

経済性を考慮した復旧性照査法に関する提案

坂井 公俊¹・室野 剛隆²・澤田 純男³

¹正会員 工修 （財）鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

²正会員 工博 （財）鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38）

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

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以降、土木構造物の耐震設計は2段階設計法によって実施されている¹⁾。これは設計地震動として、構造物の復旧性を視野に入れたレベル1地震動と、構造物の安全性を考えたレベル2地震動という2つの地震動を設定し、各地震動に対して構造物に付与された性能を満足することを確認することにより行われる。

このうちレベル1地震動は、現在の耐震設計においては構造物の弾性限を規定する地震動として用いられており、この地震動の想定レベルとしては主に、「構造物の供用期間中に1～2度発生する確率を持つ一般的な地震動」として定義されている¹⁾。しかしながらレベル1地震動において無被害であることが持つ本質的な意味については不明な部分が多く、これについて近年の学会等で多くの議論が行われている²⁾。例えば、上記の設計法を適用した場合には、レベル1地震動として50年期待値に対応する地震を用いたとすると、50年間に弾性限界を超えない確率が約63%（ポアソン過程）になるように構造物を設計したことになる。これはつまり、弾性限界を超える確率が37%であることになるのだが、それがどの程度の被害となるのかは全く考慮されていない。

こういった問題点を踏まえ、現在のレベル1地震動において無損傷に留めるという設計の枠組みに変わる新たな耐震設計法の提案が行われている³⁾。これはつまりレベル1設計で要求される復旧性を、経済性の照査を行うことで満足させる、というものである。構造物の耐用期間内に発生する地震を全て考慮した上で、構造物の初期建設コストと地震被災コストの合計であるトータルコストが最小となるような構造物を設計する（図-1）。これにより、「地震

時および地震後に、構造物の機能が経済的に維持できる」という性能を満足できると考えられる。これはISOにおいても今後発展の可能性がある一つの方向性として位置づけられている³⁾。このトータルコストを考慮した検討も近年ではいくつか実施されている^{4) 5) 6)}。さらに水道施設の耐震設計においても経済性照査を用いた設計が可能となっている⁷⁾。

しかしながら実際にトータルコストを照査指標とした設計を行う際には、非常に煩雑かつ高度な知識、手順が要求される。そこで本検討では、設計労力を簡素化した上でトータルコストが最小となる構造物の設計が可能となる手法の提案を行う。具体的には、予め多数の条件を持った構造物に対して上記作業を実施することにより、トータルコストが最小となるような性能（構造物の周期、降伏震度、靱性率）の組み合わせを算定しておき、その結果をノモグラムとして提示する。このノモグラムを用いることにより、実際の設計においては従来とほぼ同様の手続きによって経済性を照査指標とした設計が可能となると考えられる。さらに得られたノモグラムに対して考察を行うことにより、現在の耐震設計の枠組みの中で建設される構造物と経済性を考慮した場合の構造物との連続性、差異について議論を行う。

2. トータルコストを用いた復旧性照査法

(1) 復旧性照査の考え方

地震に対する構造物の復旧性とは、地震後に妥当な期間および経費で構造物の機能を回復できる性能と解釈することが出来る。この場合、妥当な期間および経費で機能を回復できる、という性能を工学的に表現する指標として、「初期建設コストと設計耐用期間内に想定される地震に対する復旧コスト、こ

