

筑波大学大学院博士課程

システム情報工学研究科修士論文

材料特性のばらつきを考慮した
合成桁およびハイブリッド合成桁の
耐力分布に関する数値的検証

千野隆之介

修士（工学）

（構造エネルギー工学専攻）

指導教員 松島亘志

2019年 3月

概要

ハイブリッド合成桁は、合成桁の一種で、主桁にハイブリッド鋼桁を用いる形式のことをいう。ハイブリッド鋼桁とは、正曲げ時に引張抵抗の負担が大きい下フランジに高性能鋼材を適用し、一方で、ウェブと上フランジには普通鋼を用いる桁の合理化構造の一種である。本検討では、ハイブリッド合成桁の合成桁に対する優位性を見出すことを目的とし、材料・部材パラメータのばらつきを考慮した耐力分布をそれぞれ求め比較する。耐力の計算方法としてファイバー法を採用し、モンテカルロ法により耐力分布を求める。結果として、ハイブリッド合成桁は耐力分布のばらつきが比較的小さく、信頼性の高い構造であることがわかった。

目次

第1章	はじめに	1
第2章	ファイバー法による断面解析	3
2.1	曲げ耐力分布の計算方法	3
2.2	材料・部材パラメータとその不確定性	4
2.2.1	部材パラメータ	4
2.2.2	コンクリートの材料パラメータ	4
2.2.3	鋼材の材料パラメータ	4
2.2.4	全塑性曲げモーメント	4
第3章	結果と考察	6
3.1	確率密度関数のモデル化による影響	6
3.1.1	確率密度関数	6
3.1.2	試行回数の検討	6
3.1.3	確率密度関数毎の耐力分布	7
3.2	信頼性指標に基づく曲げ耐力分布比較	10
3.3	各パラメータが耐力分布に及ぼす影響	11
3.4	材料の精度・品質向上による影響	13
3.5	塑性パラメータの品質向上による影響	14
第4章	まとめ	16
	謝辞	17
	参考文献	18
	付録A：ヒストグラムまとめ	19

図表目次

図 1-1	ハイブリッド合成桁と合成桁	2
図 1-2	全塑性曲げモーメント時の矩形応力分布	2
図 2-1	計算フロー	3
表 2-1	部材パラメータ	5
表 2-2	コンクリートの材料パラメータ	5
表 2-3	普通鋼・高性能鋼の材料パラメータ	5
図 2-1	コンクリートの応力ひずみ曲線.....	5
図 2-2	鋼材の応力ひずみ曲線.....	5
	7	
図 3-1	発生させた圧縮強度の平均値と試行回数	7
	7	
図 3-2	発生させた圧縮強度の標準偏差と試行回数.....	7
図 3-3	圧縮強度の確率密度関数（正規分布）	7
図 3-4	圧縮強度の確率密度関数（対数正規分布）	7
図 3-5	圧縮強度の確率密度関数（ワイブル分布）	7
表 3-1	乱数発生させたコンクリートの圧縮強度の平均値と標準偏差および誤差率	7
図 3-6	Mu/Mp ヒストグラム（合成桁）	9
図 3-7	Mu/Mp ヒストグラム（ハイブリッド合成桁）	9
表 3-2	今回の試行で得られた正規化された耐力分布 Mu/Mp の統計量.....	9
図 3-8	信頼性指標の概念図.....	10
図 3-9	信頼性指標と破壊確率の関係	10
表 3-3	信頼性指標と破壊確率.....	10
表 3-4	パラメータ名と文字の定義.....	12
図 3-10	一変数のみにばらつきを与えた時の耐力分布の標準偏差（合成桁）	12
図 3-11	一変数のみにばらつきを与えた時の耐力分布の標準偏差（合成桁）	12
図 3-12	材料品質向上の影響.....	13
図 3-13	工作精度向上の影響.....	13
図 3-14	塑性パラメータの品質向上の影響（ $f_c = 30N/mm^2$ ）	14
図 3-15	塑性パラメータの品質向上の影響（ $f_c = 80N/mm^2$ ）	14
図 3-16	合成桁の応力分布の例.....	15
	（ $f_c = 30N/mm^2$ ）	15
図 3-17	ハイブリッド合成桁の応力分布の例（ $f_c = 30N/mm^2$ ）	15
図 3-18	合成桁の応力分布の例.....	15
	（ $f_c = 80N/mm^2$ ）	15
図 3-19	ハイブリッド合成桁の応力分布の例（ $f_c = 80N/mm^2$ ）	15
図 A-0-1	3.4 節モデル No.1（合成桁）	21
図 A-0-2	3.4 節モデル No.2（合成桁）	21
図 A-0-3	3.4 節モデル No.3（合成桁）	21
図 A-0-4	3.4 節モデル No.4（合成桁）	21
図 A-0-5	3.4 節モデル No.5（合成桁）	22
図 A-0-6	3.4 節モデル No.6（合成桁）	22

図 A-0-7	3.4 節モデル No.7 (合成桁)	22
図 A-0-8	3.4 節モデル No.8 (合成桁)	22
図 A-0-9	3.4 節モデル No.9 (合成桁)	22
図 A-0-10	3.4 節モデル No.1 (ハイブリッド合成桁)	23
図 A-0-11	3.4 節モデル No.2 (ハイブリッド合成桁)	23
図 A-0-12	3.4 節モデル No.3 (ハイブリッド合成桁)	23
図 A-0-13	3.4 節モデル No.4 (ハイブリッド合成桁)	23
図 A-0-14	3.4 節モデル No.5 (ハイブリッド合成桁)	23
図 A-0-15	3.4 節モデル No.6 (ハイブリッド合成桁)	24
図 A-0-16	3.4 節モデル No.7 (ハイブリッド合成桁)	24
図 A-0-17	3.4 節モデル No.8 (ハイブリッド合成桁)	24
図 A-0-18	3.4 節モデル No.9 (ハイブリッド合成桁)	24
図 A-0-19	3.5 節モデル No.1 (合成桁)	25
図 A-0-20	3.5 節モデル No.2 (合成桁)	25
図 A-0-21	3.5 節モデル No.3 (合成桁)	25
図 A-0-22	3.5 節モデル No.4 (合成桁)	25
図 A-0-23	3.5 節モデル No.5 (合成桁)	26
図 A-0-24	3.5 節モデル No.6 (合成桁)	26
図 A-0-25	3.5 節モデル No.7 (合成桁)	26
図 A-0-26	3.5 節モデル No.8 (合成桁)	26
図 A-0-27	3.5 節モデル No.9 (合成桁)	26
図 A-0-28	3.5 節モデル No.10 (合成桁)	27
図 A-0-29	3.5 節モデル No.11 (合成桁)	27
図 A-0-30	3.5 節モデル No.12 (合成桁)	27
図 A-0-31	3.5 節モデル No.1 (ハイブリッド合成桁)	27
図 A-0-32	3.5 節モデル No.2 (ハイブリッド合成桁)	27
図 A-0-33	3.5 節モデル No.3 (ハイブリッド合成桁)	28
図 A-0-34	3.5 節モデル No.4 (ハイブリッド合成桁)	28
図 A-0-35	3.5 節モデル No.5 (ハイブリッド合成桁)	28
図 A-0-36	3.5 節モデル No.6 (ハイブリッド合成桁)	28
図 A-0-37	3.5 節モデル No.7 (ハイブリッド合成桁)	28
図 A-0-38	3.5 節モデル No.8 (ハイブリッド合成桁)	29
図 A-0-39	3.5 節モデル No.9 (ハイブリッド合成桁)	29
図 A-0-40	3.5 節モデル No.10 (ハイブリッド合成桁)	29
図 A-0-41	3.5 節モデル No.11 (ハイブリッド合成桁)	29
図 A-0-42	3.5 節モデル No.12 (ハイブリッド合成桁)	29

第1章 はじめに

かつて、我が国の鋼橋は ASD (Allowable Stress Design : 許容応力度設計法) を用いて降伏点を基準に弾性設計されてきた。2001 年に ASD から性能照査型設計の考えが導入されたが、構造物の要求性能と性能の検証方法を明確にするハードルが高いことを主な理由とし、実態は従来の ASD と何ら変化のない「見做し規定」となった。

一方で、海外諸国では LSD (Limit State Design : 限界状態設計法) による設計が主流となっている。ここで、LSD とは、設計者が定めた各種限界状態を超えないように構造を決定する考え方の事である。米国基準の AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) では、LRDF (Load Resistance Factor Design : 荷重抵抗係数設計法) を 1994 年から採用し、各種係数を荷重作用と抵抗作用に乗じることで、信頼性を担保する。また、EC (European Code) では、部分係数法を採用し、荷重作用と抵抗作用に信頼性を担保するだけでなく、構造物の重要度や解析精度を加味した係数も導入している。両設計法の各種係数は信頼性理論に基づき設定されているが、ASD の安全率の設定根拠は未知である。文献 1) では、我が国のインフラ輸出の主戦場となる東南アジア諸国 (特に、ベトナムやインドネシア) では、AASHTO LRFD が下敷きとなっていることを引き合いに、日本の LSD 適用の遅さを述べている。

このように国際的に LSD が主流となっていることを背景に、我が国も 2017 年に道路橋示方書を改訂し、部分係数を用いた LSD を導入した²⁾。これにより新材料や多様な構造に対応しやすい体制が整備されつつある。多様な構造の例としてハイブリッド合成桁^{3), 4)}が挙げられる。

ハイブリッド合成桁 (図 1-1) は、合成桁の一種で、主桁にハイブリッド鋼桁を用いる形式のことをいう。ハイブリッド鋼桁とは、正曲げ時に引張抵抗の負担が大きい下フランジに高性能鋼材を適用し、一方で、ウェブと上フランジには普通鋼を用いる桁の合理化構造の一種である。ただし、ここでいう高性能鋼材とは、高い強度と優れた溶接性を備えた鋼材料を指す。

文献 5) によると、ハイブリッド合成桁の有用性が実験的に確認されている。ここでは、ハイブリッド合成桁が示す終局時の優れた曲げ抵抗性能が示されている。一般的な鋼構造では、圧縮を受ける上フランジ部に座屈の発生が懸念されるが、この実験では、局部座屈、横倒れ座屈、せん断スパン内のウェブのせん断座屈等の不安定現象は生じず、コンクリート床版上縁が圧壊することで曲げ破壊に到る。また、断面によっては、終局曲げ耐力が全塑性曲げモーメント (図 1-2) を上回ることも確認されている。

一般の鋼 I 桁に LSD を導入した場合、降伏より早期に鋼桁の局部座屈が懸念される。塑性特性を發揮すべく、極厚板や水平補剛材の適用が策としてあるが、耐力負担の小さいウェブに極厚板を適用するメリットの小ささや、鋼重の増大を考慮すると、LSD で鋼 I 桁を設計するメリットは小さいと考えられる。一方、ハイブリッド合成桁を LSD で設計することで、ASD を用いた場合と比較して、経済性が向上するという報告がある。文献 6) では、ハイブリッド合成桁の正曲げ部に対し ASD と LSD の 2 通りで設計し、鋼重を試算・比較している。同一の設計荷重 (曲げモーメント) を与え、必要な断面寸法を定めた結果、ハイブリッド合成桁の設計に LSD を用いると、ASD を用いた場合と比較して、鋼重を 10% 減らせるとしている。これは、鋼材の塑性特性を活かした結果である。

以上のように、道路橋示方書が LSD へ移行したことを背景に、塑性域での優れた耐荷特性や経済性向上が期待できることから、ハイブリッド合成桁の需要が今後高まる可能性がある。しかし、前述のハイブリッド合成桁の有用性は、合成桁に対しても同様にいえる。文献 6) ではハイブリッド合成桁に加え、合成桁の経済性についても検討しており、ASD で設計した合

成桁と比較して LSD の場合、20%程鋼重を低減できるとしている。加えて、文献 7) では、合成桁が全塑性曲げモーメントに達することを確認しており、一概にハイブリッド合成桁が優れた構造であるとは言い難い。そのため、施工実績が多く、信頼されている合成桁の方が採用されやすく、ハイブリッド合成桁の導入が進んでいない。

塑性特性を扱う LSD では、材料の非線形領域を扱うため、構造物の耐荷挙動が予測しづらい。加えて、材料・部材に不確実性が存在するため、耐力も不確実性を持つ。つまり、LSD を導入するためには、設計値が構造物の耐荷挙動に対してどの程度余裕を持つのか、確率論的に明らかにすべきである。そのためには、入力パラメータを確率変数として、耐力の確率分布を求める手法が必要になる。合成桁については、既に材料パラメータの不確実性に基づいて、曲げ耐力分布を算出した研究例^{7), 8), 9)}がある。特に、文献 7) では、コンクリートの圧縮強度や鋼材の降伏強度などの材料パラメータを確率変数とし、モンテカルロ法によって耐力分布を求めて耐力設計式を提案している。一方、合成桁に比べて、ハイブリッド合成桁については、同様の検討が少ない。不確実性を考慮した際にハイブリッド合成桁がどのような耐荷挙動を示すかを明らかにすれば、ハイブリッド合成桁の合成桁に対する優位性を新たに見出せる可能性がある。

そこで、本研究では、ハイブリッド合成桁の合成桁に対する優位性を見出すことを目的として、材料・部材パラメータの不確実性を考慮した耐力分布をそれぞれ求め、比較する。耐力の計算法としてファイバー法を採用し、モンテカルロ法により分布を求める。モデルは統計データの与え方を変化させることで複数用意し、各モデルにおける耐力分布に考察を加える。

