

多径間連続桁における落橋防止ケーブルの 設計に関する基礎的研究

中尾尚史¹・伊津野和行²

¹学生員 工修 立命館大学大学院 理工学研究科総合理工学専攻
(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

²正会員 工博 立命館大学教授 理工学部都市システム工学科
(〒525-8577 滋賀県草津市野路東1-1-1)

1. はじめに

落橋防止システムは、想定外の地震による落橋を防止する重要なシステムであり、1996年に改訂した道路橋示方書V. 耐震設計編¹⁾では緩衝効果の持つ落橋防止システムの採用が望ましいと記載された。その後、緩衝効果や緩衝材^{2)~5)}、さらに作動速度や桁の自由落下に関する研究⁶⁾などが行われ、落橋防止システムの重要性が高まっている。

これまでに著者らは、単純桁を対象として落橋防止システムの設計、および取り付けに関する研究を行ってきた^{7) 8)}。しかし、1995年に発生した兵庫県南部地震で単純桁が数多く落橋したことにより、これらの対策として単純桁を連結して連続桁とする耐震補強が取り入れられるとともに新設の橋も連続桁が多く採用されており、連続桁の落橋防止に取り組む必要があると考えられている。

これまでに行われてきた研究のほとんどが単純桁を想定しており、連続桁に対しての研究はされていない。

連続桁の場合、単純桁と異なり桁が橋脚から離れても単純に落下することはないが、桁の曲げ破壊や支点到に作用する力の正負逆転による支承破壊により落橋につながる場合がある。よって桁の落橋防止システムを設置することにより、曲げモーメントの低減および、支点到に作用する力の正負逆転を防止することができれば、桁破壊による落橋を防ぐことが可能になる。

本研究では、連続桁を対象として桁が橋脚から離れた場合に作用する各々の力を静的および動的解析から求め、そして落橋防止ケーブルを設置したときの効果を検討する。

2. 連続桁の静的解析

橋脚から桁が離れると、正常時に比べ桁に作用する力が変化する。橋脚から桁が離れた状態になると、局所的に応力が集中することが予想される。本章では、落橋による桁への影響を静的解析により検討する。

(1) 連続桁の解析モデル

静的応答モデルは、道路橋の耐震設計に関する資料⁹⁾を基に図-1のような上部構造が5径間連続鋼I桁橋（支間割：40m×5径間、全幅員：12.0m）の連続桁を用い、橋梁の重要度はB種の橋を想定する。支点は左からA点、B点と設定する。解析では桁が落橋していない状態と、図-2のようなA点の支承が破壊して橋脚または橋台から離れたときの連続桁の影響を考える。

本研究では荷重に死荷重と活荷重を用いる。死荷重は、同資料⁹⁾から単位長さあたりの荷重を154kN/mとした。活荷重は道路橋示方書I. 共通編¹⁰⁾で示さ

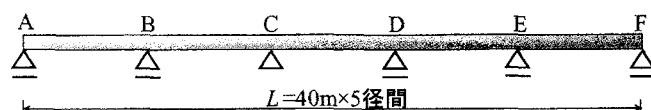


図-1 5径間連続モデル

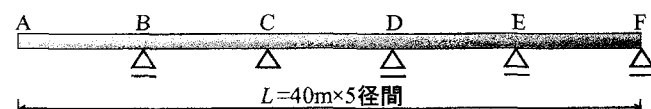


図-2 張出し梁モデル

れる活荷重を用いる。活荷重には T 活荷重と L 活荷重があるが、解析では橋梁により不利な応力が生じる L 活荷重を用いた。

また桁が橋脚から離れた場合、B 点と C 点が最も影響を受けると考えられるため、B 点または C 点に不利な応力が作用するように活荷重を載荷した。

(2) 解析結果

B 点の曲げモーメントの絶対値が最大となるように活荷重を載荷させたときの曲げモーメント図を図-3 に示す。図中の縦軸は曲げモーメント、横軸はそれぞれの支点を表している。また表中の Dead Load および Dead +Live Loads は落橋していない状態における死荷重による曲げモーメントと、死荷重と活荷重による曲げモーメントを示しており、Dead Load (張出状態) は A 点部が橋脚から離れた場合の死荷重による曲げモーメントを示している。B 点または C 点に不利な曲げモーメントが作用するように活荷重を載荷したが、曲げモーメントに大きな違いは見られなかったため、ここでは B 点に対するグラフを示した。

