

6. シミュレーション結果と荷重組合せ・荷重係数の推定

ここでは、B-C モデルを用いた同時載荷確率過程シミュレーションによって、荷重組合せおよび荷重係数値のおおよその範囲を推定する。橋にとって最も厳しい状況を考察するために、構造モデルに同時載荷を行ったときの荷重効果の 1 つである断面力を指標にして組み合わせた結果を評価する。すなわち、この検討からわかる荷重係数値の取り得る範囲は、係数値の変化が構造の諸元に与える影響の感度も自動的に考慮されたものになっていることが期待できる。なお、本章に示す活荷重に乗じる荷重係数は、有明曙橋の BWIM 記録を用いて平均大型車混入率を 30% に設定したシミュレーション結果と、道路橋示方書（平成 24 年）の B 活荷重断面力の比率として算出したものを示す。活荷重係数に関して、統計モデルの設定等が与える感度については 8 章で調べる。

6.1. 対象橋梁と着目断面

本検討でシミュレーションの対象とする橋梁形式は、下記の方針により決定した。

①従来実績が多い形式 ②近年実績が増えつつある形式

③各作用の影響度が①とは大きく異なると予想される形式

以上の選定方針より、本検討でシミュレーションの対象とした橋梁を表 6.1.4 に示す。

表 6.1.1 従来実績が多い形式

材料	形式		支間の目安	備考
鋼橋	単純桁	鈑桁	30m	
		箱桁	40m	
	連続桁	鈑桁	40m	多主桁
		箱桁	60m	
PC 橋	単純桁	T 桁	40m	合成桁橋（PC 合成床版タイプ）を含む
		箱桁	40m	固定支保工架設
	連続桁	T 桁	4@40m	
		箱桁	60+80+60m	片持架設

表 6.1.2 近年実績が増えつつある形式

材料	形式		備考
鋼橋	連続桁	少数鈑桁	
PC 橋	連続桁	ラーメン箱桁	片持架設
複合橋	連続桁	波形鋼板ウェブ箱桁	

表 6.1.3 各作用の影響度が実績の多い形式とは大きく異なると予想される形式

材料	形式		支間の目安	備考
鋼橋	単純桁	鈑桁	15m	活荷重比率が相対的に高い
		鋼床版箱桁	80m	コンクリート床版に比べ軽量
	連続桁	箱桁	80+100+80m	死荷重比率が相対的に高い
PC 橋	連続桁	ラーメン箱桁	80+120+80m	死活荷重以外の作用の影響（風、温度、地震等）を比較的受けやすい

表 6.1.4 検討対象橋梁一覧

橋梁 番号	材料	上部工形式	橋長	最大 支間長	全幅員	車道部 幅員	歩道部 幅員	備考
1	鋼	単純非合成鈹桁	19.8 m	18.3 m	6.5 m	5.5 m	歩道なし	
2	鋼	単純非合成鈹桁	31.5 m	30.0 m	7.7 m	6.5 m	歩道なし	
3	鋼	単純非合成鈹桁	51.5 m	50.0 m	7.7 m	6.5 m	歩道なし	
4	鋼	単純非合成鈹桁	81.5 m	80.0 m	7.7 m	6.5 m	歩道なし	
5	鋼	単純非合成鈹桁	101.5 m	100.0 m	7.7 m	6.5 m	歩道なし	
6	鋼	6径間連続非合成鈹桁	198.0 m	33.0 m	12.7 m	11.2 m	歩道なし	
7	鋼	6径間連続非合成鈹桁	227.0 m	37.8 m	12.7 m	11.5 m	歩道なし	
8	鋼	5径間連続非合成鈹桁	199.0 m	39.8 m	10.2 m	9.5 m	歩道なし	
9	鋼	3径間連続非合成鈹桁	102.5 m	45.7 m	11.2 m	10.5 m	歩道なし	
10	鋼	3径間連続非合成鈹桁	142.0 m	54.0 m	11.4 m	10.5 m	歩道なし	
11	鋼	4径間連続非合成鈹桁	210.0 m	58.1 m	12.8 m	10.5 m	歩道なし	
12	鋼	2径間連続非合成少数鈹桁	83.0 m	40.8 m	11.3 m	8.0 m	3.5 m	
13	鋼	2径間連続非合成少数鈹桁	97.6 m	47.5 m	11.2 m	10.3 m	歩道なし	
14	鋼	2径間連続非合成少数鈹桁	100.0 m	49.0 m	10.7 m	9.5 m	歩道なし	
15	鋼	3径間連続合成少数鈹桁	130.0 m	50.0 m	10.7 m	9.8 m	歩道なし	
16	鋼	7径間連続合成少数鈹桁	351.4 m	58.0 m	12.7 m	11.8 m	歩道なし	
17	鋼	3径間連続合成少数鈹桁	136.5 m	65.0 m	10.7 m	9.8 m	歩道なし	
18	鋼	2径間連続非合成少数鈹桁	152.0 m	75.0 m	10.7 m	9.5 m	歩道なし	
19	鋼	2径間連続非合成少数鈹桁	242.0 m	120.0 m	10.7 m	9.5 m	歩道なし	
20	鋼	3径間連続非合成箱桁	122.5 m	48.4 m	9.6 m	8.8 m	歩道なし	
21	鋼	3径間連続合成箱桁	160.0 m	60.0 m	6.9 m	6.0 m	歩道なし	
22	鋼	6径間連続非合成細幅箱桁	330.0 m	70.0 m	9.4 m	8.5 m	歩道なし	
23	鋼	3径間連続非合成箱桁	201.5 m	78.9 m	11.8 m	8.3 m	2.5 m	
24	鋼	3径間連続非合成細幅箱桁	211.0 m	80.0 m	11.5 m	10.5 m	歩道なし	
25	鋼	3径間連続合成開断面箱桁	210.0 m	80.0 m	10.7 m	9.5 m	歩道なし	
26	鋼	単純鋼床版箱桁	63.0 m	61.5 m	10.7 m	9.5 m	歩道なし	
27	鋼	単純鋼床版箱桁	76.5 m	75.0 m	10.7 m	9.5 m	歩道なし	
28	鋼	単純鋼床版箱桁	121.5 m	120.0 m	10.7 m	9.5 m	歩道なし	
29	鋼	3径間連続少数鈹桁(ラーメン橋)	180.0 m	68.0 m	10.1 m	9.3 m	歩道なし	
30	鋼	単純下路式トラス橋	97.0 m	95.1 m	11.1 m	10.3 m	歩道なし	
31	鋼	単純ニールセンローゼ橋	125.0 m	123.0 m	8.7 m	7.5 m	歩道なし	
32	RC	単純床版橋	20.8 m	20.0 m	10.7 m	9.5 m	歩道なし	
33	PC	単純プレテンT桁	18.8 m	18.0 m	9.7 m	8.5 m	歩道なし	
34	PC	単純プレテンT桁	24.8 m	24.0 m	9.7 m	8.5 m	歩道なし	
35	PC	単純プレテン床版橋	18.8 m	18.0 m	12.5 m	8.5 m	3.0 m	
36	PC	単純プレテン床版橋	24.8 m	24.0 m	12.5 m	8.5 m	3.0 m	
37	PC	単純ボステンT桁	31.7 m	30.5 m	12.9 m	12.0 m	歩道なし	
38	PC	単純合成桁橋	33.0 m	32.1 m	11.7 m	10.8 m	歩道なし	
39	PC	7径間連続中空床版橋	218.5 m	31.5 m	10.3 m	9.5 m	歩道なし	
40	PC	4径間連結ボステンT桁	140.0 m	34.0 m	11.0 m	7.5 m	2.5 m	
41	PC	3径間連結ボステンT桁	69.8 m	34.8 m	18.7 m	17.8 m	歩道なし	
42	PC	10径間連続箱桁	360.5 m	39.7 m	9.7 m	8.8 m	歩道なし	
43	PC	2径間連続箱桁	100.0 m	49.0 m	10.7 m	9.5 m	歩道なし	
44	PC	3径間連続スラット付床版箱桁	150.0 m	50.0 m	16.7 m	15.5 m	歩道なし	
45	PC	3径間連続斜ウェブ箱桁	150.0 m	50.0 m	10.7 m	9.5 m	歩道なし	
46	PC	2径間連続箱桁	152.0 m	75.0 m	10.7 m	9.5 m	歩道なし	
47	PC	3径間連続箱桁	262.1 m	113.0 m	10.2 m	9.6 m	歩道なし	
48	PC	2径間連続箱桁	242.0 m	120.0 m	10.7 m	9.5 m	歩道なし	
49	PC	5径間連結合成桁橋	182.0 m	35.2 m	11.4 m	7.8 m	2.5 m	
50	PC	2径間連結合成桁橋	84.0 m	40.2 m	11.2 m	10.5 m	歩道なし	
51	PC	Tラーメン箱桁	113.0 m	57.1 m	10.2 m	8.8 m	歩道なし	
52	PC	5径間連続ラーメン中空床版橋	147.1 m	29.4 m	17.9 m	16.3 m	歩道なし	
53	PC	3径間連続ラーメン中空床版橋	97.5 m	32.5 m	10.9 m	10.0 m	歩道なし	
54	PC	3径間連続ラーメン箱桁	114.6 m	43.0 m	7.5 m	6.5 m	歩道なし	
55	PC	3径間連続ラーメン箱桁	170.8 m	70.0 m	10.7 m	9.5 m	歩道なし	
56	PC	3径間連続ラーメン箱桁	182.8 m	75.0 m	10.7 m	9.5 m	歩道なし	
57	PC	3径間連続ラーメン箱桁	292.8 m	120.0 m	10.7 m	9.5 m	歩道なし	
58	RC	単純固定アーチ橋	78.0 m	77.8 m	12.7 m	12.0 m	歩道なし	
59	PC	3径間連続波形鋼板ウェブ箱桁	170.0 m	70.0 m	10.7 m	9.5 m	歩道なし	
60	PC	4径間連続波形鋼板ウェブ箱桁	456.0 m	135.0 m	11.2 m	10.3 m	歩道なし	

※上部工形式のうち、PC合成桁橋とはPC合成床版を用いた合成桁橋を示す。

表 6.1.5 検討対象橋梁一覧と支間長

(a) 鋼橋

橋梁形式	適用支間 (m)																			
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
単純鈑桁		○						○		○										
単純鈑桁(少数主桁)																				
単純箱桁																				
連続鈑桁			○	○	○	○	○	○												
連続鈑桁(少数主桁)				○	○	○	○	○				○								
連続箱桁					○		○	○	○											
鋼床版鈑桁																				
鋼床版箱桁								○				○								
ラーメン橋																				
ラーメン橋(橋脚と剛結)							○													
トラス橋									○											
アーチ橋												○								
斜張橋																				
吊橋																				

: 一般的に適用されることが多いとされる支間
 : 検討対象とされることが多い支間
 注) 設計施工マニュアル[橋梁編] 平成17年5月 東北地方整備局を参考に作成。
 ○ : 対象橋梁の支間長(複数支間の場合は、最も長いもの)

(b) コンクリート橋

橋梁形式	適用支間 (m)																			
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200
RC橋		○																		
PC単純プレテンT桁		○	○																	
PC単純プレテン床版		○	○																	
PC単純ボス TENT 桁			○																	
PC単純ボステン床版			○																	
PC単純箱桁			○																	
PC単純合成桁橋			○																	
PC連結プレテンT桁		○																		
PC連結プレテン床版		○																		
PC連続中空床版			○																	
PC連結ボス TENT 桁			○																	
PC連結ボステン床版			○																	
PC連続箱桁			○		○		○				○	○								
PC連結合成桁橋			○	○																
PCポータルラーメン			○	○																
Tラーメン橋					○															
連続ラーメン橋			○	○	○		○	○				○								
斜張橋																				
エクストラードード橋																				
アーチ橋								○												
複合構造							○						○							

: 一般的に適用されることが多いとされる支間
 : 検討対象とされることが多い支間
 注) 設計施工マニュアル[橋梁編] 平成17年5月 東北地方整備局を参考に作成。
 ○ : 対象橋梁の支間長(複数支間の場合は、最も長いもの)