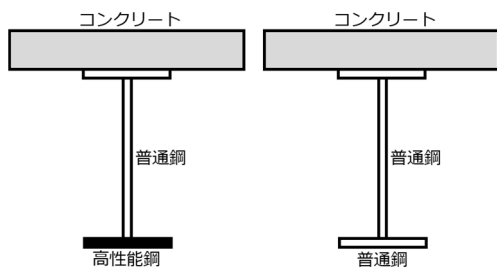


図 1-1 ハイブリッド合成桁と合成桁

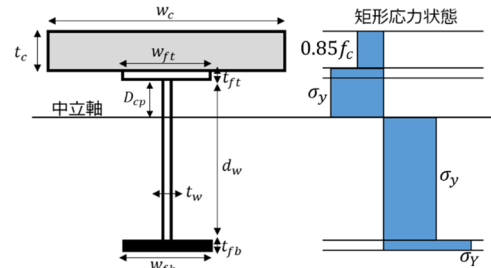


図 1-2 全塑性曲げモーメント時の矩形応力分布

第2章 ファイバー法による断面解析

2.1 曲げ耐力分布の計算方法

合成桁およびハイブリッド合成桁の耐力は、ファイバー法を用いて計算する。ファイバー法とは、断面を高さ方向に離散化（微小面積に分割）し、各要素（ファイバー）にひずみを割り当て、応力ひずみ関係より、軸力、曲げモーメントを計算する手法である。まず、コンクリート床版上縁の圧壊を終局限界状態と定義する。固定した圧壊ひずみに対して、断面内の軸力（ある高さのファイバー要素の断面積×その位置の応力）の総和が0になるように中立軸位置を求める。終局限界状態は塑性域なので、軸力と中立軸位置は非線形の関係となる。軸力の総和が0で床版上縁が圧壊している時の曲げモーメントを曲げ耐力 M_u とする。ただし、平面保持の仮定が成り立つものとし、また、鋼桁部に局部座屈や横倒れ座屈等の脆性的破壊現象が起こらないものと仮定している。今、材料・部材パラメータが与えられたとして、曲げ耐力を解析的に求めることは難しい。そこで、上記のようなファイバー法に、モンテカルロ法を組み合わせることで耐力分布を算出する。計算フローは文献7)を参考に、図2-1のように行った。

一方で、先に図1-2に示したような矩形応力状態の時の曲げモーメントを全塑性曲げモーメント M_p という¹⁰⁾。これは必ずしも終局時の曲げモーメントを表すものではないが、解析的に求めることが容易なことから、終局曲げ耐力の近似式として設計に用いられる。AASHTOやECでは、座屈破壊がコンクリートの圧縮破壊に先行しない断面であれば、設計曲げ耐力として全塑性曲げモーメントを採用できるとしている。限界状態設計法では、全塑性曲げモーメントが曲げ耐力の評価基準になっており、全塑性曲げモーメントを基準とした設計式も提案されている⁷⁾。今回は、全塑性曲げモーメントの計算にあたっては、各材料パラメータの平均値を用いる。合成桁とハイブリッド合成桁それぞれについて M_p を求め、 M_u 分布を正規化する。

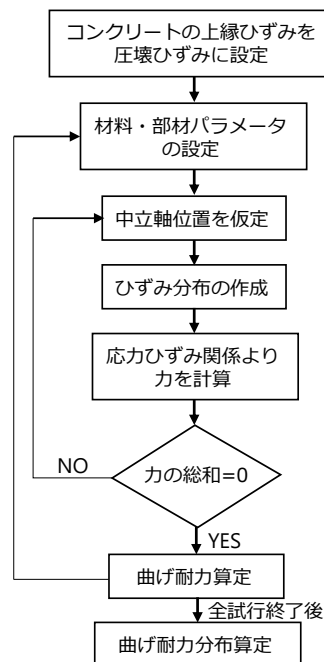


図 2-1 計算フロー

2.2 材料・部材パラメータとその不確定性

2.2.1 部材パラメータ

断面寸法の決定には、コンクリートが終局状態まで圧縮力を負担するように中立軸が常に鋼ウェブ内に存在するように決定した。これは、将来、座屈を考慮できる有限変位モデルを用いて、同様の検討を実施する予定のため、あえて、鋼材が圧縮力を負担するようにする必要があったためである。また、ある程度現実的な値となるように、道路橋示方書¹¹⁾の最小板厚に関する規定、ASSHTOのコンパクト断面設定式¹⁰⁾等を参考にした。コンパクト断面とは、最大曲げ耐力が全塑性曲げモーメントに達することができる断面であり、つまり座屈破壊が鋼材の降伏や床版の圧壊に先行することが無い断面である。

表 2-1 は今回の検討で用いるモデルの寸法値を示す。寸法に不確定性を与えるため、正規分布の平均値と標準偏差を記載してある。コンクリート寸法の標準偏差に関しては、型枠の製作精度に依存するとし¹²⁾、不確定性を与えた。鋼材寸法の標準偏差は橋梁向け鋼材の統計調査¹³⁾を参考に設定した。

2.2.2 コンクリートの材料パラメータ

コンクリートの応力ひずみ曲線として、次式を用いる。

$$\begin{cases} \sigma_c = 0.85f_c \left(\frac{\varepsilon_c}{0.002} \right) \left(2 - \frac{\varepsilon_c}{0.002} \right) & \text{ただし, } \varepsilon_c \leq 0.002 \\ \sigma_c = 0.85f_c & \text{ただし, } 0.002 \leq \varepsilon_c \leq 0.0035 \end{cases} \quad (1)$$

ただし、 σ_c : コンクリート応力、 f_c : 圧縮強度、 ε_c : コンクリートひずみである。これはコンクリート示方書で規定された式で、文献 7) でも使用されている。概略図を図 2-1 に、コンクリートの材料パラメータを表 2 に示す。値は文献 14) を参考に設定している。

2.2.3 鋼材の材料パラメータ

鋼材の応力ひずみ曲線として、次式を用いる。

$$\begin{cases} \sigma_s = E\varepsilon_s & \text{ただし, } \varepsilon_s \leq \varepsilon_y \\ \sigma_s = \sigma_y & \text{ただし, } \varepsilon_y \leq \varepsilon_s \leq \varepsilon_{st} \\ \left[\frac{\sigma_s}{\sigma_y} = \frac{1}{\xi} \frac{E_{st}}{E} \left[1 - \exp \left\{ -\xi \left(\frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_y} - \frac{\varepsilon_{st}}{\varepsilon_y} \right) \right\} \right] \right] + 1 & \text{ただし, } \varepsilon_s \geq \varepsilon_{st} \end{cases} \quad (2)$$

ただし、 σ_s : 鋼材応力、 ε_s : 鋼材ひずみ、 E : ヤング率、 ε_y : 降伏ひずみ、 ε_{st} : 硬化ひずみ、 σ_y : 降伏強度、 E_{st} : 硬化係数、 ξ : ひずみ硬化後の応力ひずみ曲線を規定するパラメータ（硬化曲率と呼ぶこととする）である。これは土木学会鋼構造新技術小委員会で規定された式で、コンクリート同様に文献 7) で使用されている。ハイブリッド合成桁の場合は、普通鋼と高性能鋼の両者に対して式 (2) を適用する。概略図を図 2-2 に、鋼材の材料パラメータを表 3 に示す。値は文献 13) を参考に設定している。

2.2.4 全塑性曲げモーメント

以上に設定した値の平均値を用いて、全塑性曲げモーメント M_p と全塑性時の中立軸位置までのウェブ圧縮領域 D_{cp} を求めた。合成桁では、 $M_p = 1.05 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{mm}$ 、 $D_{cp} = 305.5 \text{ mm}$ ハイブリッド合成桁では、 $M_p = 1.37 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{mm}$ 、 $D_{cp} = 653.1 \text{ mm}$ となる。

表 2-1 部材パラメータ

パラメータ	平均値 μ (mm)	標準偏差 σ (mm)	変動係数CV
床版幅 : w_c	1500	6	0.004
床版厚 : t_c	160	6	0.0375
上フランジ幅 : w_{ft}	300	4.38	0.0146
上フランジ厚 : t_{ft}	15	0.219	0.0146
ウェブ厚 : t_w	15	0.219	0.0146
ウェブ高さ : d_w	1500	21.9	0.0146
下フランジ幅 : w_{fb}	300	4.38	0.0146
下フランジ厚 : t_{fb}	40	0.584	0.0146

表 2-2 コンクリートの材料パラメータ

パラメータ	平均値 μ	標準偏差 σ	変動係数CV
圧縮強度 f_c (N/mm ²)	30	1.2	0.04
圧壊ひずみ	0.0035		

表 2-3 普通鋼・高性能鋼の材料パラメータ

パラメータ	普通鋼			高性能鋼		
	平均値 μ	標準偏差 σ	変動係数 CV	平均値 μ	標準偏差 σ	変動係数 CV
ヤング率 E (N/mm ²)	200000	2000	0.01	200000	2000	0.01
降伏強度 σ_y (N/mm ²)	293.75	23.5	0.08	549	36	0.0656
硬化ひずみ ε_{st}	0.0185	0.0049	0.265	0.0082	0.0041	0.5
硬化係数 E_{st} (N/mm ²)	4156	1342	0.323	2000	1170	0.585
硬化曲率 ξ (N/mm ²)	0.049	0.027	0.55	0.02	0.025	1.25

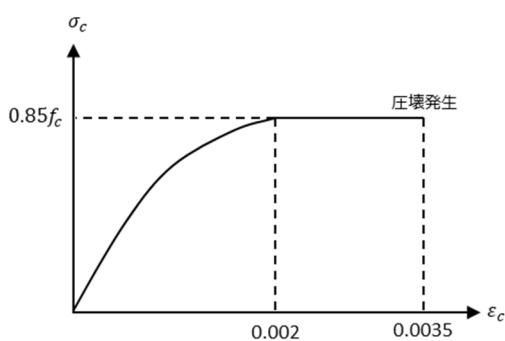


図 2-1 コンクリートの応力ひずみ曲線

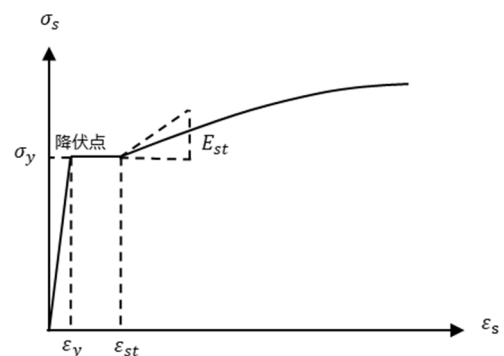


図 2-2 鋼材の応力ひずみ曲線

第3章 結果と考察

3.1 確率密度関数のモデル化による影響

3.1.1 確率密度関数

本検討では、材料・部材パラメータに与える確率密度関数の違いが耐力分布に及ぼす影響を考察するため、3種類の確率密度関数¹⁵⁾(正規分布、対数正規分布、ワイブル分布)を用意する。それぞれの確率密度関数を式(3)、式(4)、式(5)に示す。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (3)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2\right] \quad (4)$$

$$f(x) = \frac{1}{\gamma^m} m x^{m-1} \exp\left[-\frac{1}{\gamma^m} x^m\right] \quad (5)$$

対数正規分布パラメータ λ , ζ およびワイブル分布のパラメータ m , η はそれぞれ式(6)、式(7)および式(8)、式(9)により求める。

$$\lambda = \ln \mu - \frac{1}{2}\zeta^2 \quad (6)$$

$$\zeta = \sqrt{\ln\left(1 + \frac{\sigma^2}{\mu^2}\right)} \quad (7)$$

$$\mu = \eta \Gamma\left(\frac{1}{m} + 1\right) \quad (8)$$

$$\sigma = \eta \sqrt{\Gamma\left(\frac{2}{m} + 1\right) - \Gamma^2\left(\frac{1}{m} + 1\right)} \quad (9)$$

3.1.2 試行回数の検討

ここで、モンテカルロ法の試行回数の検討を行う。図3-1、図3-2に、試行回数と、発生させた乱数の平均値および標準偏差の関係を示す。試行回数は1回から10000回までであり、横軸を対数軸としている。ここでは、一例としてコンクリートの圧縮強度のみ表示している。図より、約1000回で傾きが小さくなり、以降設計値(図2-2で設定した値)に収束していく様子が確認できる。10000回で十分収束していると判断し、本検討では試行回数を10000回と設定した。

さらに、10000回の試行回数のもと発生させた乱数のヒストグラム、および、各確率密度関数との誤差率をそれぞれ図3-3、図3-4、図3-5、表3-1に示す。()内は設計値との誤差率である。平均値は1%以下、標準偏差は2.2%以下に収まっている。設計値と完全に一致しているわけではないが、この程度の誤差率のもとで結果に対して考察を行う。

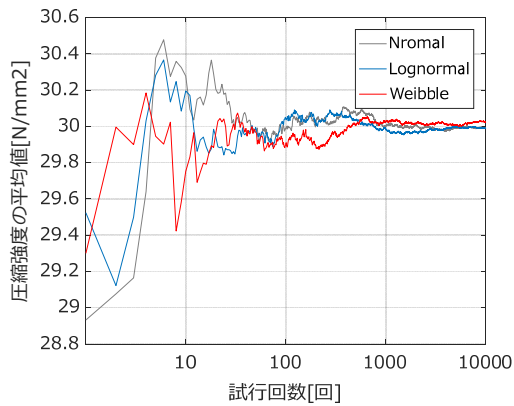


図 3-1 発生させた圧縮強度の平均値と試行回数

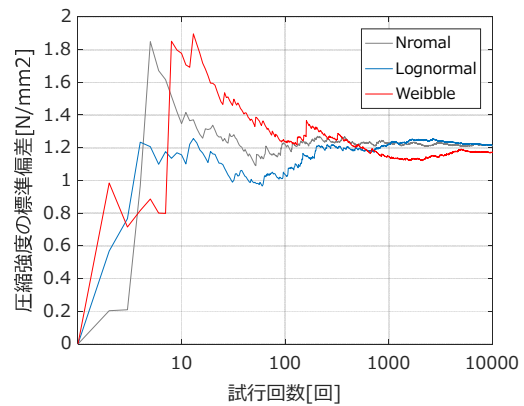


図 3-2 発生させた圧縮強度の標準偏差と試行回数

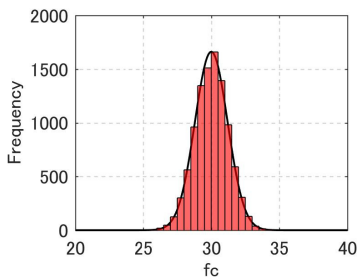


図 3-3 圧縮強度の確率密度関数（正規分布）

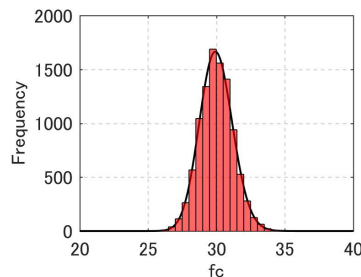


図 3-4 圧縮強度の確率密度関数（対数正規分布）

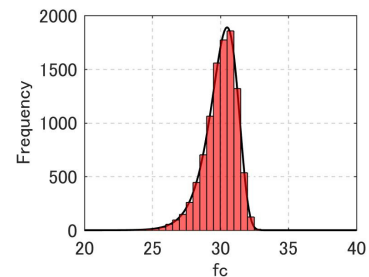


図 3-5 圧縮強度の確率密度関数（ワイブル分布）

表 3-1 乱数発生させたコンクリートの圧縮強度の平均値と標準偏差および誤差率

仮定した分布	正規分布	対数正規分布	ワイブル分布
平均値 μ	29.99 (0.03%)	29.99 (0.03%)	30.02 (0.07%)
標準偏差 σ	1.212 (1%)	1.215 (1.25%)	1.174 (2.2%)

