

## リダンダンシー評価における活荷重レベル

## A LIVE LOAD MAGNITUDE IN THE REDUNDANCY ANALYSIS

山沢哲也\* , 森山佳樹\*\* , 由井幸司\*\*\* , 奥井義昭\*\*\*\*

Tetsuya YAMASAWA, Yoshiki MORIYAMA, Koji YUI and Yoshiaki OKUI

**ABSTRACT** This paper discusses a live load magnitude in the after fracture redundancy analysis. The Monte-Carlo simulation is employed to evaluate the magnitude of load on the bridge. It was found from the result that the mean value of the simulation corresponds to almost the half magnitude of a design live load in Japan under conservative assumptions.

**KEYWORDS**: リンダンダンシー, 活荷重, モンテカルロシミュレーション, リスク評価  
Redundancy, Live Load, Monte-Carlo Simulation, Risk Evaluation

## 1. 概要

リダンダンシー解析を行う際の目標性能として, 米国の NCHRP<sup>4)</sup> では, 活荷重の 0.5 倍に相当する荷重に対して, どれか 1 部材が破断しても崩壊しないことが求められている。一方で, 我が国の道路橋における活荷重レベルは, 再現期間が明示されていないため, 発生頻度とその影響度との積で表現されるリスクを定量的に評価することができない。この節では, 道路橋示方書<sup>5)</sup>における B 活荷重の大きさが, どの程度であるかをレーン載荷に基づくシミュレーションによって示した後, 鋼道路橋のリダンダンシー解析に用いる荷重レベルについて概説する。

## 2. 荷重シミュレーション

ここでは, 道路構造物を設計するにあたって想定されるリスクとして, 次の 2 点を考える。

①橋梁上で渋滞が生じることで, ある部材が降伏または破断するシナリオ

②車両の衝突や突発的な擾乱等によって, 1 部材が破断した系に対して, 連鎖的な崩壊が生じ橋梁が落橋するシナリオ

リダンダンシー解析を行う系は, ②のシナリオにある 1 部材が破断した系である。この系に考慮すべき活荷重の大きさについて議論するために, レーン載荷に基づくシミュレーションを実施する。このシミュレーションによって得られる荷重の確率分布は, ①のシナリオをリスク評価するためにも利用できる。併せて取り上げることにする。なお, 一般的な設計では, 渋滞時の重交通に対してどの部材も降伏または破断しないよう設計し, かつ供用時には, 要求性能を下回ることがないように適切な維持管理を行うことで, シナリオ①を回避している。

## 2. 1 渋滞による荷重列の生成

(1) 車両間隔・衝撃

鋼トラス橋の 1 支間を念頭におき, 支間長  $L=70.63\text{m}$ , 幅員 8.6m (2 車線) の橋梁を基本ケースとして, 渋滞による活荷重列をモンテカルロシミュレーション (MCS) によって作成する。実態に沿っ

\*工修 鹿島建設 (株) 土木設計本部 (〒107-8502 港区赤坂 6-5-30)

\*\* (株) IHI インフラシステム 都市高速部 (〒108-0023 港区芝浦 3-17-12)

\*\*\*理学 伊藤忠テクノソリューションズ (株) 科学システム事業部 (〒100-6080 千代田区霞が関 3-2-5 霞が関ビル)

\*\*\*\*工博 埼玉大学大学院 理工学研究科 教授 (〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255)

