

材料特性等のばらつきが矩形断面コンクリート充填柱の 耐震性能評価に与える影響に関する検討

森口 智聡¹ 小野 潔² 西村 宣男³ 池内 智行⁴ 高橋 実⁵

¹学生会員 大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻（〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1）

²正会員 工博 大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻（〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1）

³フェロー工博 大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻（〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1）

⁴正会員 工博 鳥取大学工学部土木工学科（〒680-8552 鳥取市湖山町南4-101）

⁵正会員 工修 独立行政法人土木研究所構造物研究グループ（〒305-8516 つくば市南原1番地6）

1. まえがき

平成7年1月17日の兵庫県南部地震では、道路橋の鋼製橋脚についても多くの被害を受けた。その後、鋼製橋脚について、正負交番載荷実験や解析等¹⁾により、耐荷力向上、変形性能向上に関する検討が実施され、鋼製橋脚の耐震設計に有用な知見が得られた。それらの成果の一部は、平成8年12月に改定された道路橋示方書・同解説V耐震設計編²⁾（以下、「道示V」という。）の規定にも反映された。その中で、鋼製橋脚に関しては、従来の弾性域での力を基本とした設計である震度法に加え、塑性域での耐力や変形性能を考慮した設計法が新たに追加された。

ところで、設計で用いられる公称値と実際の材料強度とは異なり、さらに材料強度自体にもばらつきが存在する。実際の鋼材の降伏応力度は設計で用いられる降伏応力度より高く、このことは、一般に部材耐力を増加させる傾向にある。つまり、従来の震度法に基づく許容応力度法による設計では、降伏応力度が高いことは安全側に評価されると解されてきた。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、塑性域での耐力・変形性能を考慮して構造物の耐震性を照査する場合、材料強度のばらつきが耐力と変形性能の両者に与える影響を考慮する必要がある。また、鋼製橋脚の変形性能を検討した数少ない既往の研究³⁾では、鋼材の実際の降伏応力度が設計で用いられる公称降伏応力度より大きいことは耐力の場合とは反対に部材の変形性能を危険側に評価させるという指摘もされている。

一方、構造物の耐震性を評価する耐力評価式、変形性能評価式自体にもばらつきが存在し、そのばらつきは耐震性能評価において材料強度のばらつきより大きな影響を及ぼすとも言われている⁴⁾。したがって、構造物の耐震性を評価するためには、材料強度等のばらつき、さらにそれを評価する際の評価式自体の評価誤差によって生じるばらつき等を総合的に評価する必要がある。鉄筋コンクリート橋脚に関しては、これらのばらつきを考慮した研究⁴⁾も既にされている。また、鋼製橋脚に関しても、コンクリートを充填しないものについては、著者らも文献⁵⁾で既に検討している。しかし、現在、実際の道路橋ではコンクリートを充填した鋼製橋脚（以下、「コンクリート充填柱」という。）も多々用いられており、平成14年に改定された道示V⁶⁾では、コンクリート充填柱のM- Φ 関係を利用した耐震性能評価手法が示されている。そこで、コンクリート充填柱に関しても、前述のばらつきがM- Φ 関係を用いた耐震性能評価に与える影響も検討する必要がある。

本研究では、耐震性能評価手法として、平成14年道示V⁶⁾に規定される橋脚の曲げ-曲率（M- Φ ）関係を利用して、材料強度等の確率特性が矩形断面コンクリート充填柱の耐力・変形性能に与える影響について検討した。続いて、耐力・変形性能を評価する際の評価式自体の評価誤差によって生じるばらつきについて検討を行い、これら全ての変動要因を考慮したもとで、実橋脚モデルを想定して、耐力および変形性能の評価に与える影響について定量的な検討を行った。本論文は、これらの検討結果について報告するものである。

表-1 矩形断面コンクリート充填柱実験供試体の材料特性および構造諸元等

供試体	鋼種	降伏点 σ_y (MPa)	外形寸法 b (mm)	板厚 t (mm)	縦リブ長さ b_s (mm)	縦リブ厚 t_s (mm)	パネル数 n_s	載荷点高さ h (mm)	細長比 パラメータ λ	幅厚比パラメータ R_R	R_F	コンクリート強度 σ_{ck} (MPa)	コンクリート充填高さ h_c (mm)	軸力比 N/N_y
M5	SM490	351	900	10	65	6	3	3423.0	0.251	0.651	0.846	30.4	2,700	0.134
M6	SM490	365	900	10	75	9	3	3423.0	0.254	0.664	0.621	28.5	2,700	0.133
No.26	SM490	404	900	9	80	6	4	3423.0	0.271	0.582	0.608	23.8	2,700	0.177
No.27	SM490	382	900	10	65	6	3	3423.0	0.261	0.680	0.883	20.2	2,700	0.193
K1	SM490	369	900	9	80	6	4	3088.0	0.233	0.556	0.581	16.2	2,700	0.128
K2	SM490	369	900	9	80	6	4	3088.0	0.233	0.556	0.581	24.8	2,700	0.128
A3RS	SM490	419	680	7	41	4	5	3303.0	0.346	0.461	0.558	16.1	2,548	0.100
A3RN	SM490	423	680	7	41	4	5	3303.0	0.348	0.463	0.561	17.3	2,548	0.100

