

信頼性理論に基づく鋼製橋脚の耐震性能照査法

オリエンタルコンサルタンツ 正会員 後藤秀典 香川大学工学部 正会員 白木 渡  
 関西大学工学部 正会員 堂垣正博

1. はじめに

近年の巨大地震の被害を踏まえ、道路橋の耐震設計では、構造物の供用期間中に稀にしか発生しないような地震動に対して構造物の損傷を許容するようになった。本研究では、さまざまな荷重の中で地震荷重に注目する。本研究では、構造物の非線形応答も考慮し得る必要降伏強度スペクトルに注目し、その確率モデルを提案する。また、そのモデルを用いた構造物の耐震性能照査法を提案する。さらに、動的解析によって、提案した照査法の妥当性を検討する。

2. 必要降伏強度の確率モデル

構造物の固有周期を  $T=0.1 \sim 5.0(\text{sec})$ 、目標塑性率  $\mu_T$  を 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0、地震動強度  $A_{\max}$  を 300 ~ 1,000gal、種地盤、種地盤、種地盤の地盤種を設定し、必要降伏強度スペクトル<sup>1), 2)</sup>を算出した。ただし、減衰定数を 0.05、復元力特性の 2 次剛性比をゼロとし、入力地震動に道路橋示方書<sup>3)</sup>の標準地震入力波を用いた。さらに、回帰分析によって、必要降伏強度スペクトルの標準値を得た（表-1, 2）。これは必要降伏強度の平均的な値を表す。必要降伏強度を確定論的に扱くと、安全率を十分に取らなければ構造物の安全性・信頼性は確保されない。しかし、再現期間が数百年から数千年にもなるレベル 2 地震動に対して、過剰な安全率を設けることは合理的でない。本研究では、これを踏まえ、信頼性理論に基づく耐震設計法を推奨し、必要降伏強度の確率モデルを提案する。

構造物を設計する際、地盤種別、地動最大加速度、目標塑性率は、初期値パラメータとして与えられる。構造物の固有周期は、その寸法諸元によって変化する。設計の簡便性を考えると、構造物の固有周期の変化に伴って地震荷重の確率モデルが変化することは好ましくない。

そこで、必要降伏強度の確率モデルを地盤種別、目標塑性率ごとに作成し、構造物の固有周期によらず一定であると仮定した。なお、必要降伏強度の確率モデルの分布形は対数正規分布とした。

3. 信頼性理論に基づく耐震性能照査法

地震動は不規則で再現性のない外力であるため、構造物が同じ規模の地震動を受けてもその応答は決して同じ値を示さない。したがって、耐震設計で用いる地震動（対象地震動）の規模を明確にしても、すべての対象地震動に対して構造物の生存を保証することはできない。ここでは、対象地震動の規模を規定し、その規模の地震動が発生したときの構造物の生存確率を信頼性指標  $\beta$  で表し、それが目標信頼性指標  $\beta_T$  となるように、構造物を設計する。図-1 に設計の流れを示す。

4. 耐震性能照査法の検討

耐震性能照査法により鋼製橋脚の耐震設計

表-1 必要降伏強度スペクトルの標準値(タイプ I 地震動)

地盤種別	固有周期 $T_i(\text{sec})$ に対する $P_{ny}$
I 種	$H_{ny1} = 0.0058A_{\max} \{10.0(\mu_T - 1.0) + 1.0\}^{-0.40} T^{0.67[1.94(\mu_T - 1.0) + 1.0]^{-0.45}}$
	$H_{ny2} = 0.0026A_{\max} \{6.62(\mu_T - 1.0) + 1.0\}^{-0.35}$
	$H_{ny3} = 0.0014A_{\max} \{1.75(\mu_T - 1.0) + 1.0\}^{-0.84} T^{-1.67}$
II 種	$H_{ny1} = 0.0047A_{\max} \{9.43(\mu_T - 1.0) + 1.0\}^{-0.41} T^{0.67[1.48(\mu_T - 1.0) + 1.0]^{-0.81}}$
	$H_{ny2} = 0.0026A_{\max} \{19.28(\mu_T - 1.0) + 1.0\}^{-0.27}$
	$H_{ny3} = 0.0035A_{\max} \{2.67(\mu_T - 1.0) + 1.0\}^{-0.69} T^{-1.67}$
III 種	$H_{ny1} = 0.0043A_{\max} \{8.56(\mu_T - 1.0) + 1.0\}^{-0.42} T^{0.67[1.0(\mu_T - 1.0) + 1.0]^{-1.22}}$
	$H_{ny2} = 0.0026A_{\max} \{8.93(\mu_T - 1.0) + 1.0\}^{-0.32}$
	$H_{ny3} = 0.0052A_{\max} \{1.11(\mu_T - 1.0) + 1.0\}^{-1.11} T^{-1.67}$