表-1 車両分類

車種	車両重量 $p$ [kN]の特性 平均, 標準偏差, 最大, 最小	車長[m] 車幅[m]		車頭からの距離[m] 軸重構成比率
		乗用車 C	$\mu = 12.7, \sigma = 3.5$ $p_{max} = 30.4, p_{min} = 2.0$	4.4 1.50
小型トラック ST	$\mu = 35.5, \sigma = 12.8$ $p_{max} = 122.6, p_{min} = 9.8$	4.4 1.40	0.60, 3.40 0.239, 0.761	
中型トラック MT	$\mu = 59.5, \sigma = 24.5$ $p_{max} = 179.5, p_{min} = 15.7$	6.0 1.60	1.00, 4.50 0.196, 0.804	
大型トラック LT	$\mu = 164.3, \sigma = 61.7$ $p_{max} = 443.4, p_{min} = 37.3$	8.5 1.95	1.2, 5.55, 6.85 0.141, 0.548, 0.311	
大型ダンプ LD	$\mu = 192.5, \sigma = 93.6$ $p_{max} = 607.2, p_{min} = 53.0$	7.5 1.95	1.2, 4.55, 5.85 0.117, 0.443, 0.440	
タンクローリ TR	$\mu = 135.6, \sigma = 61.9$ $p_{max} = 330.6, p_{min} = 38.3$	8.0 1.95	1.2, 5.35, 6.65 0.137, 0.542, 0.321	
セミトレーラ TT	$\mu = 243.1, \sigma = 126.7$ $p_{max} = 850.5, p_{min} = 50.0$	14.0 2.05	1.2, 3.55, 4.85, 10.35, 11.65 0.064, 0.185, 0.183, 0.294, 0.273	
バス BS	$\mu = 135.8, \sigma = 23.6$ $p_{max} = 183.4, p_{min} = 66.7$	10.5 2.00	1.2, 8.0 0.371, 0.629	

$\mu$ :平均,  $\sigma$ :標準偏差,  $p_{max}$ :最大荷重,  $p_{min}$ :最小荷重

表-2 車種構成比

車種	大型車混入率 $\eta$	
	32.5%	60%
乗用車 C	0.551	0.327
小型トラック ST	0.124	0.073
中型トラック MT	0.131	0.242
大型トラック LT	0.103	0.190
大型ダンプ LD	0.030	0.056
タンクローリ TR	0.017	0.032
セミトレーラ TT	0.034	0.063
バス BS	0.010	0.017

た渋滞による荷重列を生成するためには、等速走行時間・反応遅れ時間等を考慮し、各車両の速度を求める必要がある<sup>3)</sup>。しかし、ここでは、リダンダンシー解析を念頭においた極端な状況を想定しているため、速度の影響を考慮せず、渋滞列の車両間隔は 2.0m で一定とした。また、車両の走行による衝撃の影響は考慮しない。これは、車両が走行状態にある場合の車両間隔は、今回仮定した 2.0m よりも大きくなると予想されるので、衝撃を考慮するような走行状態にあれば、橋上にある車両数は渋滞時よりも少なくなると予想されるためである。

#### (2) 車両の分類・構成比

MCSによって発生する車両の分類及び諸元は、鋼道路橋の疲労設計指針<sup>2)</sup>に従って表-1のように8車種とした。これらの車種を大型車混入率 $\eta$ に応じて、表-2のような車両構成を仮定した。なお、乗用車・小型トラック以外を大型車と定義する。

#### (3) 車両の発生と疑似乱数

車両の発生は、橋梁の 200m 先からとし、支間内に発生する車両の先頭位置がランダム性を有するように配慮した。MCS に用いる疑似乱数は、623 次元空間で均等性が保証されている Mersenne Twister 19937<sup>6)</sup>を用いた。

#### (4) 検討ケース

橋上での渋滞を考えたとき、渋滞長  $L_c$ がちょうど1支間長  $L=70.63m$  と等しい場合を基本ケースとし、B活荷重の大きさがどの程度であるかを示す。また、支間長  $L$ が、40.0m, 50.0m, 100.0m の場合についての結果も示す。