2. 材料強度等のばらつきがコンクリート充填柱の耐力・変形性能に与える影響

(1) 評価方法

材料特性等のばらつきが鋼製橋脚の耐力および変形性能の評価に与える影響について検討するため、実際の設計で用いられる公称値を使って算出される数値と材料特性のばらつきを考慮して算出される数値との比較を行った。ここで、耐力については正負交番載荷実験から得られる最大水平荷重を、変形性能については、正負交番載荷実験から得られる最大水平荷重時変位を指標として評価した。解析対象は表-1に示す、正負交番載荷実験で用いられた矩形断面コンクリート充填柱供試体8体としている^{7,8)}。表中の構造諸元について以下に記す。

σ_y ：材料試験による降伏応力度

b ：補剛板幅（最外縁）

t ：補剛板の板厚

b_s ：縦リブの高さ

t_s ：縦リブの板厚

n_s ：補剛板1枚あたりのパネル数

h ：載荷点高さ

σ_{ck} ：材料試験によるコンクリート圧縮強度

h_c ：コンクリートの充填高さ

鋼製橋脚の力学特性に影響を及ぼす要因としては、降伏応力度、弾性係数、断面積、部材寸法、作用軸力、供試体高さ等のばらつきが考えられる。ここでは、耐震設計において材料特性として与える表-2に示す項目を確率変数として取り扱うこととした。鋼材のばらつきに関しては文献5)を基に、コンクリートおよび作用軸力、断面寸法のばらつきに関しては文献4)を基に表-2のように設定した。なお、断面寸法は板厚のばらつきのみとし、断面の外形は不変とした。これらのばらつき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、相関性を設定するのは非常に難しい⁴⁾ことから、本研究では個々のばらつきは完全無相関であると考えた。また、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、乱数の発生は2,000回とした。

また、本論文では、公称値には下付文字の「N」を添え表記し、材料特性のばらつきを考慮した値には下付文字

表-2 材料特性等のばらつき要因とばらつきの設定

パラメータ	基準値	平均値	変動係数
コンクリート強度	18N/mm ²	120%	10%
鋼材の降伏応力度	315N/mm ²	120%	7%
鋼材の弾性係数	2.06×10^5 N/mm ²	97%	1%
作用軸力	設計値	105%	5%
断面寸法(板厚)	設計値	105%	1%