() 内は誤差率

3.1.3 確率密度関数毎の耐力分布

ここで、合成桁およびハイブリッド合成桁の正規化された曲げ耐力分布 M_u/M_p のヒストグラムをそれぞれ図 3-6、図 3-7 に示す。各階級の度数も合わせて表示している。また、耐力分布から得た平均値、標準偏差、歪度、尖度を表 3-2 に示す。

合成桁の場合、材料・部材パラメータを正規分布、対数正規分布、ワイブル分布で与えた場合を比較すると、正規分布と比べてワイブル分布は高い耐力の発生頻度が上がると同時に、低い値でも裾野が大きくなることから分かる。これは、表 3-2 では、尖度が他より相対的に大きく、かつ歪度が負になっていることから定量的にも確認できる。一方で、図 3-6 によると、対数正規分布を適用した場合は、低い側に分布が寄ることもわかる。これは表 3-2 では、歪度が正になっていることから分かる。ただし、得られた耐力分布は全体としては大きな差

は見られないので、どの確率密度関数モデルを採用しても大きく結果が変わるわけではない。特に、平均値や標準偏差を求める場合であれば、材料・部材パラメータの確率分布にどのモデルを与えても結果は変わらない。

一方で、破壊確率を求める場合には、材料・部材パラメータの確率分布を精度良く近似できる確率密度関数を用いることが重要である。たとえば、今回の乱数データの場合、 M_u/M_p が0.72以下となったのは、正規分布・対数正規分布では共に0回であったのに対し、ワイブル分布では10回となっている。同じ試行回数であっても、ワイブル分布を用いると破壊確率が高くなる。もし、安全側で設計したい場合、ワイブル分布のように低い値が出てくるモデルを採用したほうが無難である。一方で、破壊確率を求める場合には、材料・部材パラメータの確率分布を精度良く近似できる確率密度関数を用いることが重要である。たとえば、今回の乱数データの場合、 M_u/M_p が0.72以下となったのは、正規分布・対数正規分布では共に0回であったのに対し、ワイブル分布では10回となっている。同じ試行回数であっても、ワイブル分布を用いれば定量的に破壊確率を推定できる。もし、安全側で設計したい場合、ワイブル分布のように低い値が出てくるモデルを採用したほうが無難である。

次に、ハイブリッド合成桁の場合を検討する。ワイブル分布は低い値の裾野が大きく、対数正規分布は、値が小さい側へスライドしていることが分かる。この傾向は合成桁の場合と同じである。また、表3-2を見ると、正規分布・対数正規分布・ワイブル分布の統計量が示す傾向は、合成桁の時と同様である。

以上より、合成桁でもハイブリッド合成桁でも、耐力分布を平均値・標準偏差で評価する場合には、材料・部材パラメータのモデル化の違いが及ぼす影響は小さく、どのような確率分布でも利用できる。ただし、荷重を定めて破壊確率を求める場合には、ワイブル分布を用いるのが安全側である。

続いて、合成桁とハイブリッド合成桁の耐力分布を図3-6、図3-7を用いて比較する。このとき、明らかにハイブリッド合成桁の方が、合成桁よりも狭い範囲に分布している。これは、表3-2より、どの確率密度関数の場合も標準偏差が約0.65倍小さくなることから確認できる。今回の結果から、ハイブリッド合成桁の方が全塑性曲げモーメントに近い値で分布することが分かった。全塑性曲げモーメントは近似式であって、必ずしも終局曲げ耐力と一致するわけではないが、全塑性曲げモーメントによる簡易設計を行う段階で、より精度良く曲げ抵抗性能を評価していると期待でき、合理化の点から有利である。つまり、このことから、ハイブリッド合成桁の方が合成桁よりも鋼桁断面に余分な部分が少なく、高性能鋼材と共同で優れた塑性性能を無駄なく十分に引き出し、経済的な設計の可能性を示しているといえる。

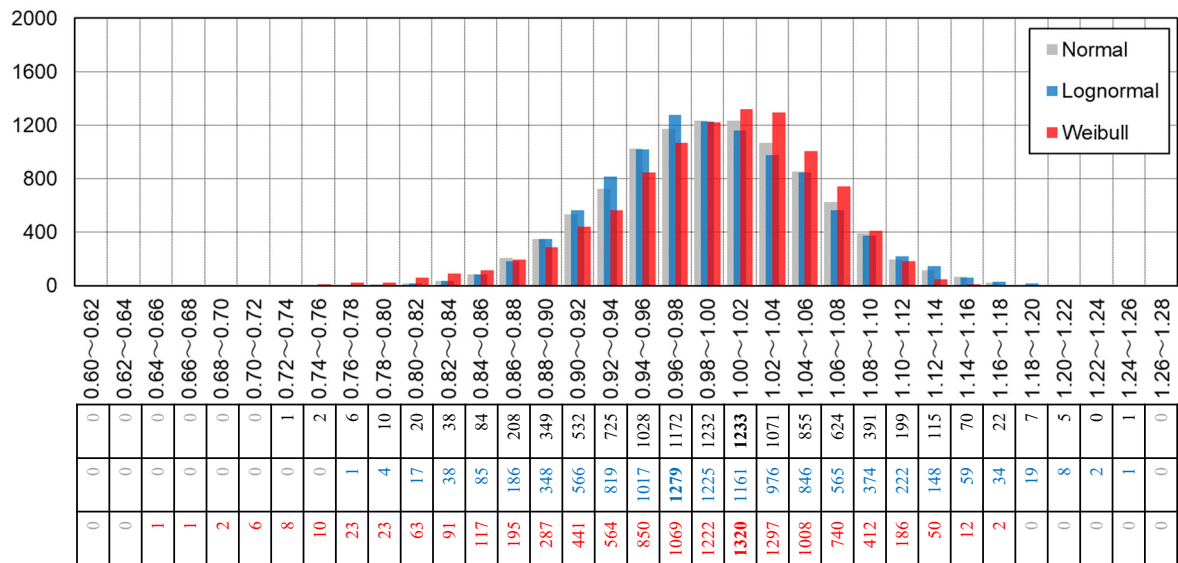


図 3-6 M_u/M_p ヒストグラム (合成桁)

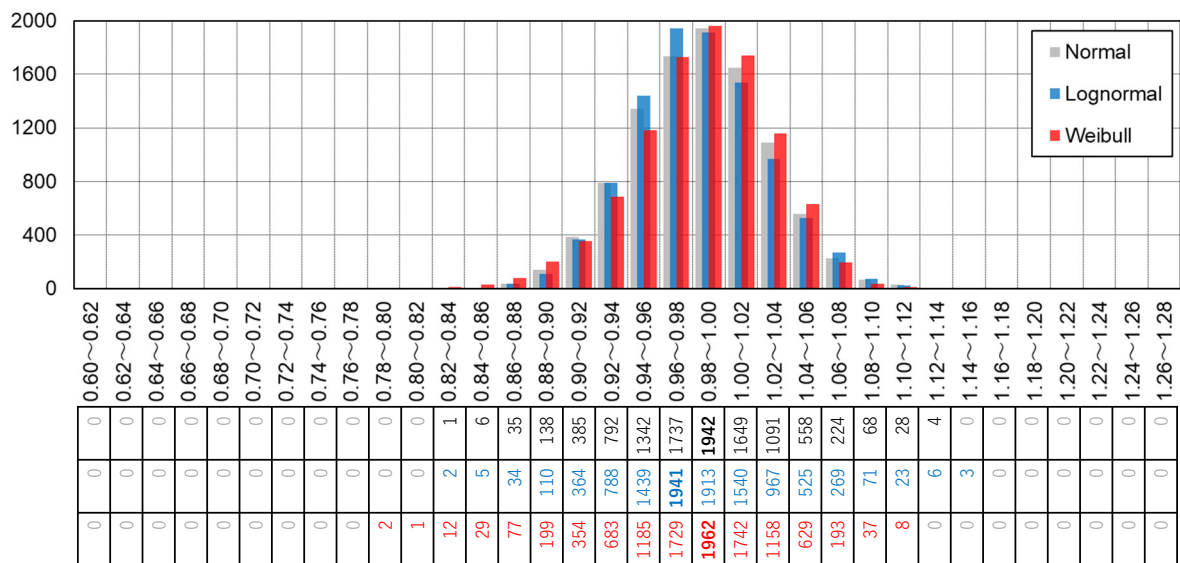


図 3-7 M_u/M_p ヒストグラム (ハイブリッド合成桁)

表 3-2 今回の試行で得られた正規化された耐力分布 M_u/M_p の統計量

	合成桁			ハイブリッド合成桁		
	正規分布	対数正規分布	ワイブル分布	正規分布	対数正規分布	ワイブル分布
平均値	0.993	0.992	0.993	0.985	0.985	0.985
標準偏差	0.0630	0.0634	0.0645	0.0408	0.0405	0.0417
歪度	-0.0345	0.14778	-0.696	0.00734	0.12656	-0.3685
尖度	0.05971	0.0263013	0.87918	-0.0427	0.0957261	0.27994

3.2 信頼性指標に基づく曲げ耐力分布比較

設計においては、信頼性指標 β に基づいた評価が行われる場合が多い。信頼性指標とは、想定される荷重に対する平均値までの余裕度を標準偏差で割ったものである。図 3-8 はその概念図であり、式 (10) は信頼性指標の計算式である。

$$\beta = \frac{\mu_z - F}{\sigma_z} = \frac{\mu'_z}{\sigma_z} \quad (10)$$

ただし、 μ_z 、 σ_z はそれぞれ曲げ耐力分布の平均値と標準偏差を表し、 F は設計荷重である。設計荷重を確定値として扱う場合、同じ断面形状で高機能鋼材を適用しているハイブリッド合成桁の信頼性指標は明らかに高く算出される。そこで、合成桁とハイブリッド合成桁には別々の設計荷重を与える。具体的には、それぞれの材料・部材パラメータを正規分布と仮定した時の 10%規格下限値をインプットとして算出した M_u を設計荷重とする。これにより、信頼性指標の大まかな傾向を把握する。ただし、ここでは、材料・部材パラメータにどの確率密度関数を適用したかに依らず、得られた耐力分布はすべて正規分布と仮定した上で破壊確率を計算している。耐力分布が実際にはどの確率密度関数に最も一致しているかは別途、検討すべき項目である。

信頼性指標と破壊確率の関係、およびその値を、図 3-9、表 3-3 に示す。ハイブリッド合成桁の方が、信頼性指標が大きくなり破壊確率も小さくなっている。これは、3.1 節でみた通り、耐力分布のばらつきはハイブリッド合成桁の方が小さいことと合致し、信頼性指標の観点からもハイブリッド合成桁の高い信頼性を確認できた。

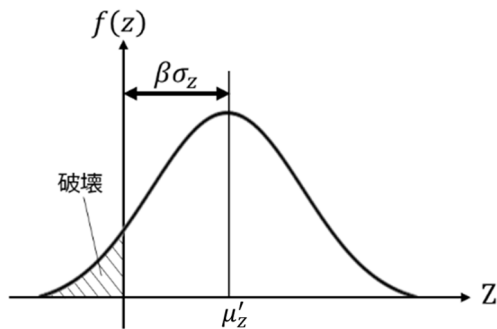


図 3-8 信頼性指標の概念図

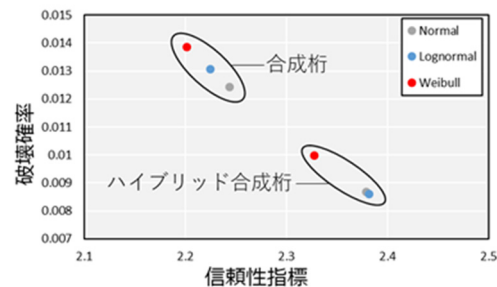


図 3-9 信頼性指標と破壊確率の関係

表 3-3 信頼性指標と破壊確率

	合成桁			ハイブリッド合成桁		
	正規分布	対数正規分布	ワイブル分布	正規分布	対数正規分布	ワイブル分布
信頼性指標 β	2.244	2.224	2.202	2.379	2.382	2.327
破壊確率	0.0124	0.0130	0.0138	0.00870	0.00860	0.00998

3.3 各パラメータが耐力分布に及ぼす影響

本節では、各パラメータが耐力分布に及ぼす影響を検討する。入力パラメータ一つのみをばらつきを与え、耐力分布を算出する。ここでは入力パラメータに正規分布を仮定し計算を行った。ばらつきを与える対象は、2.2節で挙げたすべての材料・部材パラメータである。本節で改めてパラメータ名と定義した文字を、表 3-4 にまとめる。

図 3-10、図 3-11 に、一変数のみをばらつかせた時に得られる耐力分布の標準偏差を示す。それぞれ合成桁、ハイブリッド合成桁の場合である。ALL はすべてのパラメータをばらつかせた時の結果である。本検討は、一つのパラメータのみをばらつかせた結果であり、多変数をばらつかせた際の耐力分布に及ぼす影響度とは必ずしも一致しないことに留意して欲しい。