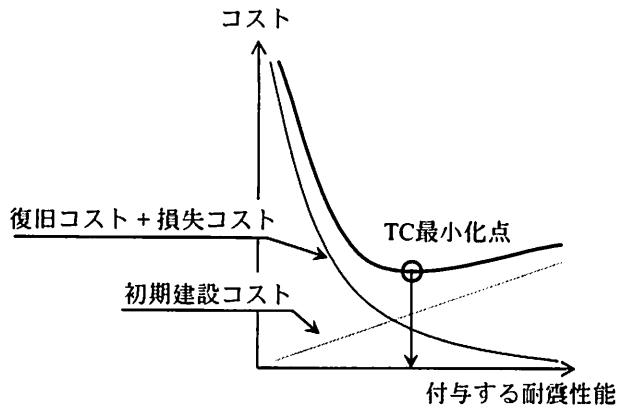


図-1 トータルコストを用いた復旧性照査の概念図

れに伴う間接被害の期待値の和、つまりトータルコスト (TC) の最小化」と解釈することにした。本研究におけるトータルコスト TC の計算は次式によることとする。

$$TC = C_i + \sum P_f \cdot C_f \quad (1)$$

ここで、 C_i ：初期建設コストであり材料費および施工費を考慮したもの、 P_f ：構造物の損傷確率、 C_f ：地震による損失コスト ($C_f = C_{RE} + C_{TD}$)、 C_{RE} ：直接復旧コスト ($C_{RE} = b \times C_{RE0}$)、 C_{RE0} ：直接復旧コストの基準値であり理想的な条件下での値、 b ：施工環境を表現するための倍率係数、 C_{TD} ：供用停止に伴う損失コストである。

なお、復旧性照査を行なう前段階でレベル2地震動を用いて構造安全性の確認を行っているため、地震損失に利用者の死亡による影響は考慮していない。さらに、地震時直接復旧コスト以外の間接コストとしては、一般に供用停止に伴う営業損失と社会に及ぼす経済損失が考えられるが、本検討では前者のみ考慮することとした。

(2) 復旧性照査用ノモグラムの提案

前節で定義したトータルコストを全ての構造物に対して算定し、復旧性を照査しようとする、設計者には構造工学だけでなく地震学、地震工学に対する高度な知識・技術が要求されるとともに、多数の動的解析等が必要となるために、従来よりも多大な労力を必要とする。そのため原則に従った形でトータルコストが最小となるような構造物を実務において設計することは現段階では不可能であると考えられる。

そこで本研究では、設計労力を簡素化した上で復旧性を満足した構造物の設計が可能となるような手法の提案を行う。具体的には、予め複数の地点において生起確率付地震動群を算定し、トータルコストが最小になるような構造物の固有周期と降伏震度、靱性率をノモグラムとして提示する。これを復旧性