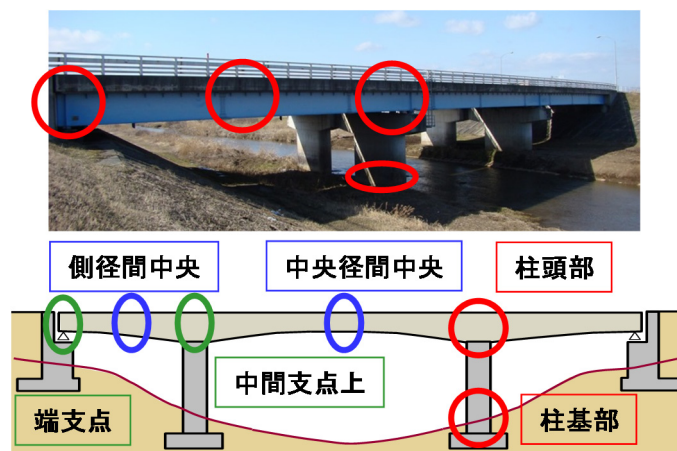


図 6.1.1 シミュレーションで着目する橋の代表断面

6.2. 荷重組合せおよび荷重係数の推定の確率的目標水準

6.2.1. 確率的目標水準の設定方針

本研究では、コードキャリブレーションによって荷重組合せと荷重係数を求めることを基本とする。道路橋示方書（平成 24 年）によって設計された橋の性能には過不足がないものと考え、道路橋示方書（平成 24 年）が与える断面力の確率水準と変わらないような断面力を与えるように荷重組合せと荷重係数をキャリブレーションする。そのため、様々な橋の様々な断面に対して、道路橋示方書（平成 24 年）が与える断面力が荷重シミュレーションから得られた断面力 100 年最大値分布においてどの程度の確率水準に相当するのかを網羅的に調べる必要がある。以降では、6.1.に示した対象橋梁に関して荷重シミュレーションによって断面力 100 年最大値分布を求め、道路橋示方書（平成 24 年）が与える断面力と比較した結果を示す。

本研究における荷重組合せおよび荷重係数を推定するための確率的目標水準は、参照期間を 100 年としたときに、100 年間の最大値を与えるものである。そこで、荷重シミュレーションから得られた 100 年最大値分布の平均値が 1 つの目標となる。しかし、後述のように地震との組合せを除く殆どの荷重組合せは、断面力の 100 年最大値分布（極値分布）の収束性が極めて高くなる。これは、地震を除く各荷重については、100 年最大値に近い断面力が 100 年の間に比較的高い頻度で複数回生じていることを意味している。発生頻度が高い状況については設計状況を特に慎重に与えるのがよく、例えば抵抗側の部分係数の評価では、ばらつきが比較的小さい分布から設計値を選ぶときには、伝統的に 5%フラクタイル値を用いるなどで評価することも行われている¹²⁾。そこで、発生頻度が高い状況については、100 年最大値分布の平均値とそれ以外の断面力標本を見れば、標本どうしの断面力の違いが大きく変わることもないと考えられる一方で、変動係数の見積もりの変化によって荷重係数を見直すことの機会をできるだけ避けることも考えて、100 年最大値分布の平均値にこだわらず安全側に荷重係数を与えるように目標とする確率水準を選ぶことも選択肢として考える。一方で、地震の影響のように再現期間が橋の供用期間に比べて非常に長いものから短いものまでを含めて一緒に扱う場合、地震の影響が含まれる荷重組合せの 100 年最大値分布（極値分布）の収束性は低くなる。例えば、同じ 100 年の中で、100 年最大値分布の平均値よりも大きなところの荷重組合せの標本を見れば、標本どうしの断面力の違いも相当に大きかったりする。その場合には、100 年最大値分布の中央値や平均値付近を一つの目標に荷重組合せや荷重係数の概略を把握する一方で、レベル 2 地震動を考えるように、設計荷重を複数段階で設定するのが合理的になるものと考えられる。

6.2.2. シミュレーション結果と設計断面力の確率統計的な位置付け

(1). 道路橋示方書（平成 24 年）が与える断面力と断面力 100 年最大値分布の関係

本研究では、道路橋示方書（平成 24 年）と変わらないような断面力を与えるように荷重組合せと荷重係数をキャリブレーションする。その前提として道路橋示方書（平成 24 年）が与える断面力が確率的にどの程度の規模であるのかを確認しておく必要がある。

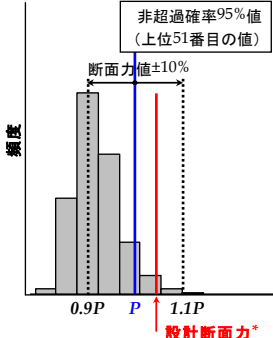
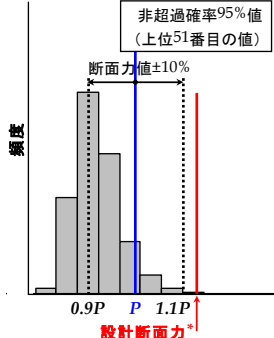
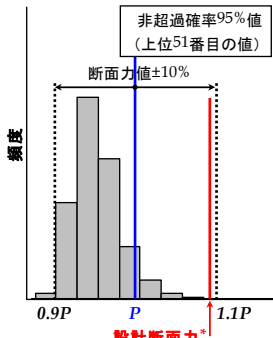
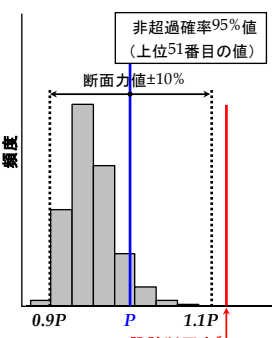
後述の表 6.2.1 および表 6.2.2 に示すように、道路橋示方書（平成 24 年）が与える断面力は、本研究で対象としたほとんどの断面で断面力 100 年最大値標本の範囲内であり、参照期間 100 年の中で 1 回起こるような規模と言えることが確認された。そのため、道路橋示方書（平成 24 年）が与える断面力が荷重シミュレーションから得られた断面力 100 年最大値分布においてどの程度の確率水準に相当するのかを網羅的に調べた上で、荷重組合せと荷重係数をキャリブレーションするための確率的目標水準を設定する。

(2). 断面力 100 年最大値分布の収束性が特に高い場合（最大値分布の変動係数が 10%以下の場合）

後述の 6.2.3.(1).に結果を示すように、地震との組合せを除く荷重組合せが支配的となる上部構造主桁の着目断面の断面力 100 年最大値分布は、最大値分布の変動係数が 10%以下となり収束性が特に高い。このような着目断面に対して、道路橋示方書（平成 24 年）が与える断面力の確率的水準を確認した結果を表 6.2.1 に示す。

このとき、本研究の対象とした着目断面の約 8 割が 100 年最大値分布の非超過確率 95%値 P （標本サンプルの上位 51 番目の値）の $0.9 \sim 1.1$ 倍（ $0.9P \leq$ 道路橋示方書が与える断面力 $\leq 1.1P$ ）の範囲内にある。断面力値を $\pm 10\%$ 変化させたとしても設計結果としての橋の断面諸元に大きな影響は与えず、目標である道路橋示方書（平成 24 年）と同程度の断面諸元が得られる場合が多いと考えられること、また一方で、非超過確率 95%値 P の近傍の断面力における各荷重の内訳は種類や比率が変わる可能性があることから、橋の設計の決定要因となる荷重組合せを取りこぼさず、網羅的に把握できるように、道路橋示方書（平成 24 年）が与える断面力が 100 年最大値分布の非超過確率 95%値 P の $0.9 \sim 1.1$ 倍の範囲内となる断面を対象に、荷重組合せと荷重係数をキャリブレーションする。

表 6.2.1 道路橋示方書（平成 24 年）が与える断面力の確率水準に関する確認結果
（最大値分布の収束性が特に高い場合）

	設計断面力*は 100 年最大値分布の 非超過確率 95%値 P の $0.9 \sim 1.1$ 倍の範囲内 ($0.9P \leq$ 設計断面力 $\leq 1.1P$)	設計断面力*は 100 年最大値分布の 非超過確率 95%値の $0.9 \sim 1.1$ 倍の範囲外 (設計断面力 $< 0.9P$, $1.1P <$ 設計断面力)
設計断面力*は 100 年最大値 標本の範囲内	326 断面 	40 断面 
設計断面力*は 100 年最大値 標本の範囲外	21 断面 	31 断面 

*上記の設計断面力は、道路橋示方書（平成 24 年）が与える断面力を示す。

(3). 断面力 100 年最大値分布の収束性が低い場合（最大値分布の変動係数が 10%よりも大きい場合）

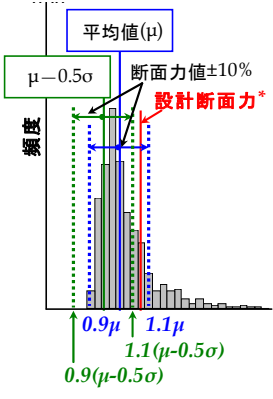
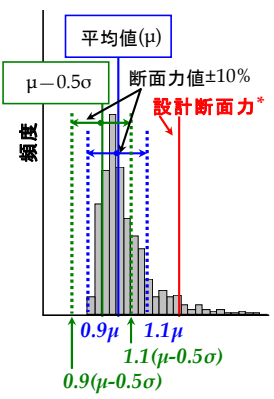
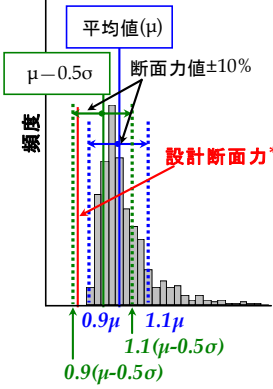
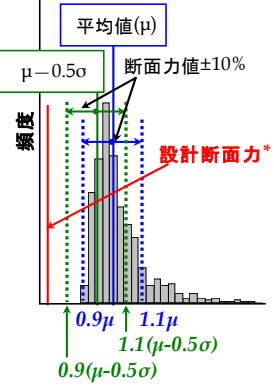
後述の 6.2.3.(2).に結果を示すように、地震の影響を含む荷重組合せが支配的となるラーメン橋の主桁および下部構造橋脚の着目断面の断面力 100 年最大値分布は、最大値分布の変動係数が 10%よりも

大きくなり、25～35%程度になるときが大半である。このような着目断面に対して、道路橋示方書（平成 24 年）が与える断面力の確率的水準を確認した結果を表 6.2.2 に示す。

このとき、本研究の対象とした着目断面の約 9 割が 100 年最大値分布の平均値 μ の 0.9～1.1 倍 ($0.9\mu \leq$ 道路橋示方書が与える断面力 $\leq 1.1\mu$)、または、100 年最大値分布の平均値 $\mu - 0.5\sigma$ (σ は 100 年最大値分布の標準偏差を示す) の 0.9～1.1 倍 ($0.9(\mu - 0.5\sigma) \leq$ 道路橋示方書が与える断面力 $\leq 1.1(\mu - 0.5\sigma)$) の範囲内にある。平均値 μ に加えて平均値 $\mu - 0.5\sigma$ を目標水準としたのは、ばらつきの大きい対数正規分布のような分布型を有する場合において中央値周辺の断面力標本を抽出することを考えたものである。100 年最大値分布のばらつきが大きいので、必ずしも平均値そのものにこだわらず、全標本の 40% 程度が含まれる平均値 $\pm 0.5\sigma$ の範囲に含まれる断面力標本は橋が 100 年の間に受ける最も厳しい状況の平均的な特性を表しているものとする。また、ここではいわゆるよくある変動状況を考慮するので、中央値側である平均値 -0.5σ に着目する。

断面力値を $\pm 10\%$ 変化させたとしても設計結果としての橋の断面諸元に大きな影響は与えず、目標である道路橋示方書（平成 24 年）と同程度の断面諸元が得られる場合が多いと考えられること、また一方で、100 年最大値分布の平均値 μ または平均値 $\mu - 0.5\sigma$ にの近傍の断面力における各荷重の内訳は種類や比率が変わる可能性があることから、橋の設計の決定要因となる荷重組合せを取りこぼさず、網羅的に把握できるように、道路橋示方書（平成 24 年）が与える断面力が 100 年最大値分布の平均値 μ の 0.9～1.1 倍、または、100 年最大値分布の平均値 $\mu - 0.5\sigma$ の 0.9～1.1 倍の範囲内となる断面を対象に、荷重組合せと荷重係数をキャリブレーションする。

表 6.2.2 道路橋示方書（平成 24 年）が与える断面力の確率水準に関する確認結果
（最大値分布の収束性が低い場合）

	設計断面力*は 100 年最大値分布の 平均値 μ 又は $\mu-0.5\sigma$ の 0.9~1.1 倍の範囲内 ($0.9\mu \leq \text{設計断面力} \leq 1.1\mu$ 又は $0.9(\mu-0.5\sigma) \leq \text{設計断面力} \leq 1.1(\mu-0.5\sigma)$)	設計断面力*は 100 年最大値分布の 平均値 μ 又は $\mu-0.5\sigma$ の 0.9~1.1 倍の範囲外 (設計断面力 $< 0.9\mu$, $1.1\mu < \text{設計断面力}$ 又は 設計断面力 $< 0.9(\mu-0.5\sigma)$, $1.1(\mu-0.5\sigma) < \text{設計断面力}$)
設計断面力*は 100 年最大値 標本の範囲内	65 断面 	4 断面 
設計断面力*は 100 年最大値 標本の範囲外	0 断面 	3 断面 

