いて 地震リスクコストの算定を行う.以下に地震リスクコストの算定式を示す.



図-3 構造モデル

$$C^{r}_{i} = \sum_{j=1}^{N_{s}} H(S_{j}) \cdot c_{ij} \cdot \Delta s \quad (i = 1 \sim N_{s})$$
⁽²⁾

ここで、 C_i は *i* 番目の地震動強度で設計した設計解の 地震リスクコスト、 $H(S_j)$ は *j* 番目の設計地震動強度 S_j に対するハザード曲線から算定される年超過確率、 c_{ij} は *i* 番目の地震動強度で設計した設計解において *j* 番目の 地震動強度の作用による損傷に対する地震損失コストで ある. c_{ij} は *i* 番目の地震動強度で設計した設計解の損傷 マトリクスから、 *j* 番目の設計地震動強度に対する各節 点の損傷度を求め、その損傷に対する補修コストから算 定を行う.

3. 数值計算例

ここでは、本論文が提案する手法を用いて数値計算を 行い、最適な地震動強度の算定を試みる.

(1) 対象構造物

本研究が対象としたのは、図-3 に示す RC 単柱橋脚 である. 非線形を考慮するのは柱基部とし、図-2 に示 したトリリニア型の骨格曲線でモデル化を行った. 基礎 は直接基礎とし、フーチングと梁部は剛とした. 使用材 料は、コンクリートは設計基準強度 24N/mm²、鉄筋は SD345 とした.

本研究では各地震動強度 S_iに対してそれぞれ最適耐 震設計を行う.この最適設計における目的関数は直接工 事費とし、コンクリートに関するコストと鉄筋に関する コストの総和とする.目的関数式を以下に示す.

$$OBJ = C^0{}_i = C^c + C^s \tag{3}$$

ここで、 C^{C} はコンクリートに関するコスト(unit)、 C^{S} は 鉄筋に関するコスト(unit)であり、材料費、足場工費、 人件費等を含む工事費用から換算した値である.⁷⁾

制約条件は,回転角に対する照査,せん断力に対する 照査とする.各制約条件式を以下に示す.

$$g^{r}_{jk} = \theta_{djk} / \theta_{mjk} - 1 \le 0 \quad (j = 1 \sim N_m)$$
(4)

$$g^{SD}_{jk} = V_{djk} / V_{rdjk} - 1 \le 0 \quad (j = 1 \sim N_m)$$
 (5)

ここで、 g_{jk}^{r} は回転角に関する制約条件、 g_{jk}^{SD} はせん断 力に関する制約条件である. θ_{djk} は部材 j の端部にお ける最大応答回転角、 θ_{mjk} は部材 j の端部の骨格曲線

表-2 設計地震動強度別の最適設計解

S_i	В	N	J	D	N _W	S_V	OBJ
50	1000	9	1	22	1	200	9209
100	1000	9	1	22	1	200	9209
150	1000	9	1	22	1	200	9209
200	1000	9	1	22	1	200	9209
250	1000	9	1	22	1	200	9209
300	1000	9	1	22	2	200	9578
350	1000	10	1	25	2	200	10021
400	1000	10	2	25	2	200	11096
450	1000	14	2	25	2	200	12323
500	1100	13	2	29	2	200	14670
550	1200	16	2	25	2	200	16596
600	1200	20	2	25	2	200	17823
650	2000	28	2	32	2	200	45798
700	2100	29	2	32	2	200	49614
750	2200	31	2	32	2	200	54069
800	2300	7	2	32	2	200	57240
850	2400	44	2	25	2	100	61184
900	2400	31	2	32	2	100	62244
950	2400	34	2	32	2	100	63687
1000	2500	36	2	32	1	100	68613

上の最大回転角, *V_{dik}* は部材 *j* の最大応答せん断力, *V_{rdik}* は部材 *j* のせん断耐力である.

設計の対象とするのは柱断面とし、正方形断面とした. 設計変数となるのは、断面幅 B (mm),軸方向鉄筋本数 N (本),軸方向鉄筋径 D (mm),軸方向鉄筋段数 J (段), せん断補強鉄筋組数 N_W (組),せん断補強鉄筋間隔 S_W (mm)の計 6 変数とした.設計空間は、B が 1000mm~ 2500mm まで 100mm 間隔、D が 22, 25, 29, 32mm, Jが 1 段または 2 段, N_W が 1 組または 2 組、 S_V は 100mm または 200mm とした.また軸方向鉄筋本数 N は、最小 の鉄筋配置間隔を $D \times 2.5$ 、最大の鉄筋配置間隔を 250mm とし、断面幅と鉄筋径に応じて得られる最大と 最小の鉄筋本数を 8 分割して設計変数とした.

