

### 3次元複合材料を緩衝材に用いた橋梁の耐震補強

(株)ピーエス三菱 技術本部開発技術部	正会員	工修	○川畑 智亮
名古屋大学大学院 工学研究科	正会員	工博	中村 光
(株)ピーエス三菱 技術本部開発技術部	正会員		吉松 慎哉
(株)ピーエス三菱 技術本部開発技術部	正会員	工修	桐川 潔

#### 1. はじめに

施工条件の厳しい河川内での橋梁の耐震補強は、一般的に用いられている仮締め切りによる橋脚補強方法では工費が高くなるという課題があり、低コストでの耐震補強技術の開発が求められている。近年、多径間橋梁において、桁衝突による地震慣性力の低減効果を考慮した耐震補強技術の研究<sup>1)</sup>がなされている。これらは、今までの橋脚補強のように耐力を向上させるのではなく、上部構造の変位を抑制することで地震時の各橋脚にかかる負担を低減させ、橋脚補強の必要性を無くす、または低減する方法であり、今後、こういった耐震補強方法が増加することが予想される。

筆者らはこれまでに、桁遊間にエネルギー吸収量の大きい3次元複合材料(写真-1)を緩衝材として使用し、上部構造の応答を低減する耐震補強工法(図-1)の開発を実施している<sup>2)</sup>。本稿では、3次元複合材料の特性をモデル化し、橋梁全体系の動的解析により耐震検討を行った結果、応答変位が最大で約40%まで低減されることが認められたため、これを報告する。

#### 2. 解析諸元

解析モデルとして、反力分散を有する3径間連続PC橋の橋軸方向を対象に、レベル2地震動について動的解析を行い、その効果を検討した。なお、解析プログラムとして、3次元骨組構造物非線形動的解析プログラムDYNA2E<sup>3)</sup>を用いた。

##### (1) 解析モデル

- 解析モデル : 2次元骨組みモデル(図-2)
- 上部構造 : 全断面有効剛性を有する線形はり要素
- 下部構造 : 橋脚基部に塑性ヒンジを考慮した非線形回転バネ、非線形はり要素
- 履歴特性 : 剛性低下型トリリニア(修正武田型)
- 減衰 : Rayleigh減衰
- 支承条件 : 水平方向: 支承バネ、鉛直方向: 拘束、橋軸直角回り: 自由
- 地盤のモデル : 橋台、橋脚下端に地盤バネ(水平、鉛直、回転)を設定