## 2. 2 渋滞長 $L_c$ が支間長 $L$ の1.0倍のとき

渋滞長  $L_c$ がちょうど支間長  $L$ と等しい場合のシミュレーション結果は、橋上に車両を満載荷した場合を試行回数1回としたときの確率分布である。

### (1) 軸重の合計値の分布形と標本の大きさ

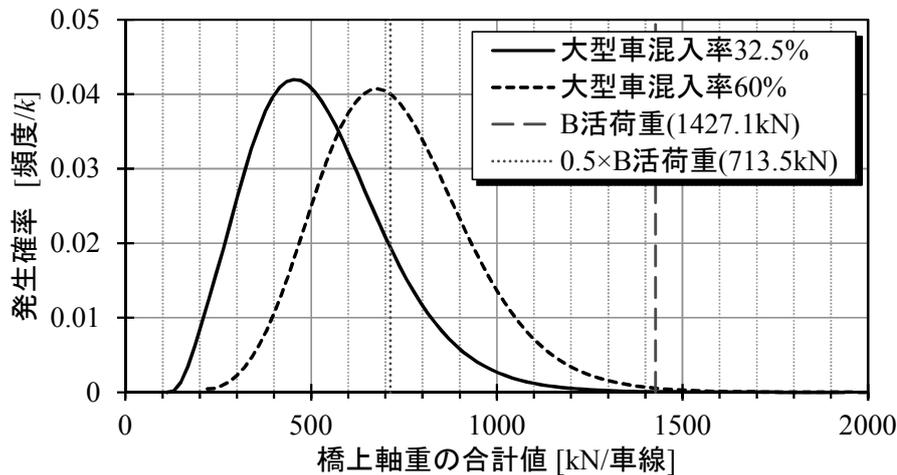
図-1、表-3に、シミュレーションの結果（標本の大きさ  $k=1.0 \times 10^8$ ）を示す。横軸は、支間長  $L$ 上にある軸重の1車線あたりの合計値である。縦軸は、頻度を標本の大きさに除した確率密度である。

各車両の重量  $p$ は、上下限值付きの対数正規分布でモデル化されているから、その和の分布形は、 $L$ が大きくなれば正規分布に近づくはずである。しかし、今回の  $L=70.63\text{m}$ では、対数正規分布形状に近い。

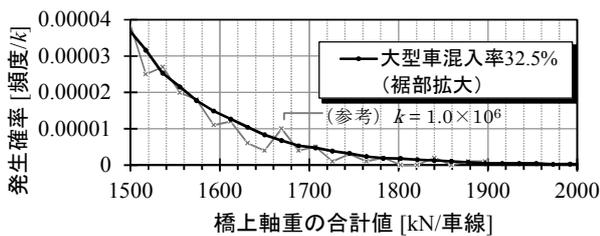
標本の大きさについては、裾部の荷重を議論することを考慮して決定した。参考までに、 $k=1.0 \times 10^6$ の結果の一例を裾部拡大図中に×印で示す。 $k=1.0 \times 10^6$ の場合には、平均値を議論するためには十分な大きさであるが、裾部の小さな確率分布を議論するためには精度が不足している。

### (2) 大型車混入率 $\eta=32.5\%$ の結果

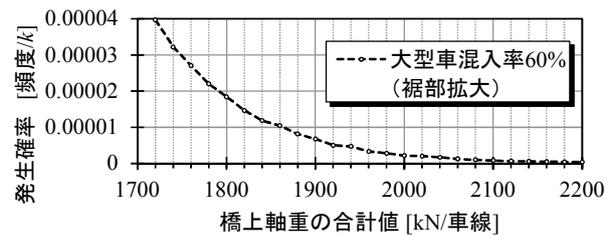
大型車混入率  $\eta=32.5\%$ のとき、平均値は513.6kN、上位0.1%値は1320kNであった。図中に示すように、B活荷重の1車線あたりの値(1427.1kN)は、上位0.1%値よりもさらに大きく、上位0.04%の値に相当する。なお、このB活荷重の値には、衝撃係数を考慮している。



(a) 全体分布



(b) 大型車混入率  $\eta = 32.5\%$  (裾部拡大図)



(c) 大型車混入率  $\eta = 60\%$  (裾部拡大図)

図-1 軸重の合計値と頻度分布 ( $L_c = 1.0L$ ,  $k = 1.0 \times 10^8$ )

表-3  $L_c=1.0L$ 時のシミュレーション結果  
( $k = 1.0 \times 10^8$ ) 単位: kN/車線

大型車混入率 $\eta$	32.5%	60%
平均値	513.6	718.3
標準偏差	189.6	204.0
上位0.1%	1326	1544

(3) 大型車混入率 $\eta=60\%$ の結果

大型車混入率 $\eta=60\%$ のとき、平均値は718.3kN、上位0.1%値は1544kNであった。B活荷重に対応する1427.1kNは、上位0.3%の荷重に相当する。