*上記の設計断面力は、道路橋示方書（平成 24 年）が与える断面力を示す。

6.2.3. シミュレーション結果の代表例

(1). 上部構造主桁の場合（地震の影響を受けない場合）

地震の影響が荷重効果として支配的とならない着目断面として、主桁の発生断面力の 100 年最大値分布を荷重シミュレーションによって求めると、断面力 100 年最大値分布の変動係数は数パーセント（3%程度）のオーダーで収束する。この場合、断面力 100 年最大値を与えるような同時載荷状況は常に類似し、高い頻度で発生していると考えられる。そして、断面力 100 年最大値分布の平均値部分だけでなく裾野部分も変動作用として物理的にも統計的にも意味のある荷重組合せであると考えられる。

断面力 100 年最大値分布のばらつきが小さい場合の例として、上部構造主桁のうち、活荷重による断面力が支配的となるケースの荷重シミュレーション結果例として、表 6.1.4 の橋梁番号 27 の橋におけるある主桁支間中央の断面力（曲げモーメント）の 100 年最大値分布を表 6.2.3 および図 6.2.1 に示す。また、100 年最大値分布の非超過確率 95%（標本サンプルの上位 51 番目の値）付近と平均値付近の断面力内訳を図 6.2.2 に示す。100 年最大値分布の非超過確率 95%値（標本サンプルの上位 51 番目の値）および平均値は、断面力値の比率が 1.0~1.1 倍程度となっている。また、断面力の内訳にも大きな変化は見られず、断面力 100 年最大値を与えるような同時載荷状況は常に類似している。したがって、100 年最大値分布の代表値の抽出には裾野部分に相当するフラクタイル値を用いることで、各標本

を構成する荷重組合せの種類や荷重係数も現実的な範囲で比較的安定して（種類や数値のバランスが絞り込まれて）得られると考えられる。

このようなコードキャリブレーションによる検討に関連して、Phoon らは Baseline Technique という考え方があることを述べている³⁾。Phoon らは、作用や抵抗の特性値として伝統的に 95%や 5%といったフラクタイル値を取ることが行われていることを指摘している。このようなフラクタイル値を特性値として採用する理由として、対象とする基本変数の変動係数に多少の変化があっても、規定された部分係数の変化が小さいことを挙げている。また、このような傾向は変動係数が 0.3 程度より小さい場合は認められるが、それより大きな変動係数の場合には必ずしもあてはまらないことを、簡単な試算を通して示している。

表 6.2.3 断面力 100 年最大値分布の分布特性の例（分布のばらつきが小さい場合）

橋梁形式	最大 支間長	着目 部位	着目 位置	着目する 荷重効果	100 年最大値分布の分布特性		
					平均値	標準偏差	変動係数
鋼単純鋼床版箱桁	75.0 m	主桁	支間中央	曲げ	47940 kNm	1121 kNm	2.3 %

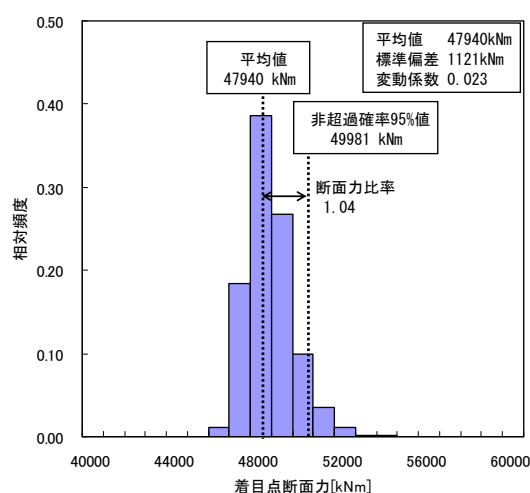


図 6.2.1 断面力 100 年最大値頻度分布（分布のばらつきが小さい場合）

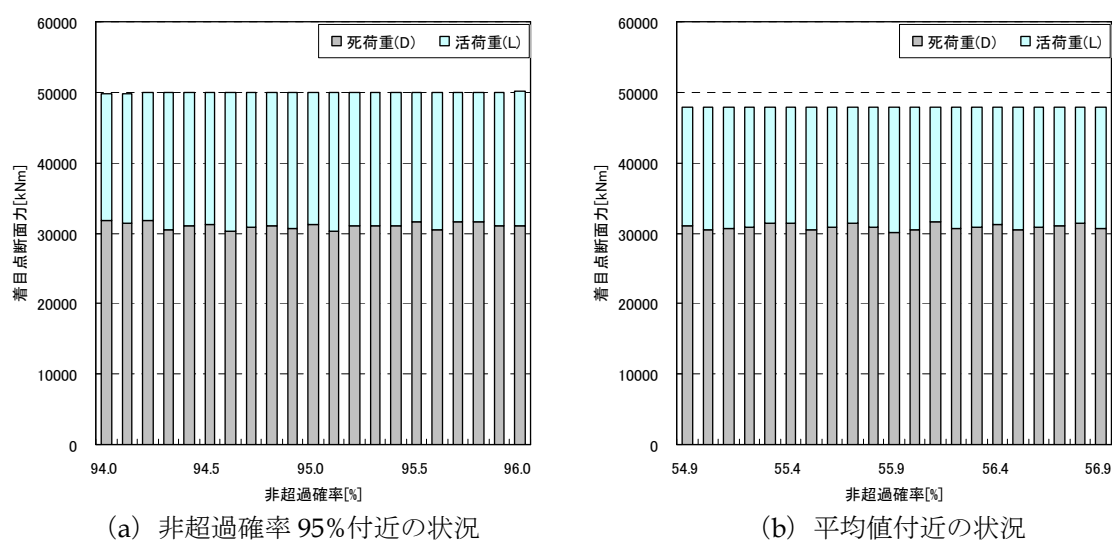
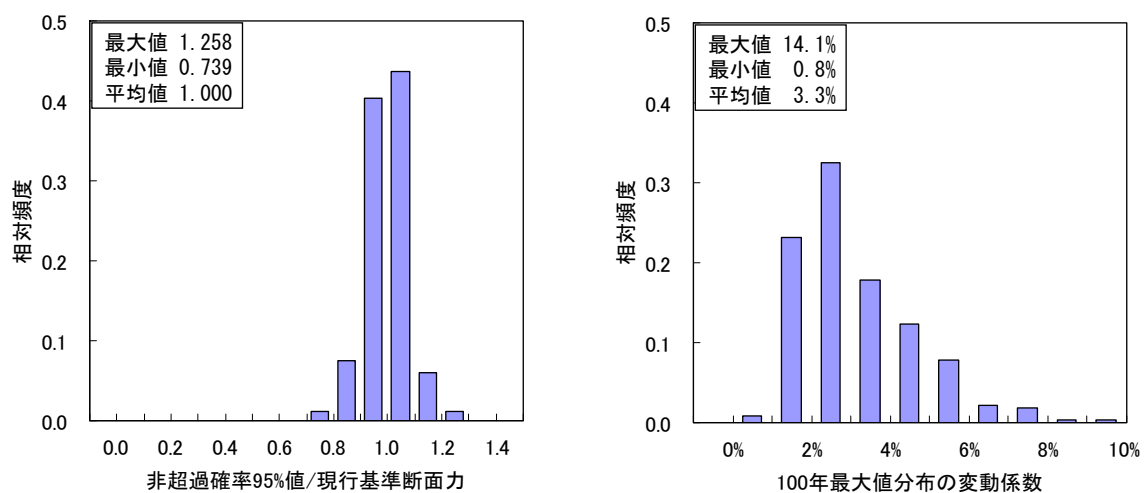


図 6.2.2 100 年最大値分布の非超過確率 95%および平均値付近の断面力内訳（主桁）

信頼性工学の観点からも、断面力の 100 年最大値を表す統計量（極値分布）の収束性が極めて高い

ときに、確率的な目標水準は統計量（極値分布）における非超過確率 95%値相当とすることで、断面力の変動係数の見込みを多少変動させたとしても部分係数値見直しの必要性が低くなるという普遍性の点で利点がある。このことと道路橋示方書（平成 24 年）で考慮されていた断面力の確率的な水準を調べた結果を踏まえて、上部構造の主桁ならびに上・下部構造によらず断面力 100 年最大値分布の変動係数が 10%程度またはそれよりも小さいときには、確率的な目標水準は統計量（極値分布）における非超過確率 95%値相当（標本サンプルの上位 51 番目の値）を検討における着目確率水準とする。

本検討におけるシミュレーションの対象とした橋梁の上部構造主桁のうち、地震の影響が荷重効果として支配的とならない着目断面の断面力 100 年最大値分布の傾向を図 6.2.3 に示す。道路橋示方書（平成 24 年）が与える断面力と 100 年最大値分布の非超過確率 95%値（標本サンプルの上位 51 番目の値）の比率は、大半のケースが 0.9~1.1 の範囲にある。また、100 年最大値分布の変動係数は大半のケースが 10%以下であり、収束性が高いことがわかる。



(a) 現行基準断面力と非超過確率 95%値の比率 (b) 100 年最大値分布における変動係数の傾向

図 6.2.3 上部構造主桁における断面力 100 年最大値分布の傾向

(2). 下部構造橋脚の場合（地震の影響を受ける場合）

地震による影響が主となるものについて、表 6.1.4 の橋に対するシミュレーションの結果得られる橋の各橋脚柱基部断面力の 100 年最大値分布における平均値と、道路橋示方書（平成 24 年）における設計断面力の関係を図 6.2.4 に示す。この図から、多くの橋において、道路橋示方書（平成 24 年）における設計断面力は断面力 100 年最大値分布の平均値の 0.9～1.1 倍になることが分かる。したがって、ばらつきの大きい分布からの代表値を取り出すという観点からは、代表値を平均値とし、断面力 100 年最大値分布の平均値を基本に荷重組合せ及び荷重係数を抽出することで、結果的には道路橋示方書（平成 24 年）における設計断面力と同等になることが期待できる。

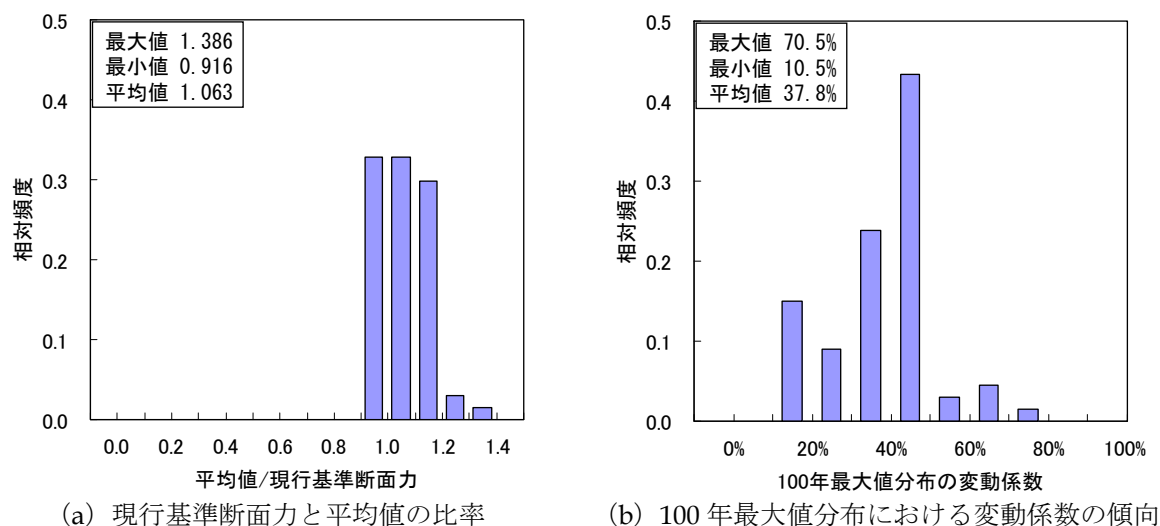


図 6.2.4 橋脚柱基部における 100 年最大値分布の傾向

断面力 100 年最大値分布のばらつきが大きい場合の例として、地震の影響による断面力が支配的となる表 6.1.4 の橋梁番号 55 の橋におけるある橋脚基部の断面力（曲げモーメント）の 100 年最大値分布を表 6.2.4 および図 6.2.5 に示す。また、100 年最大値分布の非超過確率 95%（標本サンプルの上位 51 番目の値）付近と平均値付近の断面力内訳を図 6.2.6 に示す。橋脚についてみれば、発生断面力の 100 年最大値の個々の標本は地震の影響を必ず含むという結果になった。橋脚基部発生断面力の 100 年最大値はばらつきの大きい分布形状を有するが、その変動係数は橋脚柱基部では 30%程度になり、かつ、図 6.2.1 と比べても裾野が比較的厚い傾向が見てとれる。また、図 6.2.6 より断面力 100 年最大値分布の非超過確率 95%付近の標本は異なる断面力値を示す傾向が見られることから、少なくとも、分布の裾野部分の断面力標本を抽出することは、変動作用としては極めて稀な荷重組合せを抽出してしまう恐れがあると考えられる。

表 6.2.4 断面力 100 年最大値分布の分布特性の例（ばらつきが大きい場合）

橋梁形式	最大 支間長	着目 部位	着目 位置	着目する 荷重効果	100 年最大値分布の分布特性		
					平均値	標準偏差	変動係数
PC ラーメン橋	70.0 m	橋脚	基部	曲げ	-159027 kNm	54628 kNm	34.4 %