図から、桁が橋脚から離れた場合、B 点に作用する曲げモーメントは活荷重を考慮して設計した曲げモーメントの約 3 倍の値を示している。また A~B までの範囲では、落橋していない状態の曲げモーメントは一部正の値を示しているのに対し、桁が橋脚から離れた状態ではすべて負の値を示している。C 点では落橋していない状態では曲げモーメントは負の値を示しているのに対し、桁が橋脚から離れた状態では正の値を示す。

これらの結果から、①桁が橋脚から離れた状態では A~B の範囲で全て負のモーメントが作用する。②C 点の曲げモーメントの正負が逆転する、ということに注意を要する。

3. 落橋防止ケーブルを設置した場合の効果

静的解析により、B 点では落橋していないときの 3 倍程度の曲げモーメントが作用し、C 点では曲げモーメントの正負が逆転することがわかった。ここでは落橋防止ケーブルを設置することによる効果を検討する。

(1) 落橋防止ケーブルの設置およびモデル

落橋防止ケーブルは A 点と隣接桁または橋台との間に設置する。隣接桁または橋台が不動だと仮定し、図-4 のように A 点が橋脚から離れたとき、落橋防止ケーブルのばね定数 k と A 点の変位量 y からなる復元力 k_y で落下した桁を引っ張る。これをモデル化する

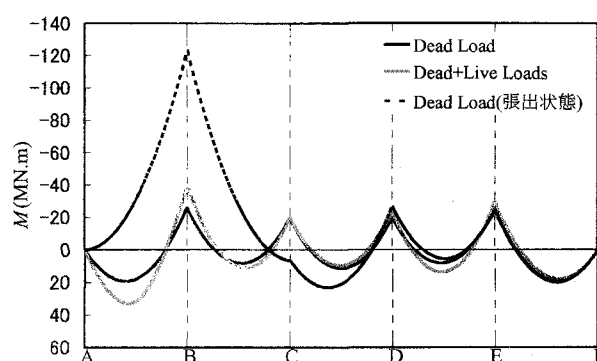


図-3 曲げモーメント図

(B 点に不利な応力が作用するように載荷)

と図-5 に示すような A 点にケーブルのばね定数 k の落橋防止ケーブルを設置したモデルとなる。このときの B 点および C 点に作用する曲げモーメントを求め、落橋防止ケーブルを設置したときの効果を検討する。

(2) ケーブル設置による効果

a) 曲げモーメント

本研究ではケーブル剛性の影響を調べるため、落橋防止ケーブルのばね定数を 1MN/m, 10MN/m, 100MN/m と設定して設計を行った。その場合の曲げモーメントを図-6 に示す。図の横軸は各支点、縦軸は曲げモーメントを表している。

ケーブルのばね定数を変えて設計した結果、ケーブル剛性によって B 点に作用する曲げモーメントは大きく変わることがわかった。また、落橋防止ケーブルを設置することで、B 点に作用する曲げモーメントを約 10%~80% 低下させることができ、さらにケーブルのばね定数を 10MN/m 以上に設定すれば、C 点に作用する曲げモーメントの正負逆転を防ぐことが可能であることがわかった。

ケーブルのばね定数を 100MN/m と設定した場合の曲げモーメントは、ほぼ 5 径間連続桁の曲げモーメントと一致する。桁に生じる曲げモーメントがどこまで許容できるのか、それによってケーブルに要求される性能は違ってくる。

b) 支点反力およびケーブル反力

ケーブルおよび支点反力を示したものを表-1 に示す。表中の k はケーブルのばね定数、 F はケーブルに作用する力、 R_B から R_F は各支点反力を表している。また、表中の ∞ はケーブルのばね定数を無限大にした場合、すなわち 5 径間連続桁における支点反力を表現している。