2. 3 支間長 $L$ が橋上軸重の合計値に与える影響

図-2に、支間長 $L$ を40.0m~100.0mまで変化させた場合について、シミュレーション結果を示す。横軸に支間長 $L$ をとり、大型車混入率 $\eta=32.5\%$ 、 $\eta=60\%$ の場合について橋上軸重の合計値のシミュレーション平均値(期待値)を、それぞれ■印・○印でプロットした。図中の黒点線は、B活荷重の0.5倍の値を示しており、支間長 $L=40\text{m}$ 、 $L=50\text{m}$ では、■印・○印のいずれのプロットも点線より下側にある。つまり、B活荷重の0.5倍の値は、渋滞時荷重の期待値よりも大きい。

一方、支間長 $L$ が70.63mよりも大きい領域では、B活荷重の0.5倍の値は、大型車混入率 $\eta=60\%$ のとき、渋滞時荷重の期待値よりもやや小さい。

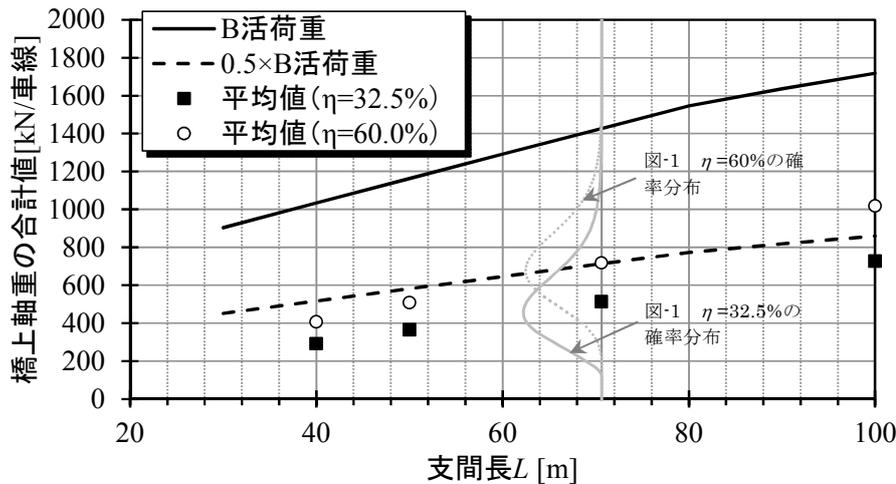


図-2 支間長 $L$ の影響 ( $k=1.0\times 10^8$ )

表-4 支間長 $L$ の影響

(a) $\eta=32.5\%$ ( $k=1.0\times 10^8$ )					単位: kN/車線
支間長 $L$ [m]	40.0	50.0	70.63	100.0	
平均値	291.1	363.7	513.6	727.3	
標準偏差	142.0	159.1	189.6	226.0	
上位0.1%	956	1079	1320	1645	

(b) $\eta=60\%$ ( $k=1.0\times 10^8$ )					単位: kN/車線
支間長 $L$ [m]	40.0	50.0	70.63	100.0	
平均値	407.1	508.8	718.3	1017.2	
標準偏差	153.3	171.5	204.0	242.9	
上位0.1%	1084	1238	1544	1960	

(c) B活荷重の大きさ (幅員 $B=8.6\text{m}$ )					単位: kN/車線
支間長 $L$ [m]	40.0	50.0	70.63	100.0	
1.0倍×B活荷重	1033.8	1163.3	1427.1	1717.3	
0.5倍×B活荷重	516.9	581.6	713.5	858.7	

2. 4 ケーススタディ

2. 2のシミュレーション(支間長 $L=70.63\text{m}$ , 2車線)を元に、

(a) B活荷重の50%値に相当する荷重列

(b) 大型車混入率 $\eta=32.5\%$ について生起確率 $p=1/(475\times 720)$ に相当する荷重列

(c) 大型車混入率 $\eta=60\%$ について生起確率 $p=1/(475\times 720)$ に相当する荷重列

の3ケースについて、荷重列の具体例を図-3に、着目部材の断面力を表-5に示す。ここで、 $p=1/(475$

×720)は、支間長  $L$  と同一の渋滞長を仮定したとき、1日2回の渋滞が生じるときの再現周期475年荷重に相当する。ここでは2車線とも同一の荷重列である極端な状況を考えている。再現周期が475年の荷重とは、供用期間50年を仮定したとき、超過確率が10%となる荷重である<sup>5)</sup>。なお、着目部材に対して不利な荷重位置となるよう、車両の位置についてはそれぞれ変更している。