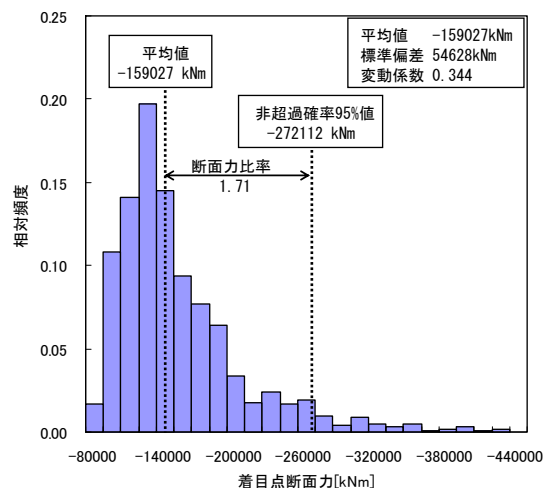


図 6.2.5 断面力 100 年最大値頻度分布（分布のばらつきが大きい場合）

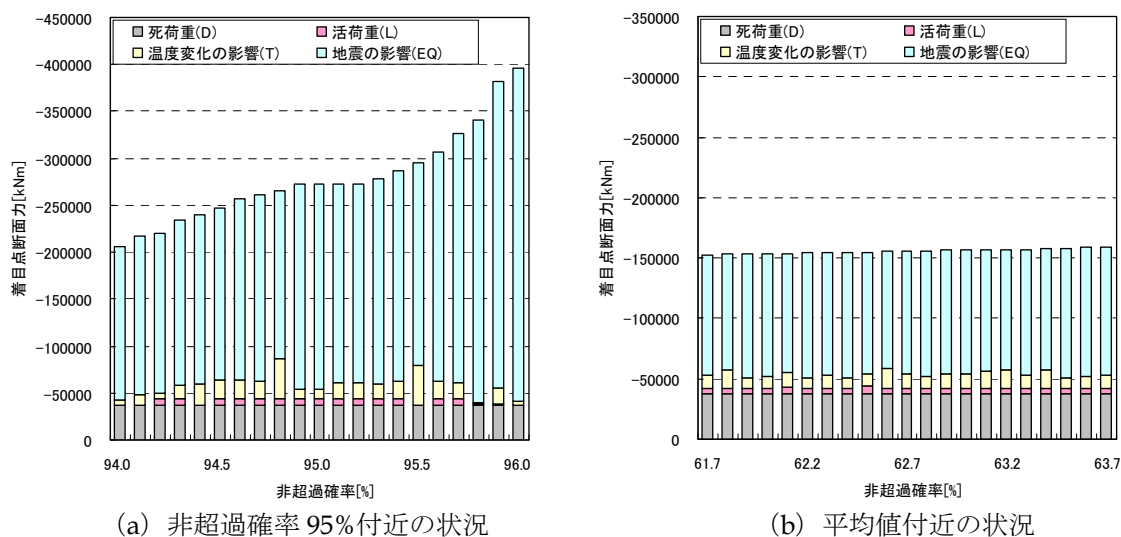


図 6.2.6 100 年最大値分布の非超過確率 95%および平均値付近の断面力内訳（橋脚基部）

したがって、地震のような作用は、変動作用としての代表値と特に稀な作用としての代表値について、荷重組合せの水準を多段化して考えるのが良いかもしれない。ばらつきの大きい分布から変動作用を含む組合せ荷重の代表としての荷重組合せや荷重係数を安定して得られるように断面力 100 年最大値標本を抽出すること、変動作用として物理的に説明性が高い（変動作用の中でも稀・異常とは考えにくい）荷重組合せや荷重係数が得られるように標本を抽出することを重視すれば、結果として断面力 100 年最大値分布の平均値や中央値周辺の断面力標本を抽出し、参考にすることで、荷重組合せや荷重係数の集約作業を行うのが合理的である。

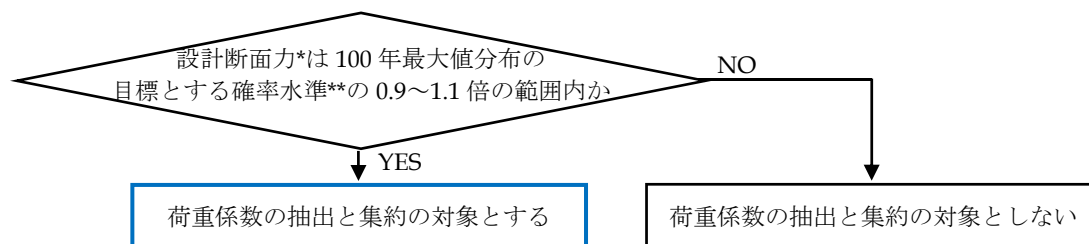
結論として、100 年最大値分布の平均値および平均値 -0.5σ 付近（ σ は 100 年最大値分布の標準偏差を示す）の断面力標本を用いて地震を考慮した組合せや荷重係数を決定することは、ばらつきの非常に大きい分布を含む組合せの代表を抽出するという観点で妥当である。さらに、一般には 100 年最大値分布の非超過確率 95%相当を目標に断面力標本を抜き出していることと比較すれば、従来の地震時の許容応力度の割増係数分も作用側で考慮した荷重組合せと荷重係数を決定することができる。

6.3. 荷重係数の抽出と集約結果

6.3.1. 荷重係数の抽出と集約方法

本研究では、断面力 100 年最大値分布において組合せ断面力の水準として設定された確率の前後 10 個の標本を含めた合計 21 標本を抽出して、荷重組合せと対応する荷重係数を算出する。6.2.3 に示したように、組合せ断面力の水準として設定された確率の前後 10 個の標本の範囲では、組合せ断面力はほぼ変わらないものの、組合せ断面力に占める各荷重の寄与分は変化している。そのため、できるだけ網羅的に断面力標本を抽出することで、荷重組合せと荷重係数の標本依存性を排除できると考えた。

荷重組合せと荷重係数の抽出は、図 6.3.1 に示すフローに従って、前述の 6.2.1. に示した道路橋示方書（平成 24 年）が与える断面力が確率的目標水準の範囲内にある断面（表 6.3.1 の青枠に該当する断面）の断面力標本を用いる。



* 道路橋示方書（平成 24 年）が与える断面力のことを示す。

** 最大値分布の収束性が特に高い場合は非超過確率 95% 値、収束性が低い場合は平均値又は平均値 -0.5σ を示す。

図 6.3.1 荷重係数の抽出と集約の対象とする断面の選定フロー

表 6.3.1 荷重係数の抽出と集約の対象とする断面（表 6.2.1 および表 6.2.2 を基に作成）

	【抽出対象】		【抽出対象外】	
	設計断面力*は 100 年最大値分布の 目標とする確率水準の 0.9~1.1 倍の範囲内		設計断面力*は 100 年最大値分布の 目標とする確率水準の 0.9~1.1 倍の範囲外	
	最大値分布の収束性 が特に高い場合	最大値分布の収束性 が低い場合	最大値分布の収束性 が特に高い場合	最大値分布の収束性 が低い場合
設計断面力*は 100 年最大値 標本の範囲内	326 断面	65 断面	40 断面	4 断面
設計断面力*は 100 年最大値 標本の範囲外	21 断面	0 断面	31 断面	3 断面

*上記の設計断面力は、道路橋示方書（平成 24 年）が与える断面力を示す。

荷重係数は図 6.3.2～図 6.3.3 に示すように、荷重シミュレーションにより発生した断面力と道路橋示方書（平成 24 年）による荷重を載荷した場合の発生断面力の比を、断面力を構成する荷重ごとに算出する。荷重シミュレーション結果を用いた各種荷重の荷重係数算出式を表 6.3.2 に示す。

以上のように、作用を組合せた結果としての 100 年最大値分布に基づく部分係数であるので、ある荷重に荷重係数を乗じた結果としての荷重規模がその荷重の再現期間としてどの程度の確率水準にあるのかを算出することに工学的意味は無い。ここでの荷重係数は、荷重を組合せた結果が橋に与える影響、すなわち、常に変化し、かつ無数の作用の組合せ種類や割合からなる橋が置かれる状況の稀さの水準の統一を図るように調整するためのものである。

荷重iの荷重係数

荷重iの作用により発生するM
特性値により発生するM

荷重iの作用により発生するS
特性値により発生するS

荷重iの作用により発生するN
特性値により発生するN

特性値 = 現行示方書における荷重値

100年最大値分布における
ある断面力標本の内訳の例

内訳比率

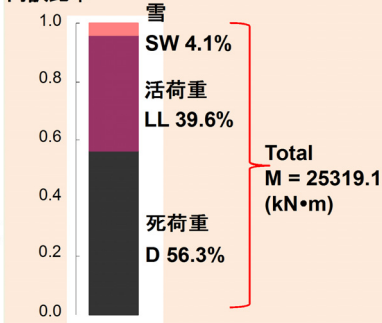
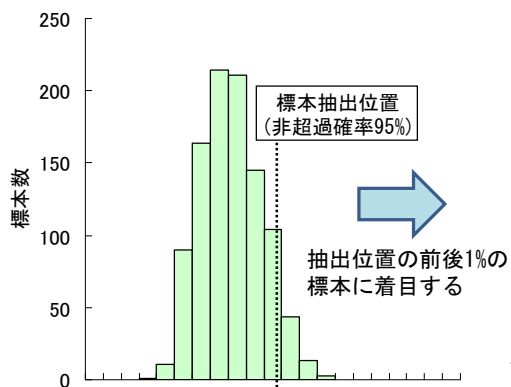


図 6.3.2 荷重係数の算出方法

■支間中央部の曲げモーメント 100年間最大値分布の例



断面力 状態	非超過 確率	組合せ	荷重係数(シミュレーション/現行)						
			D	L	T	W	E	S	C
Mz(max)	96.0	DL	1.020	0.932	↑				
	95.9	DL	0.975	0.984					
	95.8	DL	0.972	0.987					
	95.7	DL	1.011	0.942					
	95.6	DL	1.026	0.923					
	95.5	DL	1.010	0.939					
	95.4	DL	1.029	0.916					
	95.3	DL	1.031	0.909					
	95.2	DL	0.998	0.947					
	95.1	DL	1.004	0.940					
	95.0	DL	1.006	0.936					
	94.9	DL	0.983	0.962	↓				
	94.8	DL	1.006	0.935					
	94.7	DL	1.009	0.928					
	94.6	DL	1.012	0.924					
	94.5	DL	1.015	0.919					
	94.4	DL	1.021	0.912					
	94.3	DL	1.002	0.933					
	94.2	DL	1.019	0.912					
	94.1	DL	1.040	0.887					
	94.0	DL	1.003	0.930					

計21ケース抽出
各荷重係数算出

図 6.3.3 断面力の 100 年最大値分布サンプルからの荷重係数算出方法の例

表 6.3.2 荷重シミュレーションにおける断面力および荷重係数の算出式

荷重の種類	荷重シミュレーションにおける断面力の算出式	荷重係数の算出式
死荷重 (D)	$X_D(t) = A_D \cdot x_D(t)$ A_D : 死荷重の特性値による断面力 x_D : 死荷重の確率モデルに基づく特性値による断面力との比率	$\gamma_D(t) = \frac{X_D(t)}{A_D}$
活荷重 (L)	$X_L(t) = (1 + I) \cdot x_L(t)$ x_L : 車両列スナップショットによる断面力 A_L : 活荷重の特性値による断面力 I : 道路橋示方書（平成 24 年）による衝撃係数	$\gamma_L(t) = \frac{X_L(t)}{(1 + I)A_L}$
温度変化の影響 (TH)	$X_{TH}(t) = A_{TH} \cdot \frac{G(x_{TH}(t)) - T_0}{\Delta T_n}$ A_{TH} : 温度変化の影響の特性値による断面力 x_{TH} : 日最高・最低気温の確率モデルに基づく気温 T_0 : 基準温度 $G(x)$: 気温から構造物温度への相関式 ΔT_n : 道路橋示方書における温度変化の範囲	$\gamma_{TH}(t) = \frac{X_{TH}(t)}{A_{TH}}$
風荷重 (W)	$X_w(t) = A_w \cdot \left(\frac{x_w(t)}{40} \right)^2$ A_w : 風荷重の特性値による断面力 x_w : 季節風または台風の確率モデルに基づく風速	$\gamma_w(t) = \frac{X_w(t)}{A_w}$
地震の影響 (EQ)	$X_{EQ}(t) = A_{EQ} \cdot \frac{x_{EQ}(t)}{k_h^*}$ A_{EQ} : 地震の影響の特性値による断面力 （死荷重のばらつきは考慮していない） k_h^* : A 地域Ⅱ種地盤の固有周期 1.0 秒の設計水平震度(=0.25) x_{EQ} : 地震の影響の確率モデルに基づく震度	$\gamma_{EQ}(t) = \frac{X_{EQ}(t)}{A_{EQ}}$
雪荷重 (SW)	$X_{SW}(t) = A_{SW}$ A_{SW} : 雪荷重の特性値による断面力	$\gamma_{SW}(t) = \frac{X_{SW}(t)}{A_{SW}}$