ケーブルを設置していない場合、B 点の反力は 12MN と 5 径間連続桁における支点反力の 2 倍の力が

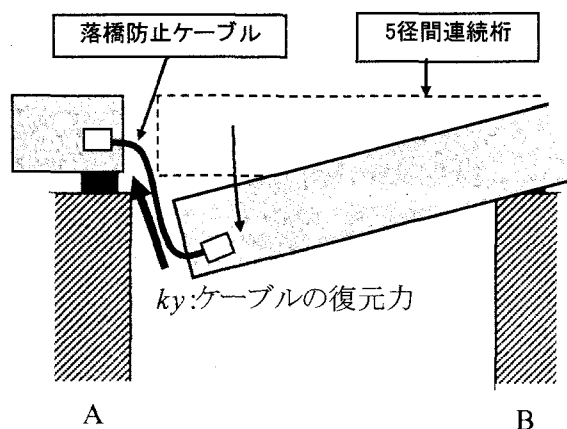


図-4 落橋防止ケーブルの作動モデル

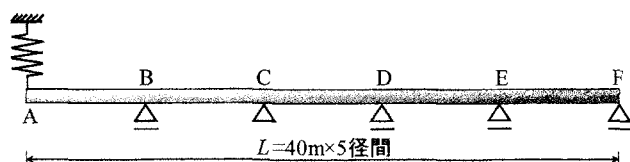


図-5 落橋防止ケーブルを設置した場合の連続桁モデル

作用しているが、ケーブルを設置することにより B 点の反力を 1/2 まで低下させることができる。さらにケーブルのばね定数を 10MN/m 以上にすれば、5 径間連続桁における支点反力の 90%以上にできる。

4. 動的解析による応答

桁が落下した場合は静的な応答値よりも大きな力が作用すると考えられる。ここでは動的解析を行いその影響を検討する。

(1) 解析モデル

モデルは図-5で示した落橋防止ケーブルを設置したモデルを用いる。静的解析と同様に A 点部に落橋防止ケーブルを設置して、A 点部が橋脚から離れて桁が落下するような状況を考え解析を行う。ケーブルには遊間長を与えず、桁落下と同時にケーブルが作動するとする。なお、桁とケーブルの減衰定数は 0.02 と設定した。

解析には自由落下した場合を考え、重力加速度として開始直後に 980cm/s^2 を与える。解析における時間間隔は 0.001 秒とした。

(2) 自由落下が桁に与える影響

a) 桁の応答

図-7 から図-10 に B 点に作用する曲げモーメント、C 点の支点反力の応答波形を示す。図中の縦軸は曲げモーメントおよび支点反力を示しており、横軸は 0 秒

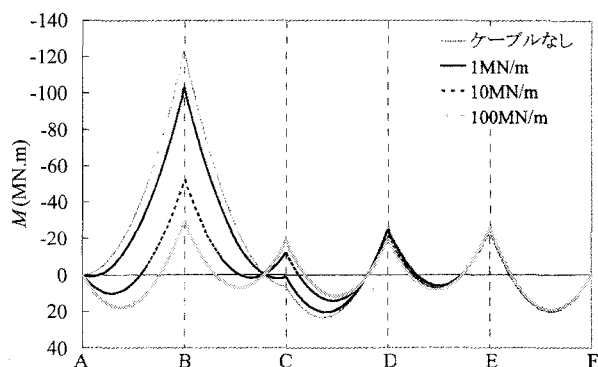


図-6 落橋防止ケーブルを設置した場合の曲げモーメント図

表-1 ケーブルに作用する力および支点反力

ケーブルばね定数 k	ケーブル作用力 $F(\text{MN})$	支点反力(MN)				
		R_B	R_C	R_D	R_E	R_F
なし	-	12.48	2.09	7.04	6.71	2.47
1MN/m	0.51	11.33	2.90	6.82	6.76	2.47
10MN/m	1.76	8.49	4.92	6.28	6.90	2.44
100MN/m	2.34	7.17	5.85	6.03	6.96	2.43
∞	-	6.97	6.00	6.00	6.97	2.43

から 30 秒までの応答時刻を示している。比較のため、本研究では落橋防止ケーブルを設置していないケースと、静的解析で用いたケーブルを設置した場合のケースを示す。図に示している ∞ はケーブルの剛性を無限大（落橋していない状態を表現）にした場合のケースを示した。