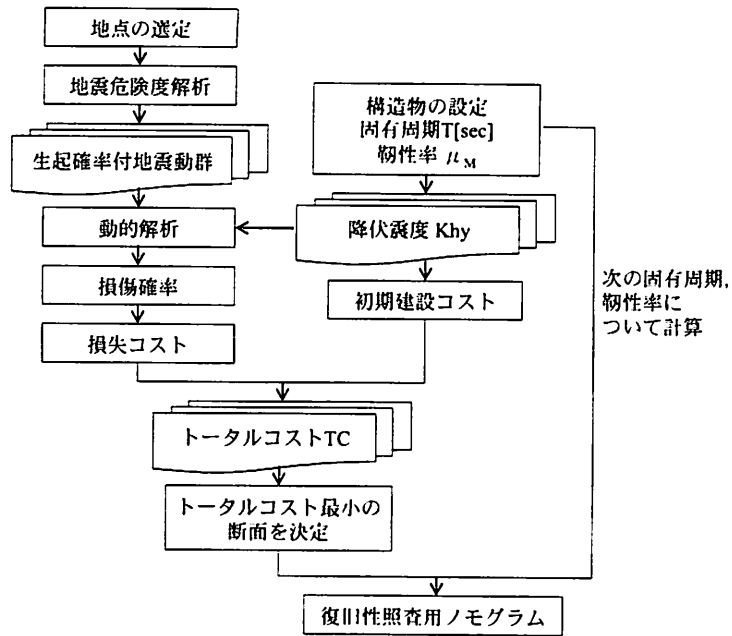


図-2 復旧性照査用ノモグラム作成手順

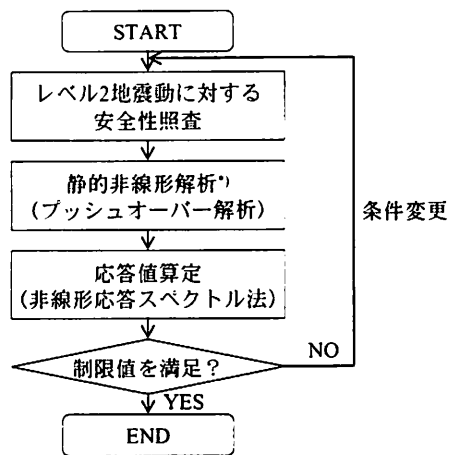
照査用ノモグラムと呼ぶこととする。復旧性照査用ノモグラムの作成手順を図-2に示す。

まず対象地点を選定し、地震危険度解析、生起確率付地震動群の作成を行う。構造物の周期、靱性率を固定し、降伏震度を変化させた複数の構造条件に対して生起確率付地震動群を入力とした動的解析を実施、各種降伏震度を持った構造物の損傷確率を算定する。これら構造物の初期建設コスト、損失コストを算定することで、トータルコストを求める。このうちトータルコストが最小となるような降伏震度の一つを選定する。この作業を構造物の周期、靱性率を変化させて多数実施し、結果を一つの図にプロットすることにより、ある構造物の周期、靱性率を確定させたときに構造物に要求される最適な降伏震度を簡便に推定することが可能となる。

なおここでの靱性率 μ_M は構造物の荷重-変位関係の中で、降伏変位 δ_y から最大荷重を示す変位 δ_M を除した値 ($\mu_M = \delta_M / \delta_y$) である。

(3) 復旧性照査用ノモグラムを用いた照査の手順

復旧性照査用ノモグラムを用いた照査の手順を図-3に示す。まずL2地震動において構造安全性を確認する。その後、静的非線形解析を実施して、構造物が保有する性能（固有周期 T_{eq} 、降伏震度 K_{hy} 、靱性率 μ_M ）を把握する。最後に復旧性照査用ノモグラムを用いて非線形応答スペクトル法⁸⁾により応答値（応答塑性率）を算定する。ノモグラムにより得られた応答塑性率 μ が構造物の保有する靱性率 μ_M を上回らないことを確認することで、復旧性の照査を行う。もし応答塑性率 μ が靱性率 μ_M を上回った場合、断面を変更して再度安全性のチェックか



*) 静的非線形解析は、安全性照査の際にほとんどの場合実施している

図-3 復旧性照査用ノモグラムを用いた復旧性照査の流れ
ら行い、下回った場合は復旧性を満足する構造物となり照査を終了する。

3. 復旧性照査用ノモグラムの作成

本節では複線用RC壁式橋脚を対象として、復旧性照査用ノモグラムを作成する。復旧性照査用ノモグラムは構造物の形式だけでなく、対象とする地域の地震活動度の違いによっても変化することが予想される。そこで対象地点としては地震活動度の異なる2地点（東京、広島）を設定し、両地点において復旧性照査用ノモグラムを算定する。

(1) 生起確率付地震動群の作成

構造物への入力地震動となる生起確率付き地震動群を作成する。地震動の発生確率は対象とする地点、期間によって変化する。対象地点としては前述した2地点（東京、広島）とし、対象期間は標準的な鉄道構造物の設計耐用期間⁹⁾である100年とした。

a) 地震発生確率の算定

断層調査結果や歴史地震資料によって設定される地震活動のモデルをもとに、確率論的地震危険度解析¹⁰⁾を実施した。地震危険度解析の例として東京地点における結果を図-4に示す。想定する地震加速度が大きくなるに従い、超過確率が小さくなっていることが分かる。

b) 生起確率付地震動群の算定

地震危険度解析結果に基づき、生起確率付地震動群を以下の手順に従って作成する。まず、加速度 $a(\text{gal})$ の地震における各震源域からの貢献度¹¹⁾を算定する。算定された各地震動レベルごとの貢献度に応じて、地震動群を作成する震源域を決定し、その震源域に割り当てる地震波の数を決定する¹²⁾。本検討では加速度を15段階（100～1500galまで100gal刻