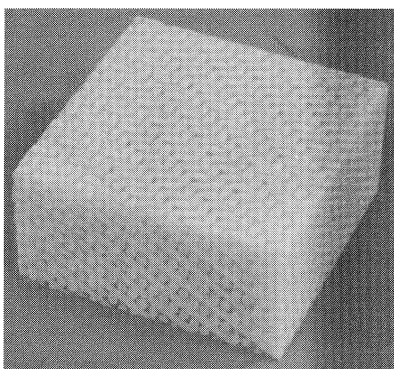


写真-1 3次元複合材料

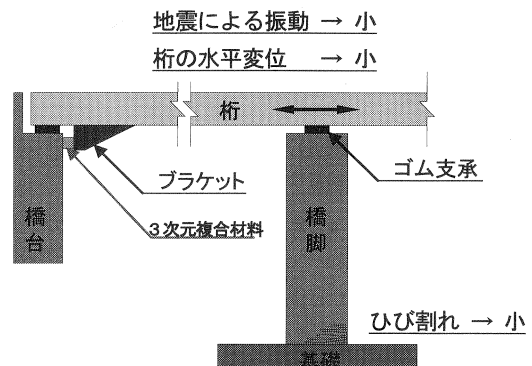


図-1 3次元複合材料の耐震補強のイメージ

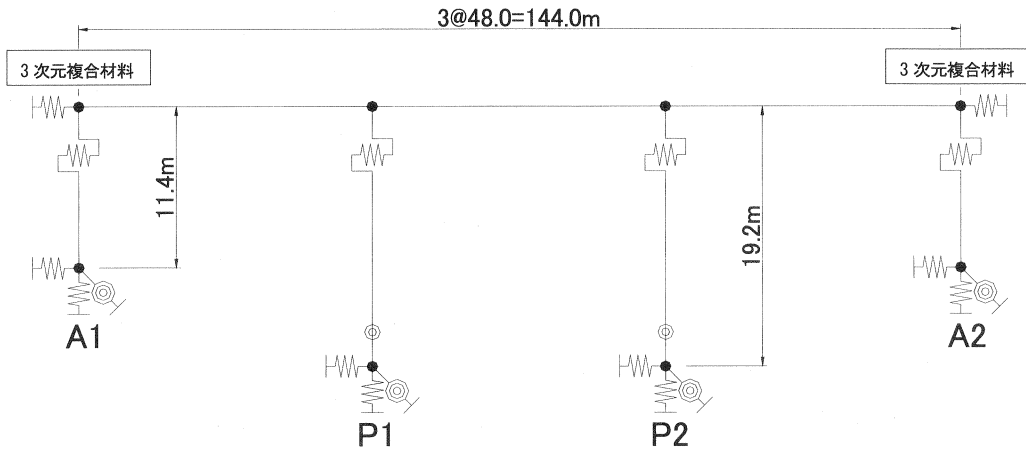


図-2 解析モデル

また、3次元複合材料は上部構造と橋台の遊間に設置し、常時では外力が作用しないものとして設計する。遊間量が大きいと地震時の応答値も大きくなり解析に与える影響は大きく、重要なパラメータとなる。そこで、桁遊間にもっとも影響を与える温度変化による桁の移動量<sup>4)</sup>を、次式を用い考慮することとした。

$$\Delta l_t = \Delta T \cdot \alpha \cdot l = 40 \times (10 \times 10^{-6}) \times (144000/2) = 28.8\text{mm}$$

よって、桁端部に3次元複合材料を設置後、最大30mmの遊間があれば問題はないが、施工スペース、設置誤差等を考慮して遊間50mm(移動量を50mm)として検討する。

解析モデルは桁遊間量の異なるケース、比較モデルのケースを考慮し、以下の4ケースとした。

- (a) 緩衝材なしで橋台への衝突なし
- (b) 3次元複合材料を設置、桁遊間最小時(50mm)
- (c) 3次元複合材料を設置、桁遊間最大時(100mm)
- (d) 緩衝材なしで桁遊間100mm

(2) 入力地震動

入力地震動 : 橋軸方向, レベル2タイプII地震動

1995年 兵庫県南部地震 気象庁神戸海洋気象台地盤上 NS成分

1995年 兵庫県南部地震 気象庁神戸海洋気象台地盤上 EW成分

1995年 兵庫県南部地震 阪高猪名川架橋予定地点地盤上 NS成分

数値積分法 : Newmark β法 (β = 1/4)

積分時間間隔 : 0.002秒

(3) 3次元複合材料の特徴とモデル化

1) 3次元複合材料の特徴

3次元複合材料は、図-3のような弾性体であるガラス繊維ロッドを3次的に組み、その隙間をエポキシ樹脂で充填して固めた複合材料である。圧縮力に対してロッドが強化材として働き、高い耐荷重性を示し、可撓性のエポキシ樹脂が衝撃エネルギーを吸収して振動を減衰させ、以下の特徴を持つ材料である。

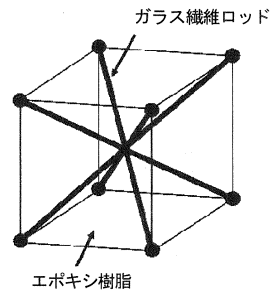


図-3 3次元複合材料

- ・ 優れた変形性能 (終局ひずみがコンクリート 0.0035 に対し, 約 0.60)
- ・ コンクリートの約 3~5 倍の圧縮強度
- ・ コンクリートの約 1/100, ゴムの 100 倍の弾性係数

2) 3次元複合材料のバネモデル化

図-4に3次元複合材料の繰返し圧縮載荷試験による応力-ひずみ関係(実線)を示す。3次元複合材料は最初にガラス繊維ロッドとエポキシ樹脂間の付着切れが生じ(これを降伏とする), 100~120N/mm<sup>2</sup>でガラス繊維ロッドが折れ始め, その後ガラス繊維ロッドが折れながら塑性ひずみが増加し, 最大ひずみ 60%程度まで変形する。ひずみが60%を超えると弾性勾配は増大し, 変形が収まってくる(これを終局とする)。

この特性を持つ3次元複合材料をバネモデル化するにあたり, 3次元複合材料の断面積や厚さをパラメータとした各種載荷試験結果を踏まえ図-4の黒点線のようにモデル化した。このような特性を有する3次元複合材料の解析モデルは, 図-5(a)に示すように桁が離れる方向, すなわち引張側では抵抗が無いものとし, 圧縮側のみで抵抗を示すスリップ型のバネモデルとした。解析ではモデル化したバネを組み込むため図-5(b), (c)のように, 分解した2つのバネを並列して設定した。さらに今回の解析では3次元複合材料の粘性減衰はないものとして安全側に考え, またモデルの関係上, 除荷勾配は弾性勾配と同じとした。