全ケースにおいて、落下開始後 1 秒以内に絶対値が最大なり、その後 10 秒から 25 秒の間で静的解析により求めた値に収束する。表-2 に桁の固有振動数と鉛直方向の有効質量比を示した。表中の上段は固有振動数、下段は有効質量比、括弧は有効質量比を累積したものを示している。ケーブルを設置していない場合やケーブルのばね定数が 1MN/m、10MN/m では主に 1 次、3 次、5 次、6 次の振動モードが卓越しているのに対し、100MN/m 以上になると 3 次以上の振動モードが卓越している。さらに 1GN/m や 5 径間連続桁では 5 次の影響が大きい。

図-7、図-8 にケーブルを設置していない場合および 5 径間連続桁における 1 次、5 次振動モード図を示す。ケーブルを設置していない場合の振動モードは張出し部の振動が顕著に現れているのに対し、5 径間連続桁の振動モードは中心に対して対称な振動をする。5 径間連続桁の 5 次振動モードは図より全体が同一方向に振動するモードになる。以上のことから、ケーブルの剛性を高くすると、高次モードが卓越する。

実際に高振動成分がどれくらい振動に影響を与えて

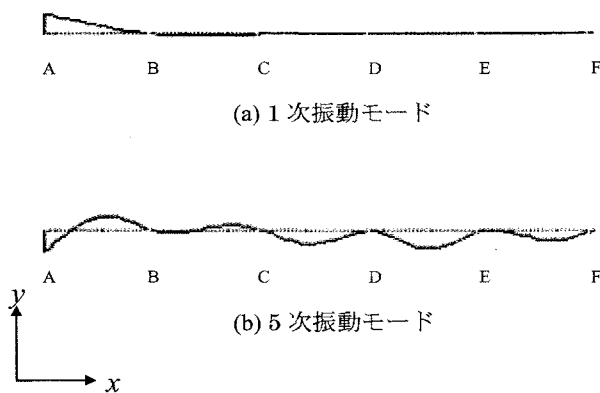


図-7 振動モード (ケーブルなし)

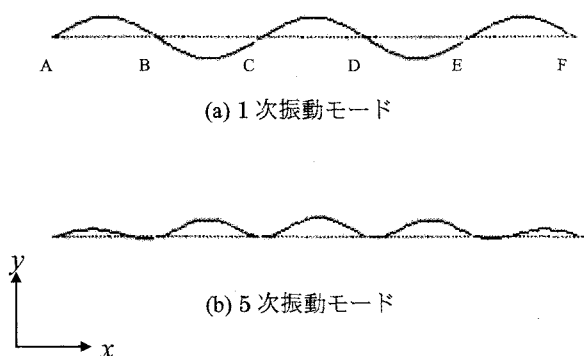


図-8 振動モード (5 径間連続桁)

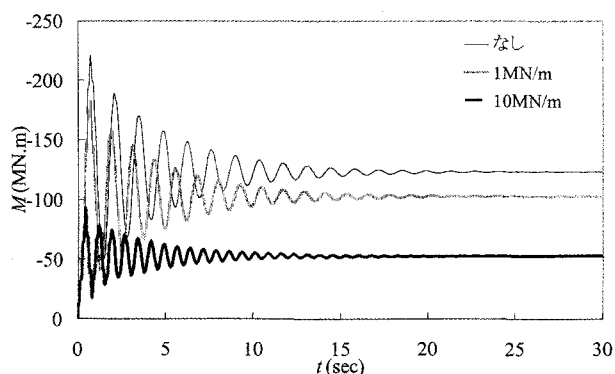


図-9 B 点に作用する曲げモーメントの応答波形 1

いるかを考えてみる。図-9、図-10 の B 点に作用する曲げモーメントを比較すると、ケーブルを設置していない場合やケーブルのばね定数を 1 MN/m 、 10 MN/m と設定した場合、落橋直後の高振動成分が表れている。 100 MN/m 、 1 GN/m とケーブルの剛性が高くなると、振動が収束するまで高振動成分が表れている。ケーブルの剛性が高くなるにつれ、高振動成分の影響を受けやすい。

