

I - B 174 材料特性等のばらつきがRC橋脚の耐力・変形性能に及ぼす影響に関する検討

建設省土木研究所 正会員 足立 幸郎
同 上 正会員 運上 茂樹

1. はじめに 材料強度のばらつきは一般に部材耐力を増加させる傾向にある。従来の震度法に基づく許容応力度法による耐震設計では、橋を構成する部材が必要以上の耐力を持つ場合に十分な耐震性を有すると解されてきた。しかしながら、材料強度のばらつきは部材の耐力特性のみならず、変形性能にも影響を及ぼす。したがって、非線形特性を考慮して構造物の耐震性を照査する場合、耐力と変形性能の両者の影響を考慮する必要がある。ここでは、材料強度のばらつきが地震時の橋全体系の挙動に及ぼす影響を検討する一環として、材料強度のばらつきが鉄筋コンクリート橋脚の耐力・変形性能に及ぼす影響を、モンテカルロシミュレーションを用いた検討を行なった。本稿ではその検討結果について報告を行なう。

2. 材料特性等のばらつき 鉄筋コンクリート橋脚の耐力・変形性能特性に及ぼすばらつき要因は、材料の機械的特性や寸法（強度、弾性係数、断面積等）、部材寸法、作用軸力のばらつきなどの他に、耐力・変形性能評価式の精度に起因するばらつき、入力力のばらつき等が存在する。ここでは、表-1 に示すばらつき要因のみを考慮した。コンクリートおよび鉄筋の強度、鉄筋断面積に関するばらつきは既往の文献¹⁾より調査し、平均的な数値として表-1 に示すように与えた。コンクリートの弾性係数のばらつきは道路橋示方書²⁾の関係式に基づき強度に依存させた。鉄筋の弾性係数、作用軸力、断面寸法・配筋位置は表-1 のようにばらつきを仮定した。これらのばらつき要因は、完全無相関ではなく、少なからず相関を持つ要因も存在する。しかしながら、相関性を設定することは困難であるため、本研究では個々のばらつき要因は完全無相関であると考え、さらに個々の要因は正規分布に従うものと仮定した。ばらつきの影響を検討する手法として、モンテカルロシミュレーション手法を用いた。乱数の発生は2000個とした。

3. 鉄筋コンクリート断面への影響 検討対象とした鉄筋コンクリート断面は、文献3)に示される矩形断面およびこれと同じ断面積、軸方向鉄筋比を有する円形断面、壁式断面の3断面とした。図-1 に検討断面を示す。本研究では、降伏曲率、終局曲率、曲率じん性率、終局曲げモーメント、降伏剛性について整理を行なうとともに、断面形状による差にも着目した。なお、これら諸量の算出にあたっては、道示に示されるB種橋およびレベル2タイプII地震動を考慮する場合の算出方法に従った。なお、本研究では設計値を用いて算出された断面耐力および変形性能については以降「基準値：D」と表記し、これを用いて基準化した。図-2 に矩形断面における検討結果を示す。また表-2 に各断面形状毎に検討結果として平均値および標準偏差を示す。ばらつきが及ぼす影響を記述すると以下ようになる。

①降伏曲率に及ぼす影響： 基準化した平均値は約118%、その標準偏差は約8%強となり、断面形状による差はみられなかった。平均値の増加は主に軸方向鉄筋の過強度特性によるものである。

②終局曲率に及ぼす影響： 基準化した平均値は約100%前後、その標準偏差は約4%となった。降伏曲率ほどの平均値の変化は見られない。断面形状による差が認められ、平均値は矩形、円形、壁式の順に小さくなる結果となった。矩形断面では基準値よりも大きい、逆に壁式断面では小さい結果となった。

③曲率じん性率に及ぼす影響： 基準化した平均値は80～90%、その標準偏差は4～7%となった。材料特性等のばらつきによる降伏曲率の増加が終局曲率の増加よりも大きいため、曲率じん性率が小さく評価される結果となった。「平均値－1×標準偏差」より算定される値は78～83%程度の値となる。

④終局曲げモーメントに及ぼす影響： 基準化した平均値は114%程度、その標準偏差は6%弱となった。断面形状による差は認められない。平均値の増加は主に軸方向鉄筋の過強度特性によるものである。なお、AASHTO

キーワード：信頼性設計、ばらつき、耐力、変形性能、鉄筋コンクリート橋脚

連絡先：茨城県つくば市旭1番地 TEL 0298-64-4966 FAX 0298-64-4424

4) では過強度係数は 30%であるが、本事例では、「平均値 + 1 × 標準偏差」の値として 20%程度が得られた。

⑤降伏剛性に及ぼす影響： 基準化した平均値は 96%、その標準偏差は約 4%となり、鉄筋の弾性係数で設定したばらつき特性が降伏剛性のばらつきとほぼ一致する結果となった。