荷重係数の集約は、断面力 100 年最大値分布から取り出した断面力標本に基づき、標本に含まれる荷重組合せの種類を①から⑭に分類し、それぞれの組合せ分類ごとに内訳として含まれるそれぞれの荷重の大きさの範囲を集約する作業を行う。本研究では、以下のような方法を用いる。

1. 断面力標本の中で、D, L, TH, W, EQ, SW の 1 つでも荷重係数が負の値となる場合は、その断面力標本を排除する。
2. 表 6.3.3 に示すような荷重組合せごとに断面力標本を分類する。この時、荷重係数が 0.1 未満となっている荷重は考慮せずに分類する。

- ①D, L の荷重係数が 0.1 以上でその他の荷重の係数は 0.1 未満
- ②D, TH の荷重係数が 0.1 以上でその他の荷重の係数は 0.1 未満
- ③D, W の荷重係数が 0.1 以上でその他の荷重の係数は 0.1 未満
- ④D, EQ の荷重係数が 0.1 以上でその他の荷重の係数は 0.1 未満
- ⑤D, L, TH の荷重係数が 0.1 以上でその他の荷重の係数は 0.1 未満
- ⑥D, L, W の荷重係数が 0.1 以上でその他の荷重の係数は 0.1 未満
- ⑦D, L, EQ の荷重係数が 0.1 以上でその他の荷重の係数は 0.1 未満
- ⑧D, TH, W の荷重係数が 0.1 以上でその他の荷重の係数は 0.1 未満
- ⑨D, TH, EQ の荷重係数が 0.1 以上でその他の荷重の係数は 0.1 未満
- ⑩D, W, EQ の荷重係数が 0.1 以上でその他の荷重の係数は 0.1 未満
- ⑪D, L, TH, W の荷重係数が 0.1 以上でその他の荷重の係数は 0.1 未満
- ⑫D, L, TH, EQ の荷重係数が 0.1 以上でその他の荷重の係数は 0.1 未満
- ⑬D, TH, W, EQ の荷重係数が 0.1 以上でその他の荷重の係数は 0.1 未満
- ⑭本研究で考慮する全ての荷重の荷重係数が 0.1 以上

ここで、集約の対象とした荷重組合せの種類を表 6.3.3 に示す。本研究で考慮する荷重の組合せとして考えられる全てのケースを示している。

表 6.3.3 集約対象とした荷重組合せの種類

	荷重組合せ	D	L	TH	W	EQ	SW	備考
①	D+L (+SW)	●	●				(●)	
②	D+TH (+SW)	●		●			(●)	
③	D+W (+SW)	●			●		(●)	
④	D+EQ (+SW)	●				●	(●)	
⑤	D+L+TH (+SW)	●	●	●			(●)	
⑥	D+L+W (+SW)	●	●		●		(●)	
⑦	D+L+EQ (+SW)	●	●			●	(●)	
⑧	D+TH+W (+SW)	●		●	●		(●)	
⑨	D+TH+EQ (+SW)	●		●		●	(●)	
⑩	D+W+EQ (+SW)	●			●	●	(●)	
⑪	D+L+TH+W (+SW)	●	●	●	●		(●)	
⑫	D+L+TH+EQ (+SW)	●	●	●		●	(●)	
⑬	D+TH+W+EQ (+SW)	●		●	●	●	(●)	
⑭	D+L+TH+W+EQ (+SW)	●	●	●	●	●	(●)	

※ () は雪荷重(SW)を含む場合と含まない場合の荷重組合せが考えうることを示している。

本研究における荷重組合せの集約は、荷重係数が 0.1 未満となっている荷重は考慮せずに行うものとしたが、これによって荷重組合せとして有意なものを見逃す可能性は小さいと考えられる。また、最終

的には、荷重に乗じる以外の部分係数のキャリブレーションも含めて、従前の設計結果から断面諸元に大きな変化がないようにすることが考えられるが、ここでの荷重組合せの集約方法が従前の設計結果から諸元に顕著な変化をもたらす可能性は無視できると考えられる。たとえば、表 6.1.4 に示した本研究の対象橋梁のうち、橋梁番号 55 の橋における主桁および橋脚柱基部の荷重別の断面力を図 6.3.4～図 6.3.5 に示す。対象断面は D、L、TH、EQ の同時載荷を受ける断面である。ある 2 つの荷重に対して、それ以外の荷重による断面力を 0.1 倍して重ね合わせたときの断面力全体に占める割合はほとんどが 10% 以下である。つまり、荷重係数が 0.1 未満となっている荷重は断面力全体に対する比率が小さい。結果として、橋の断面諸元に大きな影響は与えないと考えられる。橋脚柱基部に着目すると、断面力全体に占める地震の影響 (EQ) の割合が大きい。仮に、 $1.00D+1.00L$ または $1.00D+1.00TH$ に $0.1EQ$ を重ねたときの断面力は断面力全体の 10% 上回るが、断面力 100 年最大値の各断面力標本では地震の影響 (EQ) が支配的であり、 $1.00D+1.00L$ や $1.00D+1.00TH$ の断面力が $1.00D+1.00EQ$ の断面力を超えることはない。

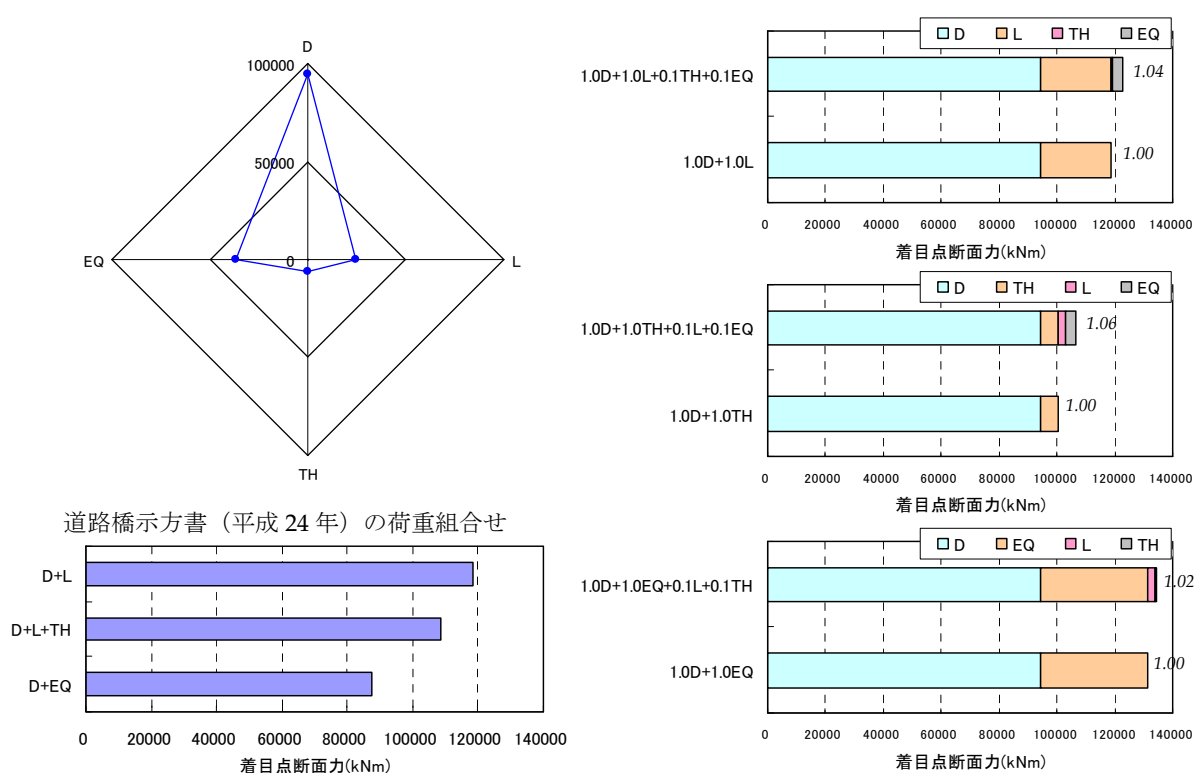


図 6.3.4 荷重別の断面力内訳の例（着目断面：主桁曲げモーメント）

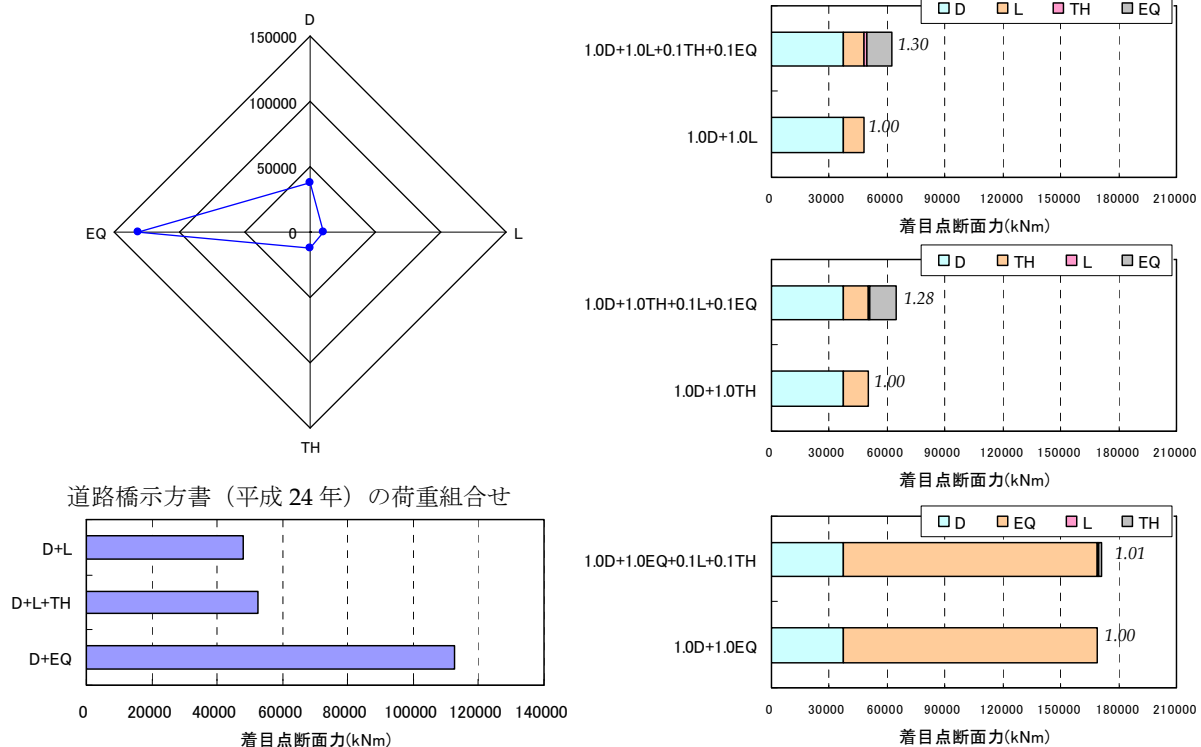


図 6.3.5 荷重別の断面力内訳の例（着目断面：橋脚柱基部曲げモーメント）

6.3.2. 荷重組合せと荷重係数の集約結果

本研究における荷重シミュレーション結果から得られた荷重組合せ、および荷重係数を表 6.3.4 に示す。最大値分布の収束性が高い場合は断面力 100 年最大値分布の非超過確率 95% 値、最大値分布の収束性が低い場合は断面力 100 年最大値分布の平均値および平均値 -0.5σ (σ は 100 年最大値分布の標準偏差を示す) の値を基準として、目標とする確率水準の断面力 100 年最大値標本の前後 10 個を含めた合計 21 標本から荷重組合せと荷重係数を整理したものである。表 6.3.4 に示す荷重係数の着色部は、荷重シミュレーションにおいて荷重組合せとして生じるが、荷重係数の中央値が特に小さいものを示している。

前述の 5 章の検討は荷重組合せのみに着眼した分析で、4 章で採用した各種荷重の発生頻度・確率モデルについて、参照期間 100 年の間にどのような荷重が同時に載荷されるのかを単に統計学上から算出し、起こりうる荷重組合せを整理するものであった。一方で、本章の検討は荷重効果の 1 つである断面力に着目しており、橋にとって最も厳しい状況となる荷重組合せを断面力を指標として評価するものである。ゆえに、5 章および本章の結果から、統計学的な観点と荷重効果としての断面力の観点で橋にとって最も厳しい状況となる荷重組合せを評価することができる。D+EQ の組合せに対して L が重なったときの L の荷重係数の中央値は 0.1 未満であることから、L の考慮の有無によって荷重効果である断面力や設計結果としての橋の断面諸元に大差は生じないと考えられ、D+EQ に L を重ねる必要性は低いと考えられる。同様の考え方をすれば、D+EQ+SW の組合せに対して L, TH を、D+TH+EQ の組合せに対して L を重ねる必要性は低いと考えられる。これは、5 章における結果と一致した傾向を示している。なお、風荷重(W)と地震の影響(EQ)が同時に作用する組合せは抽出されなかった。これは、5 章で見たように W と EQ の組合せの発生頻度がオーダーが異なるほど小さいことに加えて、発生したとしてもそれぞれの荷重効果である断面力が小さく（荷重係数が 0.1 未満）、ここに抽出されな