対象とした橋梁モデルでは, 150mmの立方体の3次元複合材料を桁遊間1箇所あたり28個設置した。3次元複合材料は降伏後のエネルギー吸収量が大きく有効であるため, 時刻歴応答解析において上部構造変位の最大応答値で3次元複合材料が降伏し終局に至らないように, 3次元複合材料の使用数量を決定する。本解析においても, あらかじめ時刻歴解析を行った上で28個と決定した。

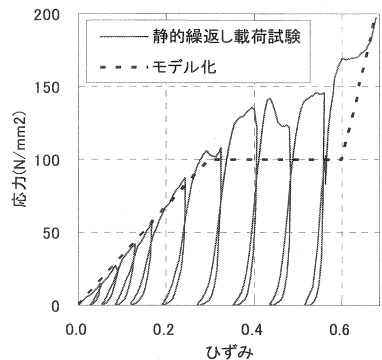
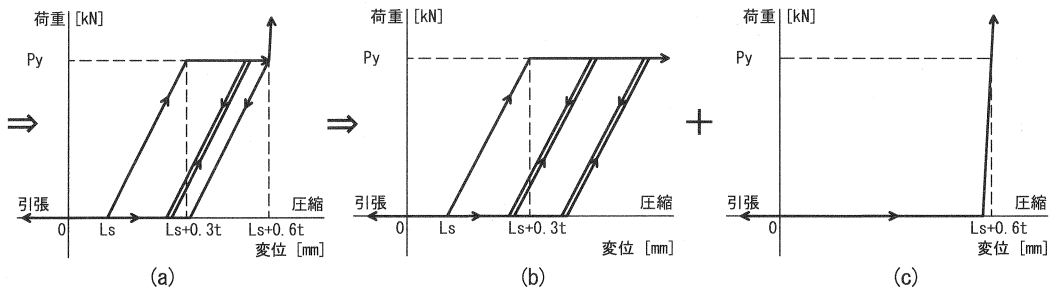


図-4 3次元複合材料の応力-ひずみ関係



Ls: 桁遊間量, t: 3次元複合材料の厚さ  
図-5 3次元複合材料のバネモデル化

3. 解析結果

(1) 固有値解析結果

表-1に固有値解析結果を示す。

固有値解析の結果, 固有値は 1.411 秒となった。また, 時刻歴応答解析で用いる Rayleigh 減衰の固有モードは1次と6次として係数を算出した。

$$C = \alpha K + \beta M$$

$$\alpha = 9.3505 \times 10^{-3}$$

$$\beta = 5.8839 \times 10^{-2}$$

表-1 固有値解析結果

固有モード	振動数 (Hz)	周期 (sec)	刺激係数		有効質量比		モード減衰
			X	Y	X	Y	
1	0.7086	1.4112	-5.26E+01	4.36E-03	0.4057	0	0.0274
2	1.7309	0.5777	3.15E-02	-5.75E-01	0	0	0.0307
3	2.33	0.4292	-7.41E-01	-1.79E-01	0.0001	0	0.0353
4	2.7476	0.364	1.64E-01	-4.92E+01	0	0.355	0.0433
5	2.8594	0.3497	-2.78E+01	-7.59E-01	0.1134	0.0001	0.0863
6	2.9141	0.3432	-3.29E+01	4.38E-01	0.1586	0	0.0872
7	3.2579	0.3069	3.22E+01	4.13E-01	0.1521	0	0.0979
8	3.3503	0.2985	-3.13E+01	3.77E-01	0.1442	0	0.098
9	4.7726	0.2095	1.39E-02	3.04E+00	0	0.0014	0.0938
10	4.9737	0.2011	1.57E-03	-4.06E+01	0	0.2418	0.0863
11	5.3962	0.1853	2.33E-04	-3.74E+01	0	0.2051	0.0985
12	5.5445	0.1804	-9.16E-04	-3.66E+01	0	0.1964	0.0986
13	6.6163	0.1511	-9.49E+00	-1.21E-02	0.0132	0	0.0751
14	6.8515	0.146	-8.89E+00	7.74E-03	0.0116	0	0.0753

(2) 時刻歴応答解析結果

図-6 に解析モデル(3)桁遊間 100mm の解析での 3 次元複合材料の荷重-変位関係を示す。荷重-変位の履歴線で囲まれた面積がエネルギー吸収量となり、3 次元複合材料は降伏荷重に達し、エネルギーを吸収していることが分かる。