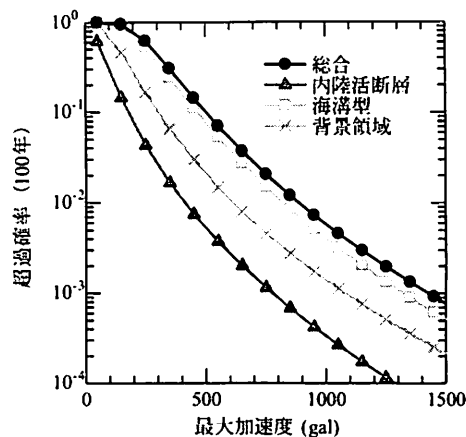


図-4 地震危険度解析結果の例（東京）

み）とし、各加速度毎に20波ずつ作成することとした。

まず応答スペクトルの距離減衰式¹³⁾を用いて、選定した震源域から想定される加速度応答スペクトル（減衰定数5%）の形状を設定する。次に位相特性としては、群遅延時間 $t_{gr}(\omega)$ の平均値と標準偏差の距離減衰式¹⁴⁾を用いて設定した。

以上の作業により、目標応答スペクトル、初期位相が決定した。そこで、繰り返し計算により振幅を調整することで、目標応答スペクトルに適合させ、得られた応答スペクトル適合波の最大加速度を想定地震レベルに調整することで、地震動を設定した。さらに、算定された地震動には、地震危険度解析によって推定された発生確率が付与される。

生起確率付地震動群の作成例として、東京地点において作成された生起確率付地震動群の一部を図-5に示す。これより、同一加速度レベルの地震動であっても、想定される震源域の地震規模、対象地点と震源との距離が各地震動ごとに異なるため、経時特性が異なった結果となっていることが分かる。

ここで得られた生起確率付地震動群は、工学的基盤位置での地震動であるため、対象地点の地盤情報を用いた地盤応答解析を実施することにより、地表位置の地震動を求めた。今回は固有周期として0.40秒の地盤を設定した。これは鉄道構造物を設計する際の地盤種別としては普通地盤（G3地盤）に分類される。

(2) 構造物の初期建設コスト C_i の算定

各種条件を持った構造物を設計し、初期建設コスト C_i の算定を行う。対象とした構造形式は、複線用RC壁式橋脚（スパン $L=29\text{m} \times 2$ 連、橋脚高さ $H=8\text{m}$ ）である。このプロトタイプの構造に対して、降伏震度 K_{hy} を4ケース（0.3、0.4、0.6、1.0）、靱性率 μ_M は各降伏震度ごとに3ケース設計することとし、合計で12断面の設計を行った。また設計時の制約として、上部工が基礎よりも先行降伏するといった条件

