

鋼製橋脚の耐震計算手法に関する検討

松田宏¹・深谷茂広²・劉銘崇³・広兼徹⁴・廣坂忠司⁵

瀬能浩実⁶・加藤祐之⁷・和内博樹⁸・嶋原徹⁹・塙喜久雄¹⁰

¹ 正会員 日本電子計算株式会社

³ 正会員 日本技術開発株式会社

⁵ 株式会社総合システム

⁷ 正会員 パシフィックコンサルタンツ株式会社

⁹ セトラロコンサル株式会社

² 正会員 株式会社長大

⁴ 株式会社横河技術情報

⁶ 正会員 株式会社オリエントコンサル

⁸ 株式会社CRC総合研究所

¹⁰ 正会員 株式会社建設技術研究所

1. はじめに

平成8年11月に改定された道路橋示方書V耐震設計編において、鋼製橋脚の耐震計算を行うにあたり、コンクリート充填した場合の地震時保有水平耐力および変形性能の算定方法、またコンクリートを充填しない場合の耐震設計上の取扱い方法が規定された。こうした耐震設計を行うためには、電算ソフトは必要不可欠となっているが、各種の条件により解のばらつく場合が生じる。

本稿は、こうした解のばらつく要因を調査し、耐震計算プログラムを開発する上で、極力解の統一性を図るために必要な条件の提案、および運用する上での留意点について報告するものである。

2. 地震時保有水平耐力法による耐震計算

(1) 解のばらつく要因と推奨する解析条件

コンクリート充填された鋼製橋脚の地震時保有水平耐力および変位性能の算定方法は、平成8年の道示改定で初めて規定された。しかし、設計ルーチンとして耐震計算を行う場合の計算手法は鉄筋コンクリート橋脚に準ずるとあるだけで、詳細な計算手順については耐震計算の参考資料などにも明記されていない。こうした状況から本検討を開始した時点でのソフト開発各社の考え方に差があり、利用者にとっても、どのソフトの解が正しいか判断に窮していた。

このような状態を踏まえ、解の統一性を極力図るため、次の2つの項目に分類しそれぞれについて検討を行った。

- ① 示方書などの基準には詳細な規定はないが、解析結果に影響を与えるため統一が必要と考えられる項目
- ② いろいろな考え方があり、現段階では統一が難しいが、ある程度の方向性を示すことができる項目

ここで、①の項目について解析条件を整理した結果を表-1に示す。

表-1 コンクリート充填された鋼製橋脚の耐震設計における解析条件

解析パラメータ	推奨する解析条件、影響度
断面の降伏、終局曲げモーメント、曲率の算出方法	・降伏時、終局時曲げモーメント、曲率の計算方法はRC橋脚に準じる。 ・この際、作用軸力としては、上部工反力、当該断面までの鋼材重量およびコンクリート重量を考慮する。 ・中立軸は合成断面で算出するが、コンクリート部の応力度は初期作用軸力による直ひずみを差引いたひずみを用いて算出する。
鋼材のびり	・有効幅を考慮しないでモデル化する。
降伏ひずみ、終局ひずみの設定位置	・断面の最外縁にあたるフランジ断面の板厚中心位置とする。
コンクリートの充填がない断面の剛性	・弾性剛性とし、コンクリート充填部と混同しないようにする。コンクリート充填部の鋼材の応力度-ひずみ関係を用いてはいけない。
中立軸の算定	・中立軸を算出するための収束計算の影響はほとんど受けない。一般的には2分法が用いられる。 ・十分に作用軸力と一致するまで収束計算を行う必要がある。収束判定条件は、仮定した中立軸での軸力と作用軸力の差が10^{-3}程度以下であれば影響はない。
断面におけるコンクリートの断面積の取扱い	・1スライス断面内でのコンクリート部分の断面積に対し、1つの縦リブの面積比が大きくなる場合もあるため、鋼断面部面積を差引いてコンクリート純断面積で評価する。

また、降伏時の判定は圧縮側フランジ、終局時は引張側フランジのそれぞれ板厚中心ひずみが降伏および終局ひずみに達したときとした。

同様に②の項目についても整理した結果を表-2に示す。いずれも複数の考え方があり、運用段階で留意する必要がある。

表-2 運用段階で留意が必要な項目

解析パラメータ	計算法の考え方
上部構造等の死荷重によるモーメントが作用する場合（施工手順を考慮して、条件設定を行う。）	①鉛直力は軸力として鋼断面で、偏心モーメントは鋼材とコンクリートの両断面で受持つ。 ②偏心モーメントも含めて死荷重は全て鋼断面で受持つ。 ③橋脚の自重は鋼断面で、上部工反力は鋼とコンクリートの両断面で受持つ。
断面形状のモデル化（コンクリート充填断面では、①の方法を用いる。）	①断面形状を忠実にモデル化する。 ②等価断面でモデル化する。 ・断面積と初期剛性を一致 ・断面積と全塑性モーメントを一致
断面の分割方法および分割数（断面幅、板厚およびリブ寸法を考慮して分割する。）	断面方向、高さ方向とも50分割程度は必要。フランジに添接された縦リブは腹板並に細分割。円形の場合の鋼材の分割法は、放射状、中立軸に平行の2とおりある。