(1) B活荷重の50%値に相当する荷重列

B活荷重に対して、その50%値に相当する荷重列を、表-1に示す各車種の平均重量によって表現しようとする、図-3(a)のように、8台中4台が大型車という構成になる。荷重の合計値は、B活荷重の2854.1kNに対して、50.4%に相当する1439.3kNとなった。

着目部材の断面力を見ると、D3部材がB活荷重断面力比の58%とやや大きい値であるが、その他の部材断面力については、ほぼ50%であった。

(2) 大型車混入率  $\eta = 32.5\%$  ( $p = 1/(475 \times 720)$ )

大型車混入率  $\eta = 32.5\%$ 時 ( $p = 1/(475 \times 720)$ )における荷重列は、9台中7台が小型車であるが、残り2台の大型車は、いずれも最大重量(平均重量の3.5倍)のセミトレーラ車である。部材断面力に対しては、この2台の大型車が支配的である。荷重の合計値は、B活荷重に対して約1.3倍に相当する3753.3kNとなった。

着目部材の断面力は、U3・L4部材についてはB活荷重比で1.5倍程度、D3部材については、同1.7倍となった。この荷重レベルは、通常的设计において、鋼部材が降伏または座屈しない限界と考えられる。

(3) 大型車混入率  $\eta = 60\%$  ( $p = 1/(475 \times 720)$ )

大型車混入率  $\eta = 60\%$  ( $p = 1/(475 \times 720)$ )における荷重列は、7台中6台が大型車であり、うち2台はほぼ最大重量のセミトレーラ車である。荷重の合計値は、B活荷重に対して約1.5倍であった。部材断面力に対しては、この2台のセミトレーラ車が支配的となる。従って、(2)の大型車混入率  $\eta = 32.5\%$ の場合における断面力の応答値と、ほぼ同一の値となっている。

今回の検討ケースは、2車線同時載荷の結果である。実際には、 $p = 1/(475 \times 720)$ のような極端な荷重が1車線に生じるとき、他方の車線については、平均的な荷重列と仮定してよい。したがって、実際の部材応答値は(1)と(3)の中間程度になると考えられる。従って、シナリオ①については、一般的な設計が実施され、橋梁の耐荷機構が失われないように適切な維持管理を行えば、これを回避することができるかと推察する。



図-3 シミュレーションによる荷重列 (図中数値は平均重量に対する倍率, 太字は大型車)

表-5 荷重の合計値・着目部材の断面力

(a) B活荷重の50%に相当する荷重列 ( )内はB活荷重載荷時に対する比率※

荷重の合計値[kN]	1439.3 (50.4%)
U3 部材軸力[kN]	-851.4 (50.4%)
L4 部材軸力[kN]	532.3 (51.2%)
D3 部材軸力[kN]	358.3 (58.4%)

※平均重量の車両を配置しているため、50.0%に完全には一致しない

(b) 大型車混入率 $\eta=32.5\%$ に相当する荷重列 ( )内はB活荷重載荷時に対する比率

荷重の合計値[kN]	3753.3 (131.5%)
U3 部材軸力[kN]	-2474.4 (146.5%)
L4 部材軸力[kN]	1561.3 (150.2%)
D3 部材軸力[kN]	1069.1 (174.4%)

(c) 大型車混入率 $\eta=60\%$ に相当する荷重列 ( )内はB活荷重載荷時に対する比率

荷重の合計値[kN]	4226.0 (148.1%)
U3 部材軸力[kN]	-2495.7 (147.7%)
L4 部材軸力[kN]	1551.2 (149.3%)
D3 部材軸力[kN]	1081.3 (176.3%)

### 3. リダンダンシー解析における荷重レベル

リダンダンシー解析における荷重レベルの設定は、荷重の生起確率とその影響度からリスク評価を行って定めることを基本とする。荷重値が精度よく推定できない場合は、どれか1部材が破断しても橋梁が崩壊しない荷重レベルとして、NCHRP<sup>4)</sup>に倣い活荷重の0.5倍の値を採用することを考える。これは、リスク評価を行うシナリオとして、偶発的に1部材が破断した場合を考え、この系の存在確率が十分小さいことから、活荷重としては期待値に相当する荷重を載荷することを意図している。