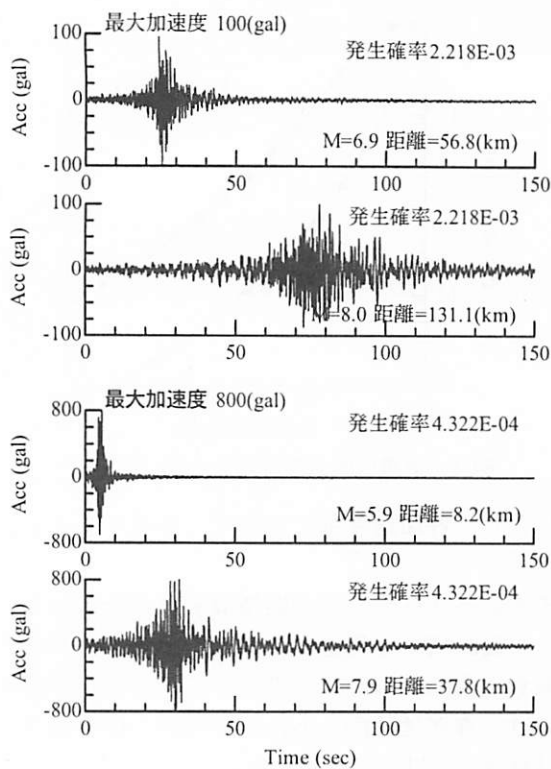


図-5 生起確率付地震動群の例（東京地点）

を設けている。最終的に得られた構造断面の例を図-6に示す。得られた各種構造断面の初期建設コスト C_I を算定した。さらに初期建設コスト C_I を降伏震度 K_{hy} 、等価固有周期 T_{eq} 、靱性率 μ_M をパラメータとした回帰式を作成した。その結果、次式を得た。

$$C_I = (44929 \times K_{hy}^2 + 16843 \times K_{hy} + 5319) \times T_{eq}^{\frac{1}{1.5}} \times \left(1 + \frac{\mu - 2.5}{2.5} \times 0.12\right) \times 1000 \quad (2)$$

(3) 構造物の直接復旧コスト C_{RE} の算定

構造物が地震損傷を受けた場合の直接復旧コスト C_{RE} は、式(1)に示したように、理想的な条件下での直接復旧コスト C_{RE0} に、施工条件を考慮するための倍率係数 b をかけることで表現することとした。

初期建設コスト算定時に設計を行った構造断面に対し、表-1の各工法を実施する際の補修領域を求め、これをもとに C_{RE0} を算定した。この結果を幅広い検討に用いることが出来るよう、式(3)のように結果を拡張した。損傷レベル4については架け替えとし、初期建設コストの10倍を設定した。

$$\text{損傷レベル1の場合： } C_{RE0} = 0 \quad (3-1)$$

損傷レベル2の場合：

$$C_{RE0} = (2024 \times k_{hy}^2 + 509 \times k_{hy} + 167) \times 1000 \quad (3-2)$$

損傷レベル3の場合：

$$C_{RE0} = (5215 \times k_{hy}^2 + 1561 \times k_{hy} + 462) \times 1000 \quad (3-3)$$

$$\text{損傷レベル4の場合： } C_{RE0} = 10 \times C_I \quad (3-4)$$

上式による推定結果は誤差0～3%であり、十分な精度で復旧コストを表現できていると考えられる。

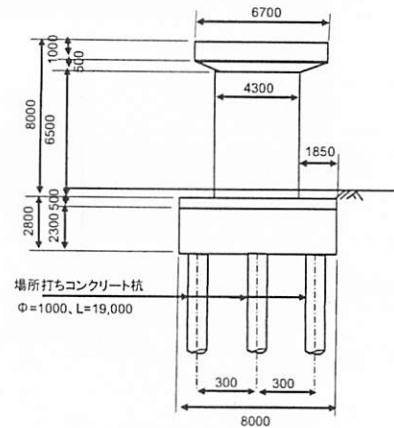


図-6 設計例 ($K_{hy} = 0.4$)

また、上記結果は理想的な条件下での復旧コストであり、実際の復旧には工事用道路の確保や地震時の復旧用資材等の確保により多くのコストを要するものと考えられる。そこで、これらの影響を考慮するための倍率係数 b を設定する。本検討では兵庫県南部地震において要した直接復旧コスト¹⁵⁾と上式により得られる C_{RE0} の比が概ね10倍であったため、 $b=10.0$ として設定した。