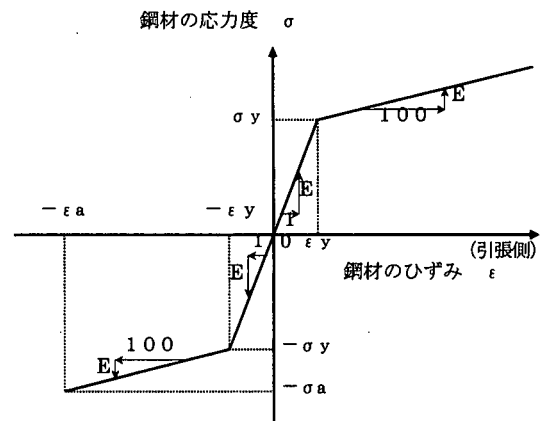


図-1 鋼材の応力-ひずみ関係

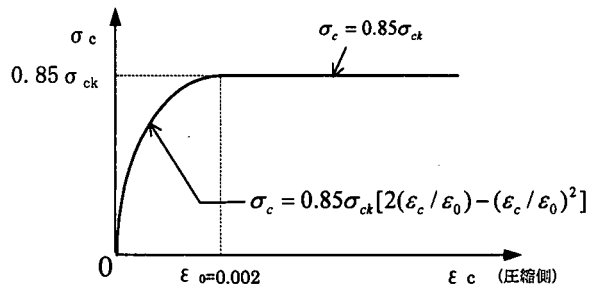


図-2 コンクリートの応力-ひずみ関係

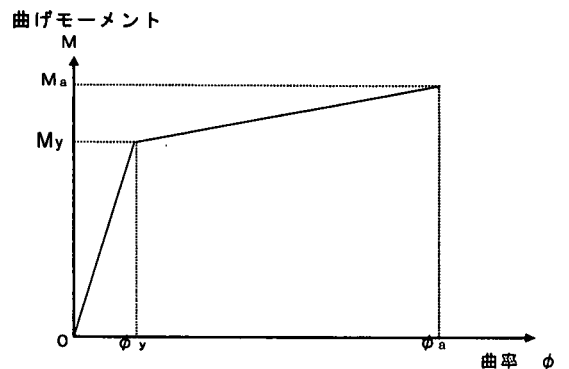


図-3 パイリニア型のM-Φ関係

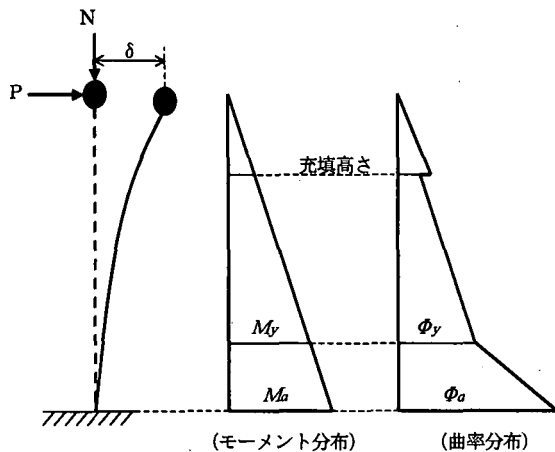


図-4 曲げモーメントと曲率

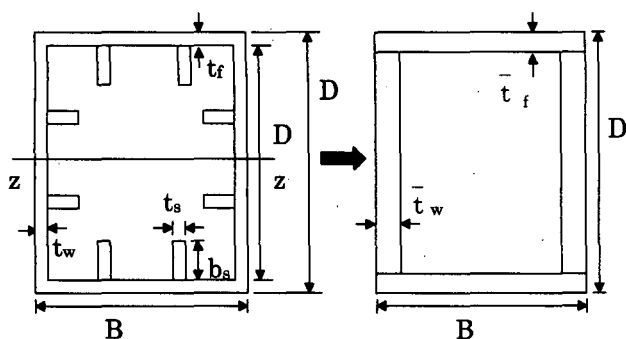


図-5 等価断面の概念図

表-3 8 供試体のシミュレーション結果

供試体	H_{maxM}/H_{maxN}		δ_{aM}/δ_{aN}	
	平均値	変動係数	平均値	変動係数
M5	1.109	0.08311	1.351	0.10731
M6	1.109	0.07037	1.321	0.11755
No.26	1.106	0.08089	1.336	0.10432
No.27	1.116	0.07416	1.311	0.10590
K1	1.109	0.08469	1.347	0.10230
K2	1.098	0.07746	1.336	0.11935
A3RS	1.109	0.08996	1.336	0.11051
A3RN	1.115	0.07315	1.347	0.11322

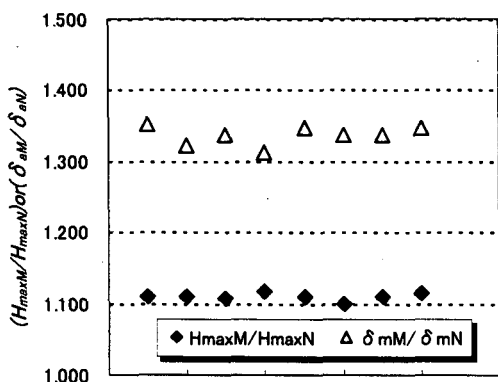


図-6 8 供試体のシミュレーションの平均値

の「 M 」を添え表記しており、公称値より算出した値、材料特性のばらつきから算出した値にも同様の表記をする。例えば、公称値から算出した最大水平荷重は H_{maxN} 、材料特性のばらつきを考慮して求めた値から算出した最大水平荷重は H_{maxM} と表し、特に断りのない限り他の量についても同様の表記をする。なお、実際に発生させた乱数の確率特性と仮定した確率特性を比較したが、誤差は1%以下となっており、目標とした確率分布特性を有するサンプルが得られていると判断できる。

(2) M-Φ関係の設定

最大水平荷重および最大水平荷重時変位に対応する許容変位の推定手法として、平成14年道示V⁰ではM-Φ関係を利用する方法が示されている。そこで、本研究ではM-Φ関係を利用して8供試体についてシミュレーションを行った。以下にM-Φ関係を利用した最大水平荷重および許容変位の算出方法を示す。

- 平成14年道示V⁰に示される鋼材の応力-ひずみ関係として図-1、コンクリートの応力-ひずみ関係として図-2を仮定し、ファイバー要素を使用して、鋼材の板厚中心位置において、圧縮側ひずみが初めて降伏ひずみ ϵ_y に達する時の点 (M_{yc} , Φ_{yc})、引張側ひずみが初めて ϵ_y に達する時の点 (M_{yt} , Φ_{yt}) を算出し、いずれか小さい方の点を (M_y , Φ_y) とする。断面は縦リブ配置等を忠実にモデル化している。
- 圧縮側ひずみが初めて ϵ_a に達する時の点 (M_a , Φ_a) を計算し、図-3のバイリニア型のM-Φ関係を設定する。許容ひずみ ϵ_a は鋼材の降伏ひずみ ϵ_y ($=\sigma_y/E$) を用いて以下の式(1)により算出する。
- 最大水平荷重 H_{max} は M_a を載荷点高さ h で割ることにより、許容変位は図-4の曲率分布を利用して以下の式(2)から算出した。

$$\epsilon_d/\epsilon_y=7 \quad (1)$$

$$\delta_a = \int_0^L (\phi \times y) dy \quad (2)$$

なお、本解析では、シミュレーションにおける繰り返し計算の煩雑さを避けるため、解析では図-5に示すように補剛材を有する箱型断面を等価な無補剛箱型断面に置き換えて計算した。等価断面を用いた設計は、すでに多数の実橋脚で使用されており、その妥当性が実証されている。なお、等価断面には、Z軸回りの全塑性モーメントを不変とする設定法と、Z軸回りの断面2次モーメントを不変とする設定法が考えられるが、文献5)と同様、今回の解析では前者を用いて計算した。以下に、その計算方法を示す。