図-11 と 12 より桁が橋脚から離れた場合、ケーブ

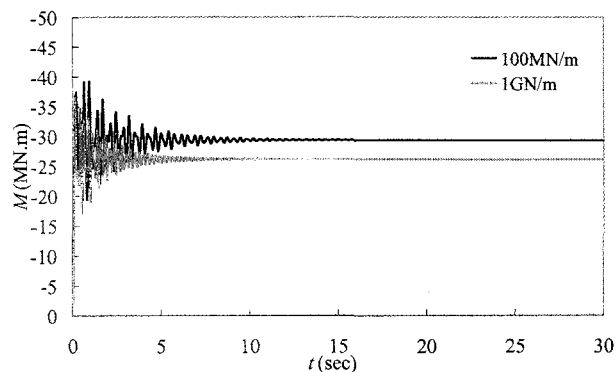


図-10 B 点に作用する曲げモーメントの応答波形 2

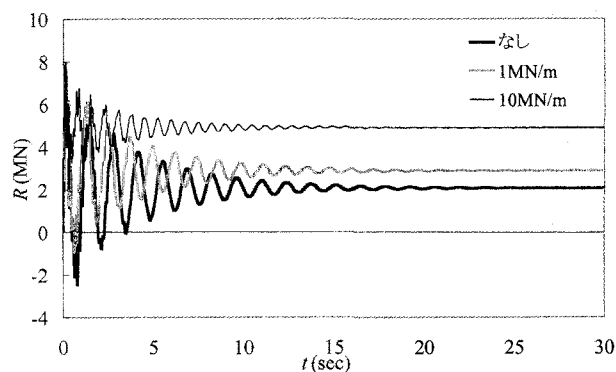


図-11 C 点に作用する反力の応答波形 1

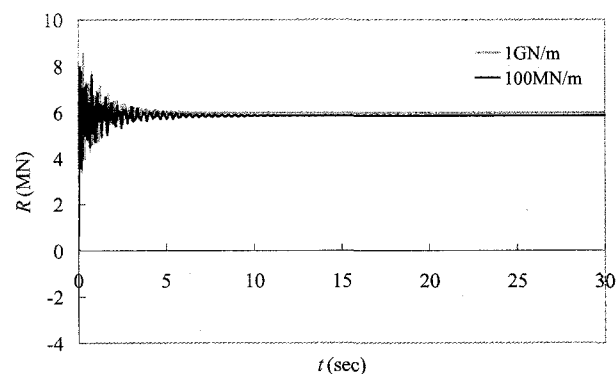


図-12 C 点に作用する反力の応答波形 2

ルがないケースやケーブルのばね定数が 1 MN/m のケースでは、C 点に負の反力が一定時間作用する。ケーブルのばね定数を 10 MN/m 以上に設定すると C 点の支点反力が逆転することはない。

b) 静的解析との比較

表-3 は動的解析と静的解析の結果を示したものである。表の B 点に作用する曲げモーメントおよび A 点の変位量 y における動的解析を見ると、落橋防止ケーブルを設置していない場合は、動的応答倍率がおよそ 2 倍の値を示しているのに対し、ケーブルを設置した場合は、動的応答倍率を約 1.5 倍までに抑えること

表-2 固有振動数と有効質量比

	固有振動数(Hz)					
	有効質量比(有効質量比累積)					
	1次	2次	3次	4次	5次	6次
ケーブルなし	0.73	3.10	3.80	4.75	5.85	6.71
	12(12)	1(13)	17(30)	0(30)	45(75)	0(75)
1MN/m	0.82	3.10	3.80	4.76	5.86	6.72
	12(12)	1(13)	5(18)	0(18)	12(30)	45(75)
10MN/m	1.40	3.10	3.80	4.79	5.89	6.76
	12(12)	1(13)	5(18)	1(19)	14(33)	42(75)
100MN/m	2.70	3.20	4.00	5.05	6.19	7.52
	8(8)	1(9)	9(18)	1(19)	45(64)	11(75)
1GN/m	3.00	3.40	4.20	5.29	6.37	11.61
	4(4)	0(4)	10(14)	0(14)	60(74)	0(74)
∞	3.00	3.40	4.20	5.32	6.39	12.18
	4(4)	0(4)	10(14)	0(14)	60(74)	0(74)