表-2 必要降伏強度スペクトルの標準値(タイプ II 地震動)

地盤種別	固有周期 $T_i(\text{sec})$ に対する $P_{ny}$
I 種	$H_{ny2} = 0.0022A_{\max} \{21.95(\mu_T - 1.0) + 1.0\}^{-0.19}$
	$H_{ny3} = 0.0031A_{\max} \{4.22(\mu_T - 1.0) + 1.0\}^{-0.49} T^{-1.00}$
II 種	$H_{ny1} = 0.0041A_{\max} \{9.94(\mu_T - 1.0) + 1.0\}^{-0.40} T^{0.33[0.2(\mu_T - 1.0) + 1.0]^{-0.88}}$
	$H_{ny2} = 0.0023A_{\max} \{27.12(\mu_T - 1.0) + 1.0\}^{-0.19}$
	$H_{ny3} = 0.0037A_{\max} \{1.92(\mu_T - 1.0) + 1.0\}^{-0.72} T^{-1.00}$
III 種	$H_{ny1} = 0.0035A_{\max} \{30.32(\mu_T - 1.0) + 1.0\}^{-0.28} T^{0.33[0.19(\mu_T - 1.0) + 1.0]^{-1.085}}$
	$H_{ny2} = 0.0023A_{\max} \{10.04(\mu_T - 1.0) + 1.0\}^{-0.24}$
	$H_{ny3} = 0.0047A_{\max} \{1.60(\mu_T - 1.0) + 1.0\}^{-0.79} T^{-1.00}$

Key words：必要降伏強度スペクトル，性能照査型設計，信頼性理論

〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35 TEL 06-6368-0882 FAX 06-6368-0882

を行い、そのモデルに対してレベル2地震動を入力地震波として動的解析を行うことで、本手法の有用性を示す。

解析対象は、正方形の無補剛箱形断面からなる単柱形式の鋼製橋脚とする。幅  $b$  は 1,500, 2,000, 3,000mm の 3 ケースとし、設計の簡単化のため、フランジと腹板の厚さ  $t$  は等しいものとした。ここでは、局部座屈が生じないような断面を考えて、最小板厚を決定した。なお、使用鋼材は SM490Y である。上部構造には RC 床版を有する鋼製 2 主箱桁橋を想定し、支間長が 40m 程度の連続高架橋を支える橋脚とした。これをもとに、上部工反力に相当する鉛直荷重  $P=10.84\text{MN}$  を得た。

構造物を設計する際には、建設地点（地盤種別）と、対象とする地震動に対する損傷度が事前に決定されている。ここでは、地盤種別種地盤に限定し、対象地震動に対する損傷度をつぎのように仮定した。タイプ I 地震動として、地動最大加速度  $A_{max}=400\text{gal}$  を想定し、そのときの構造物の損傷は  $\mu_f=1.0$  とし、その損傷に対して信頼性指標  $\beta_f=3.0$  を確保する。タイプ II 地震動として、地動最大加速度  $A_{max}=800\text{gal}$  を想定し、そのときの構造物の損傷は  $\mu_f=2.0$  とし、その損傷に対して信頼性指標  $\beta_f=1.0$  および 2.0 を確保する。ここでは、比較のためにタイプ I 地震動に対して 2 つの目標信頼性指標を設けた。以上により、解析モデルの断面を  $\beta_f=1.0$  に対して、幅  $b=2,000\text{mm}$ 、板厚  $t=55\text{mm}$ （モデル 1）、 $\beta_f=2.0$  に対して、幅  $b=2,000\text{mm}$ 、板厚  $t=66\text{mm}$ （モデル 2）のように決定した。

モデル 1 とモデル 2 に対して、弾塑性時刻歴応答解析を行った。入力地震動は、道路橋示方書の標準地震入力波をタイプ I 地震動に対しては最大加速度を 400gal に、タイプ II 地震動に対しては最大加速度を 800gal にそれぞれ振幅調整したものを用いた。その結果を図-2 に示す。図中の赤い点線は仮定された損傷度、すなわち  $\mu_f=1.0$ 、 $\mu_f=2.0$  の値を示している。同図から、すべての地震動に対して、構造物の挙動が規定値内に収まっていることがわかる。また、モデル 2 よりもモデル 1 の応答値が大きくなっており、信頼性指標  $\beta$  が安全率の役割を果たしていることがわかる。