かったものと考えられる。

表 6.3.4 荷重組合せと荷重係数の算出結果

荷重組合せ	抽出位置	D	L	TH	W	EQ	SW	該当数	荷重係数の頻度
D+L	95%値	0.97~1.09 (1.04)	0.62~1.24 (0.96)					46橋272断面 標本数 5739	図 6.3.3
D+L+SW	95%値	1.00~1.08 (1.04)	0.66~1.24 (0.84)				1.00	5橋31断面 標本数 527	図 6.3.3
D+EQ	平均値	1.01~1.07 (1.04)	0.01~0.54 (0.03)			0.88~1.10 (1.06)		19橋31断面 標本数 114	図 6.3.4
	平均値-0.5σ	1.00~1.07 (1.04)	0.01~0.62 (0.03)			0.57~1.03 (0.83)		20橋39断面 標本数 136	
D+EQ+SW	平均値	1.01~1.07 (1.03)	0.01~0.22 (0.01)	0.01~0.39 (0.14)		0.86~1.08 (0.94)	1.00	3橋9断面 標本数 31	図 6.3.5
	平均値-0.5σ	1.01~1.07 (1.03)	0.01~0.64 (0.03)	0.02~0.37 (0.18)		0.31~0.83 (0.70)	1.00	3橋10断面 標本数 55	
D+L+TH	95%値	1.00~1.08 (1.03)	0.73~1.19 (0.95)	0.10~0.93 (0.48)				9橋29断面 標本数 333	図 6.3.7
	平均値	1.02	0.95	0.38~0.58 (0.48)				1橋1断面 標本数 2	
	平均値-0.5σ	1.01~1.04 (1.03)	0.84~0.85 (0.85)	0.16~0.51 (0.40)				1橋2断面 標本数 5	
D+L+TH+SW	95%値	1.00~1.05 (1.02)	0.83~1.19 (0.95)	0.10~0.74 (0.27)			1.00	3橋7断面 標本数 58	図 6.3.8
	平均値	1.01~1.03 (1.02)	0.91~0.98 (0.91)	0.18~0.23 (0.20)			1.00	1橋2断面 標本数 4	
	平均値-0.5σ	1.00~1.03 (1.03)	0.77~1.07 (0.78)	0.18~0.30 (0.21)			1.00	1橋3断面 標本数 7	
D+L+W	95%値	1.03~1.07 (1.05)	0.60~0.89 (0.67)		0.22~1.26 (1.11)			2橋4断面 標本数 15	図 6.3.6
	平均値	1.05~1.06 (1.06)	0.55~0.75 (0.65)		1.33~1.57 (1.41)			1橋2断面 標本数 3	
	平均値-0.5σ	1.03~1.06 (1.05)	0.16~0.68 (0.48)		1.18~1.51 (1.34)			2橋4断面 標本数 24	
D+TH+EQ	平均値	1.00~1.08 (1.03)	0.01~0.53 (0.03)	0.11~0.83 (0.39)		0.62~1.11 (0.92)		20橋41断面 標本数 500	図 6.3.9
	平均値-0.5σ	1.00~1.08 (1.03)	0.01~0.51 (0.03)	0.10~0.84 (0.40)		0.37~1.04 (0.70)		21橋41断面 標本数 486	
D+L+TH+W	95%値	1.04~1.08 (1.06)	0.67~0.88 (0.77)	0.19~0.56 (0.45)	0.98~1.60 (1.14)			1橋4断面 標本数 30	図 6.3.10
	平均値	1.03~1.07 (1.05)	0.35~0.86 (0.69)	0.11~0.52 (0.36)	1.23~1.64 (1.46)			1橋3断面 標本数 12	
	平均値-0.5σ	1.02~1.07 (1.05)	0.25~0.91 (0.47)	0.15~0.62 (0.42)	0.97~1.51 (1.36)			1橋4断面 標本数 47	

※ () の値は荷重係数の中央値を示す。また、着色部は荷重係数の値が小さい荷重を示す。

6.3.3 荷重係数のおおよその範囲

荷重組合せ別に各荷重の荷重係数の値の範囲を確認する目的で、荷重係数の頻度分布を作成した。

(1). D+L, D+L+SW における荷重係数

活荷重(L)の荷重係数は雪荷重(SW)を含まないときも含むときも最大で 1.24 程度となった。

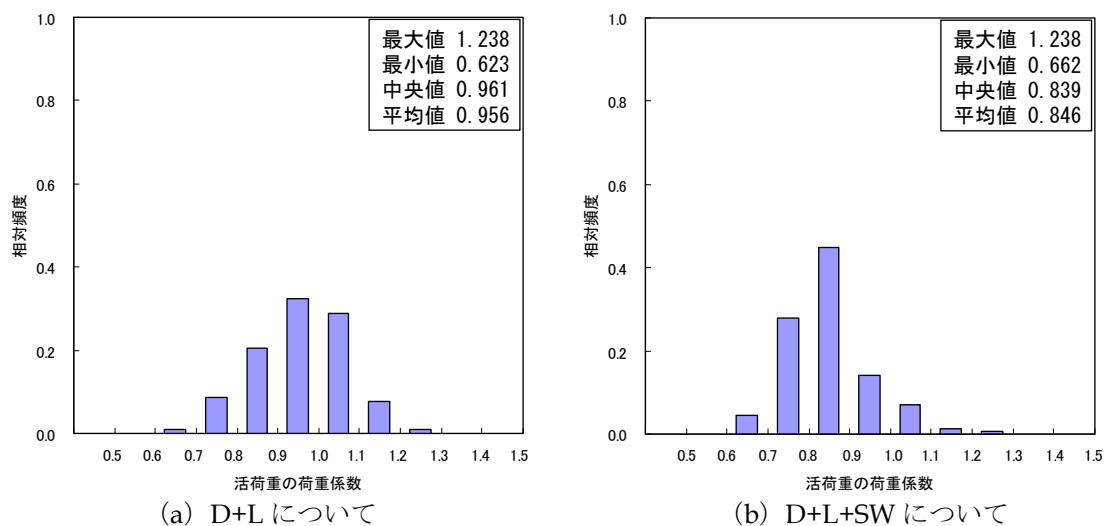


図 6.3.6 D+L, D+L+SW の組合せにおける活荷重の荷重係数頻度分布図

(2). D+EQ, D+EQ+SW における荷重係数

地震の影響(EQ)の荷重係数は 1.0 付近が最頻値となり、両荷重組合せともに同じ傾向を示している。

D+EQ については活荷重も同時に作用するケースが見られたが、L に対する荷重係数の中央値は 0.03 程度と小さな値であった。また、D+EQ+SW については、活荷重(L)と温度変化の影響(TH)が同時に作用するケースが見られたが、地震の影響(EQ)の荷重係数と比較するとこれらの荷重の荷重係数の値は小さな値であった。

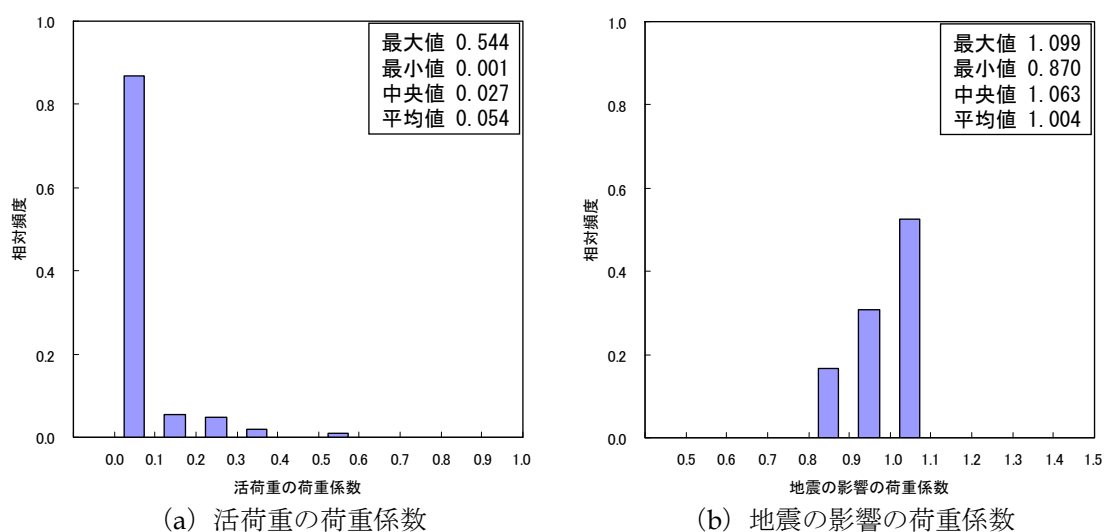


図 6.3.7 D+EQ の組合せにおける荷重係数頻度分布図 (抽出位置：平均値)

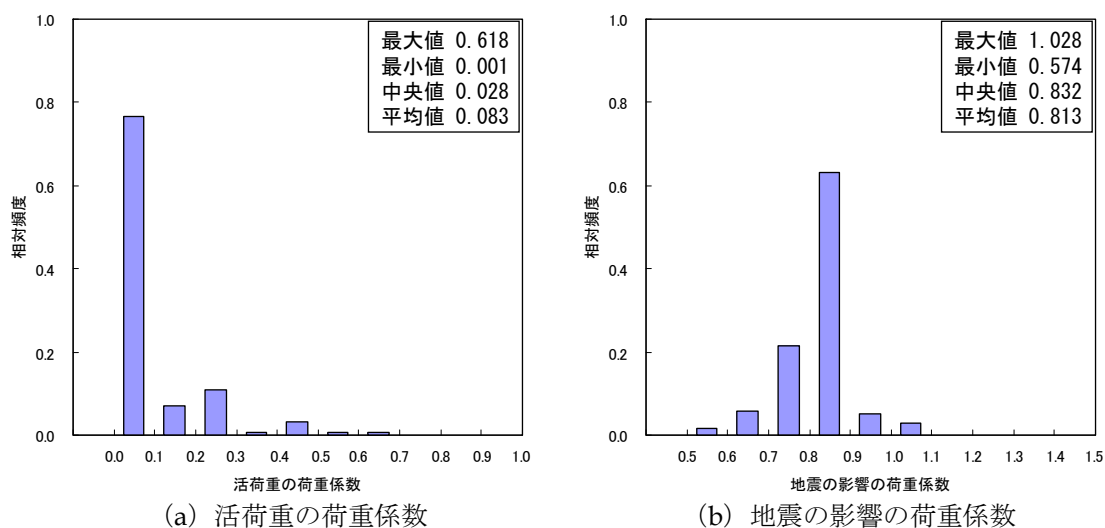
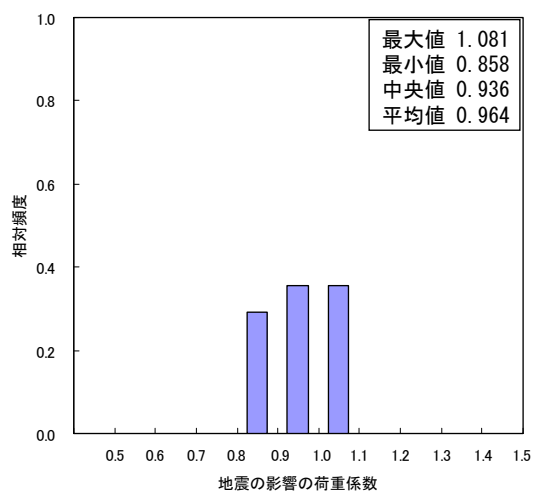
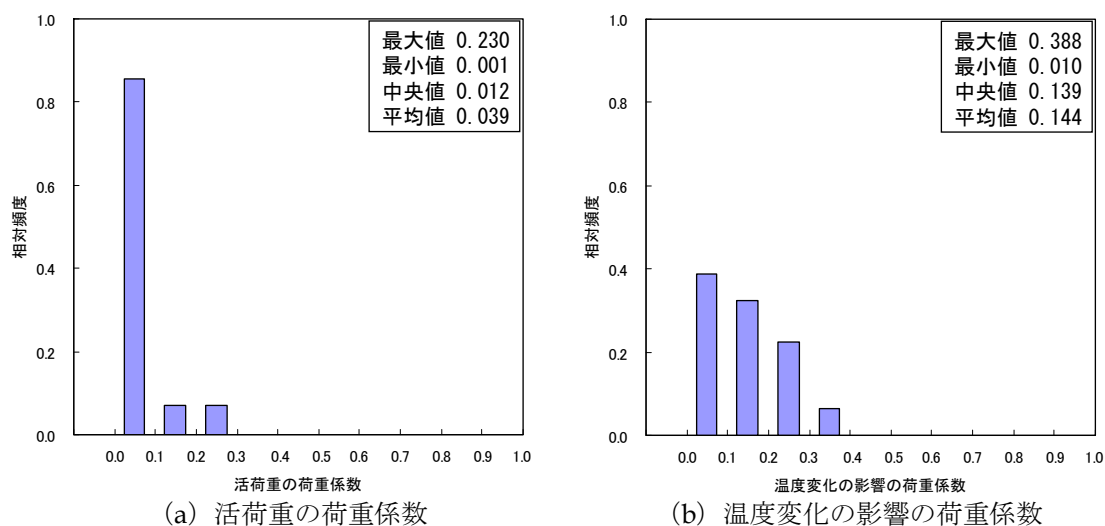
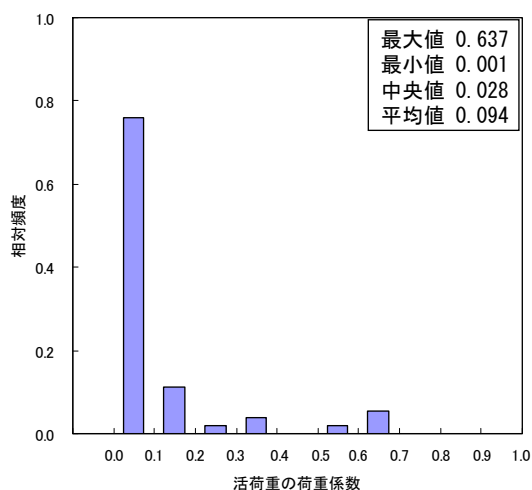