①断面の外形は変わらない(フランジ幅 B 、ウェブ高さ D は不変)。

②断面積は変わらない。

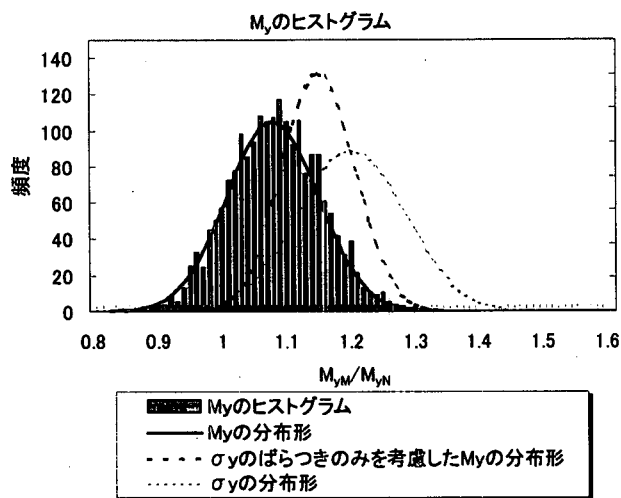


図-7 降伏曲げモーメントのシミュレーション結果

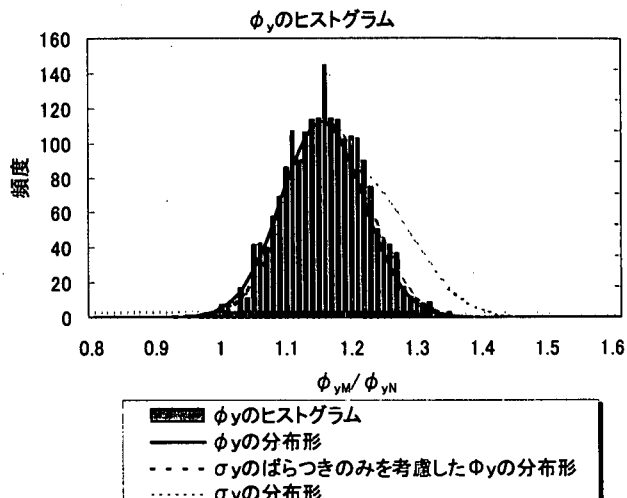


図-8 降伏曲率のシミュレーション結果

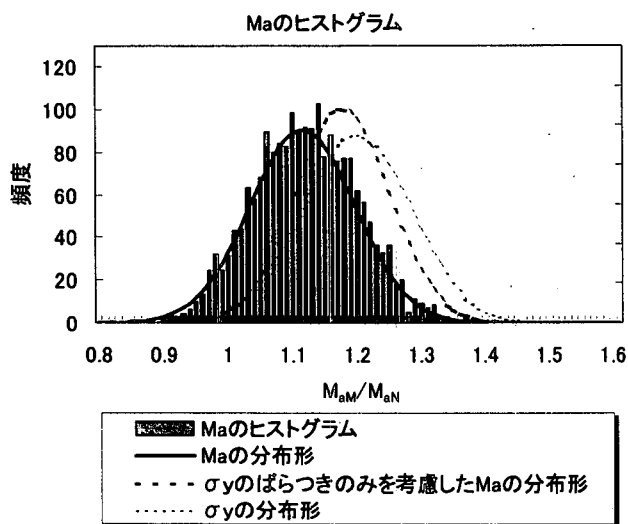


図-9 許容曲げモーメントのシミュレーション結果

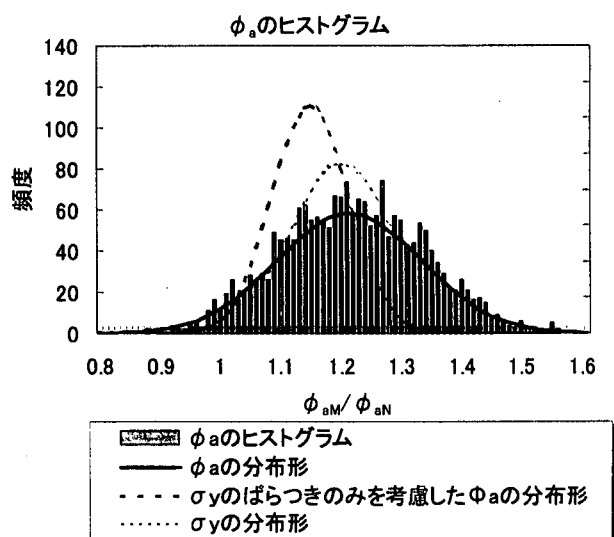


図-10 許容曲率のシミュレーション結果

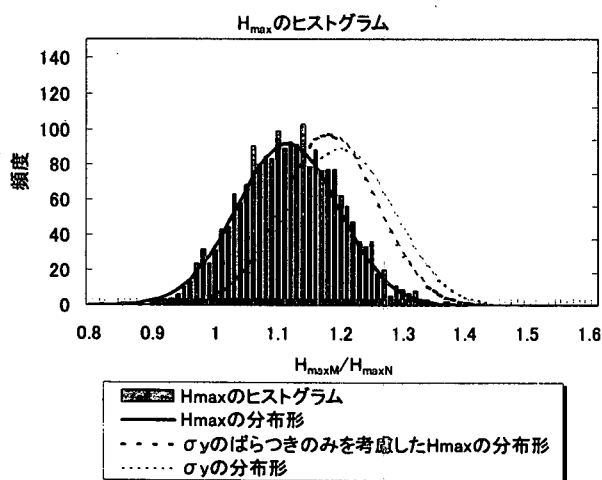


図-11 最大水平荷重のシミュレーション結果

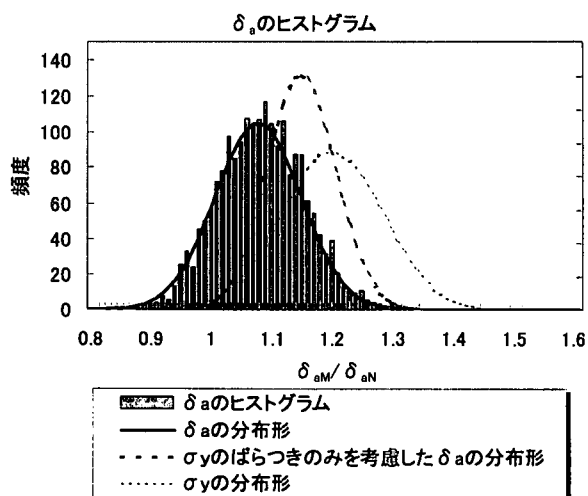


図-12 許容変位のシミュレーション結果

③ z 軸回りの断面 2 次モーメントは変わらない。

これらの条件より、置換断面のフランジ板厚 $\bar{t}_f$ ウェブの板厚 $\bar{t}_w$ は、条件②、③を表す下記の式 (3) を解くことによって容易に求められる。

$$\begin{aligned} 2[B\bar{t}_f + (D - 2\bar{t}_f)\bar{t}_w] &= A \\ BD^3 - (B - \bar{t}_w)(D - \bar{t}_f)^3 &= 12I \end{aligned} \quad (3)$$

ここで、 A ：鋼断面の全断面積

I ：鋼断面の断面 2 次モーメント

である。これより、 $\bar{t}_f$ $\bar{t}_w$ は式 (4) のように求まる。

$$\begin{aligned} \bar{t}_f &= \frac{1}{2} \left[D - \sqrt{\frac{BD^3 - 12I}{BD - A}} \right] \\ \bar{t}_w &= \frac{1}{2} \left[B - \frac{(BD - A^{3/2})}{(BD^3 - 12I)^{1/2}} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