ができる。

また、表に示す C 点の支点反力では、ケーブルを設置していないと支点は負の反力になる。現行示書方では、負反力として少なくとも $-0.3R_d$ に耐えるよう規定されている。本研究で用いた連続桁の死荷重反力の -0.3 倍は -1.8MN であるため、ケーブルを設置しない場合、 -2.74MN と設計値を超える。ケーブルに 10MN/m 以上の剛性を持たせると支点は負の反力にならない。

現在の落橋防止ケーブルの耐力は、死荷重反力の 1.5 倍の耐力で設計されている。本研究の場合 3.6MN である。静的解析では死荷重反力の 1.5 倍の耐力でケーブルを設計しても問題ないが、動的解析では 100MN/m のケースが現行設計法で求めた値よりも大きな数値を示している。

図-13 にケーブルに作用する力の時刻歴応答波形を示す。静的解析ではケーブルのばね定数 1GN/m が最大となるが、動的解析ではケーブルのばね定数 100MN/m が落橋後 5 秒程度ケーブルのばね定数 1GN/m よりも大きな力がケーブルに作用する。静的解析ではケーブルの剛性がいかにあるほど、ケーブルにも大きな力を受けるが、動的解析ではそのようなことはいえない。静的解析により求めた値が現行設計法で求められた値内であっても、動的解析では現行設計法で求められた値以上の力が作用することがある。

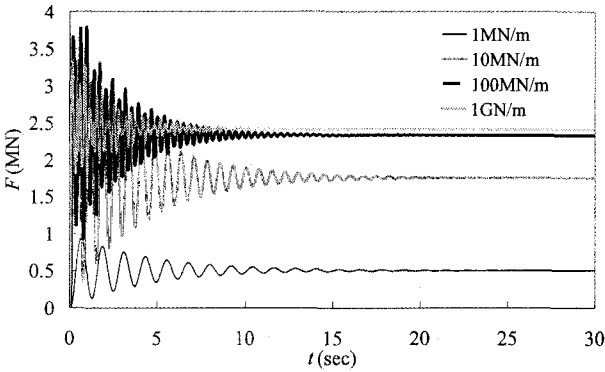


図-13 ケーブルに作用する力の応答波形

以上より、応答にはケーブル剛性の影響が大きいことがわかる。現行設計法ではケーブルの耐力のみが規定されている。ケーブル剛性は、ケーブルの耐力が規定されればケーブル長で決まる。ケーブル長あるいはケーブルの剛性を規定し、橋梁ごとに適した落橋防止ケーブルを設計する必要がある。

5. 必要ケーブル長の設計

(1) 誘導式

ケーブルに遊間長がない場合、A 点の変位量がケーブルの伸びとなる。PC ケーブルを落橋防止ケーブルに使用する場合、設計引張り強度まで許容すると仮定すれば、許容できるひずみ量は 0.015 程度である。よって、ケーブル長の設定が非常に重要になる。

必要とするケーブル長はフックの法則から

$$L = \frac{EF}{k\sigma_a} \tag{1}$$

となる。ここで E はケーブルのヤング率、 k はケーブルのばね定数、 F はケーブルに作用する力である。 σ_a はケーブルの許容応力であり、本研究ではケーブルの降伏応力までを許容すると仮定して、降伏応力 σ_y を

表-3 静的・動的解析結果の比較

ケーブルのばね定数 k		B点の曲げモーメント $M_B(\text{MN.m})$	C点の支点反力 $R_c(\text{MN})$		ケーブルに作用する力 $F(\text{MN})$	A点の変位量 $y(\text{cm})$
			max	min		
なし	静的解析	-123.2	2.1	-	-	64.1
	動的解析	-221.1	7.95	-2.47	-	118.4
1MN/m	静的解析	-102.9	2.9	-	0.5	50.7
	動的解析	-181.9	7.95	-0.93	0.9	94.9
10MN/m	静的解析	-52.7	4.9	-	1.8	17.6
	動的解析	-93.1	7.96	0.05	3.3	33.3
100MN/m	静的解析	-29.5	5.9	-	2.3	2.3
	動的解析	-39.3	7.98	0.05	3.8	3.8
1GN/m	静的解析	-26.3	6	-	2.4	0.2
	動的解析	-36.6	8.57	0.05	3.4	0.3