動的解析,および地震リスクコスト算定に用いる入力 地震動は、参考文献⁶⁾よりレベル2地震動の内陸型地震 の加速度波形を基準とし、最大加速度に対して振幅調整 を行い、解析を試みた.地震リスクコスト算定のための 地震損失コストは、損傷マトリクスに対応する補修コス トとし、詳細は参考文献⁷⁾に示される.さらにハザード 曲線は参考文献⁸⁾より、フラクタイル表示された 0.84, 0.50、0.16 の3つのハザード曲線を用いた

(2) 計算結果

上述の最適設計問題の計算結果について示す.表-2 に各地震動強度で得られた最適設計解の設計変数と初期 建設コストを示す.最適設計解は,50gal~250galまで は同一の設計解となっている.これらは,設定した設計 空間内で最小の初期建設コストとなる設計解である. 250gal以降の初期建設コストは,地震動強度に比例して 増加しているが,600galの設計解と 650galの設計解で は初期建設コストは2倍程度となっている.これは,表 -2の設計変数からわかるように,600galでは断面幅が 1200mm で耐震性能を満足するのに対し,650galでは 2000mmの断面幅を必要としているためである.

次に、各地震動強度で得られた最適設計解の損傷マト リクスを表-3 に示す.表は行に設計地震動強度,列に 表-3 設計地震動強度別の損傷マトリクス



損傷マトリクス算定のための入力地震動強度とした.各 損傷度は橋軸方向,直角方向の最大値で表した.結果は, 設計地震動強度が 250gal から 450gal までは,設計地震 動強度よりも 50gal 強い地震動強度で終局に達している. また,表-2より初期建設コストが高くなった 650gal 以 降の設計解は,1000gal の地震動強度でも終局していな いことが確認できる.

得られた損傷マトリクスとハザード曲線から地震リ スクコストを算定し、地震動強度別のトータルコストの 比較を行う.図-4~6 にはハザード曲線別のトータル コストと地震動強度の関係を示す.図中の白抜きの箇所 が初期建設コスト、灰色の箇所が地震リスクコスト、矢 印はトータルコストが最小となる箇所である.図より最 適な地震動強度を算定すると、0.16フラクタイルハザー ド曲線では 300gal, 0.50 では 350gal, 0.84 では 450gal が最適な地震動強度となった.本研究では、ハザード曲 線、および入力地震動は、地域や地盤に固有のものでは ないため、最適地震動強度の絶対的な値の評価は行わな いが、地震発生確率の違いによって、最適な地震動強度 がそれぞれ異なることが本手法により確認された.

4. まとめ

低い地震動強度で設計された構造物は,初期建設コス トは低いが,地震リスクは高い.逆に高い地震動強度で 設計された構造物は,初期建設コストは高いが地震リス クは低い.よって,ある地震動強度では初期建設コスト と地震リスクが最も低い箇所が存在し,この地震動強度 で設計を行えば,合理的な設計が可能ではないか.この ような観点から,本研究では対象とする地域,地盤,構 造物固有の最適な設計地震動強度を算定することを目的 とし,算定のための手法の提案を行った.

提案した手法を RC 単柱橋脚に適用し,3 つの異なる ハザード曲線を用いて最適地震動強度を算定した.結果, 地震発生確率により,最適地震動強度はそれぞれ異なる ことが確認された.今後は,地震リスクに補修費だけで はなく,ユーザーコストなどを考慮した場合や,他の構 造物に適用し検討を行いたいと考えている.



図-6 トータルコストと設計地震動強度の関係 (0.84 フラクタイルハザード)

参考文献

- 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V 耐震設計 編, 2002.
- 長尾毅,山田雅行,野津厚:フーリエ振幅と群遅 延時間に着目した確率論的地震ハザード解析,土 木学会論文集,No.801/I-73, pp.141-158, 2005.
- 伊藤義人,和田光永:イベントを考慮した交通基 盤施設のライフサイクル評価手法に関する研究, 土木学会論文集,No.745/I-65, pp.131-142, 2003.
- 4) 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/VI-66, pp.125-138, 2005.
- 5) 阿部淳一, 渡邊忠朋, 杉本博之: RBF ネットワー クによる制約条件近似と RC 橋脚の最適耐震設計 に関する研究, 土木学会論文集, Vol62 No02, pp.405-418, 2006.
- 6) 土木学会:コンクリート標準示方書 耐震性能照 査編,2002.
- 渡邊忠朋・杉本博之・朝日啓太:補修費用を考慮 した耐震設計に関する一考察,土木学会論文集, No.718/V-57, pp.81-93, 2002.
- 2 北大学会地震工学委員会・レベル 2 地震動研究小 委員会:レベル 2 地震動研究小委員会の活動成果 報告書,2000.