図-7 に解析モデルケース(a)~(c)の P1 上部の時刻歴応答変位を示す。

モデル(a)の補強前では地震波の増幅に伴い変位振幅も増大している。これに対し 3 次元複合材料を設置した場合、桁に桁遊間以上の変位が生じた場合は 3 次元複合材料によって変位が抑制されるため、変位がある一定量を超えると変位量が低減されていることがわかる。これは、モデル(c)桁遊間 100mm よりモデル(b)桁遊間 50mm のほうが変位を抑制し始めるのが早いので、3 次元複合材料の補強効果がより顕著に表れているといえる。

表-2 にその差を確認するため、モデル(b)、(c)の各地震波における応答値を示す。最大応答値を網掛け大字で示したが、変位や断面力が最大値を示す地震波は、必ずしも同じ地震波とは限らなかった。通常、応答値は 3 波の平均値を用いるが、3 次元複合材料の数量は最大応答値により決定されるので今回は最大値と比較することとした。桁遊間が大きいモデル(c)の方が桁端部に作用する力は大きく、どれも 3 次元複合材料が降伏域まで達している。また、回転角、変位も大きく橋脚への負担が大きくなることから、桁遊間はできるだけ小さい方が有利だと言える。

表-3 に今回解析を行ったモデルの結果一覧表を示す。3 次元複合材料による補強モデルである(b)、(c)を補強前のモデル(a)と比較すると、応答回転角、変位について補強効果により変形量が低減されるのが分かる。また、モデル(d)は補強前の状態で上部構造が 100mm 変位すると橋台に衝突し桁の応答軸力が急激に上昇すると仮定したものである。モデル(d)の変形量については 3 次元複合材料を設置したタイプと同様に抑えられているが、桁端部に作用する軸力は大きくなっていることから、3 次元複合材料が緩衝材として十分機能していることが分かる。

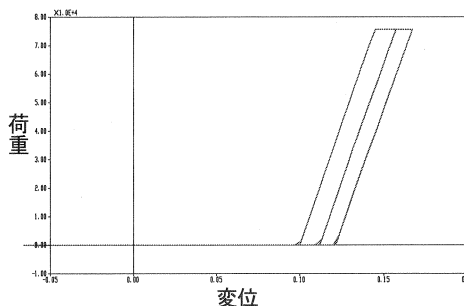


図-6 3次元複合材料の荷重-変位関係 (A1 上部, 神戸海洋気象台 EW 成分)

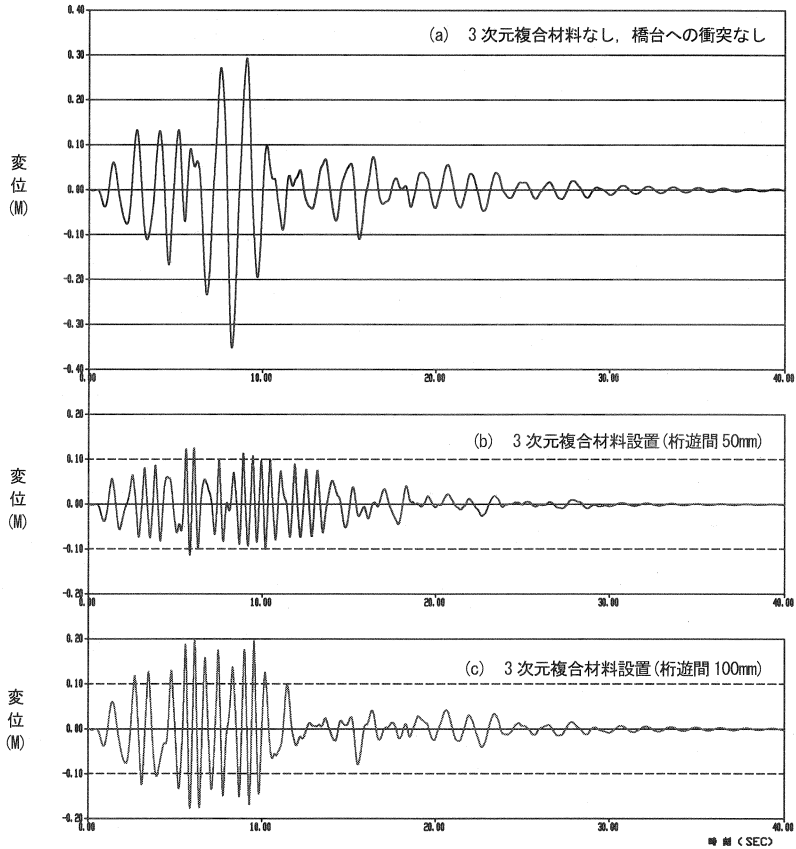


図-7 時刻歴応答変位 (P1 上部—地震波\* : T2-1)