(4) 損失コスト C_{TD} の算定

直接復旧コスト以外の地震損失コスト C_{TD} としては、地震被害による供用停止によって発生する運輸収入の減額のみを想定することとした。この損失額（減収額）は、供用停止日数と1日あたりの運輸収入とを乗じることにより算定されるが、その一般的な値を精度よく見積もるのは現状では困難である。そこで本検討では、供用停止に伴う損失は直接復旧コストの倍数 ($C_{TD} = k \times C_{RE}$) で算定することにした。この倍率係数は、兵庫県南部地震による直接復旧コストと営業損失の関係¹⁵⁾を参考にして、 $k=2.0$ とした。

(5) 復旧性照査用ノモグラムの作成

a) トータルコストの算定

これまでの検討により、構造物への入力地震動（生起確率付地震動群）、構造物の建設コスト、地震によって損傷を受けた際の復旧コスト（直接復旧コスト、損失コスト）が得られた。そこで、本章では想定した構造物に地震動群を入力することで、各構造物のトータルコストを算定した。

トータルコスト算定結果の例として、東京地域、広島地域における等価固有周期 $T_{eq} = 1.0$ 秒、靱性率 $\mu_M = 2.0, 5.0$ の場合の結果を図-7に示す。これより、本手法によって構造物の等価固有周期、靱性率を固定した際のトータルコストが最小となる構造物の降

表-1 損傷レベルに対して想定した補修工法

損傷箇所	損傷程度			
	損傷レベル 1	損傷レベル 2	損傷レベル 3	損傷レベル 4
梁	無補修	足場工 ひび割れ注入工	足場工 ひび割れ注入工 かぶり修復	架け替え
柱、躯体	無補修	足場工 ひび割れ注入工	足場工 ひび割れ注入工 かぶり修復 埋戻工 ^{*)}	架け替え