いま、2.2、2.4で示したように、支間長 $L=70.63\text{m}$ の場合について考えると、B活荷重の0.5倍の値(713.5kN/車線)は、大型車混入率 $\eta=60\%$ のときの期待値(718.3kN/車線)とほぼ同じ値である。支間長 $L$ が70mよりも小さな範囲については、B活荷重の0.5倍の値の方が大きな値となるため、1部材が破断した系に対する照査荷重としては安全側の値を与える。

支間長 $L$ が70mよりも大きな範囲でかつ大型車混入率 $\eta=60\%$ の場合は、B活荷重の0.5倍の値の方がやや小さな値となる。しかし、支間長が長くなるほど、今回仮定した一定の車両間隔(2.0m)で満載となる確率は低下すると考えられることや、複数車線がある場合の同時載荷の可能性が低いことを考慮すれば、大きく危険側とまではいえないだろう。ただし、支間長 $L$ が70mよりも大きな範囲でかつ大型車混入率が60%を上回る場合については、適切な活荷重の確率分布を、交通量調査・軸重調査から推定することが望ましい。

謝辞：本研究の一部は土木学会平成25年度重点研究課題の研究助成を受けて「鋼構造物のリダンダンシーに関する検討小委員会」の一環として実施されました。

#### 参考文献

- 1) (公社)日本道路協会：道路橋示方書 I 共通編・II 鋼橋編 同解説 (平成24年版), 2012.
- 2) (公社)日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針, 2002.
- 3) 森猛, 秋山慎一郎：交通渋滞時の2車線道路橋の疲労設計荷重・同時載荷係数の検討, 第59回構造工学シンポジウム, 11-1, 土木学会, 2013.
- 4) National Cooperative Highway Research Program: Inspection and Management of Bridges with Fracture-Critical Details, NCHRP Synthesis 354, Transportation Research Board, 2005.
- 5) Structural Engineers Association of California: Vision 2000 - Performance Based Engineering of Buildings, Vision 2000 Committee, 1995.
- 6) M. Matsumoto and T. Nishimura, Mersenne Twister: A 623-dimensionally Equidistributed Uniform Pseudorandom Number Generator, ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation, 1998.

## リダンダンシー解析における 荷重レベルの設定

土木学会鋼構造委員会 鋼構造のリダンダンシーに関する研究小委員会  
 WG1, WG3

鹿島建設(株) ○山沢 哲也  
 (株)IHIインフラシステム 森山 佳樹  
 伊藤忠テクノソリューションズ(株) 由井 幸司  
 埼玉大学 奥井 義昭

## リダンダンシー解析における荷重レベル

考えるシナリオと設計思想：

シナリオ1 --- 渋滞時の重交通で  
ある1部材が破断する

↓

**部材が破断しないように設計し、  
その性能が維持されるよう管理する**

シナリオ2 --- 衝突・火災等の突発事象で  
ある1部材が破断する

↓

**リダンダンシー解析によって  
連鎖的崩壊を生じないことを確認する**

## シナリオに基づくリスク評価

荷重レベル 変換水準

- 実態交通に対してB活荷重の水準が不明確
- シナリオ2に対応する期待荷重を知りたい

荷重シミュレーションを実施

シナリオ2 連鎖的崩壊をしない

シナリオ1 降伏または座屈強度以内

## Vision 2000の性能行列と荷重の再現周期T

設計期間D=50年に対する 10%の再現率P	荷重の再現周期T				設計の解釈
	基準強度以内	降伏または座屈強度以内	破断または後座屈強度以内	連鎖的崩壊をしない	
0.69	Frequent (43 <sub>y</sub> )	Full Operational	Operational	Life Safe	Unacceptable performance for new construction
0.5	Occasional (72 <sub>y</sub> )	A	B	Near Collapse	
0.1	Rare (475 <sub>y</sub> )	B	C		
0.05	Very Rare (970 <sub>y</sub> )	C			

対応する橋梁の重要度 (例)