表-4 試算結果

ケーブルのばね定数 k	ケーブル作用力 F (MN)	死荷重反力 に対する倍率	ケーブルの変形量 y (m)	必要ケーブル断面積 A (mm ²)	必要ケーブル長 L (m)
1MN/m	0.5	0.21	0.507	422.5	84.5
10MN/m	1.8	0.75	0.176	1468.6	29.4
100MN/m	2.3	0.96	0.023	1951.8	3.9
1GN/m	2.4	1.00	0.002	2018.2	0.4

用いる。ここでは、ケーブルはPCケーブル ($E=200$ GN/m²) を使用し、ケーブルの降伏応力は 1.2GN/m^2 とする。

(2) 必要ケーブル長の試算結果

表-4に、静的解析におけるケーブル作用力に対して必要なケーブル最短長を示す。ケーブルのばね定数が 1MN/m 、 10MN/m では 30m 以上ケーブルが必要であり設計上困難である。実用的なケーブルの長さに収めるためには、剛性が約 100MN/m 以上のケーブルを使用する必要がある。

100MN/m のケーブルを用いた場合、ケーブルに作用する力は最大 $0.96R_d$ となり B 点の曲げモーメントは常時の 1.13 倍、C 点の支点反力は 0.98 倍となって負反力にならない。

6. おわりに

本研究では連続桁における落橋防止ケーブルの効果を検討した。得られた主な結果は以下の通りである。

- ① 桁が落下した場合、落下していない状態の 3 倍程度の曲げモーメントが生じ、曲げモーメントの正負が逆転する。よって、落橋防止ケーブルを設置するなど桁に生じる曲げモーメントを低減させる必要がある。
- ② 落橋防止ケーブルを設置することにより、 10% ～ 80% 桁に生じる曲げモーメントを低減させることが可能である。
- ③ 落橋すると一部の支点に荷重が集中する。本研究のモデルでは B 点に常時の 2 倍以上の反力が作用する。
- ④ 自由落下を考えた場合、落下開始直後に絶対値が最大となる曲げモーメントや支点反力が発生する。また静的応答で求めたときよりも、曲げモーメントや支点反力は 1.5 倍から 2 倍の大きさになる。
- ⑤ 一部の支点では反力の正負が逆転する。本研究のモデルでケーブルを設置していない場合、C

点の支点反力が -2.4MN となり、支点反力が現行規定の最小値である死荷重反力の -0.3 倍を上回る。落橋防止ケーブルを設置することにより、規定値以内にすることが可能である。

- ⑥ ケーブルの長さを設計する場合、本研究のモデルでは 100MN/m 程度の剛性を持つケーブルを用いることが設計上有効である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V. 耐震設計編，1996.
- 2) 梶田幸秀，北原武嗣，西本安志，香月智：エアーフローティング装置を用いたゴム製緩衝材の桁間衝突実験，土木学会地震工学論文集，Vol. 27, Paper No. 316, 2003.
- 3) 北原武嗣，梶田幸秀，西本安志，鈴木智子，磯貝幸子：桁間衝突時の衝撃力緩和・エネルギー吸収能に与える緩衝用ゴム厚の影響，第 6 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp. 139-144. 2003.
- 4) 芦塚憲一郎，小林伸吉，春日昭夫，玉置一清，永元直樹：大規模地震時の桁衝突に備えた桁遊間緩衝材の設計について，第 3 回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp. 227-232. 1999.
- 5) 川島一彦，庄司学：衝突緩衝用落橋防止システムによる桁間衝突の影響の低減効果，土木学会論文集，No.612/I-46, pp. 129-142, 1999.
- 6) 伊津野和行，小林紘士，鎌田耕平：桁落下を想定した桁間ケーブル連結装置の所要条件に関する考察，土木学会論文集，No.668/I-54, pp. 319-324, 2001.
- 7) 中尾尚史，伊津野和行：非線形緩衝材を有する落橋防止ケーブルの設計法に関する研究，構造工学論文集，土木学会，Vol. 51A, pp. 751-758, 2005.
- 8) 中尾尚史，伊津野和行，緩衝型落橋防止システムの設計と取り付けに関する検討，土木学会地震工学論文集，Vol. 28, Paper No. 64, 7 pages (CD-ROM), 2005.
- 9) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1997.
- 10) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I. 共通編，2002.