*) 橋脚下端や柱下端が損傷した場合

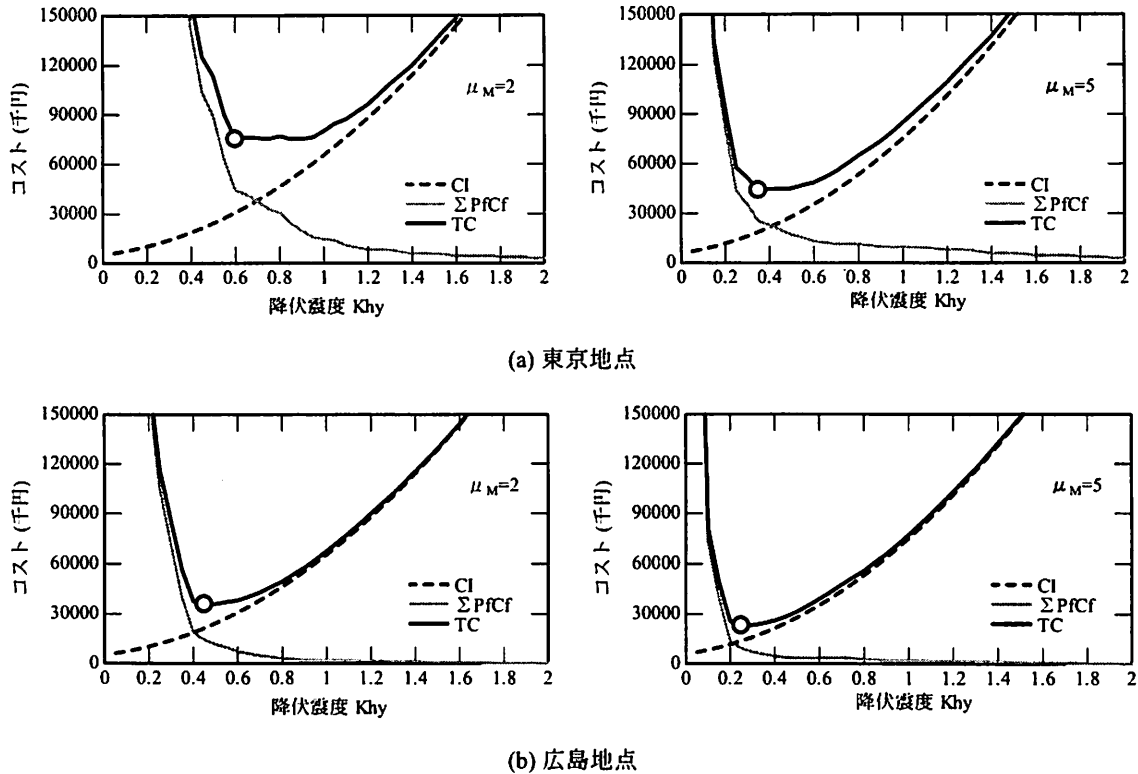


図-7 トータルコストの算定例 (Teq=1.0秒)

伏震度が選定できることが分かる。各図において○印で示した点がトータルコストが最小となる点（最適な降伏震度）である。

さらに、東京地点と広島地点のトータルコスト算定結果の比較からは、東京地点では、広島地点と比較すると地震活動度が高いため、地震による損傷確率が大きくなっている。これに伴い復旧コストが大きくなるために、トータルコストとしても東京地点が広島地点よりも大きな結果となっている。その結果、地震活動度が高い地域ほど降伏震度の大きな構造物が選択されている。

b) 復旧性照査用ノモグラムの算定

前節の結果より、構造物の等価固有周期、靱性率を固定した場合の、最適な降伏震度が1つ得られることが分かった。本節では等価固有周期、靱性率を広範囲にわたって多数変化させ、各条件における最

適な降伏震度を選定した。この降伏震度選定結果をまとめて図-8に復旧性照査用ノモグラムとして示す（靱性率 $\mu_M=1, 2, 4, 8$ の場合）。

これらの各図には現在の鉄道構造物の耐震設計時に用いられているL2地震動スペクトルⅡの所要降伏震度スペクトルも示しているが、地震活動度の高い東京地点においては、復旧性照査用ノモグラムとL2地震動がほぼ一致している。このためこれらの地域においては、L2地震動において早期の機能回復を要求している従来の耐震設計によって得られる構造断面と、本手法によるトータルコストを考慮した構造断面は、ほぼ等価な結果を与えると言える。

これに対し地震活動度が相対的に低い広島地点では、得られた復旧性照査用ノモグラムはL2地震動よりも下回っていることが分かる。これは地域ごとの地震活動度の差によるものであると考えられるが、現在の耐震設計においてもこの地震活動度の差を表