シミュレーション結果について平均値、標準偏差、変動係数を表-3 に、また、平均値については図-6 にも示す。供試体間で大きな差異はなかったため、紙面の都合上から、詳細な分布形については供試体 A3RN の結果のみを一例として代表させ、図-7 から図-12 に示す。各図からわかるように、どのパラメータもばらつきが大きい。また図には、材料特性のばらつきとして鋼材の降伏応力度のみを代表させて算出した場合の分布形と鋼材の降伏応力度自体も比較のため掲載してある。これは、コンクリートを充填しない鋼製橋脚について、著者らが文献 5) で同様のシミュレーションを行った際、材料特性のばらつきとして鋼材の降伏応力度のみを代表させてもシミュレーション結果に差異がなかったことに基づくものである。しかしながら、今回の検討では、コンクリートを充填していることもあり、鋼材の降伏応力度のばらつきのみがシミュレーション結果に影響を与えているのではないことがわかる。コンクリート強度のばらつきが大きいことが原因として考えられる。

1) 降伏曲げモーメントのシミュレーション結果 (図-7)

公称値から算出した降伏曲げモーメント M_{yN} と材料特性のばらつきを考慮して算出した降伏曲げモーメント M_{yM} の比 M_{yM}/M_{yN} について、2,000 回の平均値は 1.078、標準偏差は 0.0711、変動係数は 0.0659 となった。

2) 降伏曲率のシミュレーション結果 (図-8)

公称値から算出した降伏曲率 ϕ_{yN} と材料特性のばらつきを考慮して算出した降伏曲率 ϕ_{yM} の比 ϕ_{yM}/ϕ_{yN} について、2,000 回の平均値は 1.156、標準偏差は 0.0631、変動係数は 0.0545 となった。

3) 許容曲げモーメントのシミュレーション結果 (図-9)

公称値から算出した許容曲げモーメント M_{aV} と材料特性のばらつきを考慮して算出した許容曲げモーメント M_{aM} の比 M_{aM}/M_{aV} について、2,000 回の平均値は 1.115、標準偏差は 0.0816、変動係数は 0.0732 となった。

4) 許容曲率のシミュレーション結果 (図-10)

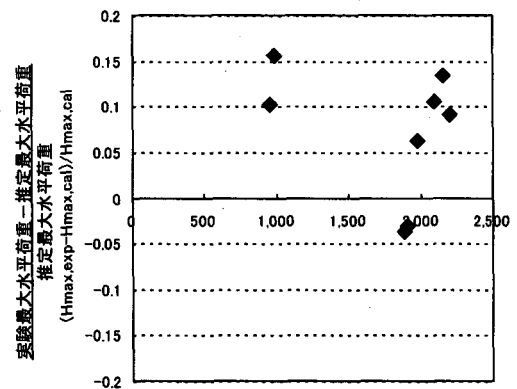
公称値から算出した降伏曲率 ϕ_{aV} と材料特性のばらつきを考慮して算出した降伏曲率 ϕ_{aM} の比 ϕ_{aM}/ϕ_{aV} について、2,000 回の平均値は 1.214、標準偏差は 0.1199、変動係数は 0.0988 となった。