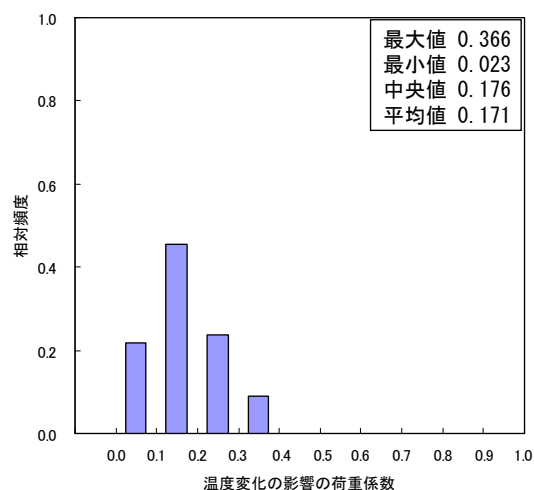
図 6.3.8 D+EQ の組合せにおける荷重係数頻度分布図 (抽出位置: 平均値-0.5 σ)



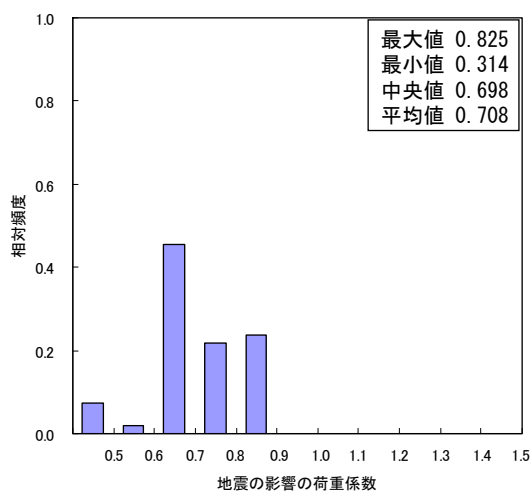
(c) 地震の影響の荷重係数
図 6.3.9 D+EQ+SW 組合せにおける荷重係数頻度分布図 (抽出位置: 平均値)



(a) 活荷重の荷重係数



(b) 温度変化の影響の荷重係数

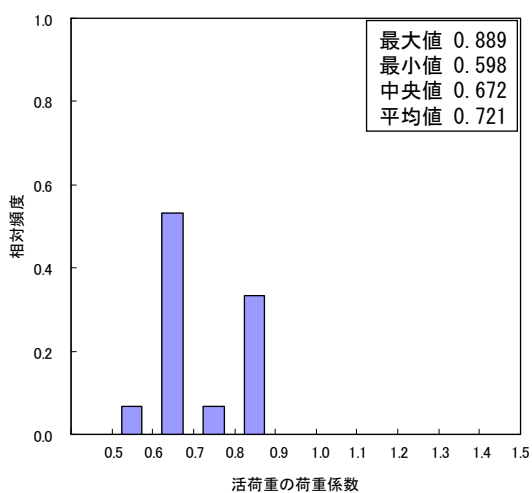


(c) 地震の影響の荷重係数

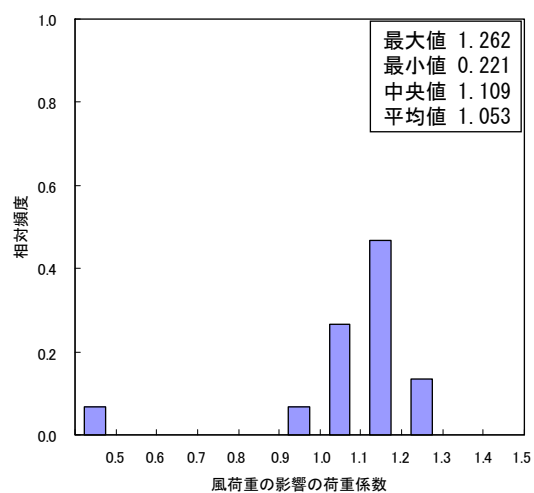
図 6.3.10 D+EQ+SW 組合せにおける荷重係数頻度分布図 (抽出位置: 平均値 -0.5σ)

(3). D+L+W における荷重係数

活荷重(L)の係数は最大で 0.9 程度、風荷重(W)の係数は最大で 1.25 程度であった。(1).に比べると、活荷重(L)の最大値、中央値、平均値のいずれも小さくなっている。



(a) 活荷重の荷重係数



(b) 風荷重の荷重係数

図 6.3.11 D+L+W の組合せにおける荷重係数頻度分布図 (抽出位置: 非超過確率 95%)

(4). D+L+TH, D+L+TH+SW における荷重係数

活荷重(L)の係数は最大で 1.20 程度となり、両荷重組合せともに同じ傾向を示している。また、(1).と比べると最大値、中央値はわずかながら小さくなっている。

温度変化の影響(TH)の荷重係数は両荷重組合せともに大半のケースが 0.50 以下となったが、最大値は D+L+TH のときは 0.93、D+L+TH+SW のときは 0.74 となり、D+L+TH のときは 0.70~0.80、D+L+TH+SW のときは 0.60~0.70 の間についても無視できない頻度で生じている。温度変化の影響(TH)の荷重係数の中央値は、D+L+TH よりも D+L+TH+SW の荷重組合せの方が小さく、雪荷重と温度変化の影響の双方が 1.00 近くの荷重係数どうして重なる可能性は低くなる傾向が見られる。

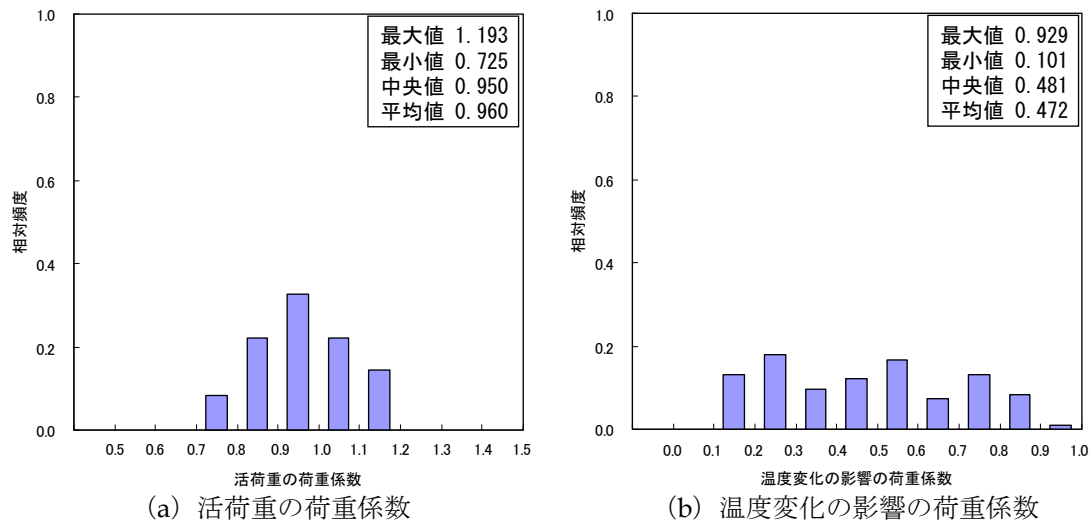


図 6.3.12 D+L+TH の組合せにおける荷重係数頻度分布図（抽出位置：非超過確率 95%）

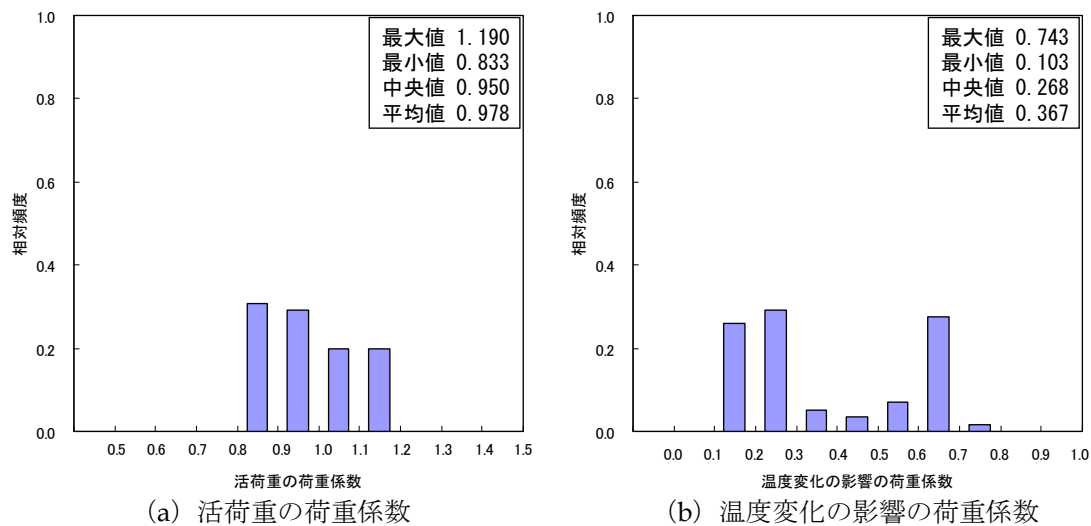


図 6.3.13 D+L+TH+SW の組合せにおける荷重係数頻度分布図（抽出位置：非超過確率 95%）

(5). D+TH+EQ における荷重係数

温度変化の影響(TH)の荷重係数は、相対頻度が 0.1 程度以上を有する範囲で見ると 0.10 から 0.70 の広い範囲で分布し、0.50~0.60 程度が最頻値となり、無視できない頻度で生じている。また、地震の影響(EQ)の荷重係数は 1.0 付近が最頻値となった。活荷重(L)の荷重係数は、相対頻度が 0.1 程度以上を有する範囲で見ると 0.30 未満であり、中央値は 0.03 程度であった。