## 5. おわりに

本研究で得られた結果を要約すれば、つぎのようである。1) 目標とする信頼性指標  $\beta$  がうまく安全率の役割を果たしている。2) 本設計法によると、構造物に許容される損傷度を十分に生かした設計ができる。3) 本手法によると、構造物の生存を確率論的な立場から保証できる。

参考文献 1) 西村昭彦・室野剛隆：所要降伏震度スペクトルによる応答値の算定，鉄道総研報告，No. 13，No. 2，pp. 47-51，1999-2。2) 家村浩和・三上 卓：目標耐震性能に必要な降伏強度と塑性率のスペクトル，土木学会論文集，No. 689/ -57，pp. 333-342，2001-10。3) 日本道路協会編：道路橋示方書・同解説，耐震設計編，丸善，1996-12。

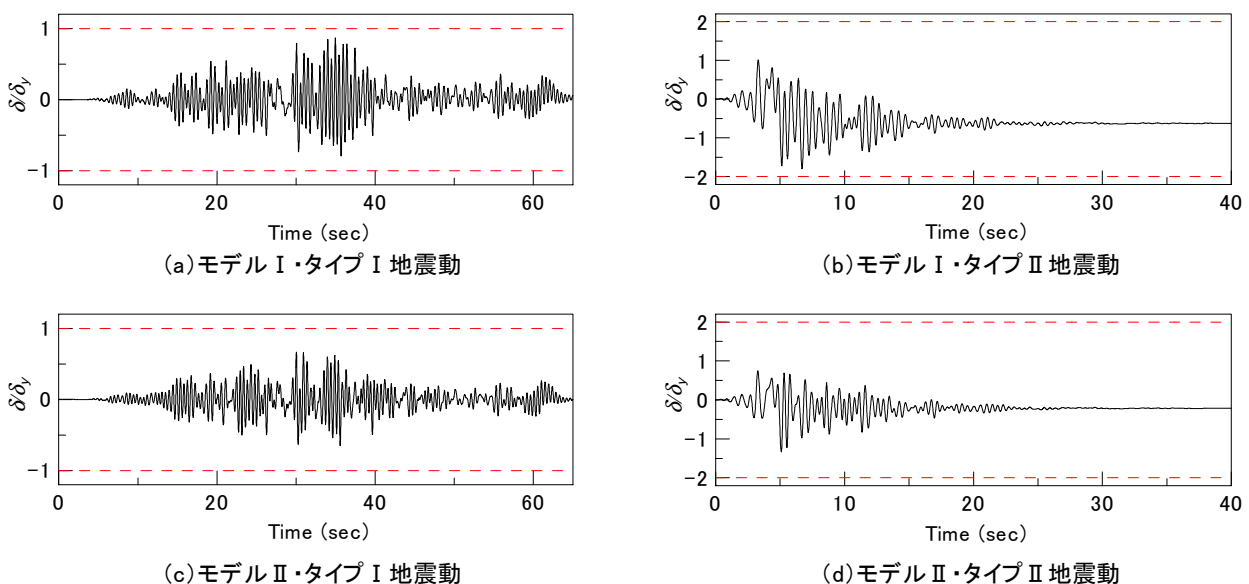


図-2 単柱形式の鋼製橋脚の動的解析による柱頭での応答変位

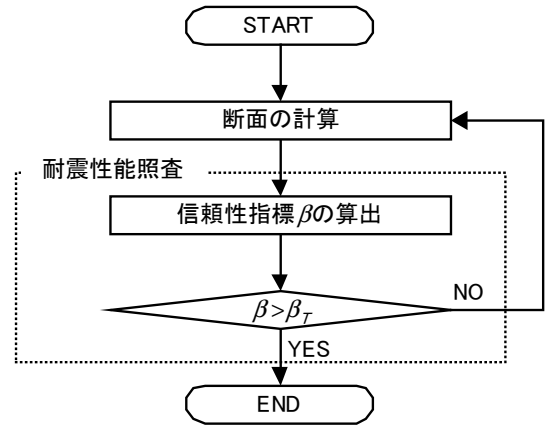


図-1 耐震性能照査の流れ