5) 最大水平荷重のシミュレーション結果 (図-11)

公称値から算出した最大水平荷重 H_{maxV} と材料特性のばらつきを考慮して算出した最大水平荷重 H_{maxM} の比 H_{maxM}/H_{maxV} について、2,000 回の平均値は 1.115、標準偏差は 0.0816、変動係数は 0.0732 となった。材料特性のばらつきを考慮して算出した最大水平荷重 H_{maxM} の大部分が公称値から算出した最大水平荷重 H_{maxV} を上回り、M- Φ モデルによる設計では、最大水平荷重は安全側の評価

表-4 実験結果および M- Φ 関係による計算結果

供試体	M- Φ 関係による推定値		実験値	
	H_{max} (kN)	δ_a (mm)	P_{max} (kN)	δ_m (mm)
M5	1,854	79	1,971	75
M6	1,962	75	1,902	90
No.26	1,956	79	1,883	76
No.27	1,890	57	2,089	56
K1	1,895	48	2,148	72
K2	2,023	62	2,206	85
A3RS	849	82	981	85
A3RN	863	85	951	85



実験で得られた最大水平荷重 $H_{max,exp}$ (kN)

図-13 耐力評価式の精度

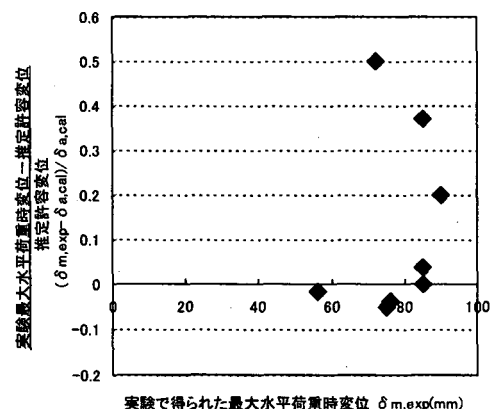


図-14 変形性能評価式の精度

を受けていることがわかる。

6) 許容変位のシミュレーション結果 (図-12)

公称値から算出した許容変位 δ_{aV} と材料特性のばらつきを考慮して算出した許容変位 δ_{aM} の比 δ_{aM}/δ_{aV} について、2,000 回の平均値は 1.347、標準偏差は 0.1525、変動係数は 0.1132 となった。材料特性のばらつきを考慮して算出した許容変位 δ_{aM} の大部分が公称値から算出した許容変位 δ_{aV} を上回り、設計では、許容変位も安全側の評価を受けていることがわかる。ただし、設計値を下回る可能性は、最大水平荷重より許容変位の方が大きく、今回ばらつき要因として考慮したパラメータは変形性能の方に大きな影響を与えていることがわかった。

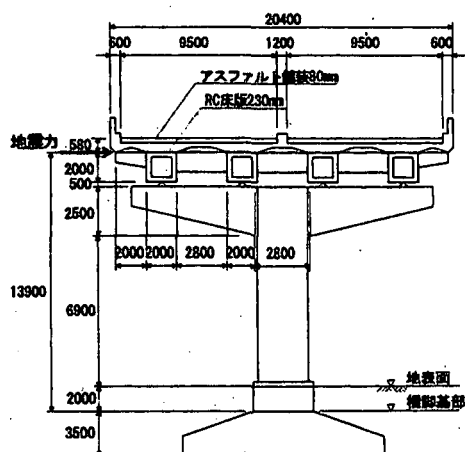


図-15 仮定した鋼製橋脚⁹⁾

3. M - Φ 関係の精度の検討

一般に耐力および変形性能評価式の推定式の精度は、正負交番載荷試験結果による荷重-変位特性と比較することによって得られる⁴⁾。そこで2章と同じ8供試体を対象に、最大水平荷重および最大水平荷重時変位に関して、表-2 に示す材料強度を用いて M- Φ 関係から求まる計算結果と正負交番載荷試験結果との比較を行った。対象とした8供試体について、正負交番載荷試験によって得られた最大水平荷重 P_{max} および最大水平荷重時変位 δ_m の実験結果、M- Φ 関係から算出した最大水平荷重 H_{max} および許容変位 δ_a を表-4 に示す。なお、ここでの比較は忠実断面を用いて行った。

M- Φ 関係を用いた最大水平荷重の評価精度の検討結果を図-13 に、許容変位の評価精度の検討結果を図-14 に示す。図中の横軸には正負交番載荷試験結果から得られる値を、縦軸には実験結果から得られる値を推定式から計算される値を引き、その引いた値を実験結果の値で除したものをとっている。