図 3-10 を見てわかるように、合成桁の場合、 σ_y が耐力分布に及ぼす影響が大きい。この理由は、下フランジと中立軸の距離が大きく、耐力に占める下フランジ（普通鋼）の負担が大きいためだと考えられる。ここで、普通鋼の品質が向上した状況を想定し、 σ_y の標準偏差を 0 として、 σ_y 以外のパラメータをすべてばらつかせ同様の計算をすると、耐力分布の標準偏差が約 0.025 となった。この検討結果から、合成桁の場合、 σ_y のばらつきを抑えることで、信頼性の高い設計が期待できると言える。

次に、図 3-11 を見てわかるように、ハイブリッド合成桁の場合、 σ_y が耐力分布に及ぼす影響が大きい。こちらも合成桁と同様に、中立軸から最も遠い位置にある下フランジ（高性能鋼）の耐力負担が大きいためだと考えられる。ただし、高性能鋼の ALL に占める σ_y の割合は、合成桁の ALL に占める σ_y の割合ほど大きくない。これは、高性能鋼の影響で中立軸位置が下がるためだと考えられる。また、高性能鋼の降伏強度以外にも、普通鋼の降伏強度やコンクリート厚等の影響も大きい。これより、例え一つのパラメータに低い値が入力されても、その他のパラメータがそれを補うため、ハイブリッド合成桁の信頼性が高くなっていると考えられる。

表 3-4 パラメータ名と文字の定義

パラメータ名	文字の定義	パラメータ名	文字の定義	
ヤング率	E	圧縮強度	f_c	
合成桁	降伏強度	σ_y	床版幅	w_c
	硬化ひずみ	ε_{st}	床版厚	t_c
	硬化係数	E_{st}	上フランジ幅	w_{ft}
	硬化曲率	ξ	ウェブ厚	t_w
ハイブリッド合成桁	降伏強度	σ_Y	下フランジ幅	w_{fb}
	硬化ひずみ	ε_{ST}	上フランジ厚	t_{ft}
	硬化係数	E_{ST}	ウェブ高さ	d_w
	硬化曲率	Ξ	下フランジ厚	t_{fb}

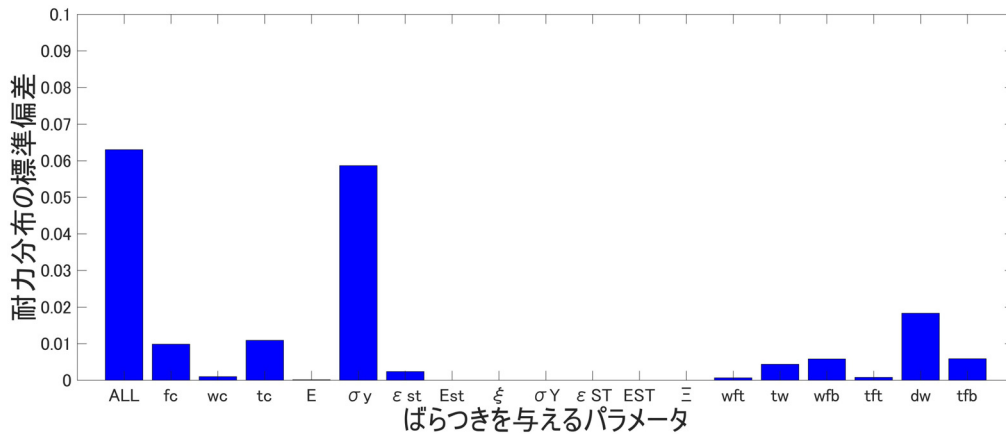


図 3-10 一変数のみにばらつきを与えた時の耐力分布の標準偏差（合成桁）

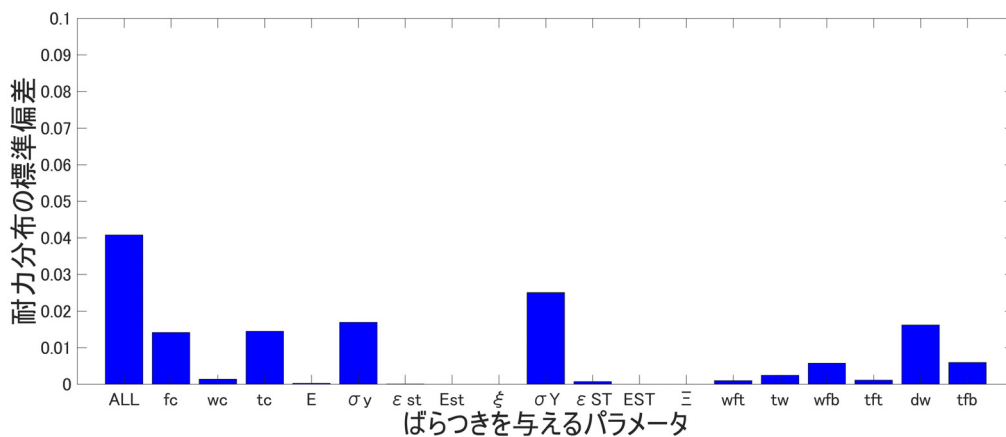


図 3-11 一変数のみにばらつきを与えた時の耐力分布の標準偏差（合成桁）

3.4 材料の精度・品質向上による影響

本節では、入力パラメータのばらつき抑制が、耐力分布に及ぼす影響について考察する。コンクリートおよび鋼材の工作精度（部材パラメータの標準偏差）、材料品質（材料パラメータの標準偏差）を向上させ断面解析を行う。具体的には、2.2節で設定したパラメータの標準偏差を2/3倍、1/3倍した値を入力する。品質・精度向上によるおおまかな傾向を掴むことを目的としているため、2/3、1/3という数値設定に特に根拠はない。値が負とならないことを理由として、ここでは対数正規分布で入力パラメータにばらつきを与える。

図3-12より、合成桁において、材料パラメータの標準偏差を1/3倍にすると、耐力分布のばらつきが大きく抑えられることがわかる。ただし、材料品質向上の労力を考慮すると、単にハイブリッド合成桁を採用し、標準偏差を抑える方が、信頼性の高い設計を目指す上で現実的だと考えられる。

次に、図3-13を見ると、工作精度向上により合成桁、ハイブリッド合成桁の耐力分布のばらつきが抑えられる。また、ばらつきが抑えられる割合は、合成桁よりもハイブリッド合成桁の方が大きくなっている。これは、3.3節で見たように、ハイブリッド合成桁では、材料パラメータだけでなく、部材パラメータも耐力分布のばらつきに大きな影響を与えるためである。ただし、その割合は材料品質を向上した場合と比較するとあまり大きくなく、工作精度向上のモチベーションはあまり高くないと言える。

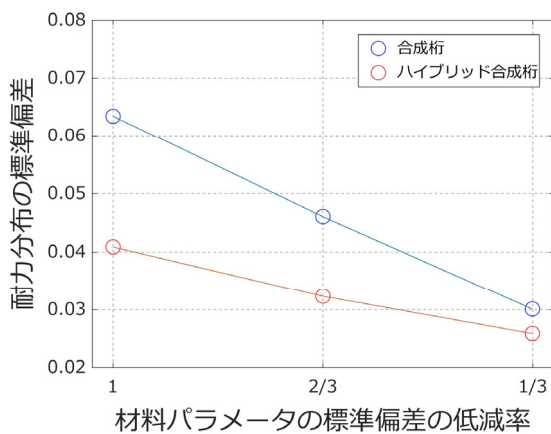


図 3-12 材料品質向上の影響

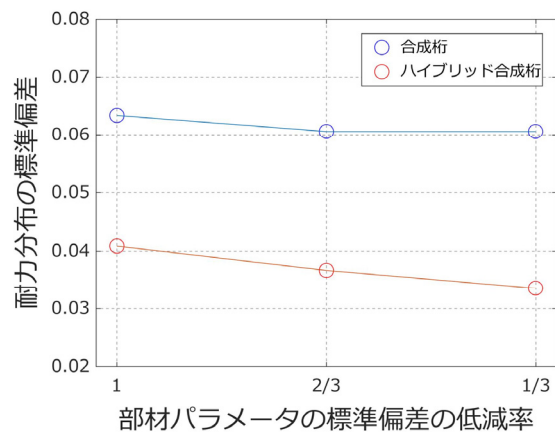


図 3-13 工作精度向上の影響

3.5 塑性パラメータの品質向上による影響

本節では、塑性パラメータの品質 (ε_{st} , ε_{ST} , E_{st} , E_{ST} , ξ , Ξ の標準偏差) 向上が耐力分布に及ぼす影響を検討する。塑性パラメータが耐力分布に及ぼす影響は極めて小さいという報告が文献7) でされている。また、図 3-10, 図 3-11 から確認できるように、塑性パラメータが耐力分布に及ぼす影響は極めて小さいといえる。これは、コンクリート強度が $30N/mm^2$ と小さく、鋼材が塑性性能を発揮する (ひずみ硬化域に達する) 以前に圧壊に達してしまったためだと考えられる。そこで、コンクリートの圧縮強度の強いモデルを採用すれば、鋼材の塑性性能の発揮、ひいては、塑性パラメータの品質の影響を考察できると考える。具体的には、2.2 節で設定した、塑性パラメータの標準偏差を $2/3$ 倍, $1/3$ 倍した値を入力する。コンクリートの圧縮強度は、 $30N/mm^2$ と $80N/mm^2$ を用いる。それぞれの標準偏差は、 $1.2N/mm^2$, $2.06N/mm^2$ としている¹⁴⁾。図 3-14, 図 3-15 に各モデルの耐力分布の標準偏差を示す。

$f_c = 30N/mm^2$ の場合、合成桁、ハイブリッド合成桁ともに耐力分布のばらつきにあまり変化がない。図 3-16, 図 3-17 の応力分布から、ひずみ硬化域に達せずに圧壊が早期に発生し、塑性特性が活かせなかったことが原因と考えられる。 $f_c = 80N/mm^2$ の場合は、耐力分布のばらつきが抑制されている。図 3-18, 図 3-19 の応力分布を見ると、広い範囲でひずみ硬化していることが確認でき、塑性パラメータの影響を受けやすくなることが原因と考えられる。ただし、その程度はあまり大きくないことから、単にハイブリッド合成桁を採用するのが、信頼性の高い設計を目指す上で現実的である。

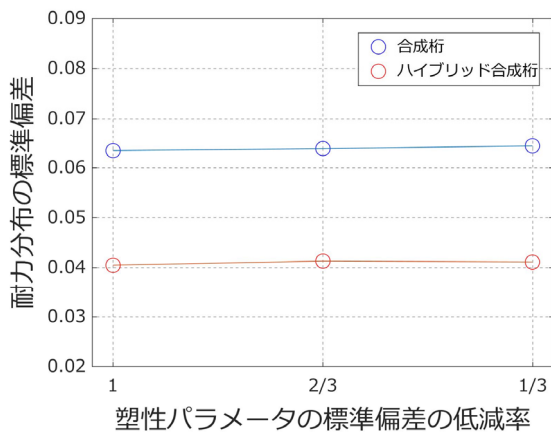


図 3-14 塑性パラメータの品質向上の影響 ($f_c = 30N/mm^2$)

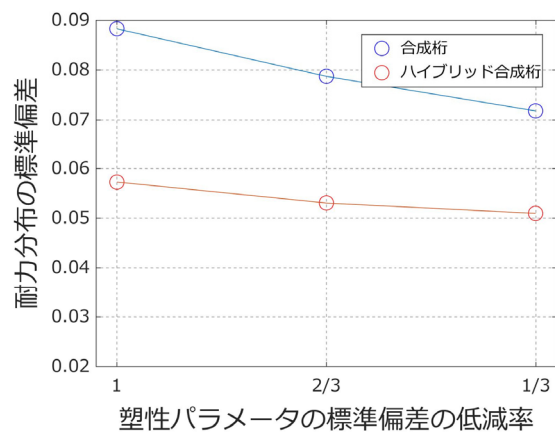


図 3-15 塑性パラメータの品質向上の影響 ($f_c = 80N/mm^2$)

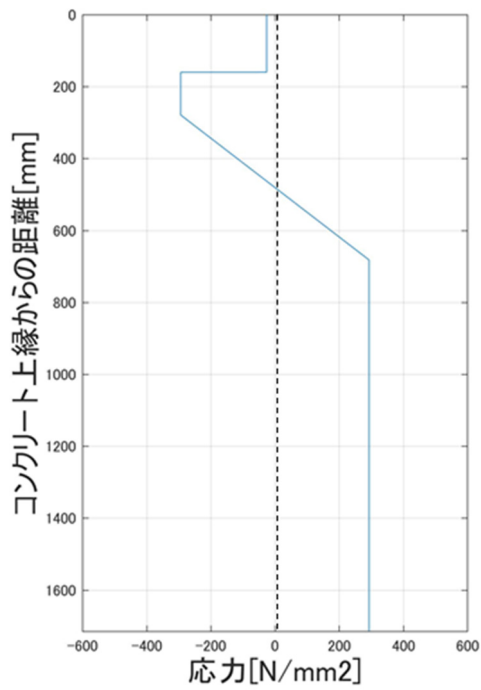


図 3-16 合成桁の応力分布の例 ($f_c = 30\text{N/mm}^2$)

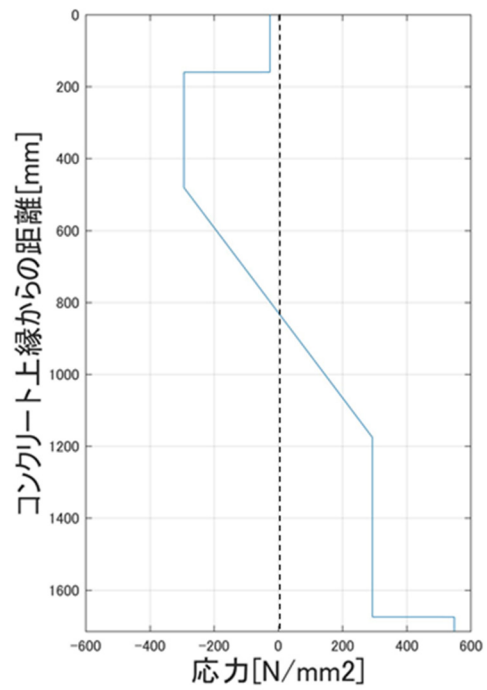


図 3-17 ハイブリッド合成桁の応力分布の例 ($f_c = 30\text{N/mm}^2$)