- 緊急輸送道路
- 道路橋 (幹線道)
- 道路橋 (市町村道)

設計期間 D

$$P_{[1]} = 1/T = 1 - (1 - P)^{1/D}$$

単位期間における超過率

設計期間 D

超過率 P

1 1.453 T/D

## 荷重シミュレーションの手法

荷重も対象正規分布

- 鋼道路橋の疲労設計指針に基づいて車両・軸重を発生
- 橋上に車両間隔2mで列べ、軸重・断面力を集計
- 疑似乱数にはMT19937を使用、 $k=1 \times 10^8$ 回のシミュレーションを実施

FEモデル構築

車両・軸重の生成

橋上軸重の集計

単位荷重の応答計算

車両位置

反力・断面力

## 荷重シミュレーション (支間長L=70.63m, 幅員B=8.6m)

- B活荷重は、大型車混入率 $\eta=32.5\%$ のとき、上位0.04%の荷重に相当
- 0.5×B活荷重は、大型車混入率 $\eta=60\%$ のときの期待荷重とほぼ同等

発生確率密度 [頻度/k]

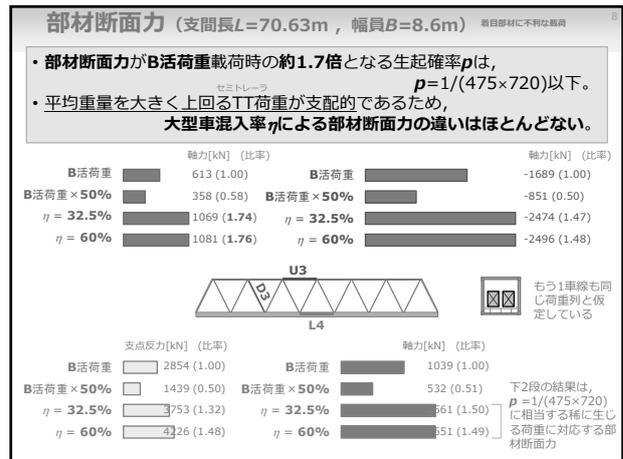
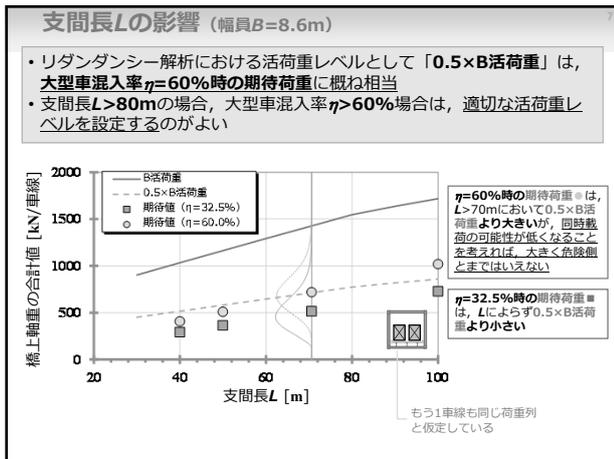
橋上軸重の合計値 [kN/車線]

反力と相似な値

ただし、もう1車線も同じ荷重列と仮定した場合 (L=70.63m)

0.5×B活荷重の例 (軸重合計=713.5kN)

大型車混入率 $\eta=32.5\%$ ,  $\rho=1/(475 \times 720)$ の例 (軸重合計=1890kN)



### まとめ (リダンダンシー解析における荷重レベルについて)

- リダンダンシー解析に用いる活荷重レベルとして、道示B活荷重の50%に相当する荷重を視覚的に提示した。
- B活荷重載荷時の約1.7倍となる部材断面力の応答値となる荷重は、2車線ともに生起確率 $p = 1 / (475 \times 720)$ に相当する荷重水準であった。稀な活荷重によって「部材が降伏または破断する」シナリオ1は、適切な設計・維持管理によって回避できる。
- シナリオ2「連鎖的崩壊が生じない」ことを確認するためのリダンダンシー解析では、1部材が破断した系に対して期待荷重を載荷することを基本とする。  
このとき、支間長80mを超えかつ大型車混入率が60%を超えるような特殊な場合を除いて、B活荷重の50%に相当する荷重は、期待荷重として保守的な値である。