平成14年道示V⁹⁾の規定に従って計算される最大水平荷重、許容変位ともにその大部分が実験値を上回っており、安全側の評価を受けるように設定されていることがわかる。特に、許容変位でその傾向が強く、ばらつきも大きなものとなった。最大水平荷重について、縦軸の平均値は 0.0729、標準偏差は 0.0681、変動係数は 0.981 となった。許容変位については、縦軸の平均値は 0.125、標準偏差は 0.210、変動係数は 1.676 となった。

4. 降伏応力度のばらつきおよび評価誤差を考慮した耐力・変形性能の検討

2章で検討した材料特性のばらつき、および3章で検討した評価式のばらつきを同時に考慮した実最大水

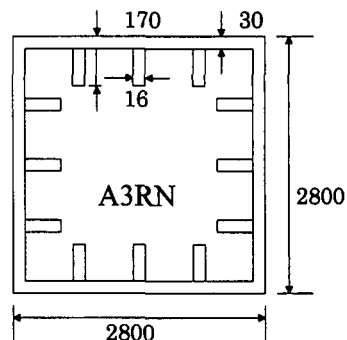


図-16 仮定した鋼製橋脚の断面⁹⁾

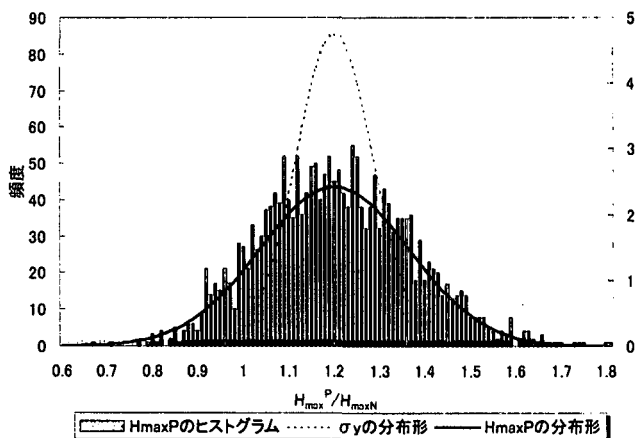


図-17 実最大水平荷重の分布形

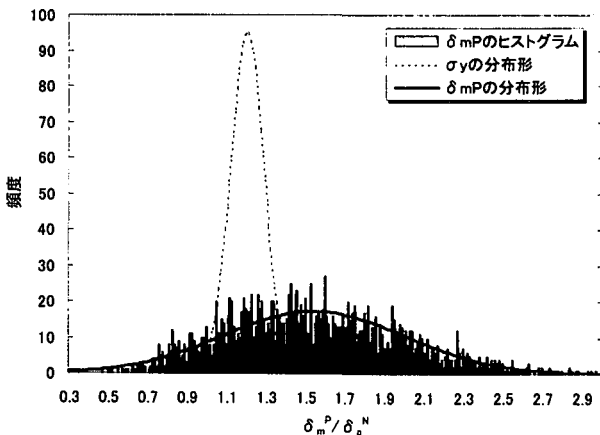


図-18 実最大水平荷重時変位の分布形

平荷重 H_{max}^P 、実最大水平荷重時変位 δ_m^P をそれぞれ算出し、その特性が矩形断面コンクリート充填柱の耐震性評価に及ぼす影響について検討を行った。対象とした実構造物は図-15 および図-16 に示すような、地上の一般道路上部に建設されるような高架道路の鋼製橋脚 A3RN⁹⁾ を仮定した。橋脚の断面諸元およびパラメータを図中に示す。解析手法としては同様にモンテカルロシミュレーションを用いた。断面は2章同様、等価断面を用いた。なお、本文では、材料特性および評価式のばらつきをともに考慮して求めた値を実際に構造物が発揮する量とし「実…」と表記した。また、記号では上付文字の「P」で表してある。

材料特性によるばらつき、および評価式の評価誤差によるばらつきを考慮した場合に、構造物が実際に保有する実最大水平荷重は以下の式 (5) のようにして求めた。公称降伏応力度に基づいて算出される最大水平荷重 H_{maxN} に対して、材料特性等のばらつきを考慮した最大水平荷重 H_{maxM} を算出し、さらにこの H_{maxM} に対して評価式の評価誤差によるばらつきを考慮し、最終的に構造物が実際に発揮する実最大水平荷重 H_{max}^P を算出した。実最大水平荷重時変位 δ_m^P も以下の式 (6) のように同様に算出した。