(2) 比較計算例

3種類のソフトウェアにより矩形断面橋脚での比較計算を行った一例を表-3に示す。計算条件は参考資料¹⁾による。断面の分割方法は各社異なる。また、C社のみコンクリートの断面積から鋼材リブ分を差引いていない条件で計算を行った。A社とB社は1%以下の差しかない。C社の場合でも、A社、B社と比較して差は最大1%強であり、計算精度の向上の確認ができた。

表-3 矩形断面橋脚の比較計算結果（橋軸、タイプⅠ）

		A社	B社	C社
水平力 (tf)	降伏時	549.4	549.3	550.6
	終局時	762.1	762.1	763.4
水平変位 (cm)	降伏時	6.19	6.19	6.21
	終局時	55.08	55.09	54.37
地震時保有水平耐力Pa (tf)		620.3	620.2	621.5
許容塑性率 μ_a		3.22	3.22	3.18
等価水平震度 k_{be}		0.40	0.40	0.40

3. 動的解析による耐震計算

コンクリート充填しない鋼製橋脚に対して非線形性を考慮した動的解析により耐震性を照査する必要がある。ここでは、上部構造、橋脚を図-1に示す2質点系でモデル化を行い、計算ソフトウェア、計算パラメータの影響について調査した。地盤の影響は周期算出時のみ考慮した。使用した波形はタイプⅡのⅡ種地盤の地震波形、また剛性比例型減衰を用いた。計算ソフトウェアの違いの影響は表-4に示すとおり極僅かであった。バネ要素を用いた解析の場合、要素剛性行列が簡単に組立てられるため、各時間ステップにおいて部材間の相対変位と部材力の関係を正しく評価できれば、プログラムの相違に

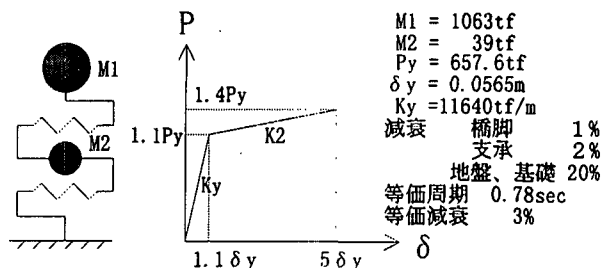


図-1 計算モデル ($\Delta t = 0.001\text{sec}$)

よる解析結果の差異はなくなると判断できる。

また、非線形動的解析を行う場合、計算パラメータとして、減衰モデル、数値積分法、収束計算法、計算時間間隔などが考えられる。検討を行った結果、減衰モデルの違いによる影響が他の計算パラメータよりも大きいことがわかった。また、わずかではあるが、計算時間間隔の違いの影響も生じる可能性がある。計算結果の一部を表-5に示す。数値積分法はNewmark- β 法 ($\beta=1/4$)とし、波形はタイプⅡ-Ⅱ-1を用いた。

表-4 計算プログラムの違いによる解析結果の比較

	橋脚水 平力tf	橋脚変位m		橋脚残留変位m	
		最大	平均	最終時	平均
A社	波形1	946	0.310	0.031	0.023
	波形2	906	0.265	0.011	
	波形3	900	0.258	0.028	
D社	波形1	945	0.310	0.031	0.023
	波形2	905	0.265	0.011	
	波形3	899	0.258	0.028	
E社	波形1	946	0.310	0.036	0.024
	波形2	906	0.265	0.011	
	波形3	899	0.258	0.029	
F社	波形1	945	0.310	0.036	0.025
	波形2	904	0.264	0.010	
	波形3	899	0.258	0.029	

表-5 計算パラメータの違いの影響（A社による）

ケース		1	2	3	4
計算条件	減衰タイプ	剛性比例 h=3%	剛性比例 h=3%	剛性比例 h=各要素	レーリー
	Δt sec	0.001	0.01	0.001	0.001
上部構造	加速度 gal	907.92	908.04	878.90	930.91
	水平変位 m	0.59305	0.59322	0.60726	0.58977
橋脚	変位 m	0.31019	0.31032	0.32780	0.34168
	水平力 tf	945.99	946.10	961.75	974.18
	残留変位 m	0.03115	0.03119	0.02185	0.02536

ここで報告した内容は、（財）土木研究センター内に設置された耐震設計ソフトウェアに関する研究委員会（座長：川島一彦東京工業大学教授）で検討されたものの一部である。

参考文献

1) (社)日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料、平成9年3月