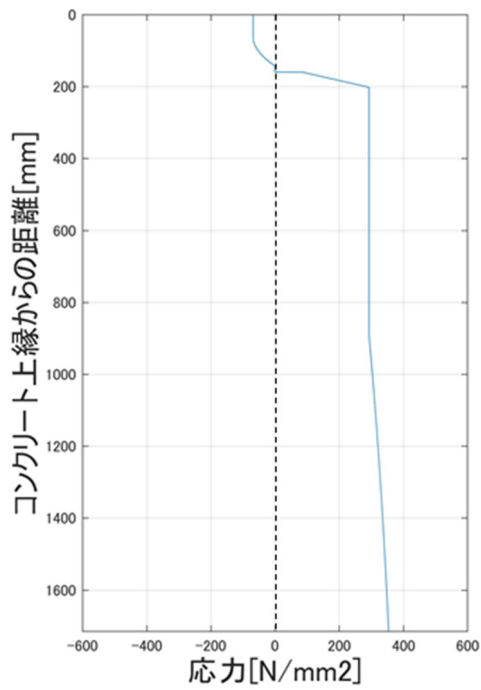


図 3-18 合成桁の応力分布の例 ($f_c = 80\text{N/mm}^2$)

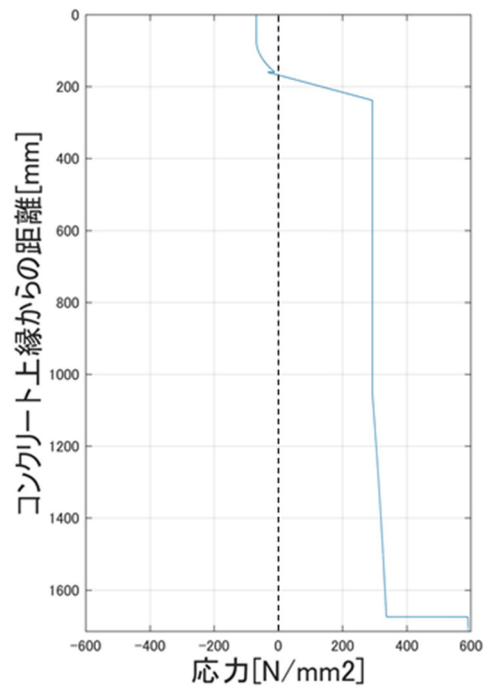


図 3-19 ハイブリッド合成桁の応力分布の例 ($f_c = 80\text{N/mm}^2$)

第4章 まとめ

本研究では、合成桁に対するハイブリッド合成桁の優位性を見出すことを目的とし、ファイバー法とモンテカルロ法の組み合わせにより両者の曲げ耐力分布を求めて比較した。材料・部材のパラメータとして、各部位の寸法およびコンクリートの圧縮強度、普通鋼および高性能鋼の降伏強度等を確率変数とした。結果より、次のような知見を得た。

1. 合成桁・ハイブリッド合成桁の曲げ耐力分布の平均値・標準偏差は、材料・部材パラメータの確率分布モデルを変化させてもほとんど変化しない。
2. 耐力分布から求める合成桁・ハイブリッド合成桁の破壊確率は、材料・部材パラメータに与える確率密度関数によって、変化する。このとき、ワイブル分布を用いると、耐力分布の歪度が負となり、尖度も大きくなることから、最も安全側の設計となる。
3. 全塑性曲げモーメントを用いて耐力分布を正規化すると、標準偏差・信頼性指標・破壊確率のいずれにおいてもハイブリッド合成桁が合成桁より小さくなる。これは、ハイブリッド合成桁が合理的で、鋼材の優れた塑性性能を有効活用し、経済性が期待できる構造であることを示している。
4. 合成桁の耐力分布は、普通鋼の降伏強度のばらつきに大きく依存する。一方で、ハイブリッド合成桁の耐力分布は、高性能鋼の降伏強度のばらつきに最も影響を受ける。
5. ハイブリッド合成桁は、部材パラメータのばらつきに比較的影響を受けやすく、工作精度向上に対して技術革新のモチベーションが高まる。
6. 塑性パラメータの品質を向上させた合成桁より、単にハイブリッド合成桁を採用する方が、信頼性の高い設計を目指す上で優位である。

以上の検討は、一つの断面のみを対象として行ったものである。寸法を変更し同様の知見が得られるかは今後、検討の必要がある。

また、入力パラメータには改善の余地がある。参照する文献、使用材料、鋼材メーカー等によって統計データが異なるため、より現実に近い値を用いることでさらなる合理化の可能性がある。今回用いた断面寸法の標準偏差¹²⁾は鋼材に対して一律の変動係数で与えており、特に、フランジ幅、ウェブ高さに関しては、道路橋示方書で設定されている許容差を用いた場合より、大きめの設定となっている。本検討の値で設計すれば安全側の設計が可能であるが、各設計者がより現実に近い統計データに置き換えることも可能である。

座屈による影響を適切に考慮するためには、ファイバー法による断面計算ではなく三次元有限変位問題として解く必要があり、今後、検討を予定している。また、疲労限界¹⁶⁾など終局限界以外の限界状態についても検討が必要である。今回は材料・部材のパラメータを相互に独立かつ同様の確率分布モデルに従うと仮定しているが、相関を考慮した場合の影響や異なる確率分布モデルを適用した場合の影響なども検討すべきである。加えて、単一の桁だけでなく、補剛などの副構造の影響も考慮した上部構造全体や、橋脚や地盤などの下部構造も含めた全体系での検討も今後の課題である。

謝辞

本研究に際して、丁寧なご指導を頂きました松島亘志先生に深謝いたします。山本亨輔先生は、日々研究へのアドバイスに加え、頻繁にお食事に誘って下さり、公私ともにお世話になりました。有難うございます。また、日々の生活から研究までお世話になったフロンティア工学研究グループの皆様、そしていつも支えてくれた家族に心より感謝いたします。

参考文献

- 1) 長井正嗣：鋼橋の設計法の変遷（歴史）と未来への展望について，第25回鋼構造基礎講座 鋼橋の設計法—その歴史変遷、最新情報から未来の設計法まで—，2013.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，2017
- 3) 山本亨輔，河野広隆，杉浦邦征，大島義信：材料特性が鋼-コンクリートハイブリッド合成桁の曲げ耐力確率分布に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.30, No.3, 2008.
- 4) 山本亨輔，河野広隆，杉浦邦征，大島義信，利根川太郎：材料非弾性特性がハイブリッド合成桁の終局曲げ耐力に及ぼす影響，土木学会第62回年次学術講演会，2007.
- 5) 前田幸雄，梶川靖治，石渡正夫：ハイブリッド合成げたの曲げ耐荷力に関する実験的研究，川崎製鉄技報，Vol.10, No.1, pp.86-99, 1978.
- 6) 長井正嗣，宮下剛，劉翠平，稲葉尚文，本間淳史：鋼及び合成ハイブリッド桁の設計と適用性に関する考察，土木学会論文集 A1, Vol.68, No.1, pp.203-215, 2012.
- 7) 江頭克礎，中村聖三，荒木智，高橋和雄：材料特性のばらつきを考慮した合成コンパクト断面の正曲げ耐力設計式，土木学会論文集 A, Vol.63, No.4, pp.576-585, 2007.
- 8) 荒木智，中村聖三，江頭克礎，高橋和雄，呉慶雄：塑性域の鋼材特性が鋼-コンクリート合成桁の曲げ耐力の確率分布に及ぼす影響，構造工学論文集，51A, pp.1247-1255, 2005.
- 9) 江頭克礎，中村聖三，高橋和雄，呉慶雄：鋼-コンクリート合成断面の正曲げ耐力に及ぼす鋼材特性の影響，構造工学論文集，49A, pp.794-798, 2003.
- 10) 日本鋼構造協会：合成桁の限界状態設計法案，JSSC テクニカルレポート，No.70, 2006.
- 11) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（Ⅱ鋼橋編），2004.
- 12) 伊藤正義，井野智，杉野目章，植松武是：最近の建築現場における鉄筋コンクリート工事の施工精度に関する調査，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16, No.1, 1994.
- 13) 奈良敬，中村聖三，安波博道，川端文丸，塩飽豊明：橋梁向け構造用鋼板の板厚および強度に関する統計調査，土木学会論文集，No.752, I-66, pp.299-310, 2004.
- 14) 鈴木澄江，榊田佳寛：コンクリートの圧縮強度レベルと確率分布形状，日本建築学会鋼構造系論文集，No.578, I-6, 2004.
- 15) 宮田喜生，中村聖三，高橋和雄：鋼 I 桁橋の破壊確率に対する確率分布の影響に関する検討，鋼構造年次論文報告集，19, pp.63-68, 2011.
- 16) 小西拓洋，高橋和也，三木千寿：高強度鋼の適用による鋼橋の合理化設計の可能性，土木学会論文集，No.654, I-52, pp.91-103, 2000.

付録 A : ヒストグラムまとめ

付録図目次

図 A-1	3.4 節モデル No.1 (合成桁)	21
図 A-2	3.4 節モデル No.2 (合成桁)	21
図 A-3	3.4 節モデル No.3 (合成桁)	21
図 A-4	3.4 節モデル No.4 (合成桁)	21
図 A-5	3.4 節モデル No.5 (合成桁)	22
図 A-6	3.4 節モデル No.6 (合成桁)	22
図 A-7	3.4 節モデル No.7 (合成桁)	22
図 A-8	3.4 節モデル No.8 (合成桁)	22
図 A-9	3.4 節モデル No.9 (合成桁)	22
図 A-10	3.4 節モデル No.1 (ハイブリッド合成桁)	23
図 A-11	3.4 節モデル No.2 (ハイブリッド合成桁)	23
図 A-12	3.4 節モデル No.3 (ハイブリッド合成桁)	23
図 A-13	3.4 節モデル No.4 (ハイブリッド合成桁)	23
図 A-14	3.4 節モデル No.5 (ハイブリッド合成桁)	23
図 A-15	3.4 節モデル No.6 (ハイブリッド合成桁)	24
図 A-16	3.4 節モデル No.7 (ハイブリッド合成桁)	24
図 A-17	3.4 節モデル No.8 (ハイブリッド合成桁)	24
図 A-18	3.4 節モデル No.9 (ハイブリッド合成桁)	24
図 A-19	3.5 節モデル No.1 (合成桁)	25
図 A-20	3.5 節モデル No.2 (合成桁)	25
図 A-21	3.5 節モデル No.3 (合成桁)	25
図 A-22	3.5 節モデル No.4 (合成桁)	25
図 A-23	3.5 節モデル No.5 (合成桁)	26
図 A-24	3.5 節モデル No.6 (合成桁)	26
図 A-25	3.5 節モデル No.7 (合成桁)	26
図 A-26	3.5 節モデル No.8 (合成桁)	26
図 A-27	3.5 節モデル No.9 (合成桁)	26
図 A-28	3.5 節モデル No.10 (合成桁)	27
図 A-29	3.5 節モデル No.11 (合成桁)	27
図 A-30	3.5 節モデル No.12 (合成桁)	27
図 A-31	3.5 節モデル No.1 (ハイブリッド合成桁)	27
図 A-32	3.5 節モデル No.2 (ハイブリッド合成桁)	27
図 A-33	3.5 節モデル No.3 (ハイブリッド合成桁)	28
図 A-34	3.5 節モデル No.4 (ハイブリッド合成桁)	28
図 A-35	3.5 節モデル No.5 (ハイブリッド合成桁)	28
図 A-36	3.5 節モデル No.6 (ハイブリッド合成桁)	28
図 A-37	3.5 節モデル No.7 (ハイブリッド合成桁)	28
図 A-38	3.5 節モデル No.8 (ハイブリッド合成桁)	29

図 A-39	3.5 節モデル No.9 (ハイブリッド合成桁)	29
図 A-40	3.5 節モデル No.10 (ハイブリッド合成桁)	29
図 A-41	3.5 節モデル No.11 (ハイブリッド合成桁)	29
図 A-42	3.5 節モデル No.12 (ハイブリッド合成桁)	29

A.1 3.4節で用いたモデル

本編3.4節で用いたモデルの M_u/M_p ヒストグラムを以下に示す.