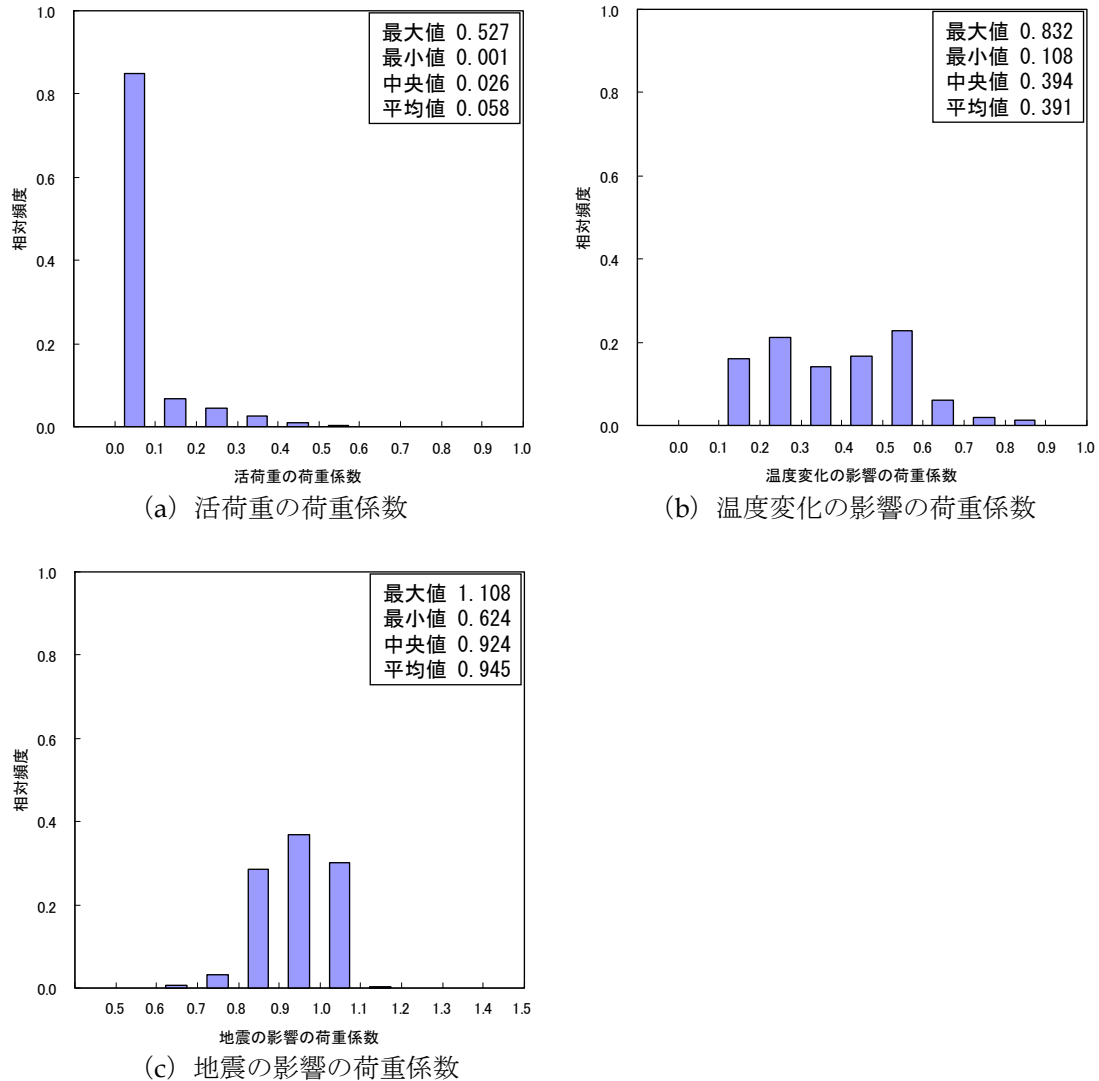
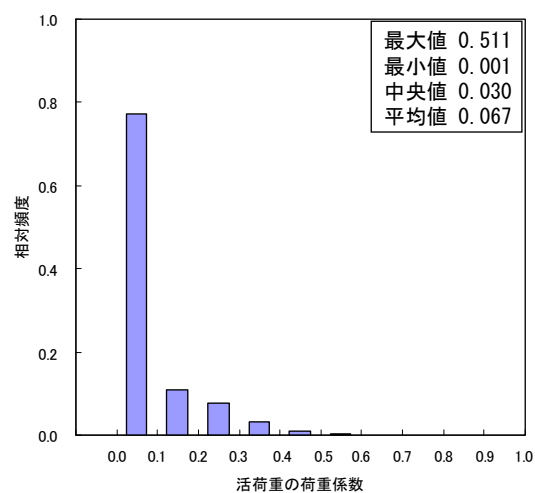
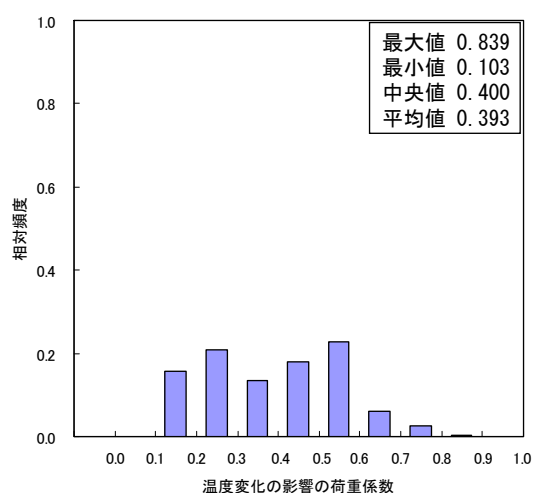


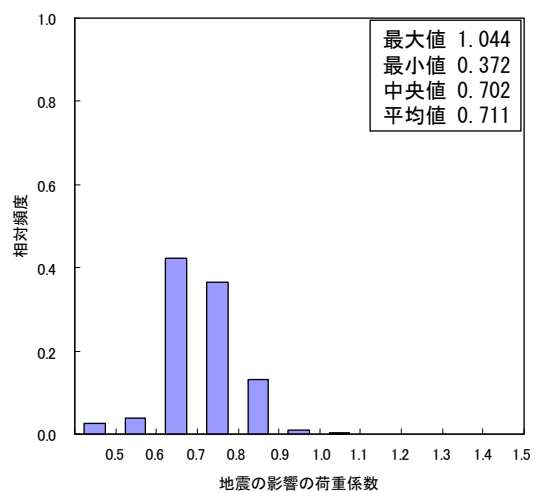
図 6.3.14 D+TH+EQ の組合せにおける荷重係数頻度分布図（抽出位置：平均値）



(a) 活荷重の荷重係数



(b) 温度変化の影響の荷重係数



(c) 地震の影響の荷重係数

図 6.3.15 D+TH+EQ の組合せにおける荷重係数頻度分布図 (抽出位置: 平均値-0.5 σ)

(6). D+L+TH+W における荷重係数

活荷重(L)の荷重係数は最大で 0.90 程度となり、(1).および(4).に比べると小さな値を示した。また、温度変化の影響(TH)の荷重係数は 0.10 から 0.60 の範囲で分布し、最頻値は 0.50~0.60 であった。風荷重(W)の荷重係数は 1.0~1.2 付近が最頻値となった。

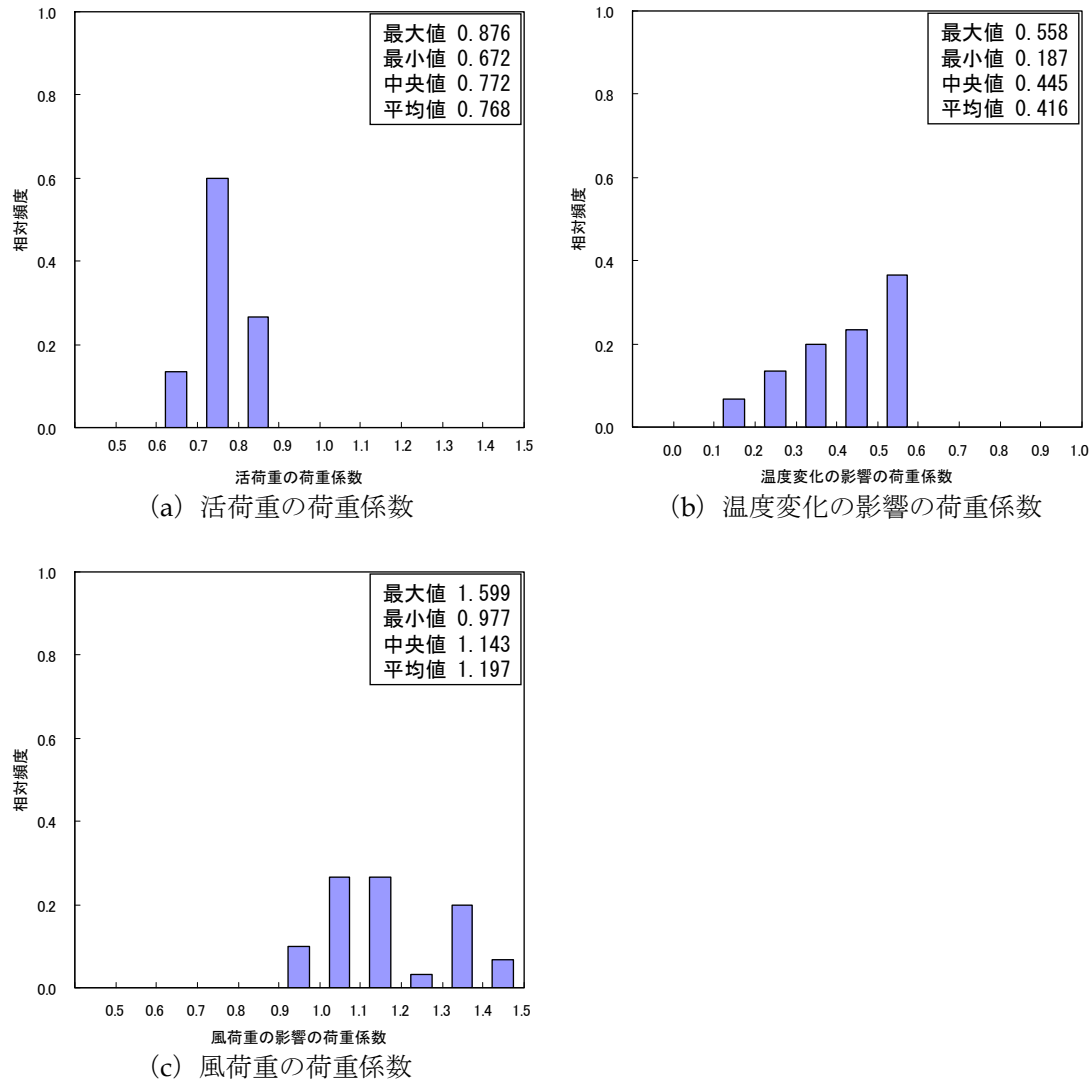


図 6.3.16 D+L+TH+W の組合せにおける荷重係数頻度分布図（抽出位置：非超過確率 95%）

6.3.4 荷重シミュレーション結果から得られた荷重組合せの分析

6.3.3 荷重係数のおおよその範囲

荷重組合せ別に各荷重の荷重係数の値の範囲を確認する目的で、荷重係数の頻度分布を作成した。

に示した結果から、荷重同時載荷状況は各荷重の最大値の単純和を取ったものとはなっておらず、重なる荷重の種類が増えると個々の荷重係数の値が小さくなる傾向が見られた。例えば、図 6.3.11 に示した D+L+W の組合せにおいて活荷重の荷重係数が最大値となった着目断面の L と W の同時載荷状況を整理した結果を表 6.3.5 に示す。ここでは、各荷重の荷重係数が最大値となる時にその他の荷重がどのように重なるのかを確認するため、L または W の荷重係数が最大値となる標本におけるその他の荷重の荷重係数を整理している。L の荷重係数は、W が最大値となるときは小さな値を示しており、L と W の両者が最大値どうしで重なる状況は生じていない。つまり、荷重を組み合わせた結果としての目標確率水準を 100 年最大値分布の非超過確率 95% 値として統一的に扱うことによって、活荷重(L) の荷重係数は D+L よりも D+L+W の組合せの方が、同時に重なる変動作用の数が増えたことによって小さな値を示す傾向となっている。

このことは、道路橋示方書（平成 24 年）における許容応力度の割増係数が、複数の荷重が同時に最大値で発生することが稀であることの頻度補正を抵抗側で行っていたと推察させるものである。しかし、荷重同時載荷頻度の影響を全ての荷重に等しく考慮する係数を用いて補正することは不合理なときもあることも同時に示している。

表 6.3.5 D+L+W の荷重組合せにおける L と W の同時載荷状況

	荷重係数		
	D	L	W
L の荷重係数が最大となるとき	1.032	0.889	1.064
W の荷重係数が最大となるとき	1.027	0.677	1.262

6.4. 検討結果のまとめ

B-C モデルを用いた同時載荷確率過程シミュレーションによって、荷重組合せおよび荷重係数値のおおよその範囲を推定した結果を表 6.4.1 に示す。最大値分布の収束性が高い場合は断面力 100 年最大値分布の非超過確率 95%値、最大値分布の収束性が低い場合は断面力 100 年最大値分布の平均値を基準として、荷重組合せと荷重係数を整理したものである。

表 6.4.1 荷重組合せと荷重係数の推定結果

荷重組合せ	D	L	TH	W	EQ	SW
D+L	0.97～1.09	0.62～1.24				
D+L+SW	1.00～1.08	0.66～1.24				1.00
D+EQ	1.00～1.07				0.57～1.10	
D+EQ+SW	1.01～1.07				0.31～1.08	1.00
D+L+TH	1.00～1.08	0.73～1.19	0.10～0.93			
D+L+TH+SW	1.00～1.05	0.83～1.19	0.10～0.74			1.00
D+L+W	1.03～1.07	0.60～0.89		0.22～1.57		
D+TH+EQ	1.00～1.08		0.10～0.84		0.37～1.11	
D+L+TH+W	1.02～1.08	0.25～0.91	0.11～0.62	0.97～1.64		

【参考文献】

- 1) ISO2394 General principles on reliability for structures, 1998
- 2) ISO2394 General principles on reliability for structures, 2015
- 3) K. K. Phoon, D. E. Becker, F. H. Kulhawy, Y. Honjo, N. K. Ovesen, S. R. Lo : Why Consider Reliability Analysis for Geotechnical Limit State Design?, LSD2003 International Workshop on Limit State Design in Geotechnical Engineering Practice, 2003