4. 鉄筋コンクリート橋脚への影響 図-1 に示す矩形断面を持つ、橋脚高 5, 10, 20, 30m を有する橋脚を検討対象とした。断面は高さ方向に変化しないと仮定した。橋脚の荷重-変形特性は、文献 5) に示される手法により断面曲率等から算出した。基準橋脚で想定する基準慣性力 ($k_h W(D)$)、 k_h ：基準震度、 $W(D)$ ：基準上部構造重量) は、エネルギー一定則を仮定して設定した。すなわち、

$$k_h W(D) = \sqrt{2\mu(D) - 1} \cdot P_y(D) \quad (\mu(D) : \text{基準じん性率}, P_y(D) : \text{基準降伏耐力}) \quad (1)$$

として求めた。なお、本式は要求じん性率と基準じん性率は同一であるとしている。モンテカルロシミュレーションから得られたばらつきを考慮した降伏耐力 (P_y') に対応する要求じん性率 (μ_r') は、

$$\mu_r' = (1/2) \cdot \{k_h W(D) / P_y'\}^2 + 1 \quad (2)$$

として算出した。ばらつきを考慮して得られた設計じん性率 (μ') と要求じん性率 (μ_r') と比較することによって、耐震安全性を評価したのが図-3 である。要求じん性率に対する設計じん性率は平均的に 20%程度大きく、3 σ 程度のばらつきを考慮した場合に 1 を下回るケースが存在することがわかる。

表-1 材料特性等のばらつき要因とばらつきの設定値 表-2 シミュレーション結果（平均値と標準偏差）

パラメータ	基準値	平均値	変動係数
コンクリート強度	23.5N/mm ²	120%	10%
コンクリート弾性係数	2.45 × 10 ⁴ N/mm ²	強度に依存	強度に依存
鉄筋降伏点強度	295N/mm ²	120%	7%
鉄筋断面積	公称値	97%	1%
鉄筋弾性係数	2.06 × 10 ⁵ N/mm ²	97%	1%
作用軸力	5% $\sigma_{ca} A_s$	105%	5%
断面寸法・配筋配置	設計値	100%	1%

	矩形断面		円形断面		壁式断面	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
降伏曲率	1.185	0.086	1.182	0.072	1.184	0.074
終局曲率	1.060	0.044	1.018	0.044	0.972	0.038
曲率じん性率	0.899	0.064	0.864	0.037	0.824	0.044
終局曲げモーメント	1.141	0.066	1.143	0.064	1.143	0.068
降伏剛性	0.964	0.036	0.969	0.040	0.968	0.036

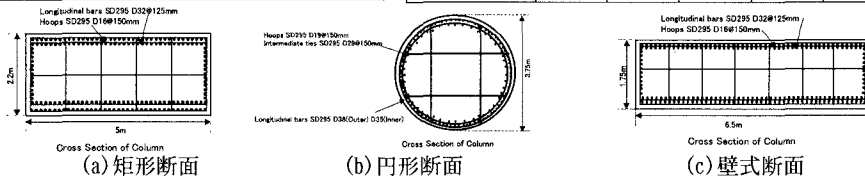


図-1 検討対象とした鉄筋コンクリート橋脚断面

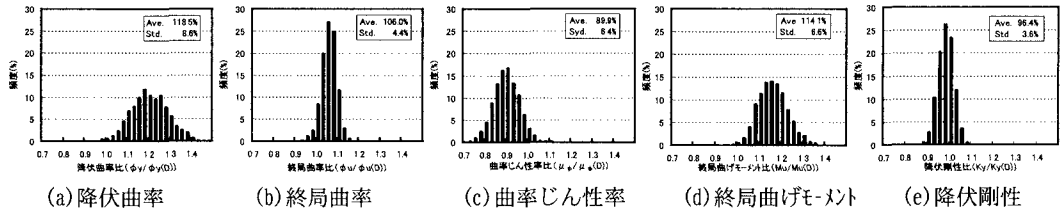


図-2 モンテカルロシミュレーションの結果（矩形断面）

5. おわりに 材料特性等にばらつきにより、鉄筋コンクリート橋脚の耐力は基準値に対して増加し、変形性能は低下する。また、エネルギー一定則を仮定した地震応答特性に着目した場合の耐震安全性は増加する傾向にあることが判明した。

参考文献 1) 中楚良昭：信頼性理論による鉄筋コンクリート造建築物の耐震安全性に関する研究、東京大学博士論文、1988.3、2) 日本道路協会：道路橋示方書、1996.12、3) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料、1997.3、4) AASHTO：Standard Specifications for Highway Bridges 16th Edition、1996、5) 星隈ら：載荷繰返し特性と塑性曲率分布に着目した曲げ破壊型鉄筋コンクリート橋脚の塑性変形性能とその評価法、構造工学論文集 Vol.44A、1998.3

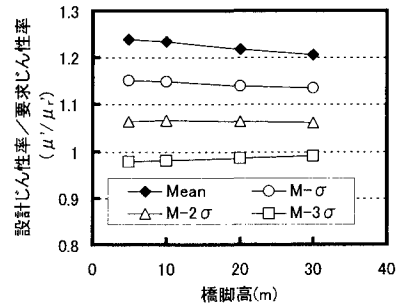


図-3 橋脚高と設計じん性率/要求じん性率