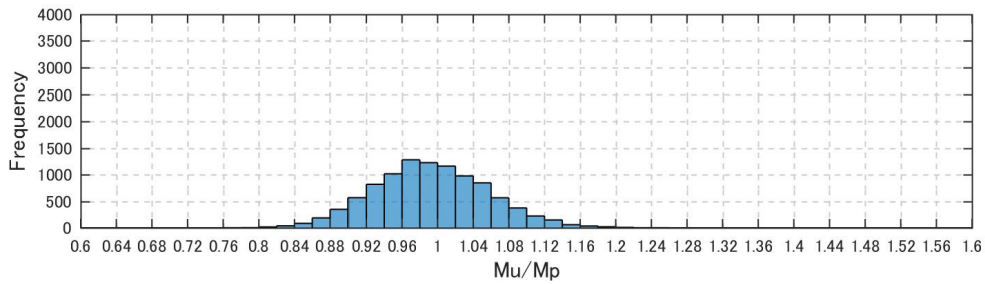


図 A-0-1 3.4節モデル No.1 (合成桁)

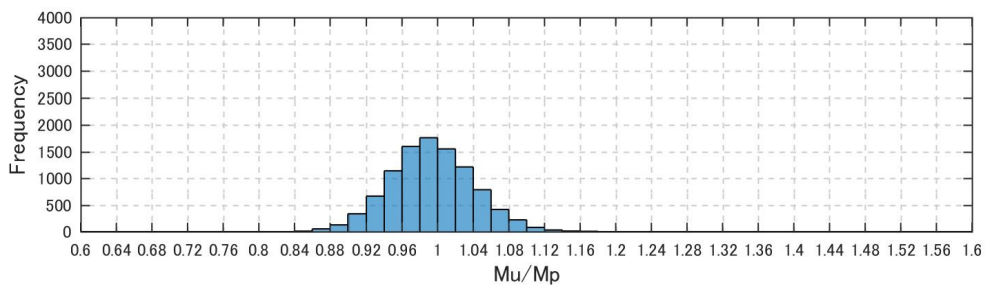


図 A-0-2 3.4節モデル No.2 (合成桁)

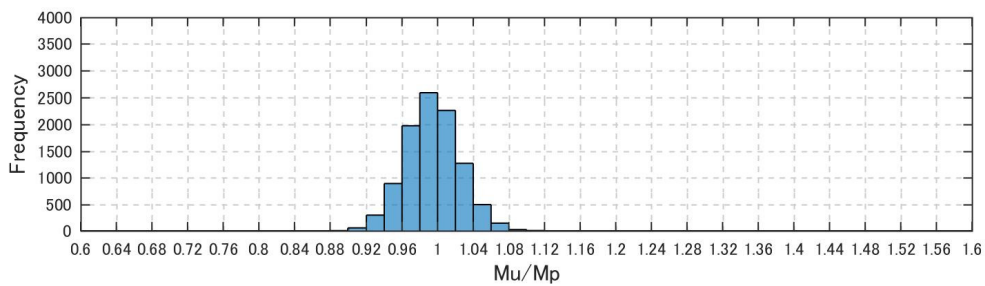


図 A-0-3 3.4節モデル No.3 (合成桁)

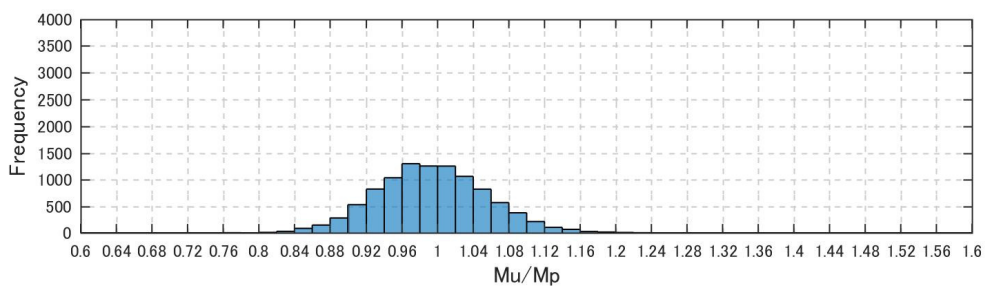


図 A-0-4 3.4節モデル No.4 (合成桁)

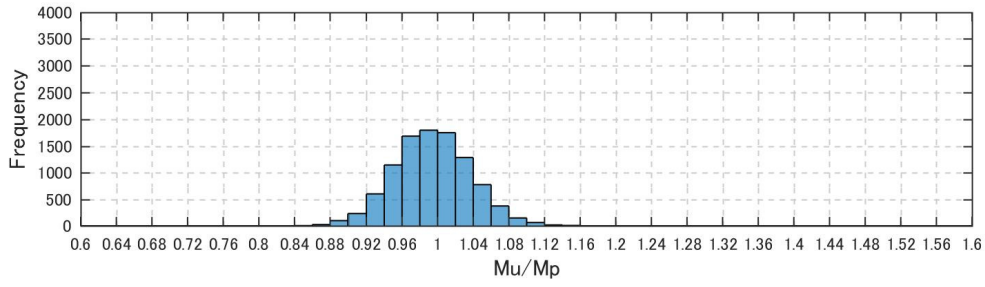


図 A-0-5 3.4 節モデル No.5 (合成桁)

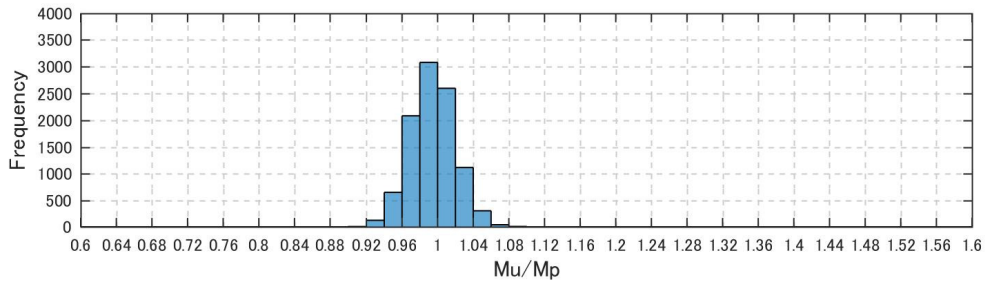


図 A-0-6 3.4 節モデル No.6 (合成桁)

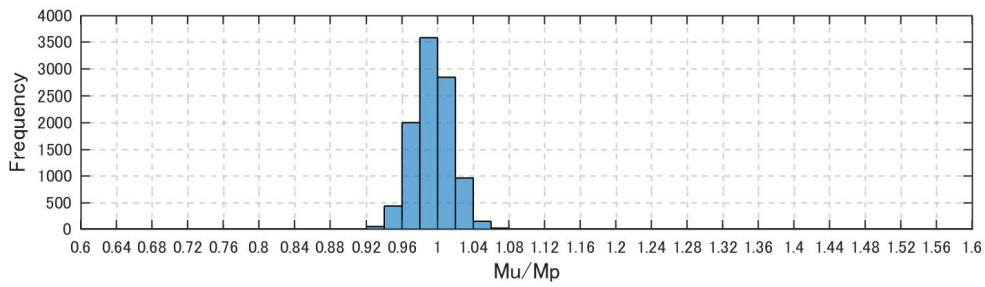


図 A-0-7 3.4 節モデル No.7 (合成桁)

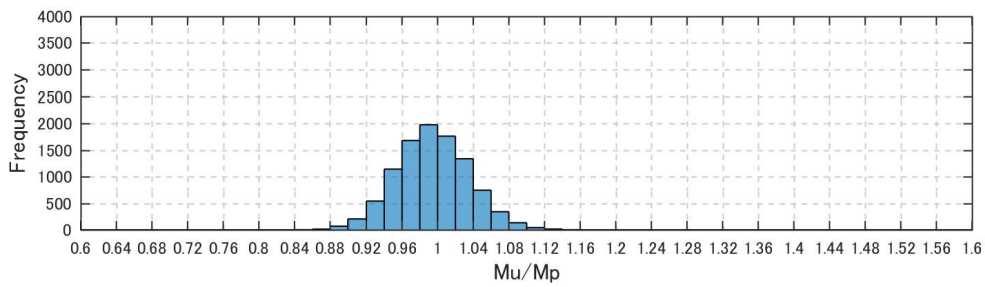


図 A-0-8 3.4 節モデル No.8 (合成桁)

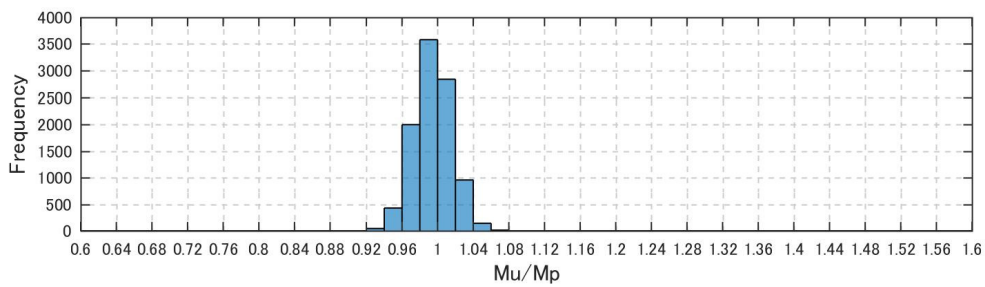


図 A-0-9 3.4 節モデル No.9 (合成桁)

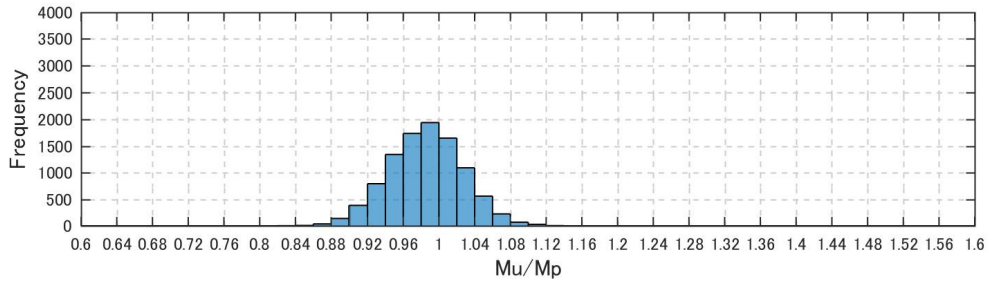


図 A-0-10 3.4 節モデル No.1 (ハイブリッド合成桁)

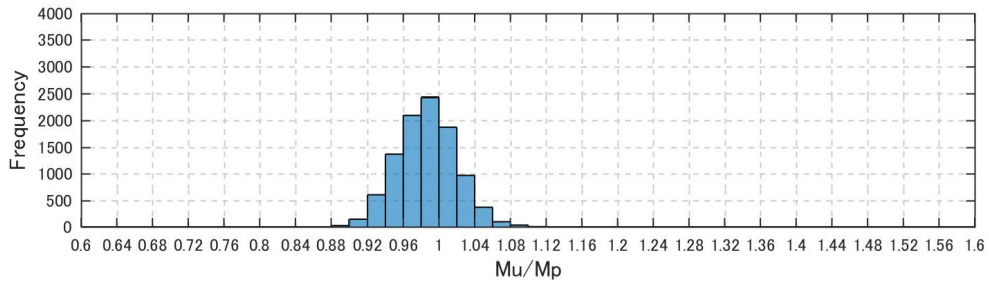


図 A-0-11 3.4 節モデル No.2 (ハイブリッド合成桁)

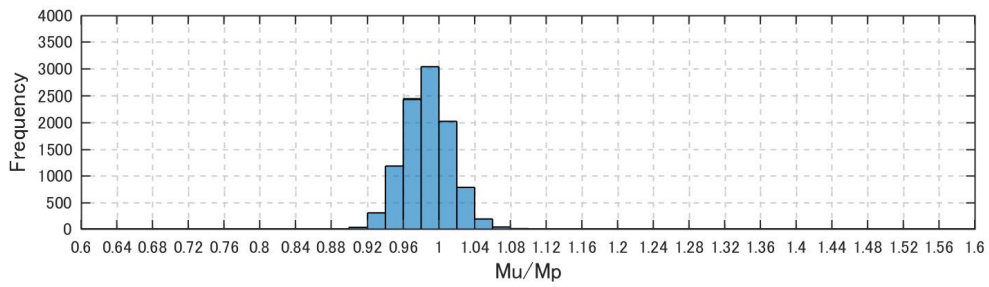


図 A-0-12 3.4 節モデル No.3 (ハイブリッド合成桁)

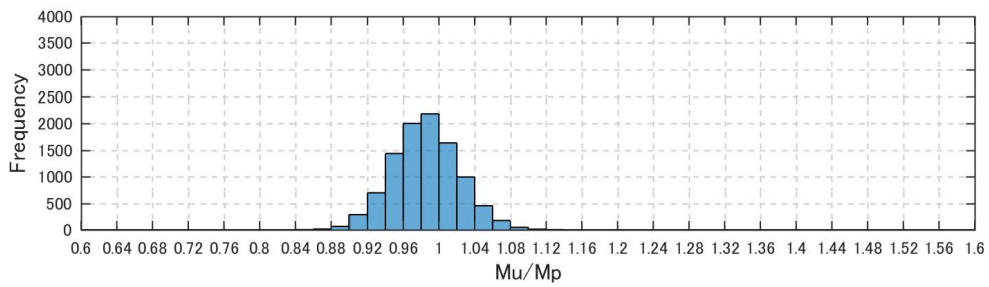


図 A-0-13 3.4 節モデル No.4 (ハイブリッド合成桁)

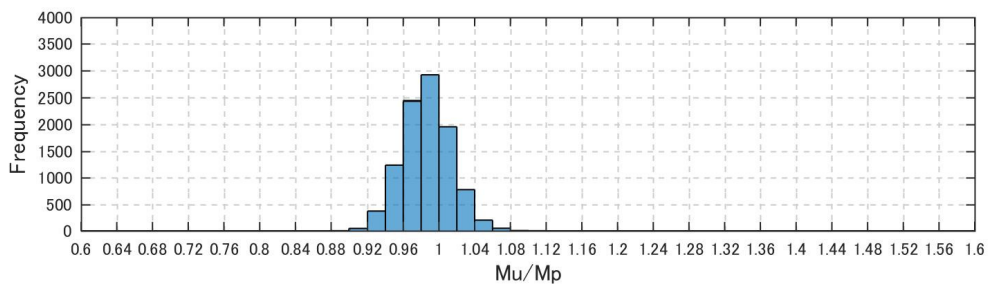


図 A-0-14 3.4 節モデル No.5 (ハイブリッド合成桁)

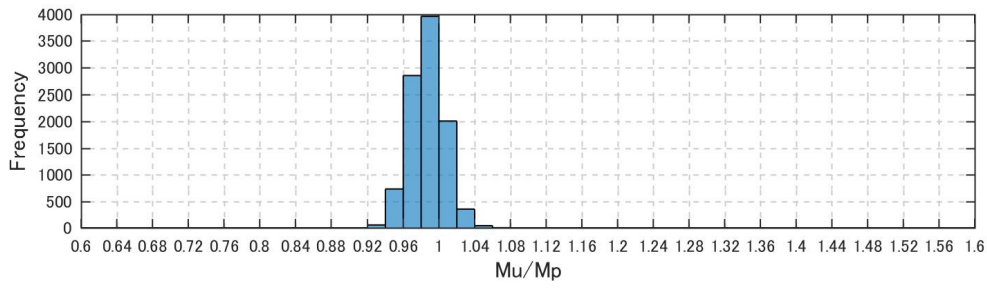


図 A-0-15 3.4 節モデル No.6 (ハイブリッド合成桁)