$$H_{max}^P = (1 + m_H) \cdot H_{maxM} \quad (5)$$

$$\delta_m^P = (1 + m_\delta) \cdot \delta_{aM} \quad (6)$$

H_{maxM} 、 δ_{aM} ：表-1 に示す材料特性のばらつきを考慮して算出した最大水平荷重および最大水平荷重時変位

m_H ：耐力評価式のばらつき考慮する指標で、3章の検討結果より求めた平均値 0.0729、標準偏差 0.0681 に従い、正規分布を仮定して発生させた乱数

m_δ ：変形性能評価式のばらつき考慮する指標で、3章の検討結果より求めた平均値 0.0727、標準偏差 0.0714 に従い、正規分布を仮定して発生させた乱数

実最大荷重の結果を図-17 に、実許容変位の結果を図-18 に示す。実最大水平荷重 H_{max}^P を設計最大荷重 H_{maxN} で基準化した比 H_{max}^P/H_{maxN} について、2,000 個の平均値は 1.201、標準偏差は 0.165、変動係数は 0.137 となった。最大水平荷重 H_{max}^P は大部分において設計最大荷重 H_{maxN} より大きくなっていることがわかる。これは設計で想定すると考えられる耐力より実橋脚が発揮する耐力の方が大きく、安全側の評価を受けていることを表している。また、ばらつきが大きい。これは4章で検討した M- Φ 関係の評価誤差が大きかったことに加え、材料特性等すべてのばらつきを包含した検討結果であることが原因であると考えられる。実最大水平荷重時変位 δ_m^P を設計最大荷重時変位 δ_{mN} で基準化した比 δ_m^P/δ_{mN} について、2,000 個の平均値は 1.545、標準偏差は 0.460、変動係数は 0.298 となった。実最大水平荷重時変位 δ_m^P につい

ても大部分が設計許容変位 δ_{mN} を上回り、設計で想定すると考えられる変形性能より実橋脚が発揮する変形性能の方が大きく、変形性能に着目した設計でもかなり安全側の評価を受けていることがわかる。また、最大水平荷重 H_{max}^P と比べても、最大水平荷重時変位 δ_m^P は非常にばらつきが大きい。これは、4章で検討した M- Φ 関係の評価精度において、平成 14 年道示 V⁹⁾ の規定が許容変位に関してはかなり安全側に設定されていたことが原因として考えられる。

5. 結論

本稿では、材料特性等のばらつきと耐力および変形性能を評価する際の M- Φ 関係における評価誤差によって生じるばらつきが、コンクリートを充填した矩形断面鋼製橋脚の耐震性の評価に与える影響についての検討を行った。得られた結論をまとめると以下ようになる。

(1) 材料特性のばらつきを考慮して算出した最大水平荷重 H_{maxM} の大部分が公称値から算出した最大水平荷重 H_{maxN} を上回り、M- Φ モデルによる設計では、最大水平荷重は安全側の評価を受けていることがわかる。また、材料特性のばらつきを考慮して算出した許容変位 δ_{aM} も大部分が公称値から算出した許容変位 δ_{aN} を上回り、許容変位も安全側の評価を受けていることがわかる。ただし、材料特性のばらつきは耐力より変形性能に与える影響の方が大きい。

(2) 平成 14 年道示 V の規定において、M- Φ 関係から計算される最大水平荷重および許容変位は、正負交番載荷実験結果の最大荷重、最大荷重時変位をともに安全側に評価している。特に、許容変位については、かなり安全側に設定しているものと考えられる。

(3) 材料特性によるばらつき、および M- Φ 関係の評価誤差によるばらつきを考慮した最大水平荷重 H_{max}^P は大部分において設計最大荷重 H_{maxN} より大きくなっていることがわかる。これは設計で想定すると考えられる耐力より実橋脚が発揮する耐力の方が大きく、設計において安全側の評価を受けていることを表している。実最大水平荷重時変位 δ_m^P についても大部分が設計許容変位 δ_{mN} を上回り、設計で想定すると考えられる変形性能より実橋脚が発揮する変形性能の方が大きく、変形性能に着目した設計でも安全側の評価を受けていることがわかる。また、最大水平荷重時変位 δ_m^P は非常にばらつきが大きい。これは、M- Φ 関係が許容変位に関してかなり安全側に設定されている影響を受けているためである。

参考文献

- 1) 例えば, 建設省度土木研究所, 首都高速道路公団, 阪神高速道路公団, 名古屋高速道路公社, (社) 鋼材倶楽部, (社) 日本橋梁建設協会: 道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究報告書 (I) ~ (VIII), (総括編), 1997 年 4 月~1999 年 3 月.
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1996 年 12 月.
- 3) Yushi Fukumoto ; Reduction of structural ductility factor due to variability of steel properties, Engineering Structures, No.22, pp.123-127, 2000.
- 4) 足立幸郎, 運上茂樹: じん性設計を行なった鉄筋コンクリート橋脚の耐震信頼性評価, 構造工学論文集, vol.46A, pp.777-788, 2000 年 3 月.
- 5) 森口智聡, 小野 潔, 西村宣男: 降伏応力度等のばらつきが鋼製橋脚の耐震性評価に与える影響に関する検討, 第 4 回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, pp.239-248, 2002 年 1 月.
- 6) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002 年 3 月.
- 7) 小野 潔, 西村宣男, 西川和廣, 中洲啓太, 野中哲也, 坂本圭子: コンクリートを充填した矩形断面鋼製橋脚の M- Φ 関係を利用した耐震性能評価手法に関する検討, 構造工学論文集, vol.48A, pp.683-692, 2002 年 3 月.
- 8) 小野 潔, 西村宣男, 高橋 実, 野中哲也, 坂本圭子: コンクリートを充填した鋼製橋脚の M- Φ 関係を利用した耐震性能評価手法に関する検討, 第 4 回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集, pp.193-202, 2002 年 1 月.
- 9) 西川和廣, 村越潤, 山本悟司, 上仙靖, 高橋実, 中嶋浩之, 岡田淳: 鋼製橋脚のハイブリッド地震応答実験, 土木研究所資料第 3585 号, 1993 年 3 月.