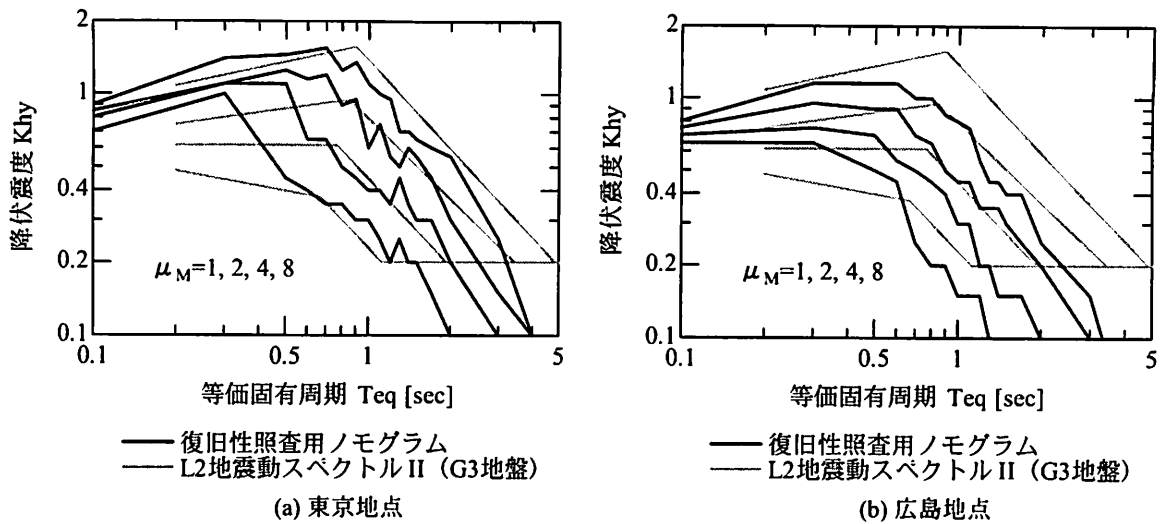


図-8 復旧性照査用ノモグラム算定結果

現することを目的とした、地域別係数が導入されており、ノモグラム算定結果はこの地域別係数を支持するものであると言える

5. まとめ

本検討では、レベルⅠ地震動に対して弾性設計を行うという現在の土木構造物における一般的な耐震設計手法に変わる枠組みとしての、トータルコストを照査指標とした復旧性照査法に関する検討を行った。予め多数の諸元に対してトータルコストが最小となるような周期、韌性率、降伏震度の組み合わせを算定しておき、それらの結果を復旧性照査用ノモグラムとして出力した。この復旧性照査用ノモグラムを用いることで、設計を行う際には従来の耐震設計の流れと同様の手続きで、トータルコストを照査指標とした復旧性の照査が行える。

また、得られた復旧性照査用ノモグラムと現在の耐震設計において使用されている地震動、制限値とを比較することで、両者の結果はほぼ同等の結果を得ることを確認した。これは過去の地震被害等を通じて経験工学的に構築されてきた現在の耐震設計に物理的な意味づけを与えるという点で重要な結果であると言える。

参考文献

- 1) 土木学会 土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会：土木構造物の耐震設計法等に関する第3次提言と解説，2000。
- 2) 土木学会・地震工学委員会・耐震設計基準小委員会：土木構造物の耐震性能設計における新しいレベルⅠの考え方（案），委員会活動報告書，2003。
- 3) ISO TC 98/SC3/WG10 : Basis for design of structures - Seismic actions for designing geotechnical works, 2005.
- 4) 大住道生，運上茂樹：トータルコストに基づく土木構造物の要求耐震性能の設定法に関する一検討，土木技術資料，41-10，pp.50-55，1999。
- 5) 一井康二：トータルコストに基づく耐震設計の提案と試算（重力式岸壁の例），日本地震工学シンポジウム論文集，11，pp.2371-2376，2002。
- 6) 阿部淳一，杉本博之，渡邊 忠朋：地震リスクを考慮した設計地震動強度算定に関する研究，土木学会論文集A，Vol.63，No.4，pp.780-794，2007。
- 7) （社）日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，2009。
- 8) 西村昭彦，室野剛隆，齋藤正人：所要降伏震度スペクトルの作成と耐震設計への適用，地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，Vol. 3，pp. 43-48，1999。
- 9) （財）鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説耐震設計，1999。
- 10) Cornell, C.A.: Engineering Seismic Risk Analysis, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.58, No.5, pp.1583-1606, 1968.
- 11) 亀田弘行，石川裕，奥村俊彦，中島正人：確率論的想定地震の概念と応用，土木学会論文集，No.577/I-41，pp.75-87，1997。
- 12) 安中正，香川敬生，石川裕，江尻譲嗣，西岡勉：期待損失評価のための確率論的ハザードに適合した地震動波形群の設定方法，土木学会地震工学論文集，Vol.28，2005。
- 13) 安中正，山崎文雄，片平冬樹：気象庁 87 型強震計記録を用いた最大地動及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講演論文集，pp.161-164，1997。
- 14) 佐藤忠信，室野剛隆，西村昭彦：観測波に基づく地震動の位相スペクトルのモデル化，土木学会論文集，No.640/I-50，pp.119-130，2000。
- 15) 阪神淡路大震災鉄道復興記録編纂委員会編：よみがえる鉄路，山海堂，1996。