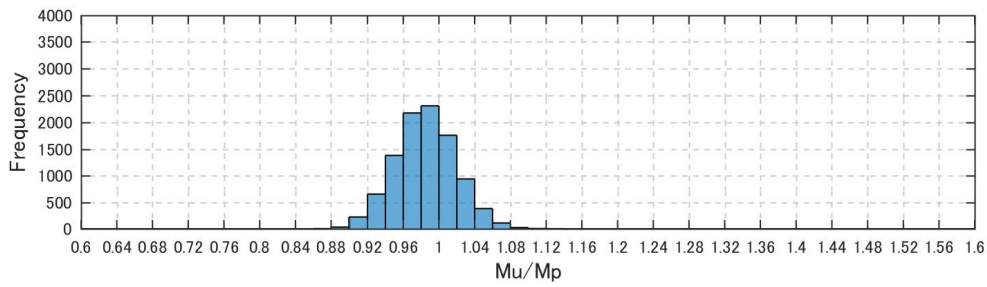


図 A-0-16 3.4 節モデル No.7 (ハイブリッド合成桁)

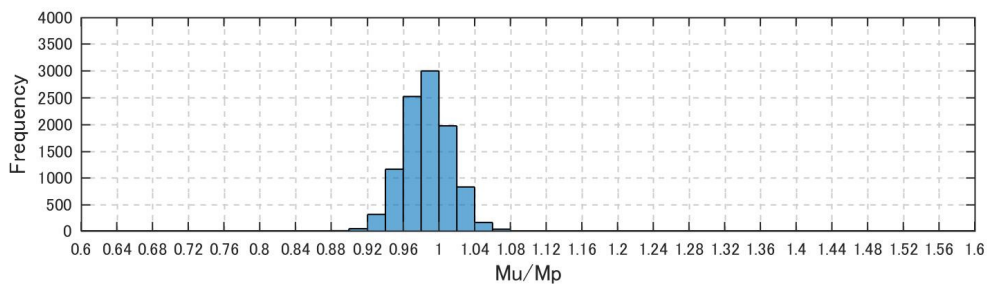


図 A-0-17 3.4 節モデル No.8 (ハイブリッド合成桁)

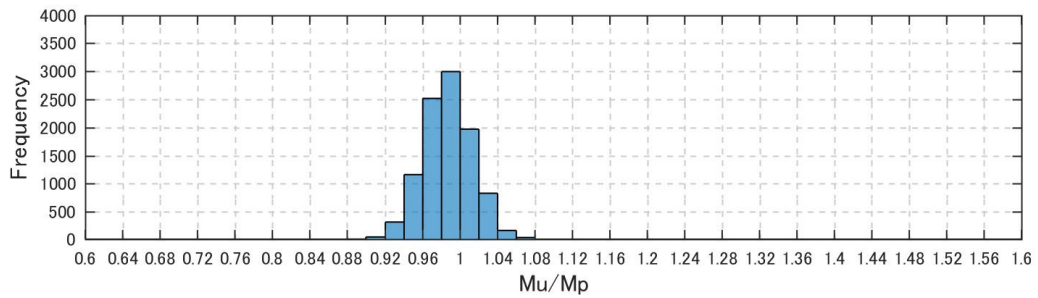


図 A-0-18 3.4 節モデル No.9 (ハイブリッド合成桁)

A.2 3.5 節で用いたモデル

本編 3.5 節で用いたモデルの M_u/M_p ヒストグラムを以下に示す.

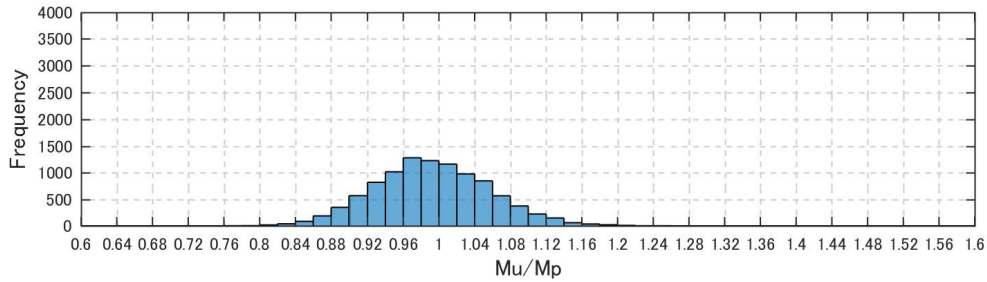


図 A-0-19 3.5 節モデル No.1 (合成桁)

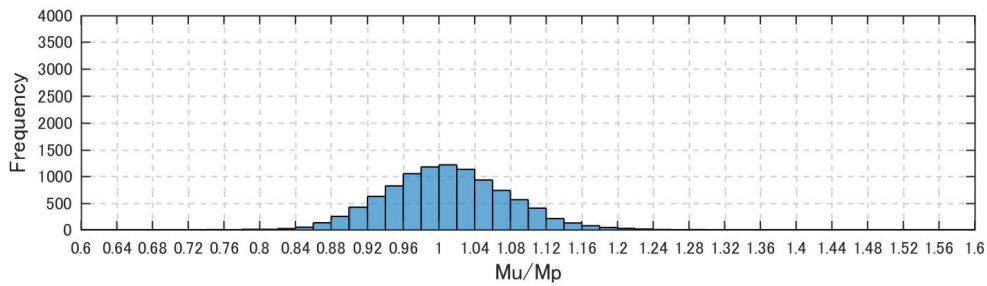


図 A-0-20 3.5 節モデル No.2 (合成桁)

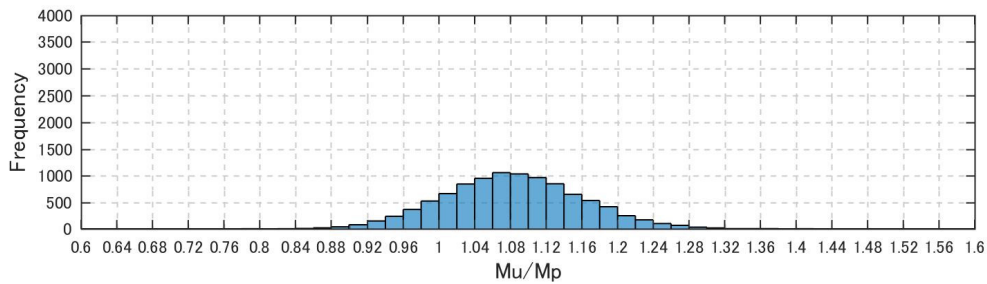


図 A-0-21 3.5 節モデル No.3 (合成桁)

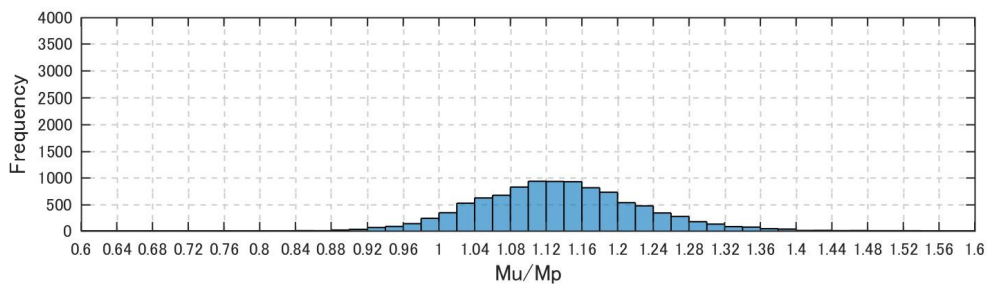


図 A-0-22 3.5 節モデル No.4 (合成桁)

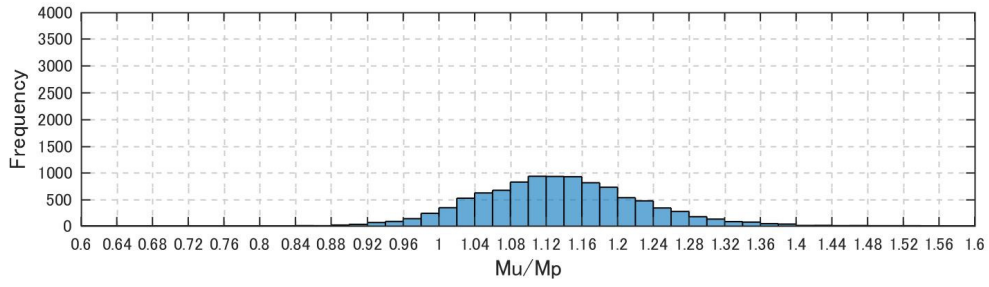


図 A-0-23 3.5 節モデル No.5 (合成桁)

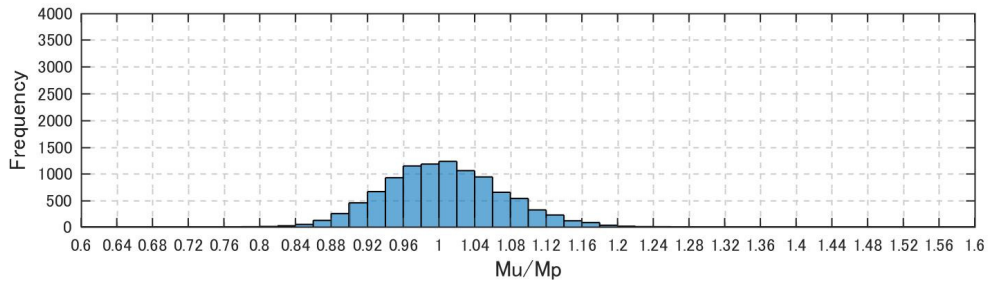


図 A-0-24 3.5 節モデル No.6 (合成桁)

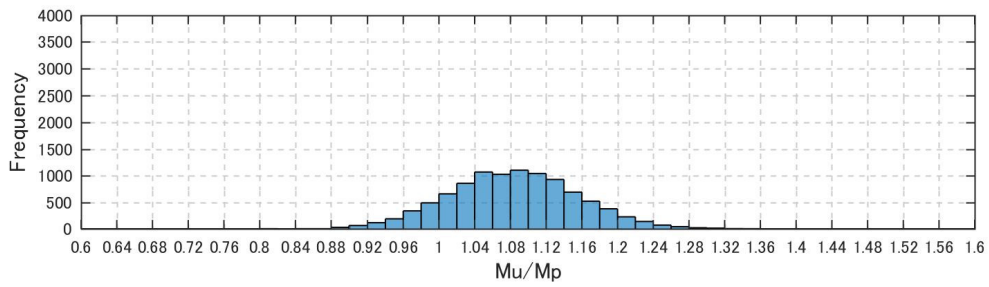


図 A-0-25 3.5 節モデル No.7 (合成桁)

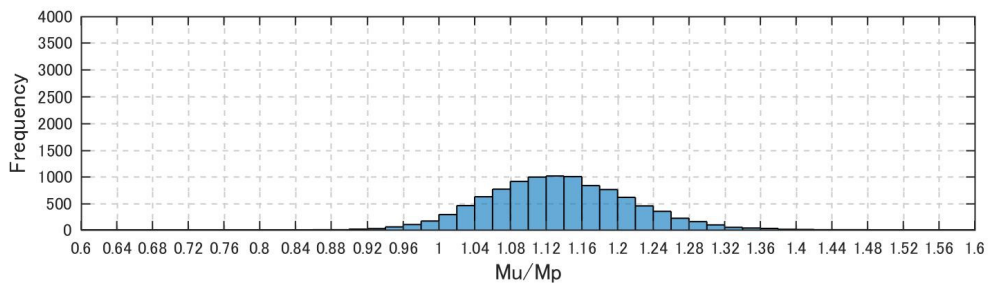


図 A-0-26 3.5 節モデル No.8 (合成桁)

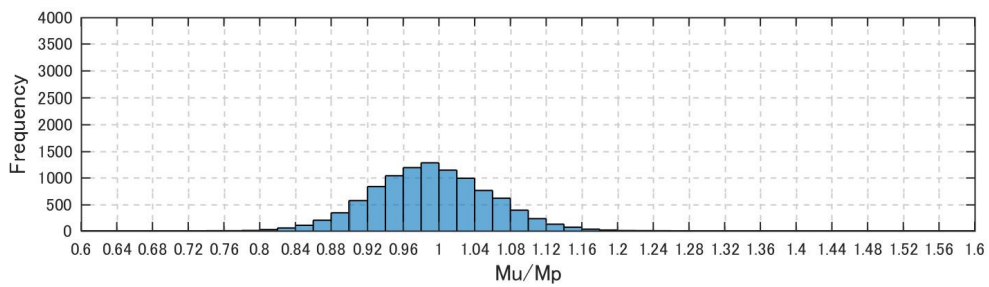


図 A-0-27 3.5 節モデル No.9 (合成桁)

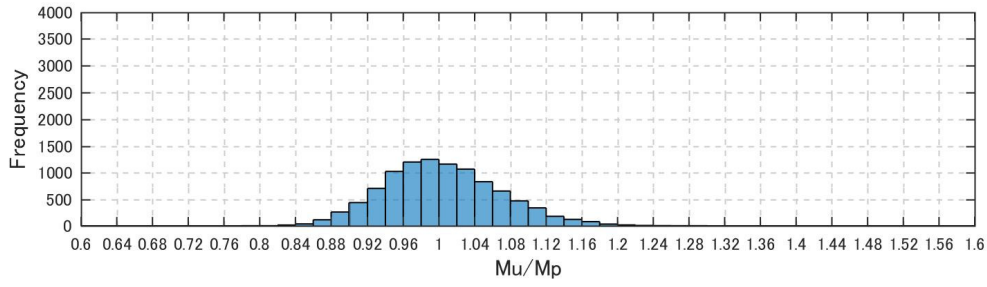


図 A-0-28 3.5 節モデル No.10 (合成桁)

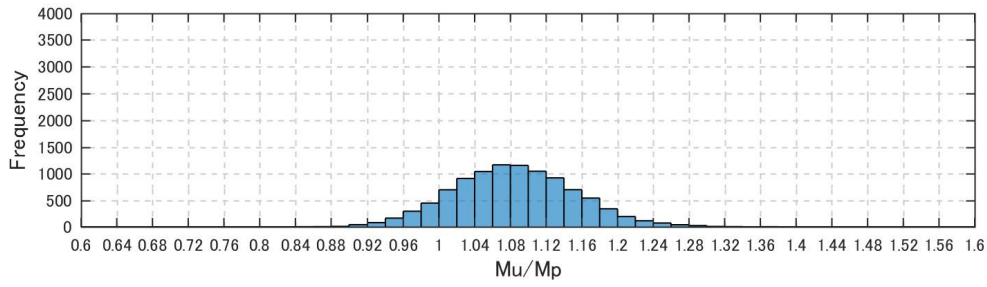


図 A-0-29 3.5 節モデル No.11 (合成桁)