表-2 桁遊間の最小時と最大時の最大応答値

桁遊間		mm	50			100		
地震波*		—	T2-1	T2-2	T2-3	T2-1	T2-2	T2-3
3次元複合材料 の破壊状態	A1側	—	弾性	弾性	降伏	降伏	降伏	降伏
	A2側	—	弾性	弾性	弾性	降伏	降伏	弾性
橋脚基部 非線形状態	P1	—	ひび割れ	ひび割れ	ひび割れ	ひび割れ	ひび割れ	ひび割れ
	P2	—	ひび割れ	ひび割れ	ひび割れ	ひび割れ	ひび割れ	ひび割れ
桁端部 作用軸力	A1側	kN	64968	72077	75600	75600	75600	75600
	A2側	kN	62552	74970	69852	75600	75600	68803
上段： 応答回転角	P1	rad	0.00149	0.00178	0.00158	0.00154	0.00158	0.00211
		rad	0.02535			0.02535		
下段： 許容回転角	P2	rad	0.00150	0.00185	0.00162	0.00159	0.00170	0.00216
		rad	0.02543			0.02543		
変位 (橋脚上端)	A1	m	0.129	0.145	0.139	0.205	0.210	0.186
	P1	m	0.125	0.140	0.134	0.199	0.204	-0.202
	P2	m	-0.128	-0.136	-0.142	-0.194	-0.215	-0.220
	A2	m	-0.132	-0.141	-0.148	-0.200	-0.221	-0.226

\*地震波 : T2-1 : 1995年 兵庫県南部地震 気象庁神戸海洋気象台地盤上 NS成分  
 T2-2 : 1995年 兵庫県南部地震 気象庁神戸海洋気象台地盤上 EW成分  
 T2-3 : 1995年 兵庫県南部地震 阪高猪名川架橋予定地点地盤上 NS成分

表-3 解析結果 (各モデルの最大値の比較)

解析モデル名		(a)	(b)	(c)	(d)
3次元複合材料の数		0	28	28	0
桁遊間		∞	50	100	100
3次元複合材料の破壊状態	A1側	—	弾性	降伏	—
	A2側	—	弾性	降伏	—
橋脚基部非線形状態	P1	ひび割れ	ひび割れ	ひび割れ	ひび割れ
	P2	ひび割れ	ひび割れ	ひび割れ	ひび割れ
桁端部作用軸力	A1側	kN	—	75600	101396
	A2側	kN	—	74970	81629
応答回転角	P1	rad	0.00249	0.00178	0.00211
	P2	rad	0.00252	0.00185	0.00216
変位 (橋台, 橋脚上端)	A1	m	0.371	0.145	0.210
	P1	m	0.372	0.140	0.204
	P2	m	0.372	-0.142	-0.220
	A2	m	0.371	-0.148	-0.226

#### 4. まとめ

- (1) 時刻歴応答解析の結果, 橋脚の応答変位は小さくなり作用する力が小さくなるため, 3次元複合材料による耐震補強効果が認められた。その結果, 橋脚の補強が必要であった橋梁において, 橋脚補強の必要性を無くす, または補強する橋脚数減らすことが可能となる。しかし, これは径間, 上部構造の重量, 温度伸縮量, 橋脚高さ等に影響すると予想され, どれだけの補強効果があるかは今後の課題であり, 今回の解析だけでは一概に言えない。
- (2) 3次元複合材料による耐震補強前の状態で橋台に桁が直接衝突する場合と比較して, 3次元複合材料を設置することで桁端部に作用する軸力が低減し, 3次元複合材料は緩衝材として十分機能したと言える。
- (3) 桁遊間量が小さい場合のほうが橋脚の応答変位が小さくなり, 3次元複合材料による耐震補強効果が認められた。
- (4) PC橋, 鋼橋にかかわらず設置可能であるが, 径間数が多いと桁端部軸力が大きくなりすぎて補強効果が小さくなると予想される。逆に径間数が少なく, 橋脚高の高い橋脚のものほど3次元複合材料による耐震補強効果が大きいと予想されるが, それは今後の課題である。

#### 参考文献

- 1) 田崎賢治・幸左賢二・阿部弘典・新井伸博: 橋の桁端部に間詰め材を充填する地震慣性力の低減効果, コンクリート工学年次論文集, Vol. 26, No. 2, 2004
- 2) 桐川潔・久保明英: 衝突させて3DSoleを潰し減衰させる新しい耐震補強方法, 土木学会 全国大会第59回年次学術講演会講演概要集, I-211, 2004.9
- 3) CRCソリューションズ: DYNA2E Manual, Ver7.2
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 (I), 2002.3