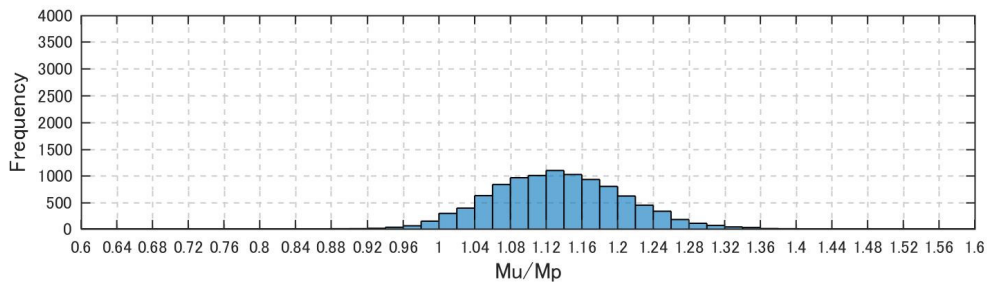


図 A-0-30 3.5 節モデル No.12 (合成桁)

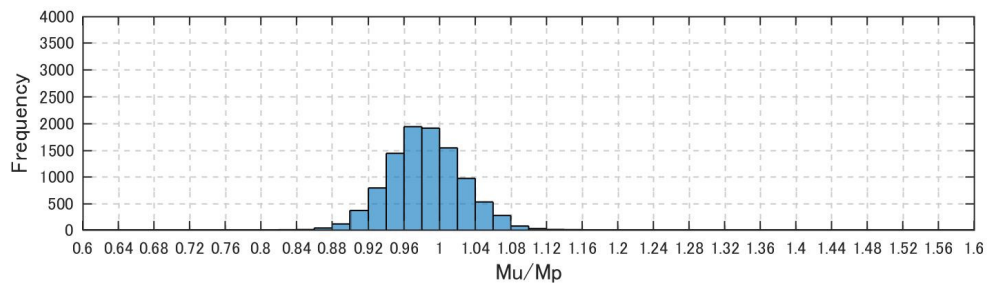


図 A-0-31 3.5 節モデル No.1 (ハイブリッド合成桁)

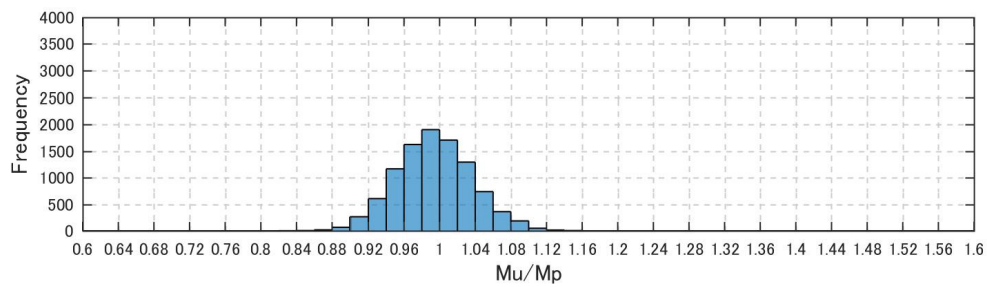


図 A-0-32 3.5 節モデル No.2 (ハイブリッド合成桁)

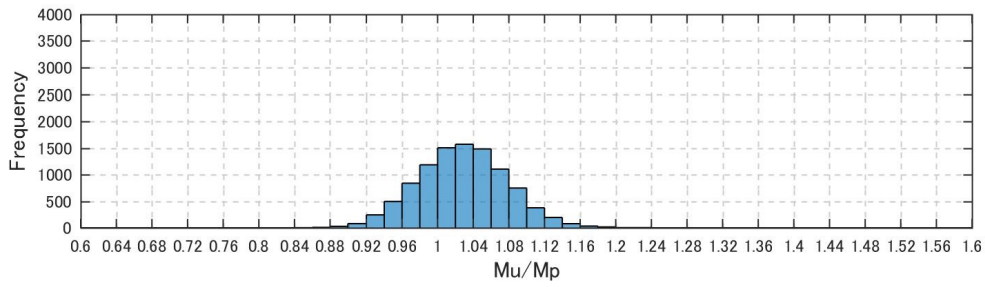


図 A-0-33 3.5 節モデル No.3 (ハイブリッド合成桁)

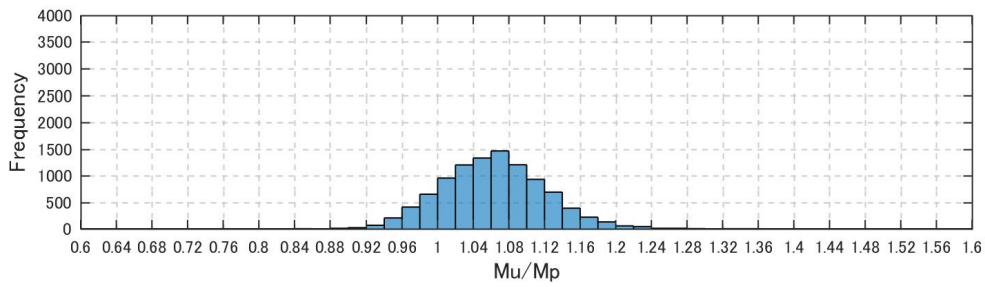


図 A-0-34 3.5 節モデル No.4 (ハイブリッド合成桁)

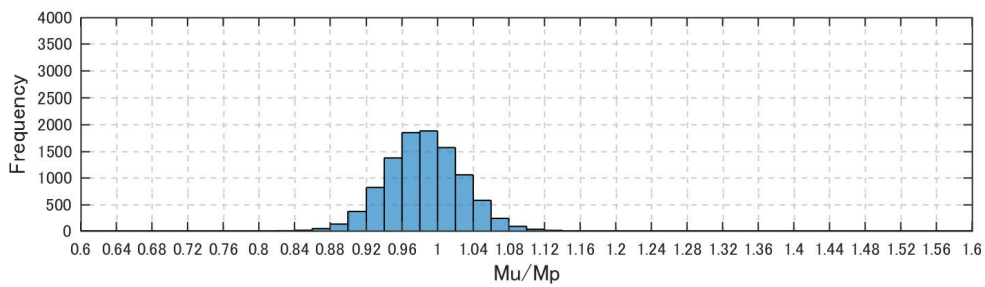


図 A-0-35 3.5 節モデル No.5 (ハイブリッド合成桁)

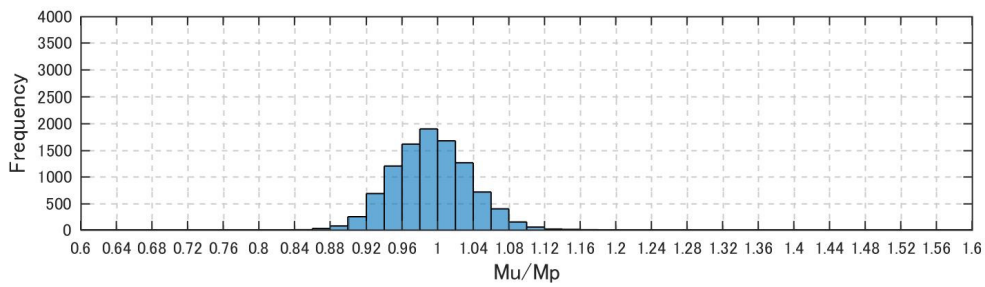


図 A-0-36 3.5 節モデル No.6 (ハイブリッド合成桁)

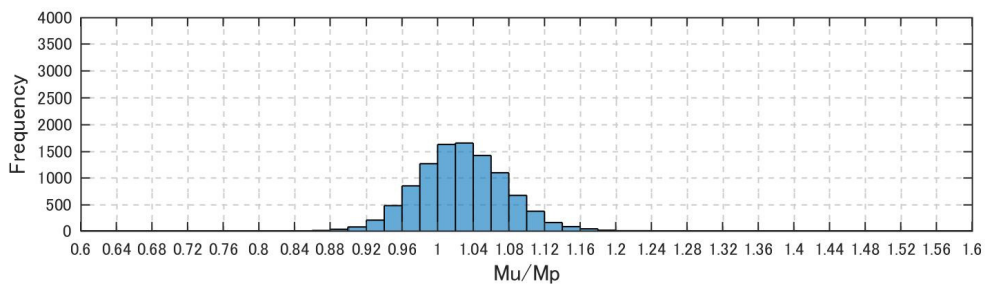


図 A-0-37 3.5 節モデル No.7 (ハイブリッド合成桁)

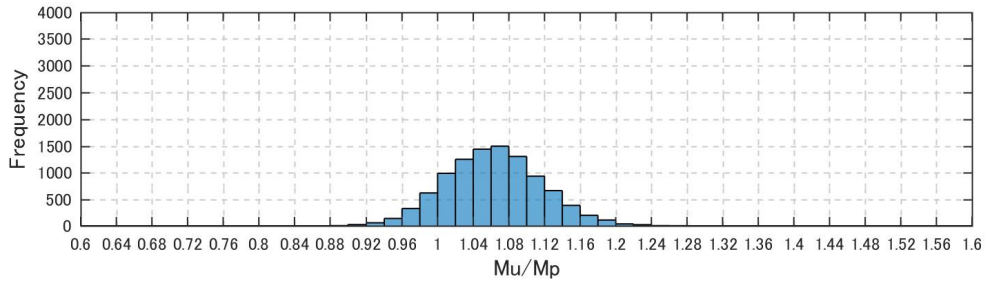


図 A-0-38 3.5 節モデル No.8 (ハイブリッド合成桁)

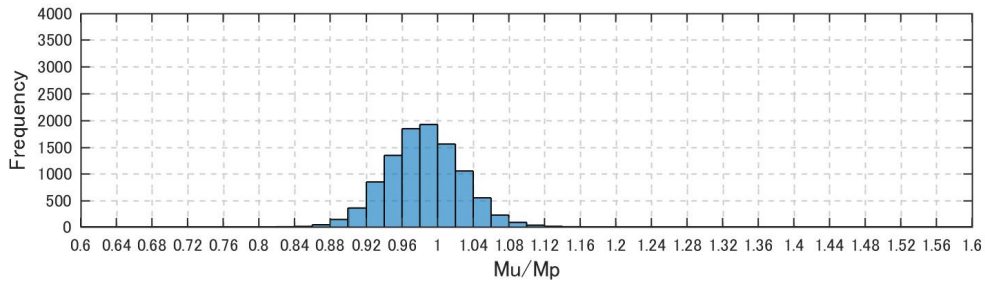


図 A-0-39 3.5 節モデル No.9 (ハイブリッド合成桁)

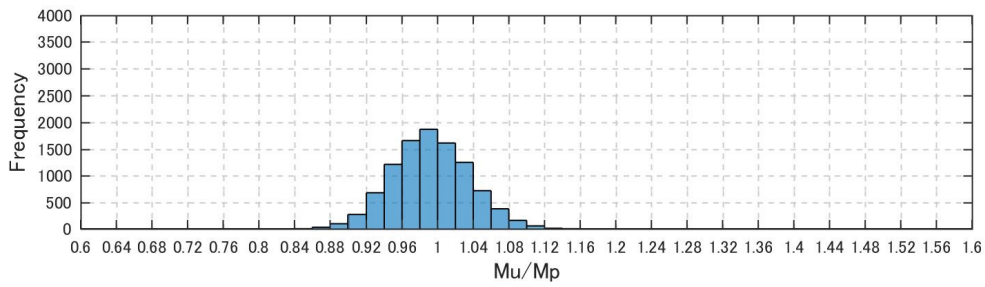


図 A-0-40 3.5 節モデル No.10 (ハイブリッド合成桁)

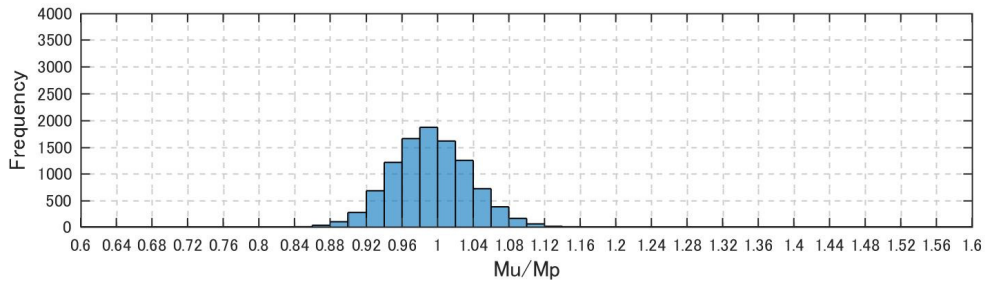


図 A-0-41 3.5 節モデル No.11 (ハイブリッド合成桁)

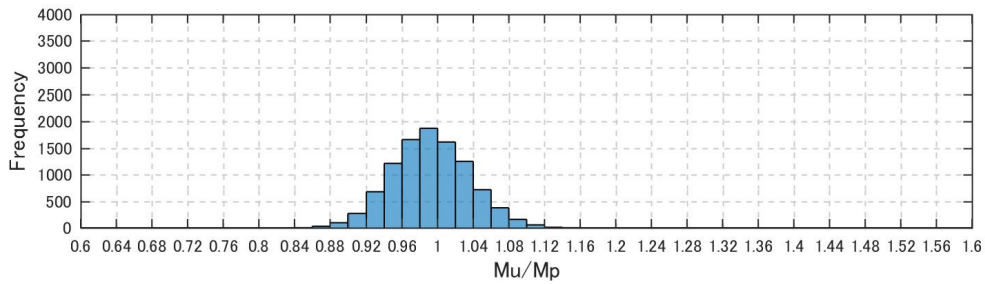


図 A-0-42 3.5 節モデル No.12 (ハイブリッド合成桁)