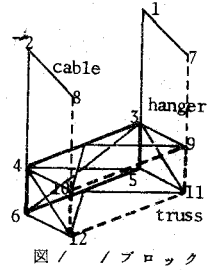


吊橋の立体有限変形解析について

大阪大学工学部 正員 小松定夫
 大阪大学工学部 正員 西村宣男
 大阪大学大学院 学生員 中川知和

1. まえがき 著者らは、偏心荷重や横荷重を受ける完成系吊橋に対して、自由度の低減、計算時間節減などの改良を行った変形法(ブロック変形法)を適用して立体構造解析を行い、この解法が厳密性、汎用性、経済性の面から実用に供し得るものであることを確認した¹⁾。ところで既報の解析では線形化撓度理論に属する計算を行っており、たとえば、架設中の吊橋のように非線形挙動が設計上問題になるような場合には、有限変形の影響を導入した非線形解析が必要である。ここでは完成系吊橋の立体有限変形解析を行う。しかし、本解析過程はわずかな修正により、架設中の吊橋の立体構造解析に拡張することができる。

2. ブロック変形法の概要 1) 本法では慣用の変形法のように吊橋を構成する個々の部材の剛性マトリックスを全体系についてそのまま組合せるのではなく、図1に示すようにケーブル・ハンガーを含む補剛トラスの1パネルに相当するブロックについて予め剛性マトリックス(ブロック剛性マトリックス)を作成しておく。たとえば第*i*番目のパネルのブロック剛性マトリックス $k^{(i)}$ は、 $k^{(i)} = k_c^{(i)} + k_d^{(i)} + k_{bu}^{(i)} + k_{bl}^{(i)}$ (1) と表わされ、ここに、 $k_c^{(i)}$ は第*i*パネルのケーブル、ハンガーおよび弦材に関する剛性マトリックス、 $k_d^{(i)}$ 、 $k_{bu}^{(i)}$ 、 $k_{bl}^{(i)}$ は各々第*i*パネルの主構斜材、上横構斜材、下横構斜材に関する剛性マトリックスである。数種の主構と横構の骨組構成について、予め $k_d^{(i)}$ 、 $k_{bu}^{(i)}$ 、 $k_{bl}^{(i)}$ を作成しておき、形状インデックスによりこれらを制御すれば、部材関連データを省略できる。図1のように横構がKトラス、主構はワレントラスの場合には各構面2種の形状インデックスの組合せとなる。2) 補剛トラス垂直材および横構支材(図1の太線)の両端の軸方向変位を等しいとおき、さらにKトラスのように構面内部に節点が存在する場合は、その節点変位を構面の四隅の変位で代表させて自由度の低減を計っている。この操作により、慣用の変形法に比べて本法の節点自由度は、1断面24から14に約40%減少している。したがって $k^{(i)}$ は28×28の大きさとなる。3) ケーブルとハンガーの、死荷重による初期張力が剛性に与える影響を考慮する。4) ケーブルとハンガーについては、釣合条件式に有限変形の影響を考慮するが、吊構造は線形挙動を示すと考えて、Newton-Raphson法により、非線形計算を行う。この際、不釣合力は、ケーブル節点と、補剛トラス垂直材および横構支材についての力の釣合から算出される。



3. 計算機容量と計算時間 図1のように節点番号付けを行えば、本法の全体系剛性マトリックスの半バンド幅は19であり、剛性マトリックスおよび荷重項を記憶するのに必要な容量は、計算例の吊橋(パネル数124)では、36.75kワードとなる。これに対して慣用の変形法では、108kワード必要である。本法で線形化撓度理論に属する計算を行えば、1 caseのCPU timeは約11秒、非線形計算では、2回〜3回の反復計算で収束し、[収束判

定条件; (不釣合力の絶対値の最大値) / (吊構造自重) ≤ 0.01] CPU time は約 20 秒である。(京都大学大型計算機センター, FACOM 230/75)

4. 数値計算例 スパン割 260m + 1100m + 260m の連続吊橋を対象に数値計算を行った。基準荷重状態は鉛直偏心荷重(中央径間側に道路荷重 2.16 t/m, 偏心量 7m 満載; 鉄道荷重 8.04 t/m, 偏心量 5.3m, 中央径間左 77-より 370m 間に載荷)。および水平横荷重 [ケーブル 0.765 t/m (main), 0.89 t/m (side), 吊構造 3.88 t/m (main), 3.9 t/m (side)] である。主要諸元を表 1 に示す。表 2~表 5 に各種荷重状態に対する変形および部材力を示す。ただし表 3 は、弦材断面面積を $0.0357 \text{ m}^2 (\sqrt{2Hd/EI_y}, l_m=10)$ にして、水平曲げに対する剛性を落とした場合であり、表 4 の水平横荷重は基準の 1/4 を作用させている。また、 $\psi+\theta$; 橋面傾斜角, U_s, V_s ; 吊構造せん断中心の水平横方向および鉛直方向変位, ΔT_c ; ケーブル付加張力である。表 2, 3 から水平横荷重に対して線形解と非線形解の差は小さいことがわかる。弦材力に若干の相違がみられるのは、非線形解では吊構造せん断中心の上方への鉛直変位が現われて付加的曲げモーメントを生じたためであると思われる。表 5 から鉛直偏心荷重についても、最大たわみに 6% の差がみられる程度で、非線形性はあまり強く出ないといえる。表 4 には鉛直偏心荷重と水平横方向荷重を同時に作用させた場合の連成解と重ね合せによる解との比較を示した。この表から連成度は小さいことがわかる。なお、鉛直偏心荷重で、設計荷重の 1.7 倍に対して非線形効果がどの程度現われるかについては当日発表する予定である。

表 1 主要諸元

トラス高	13 m	パネル間隔	13.095 m
トラス幅	32 m	# (side)	13 m
ケーブル間隔	32 m	ケーブル断面積	0.671 m ²
ケーブルサグ	100 m	ハンガー #	0.015 m ²
斜材断面積	0.0668 m ²	対傾橋斜材 #	0.00276 m ²
弦材 #	0.122 m ²	ケーブル重量	13.24 t/m
横橋斜材 #	0.0373 m ²	つり構造 #	28.7 t/m

表 2 水平横荷重

荷目点 z/l	$\psi+\theta \cdot 10^{-3} \text{ rad.}$		$U_s \text{ m}$		上弦材 t		上橋脚 t		下橋脚 t		
	L.	N.L.	L.	N.L.	L.	N.L.	L.	N.L.	L.	N.L.	
左側径間	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-54	-54	-195	-195	
	0.5	-0.059	-0.058	-0.251	-0.251	-1115	-1115	-277	-277	-292	-292
	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-3349	-3399	-433	-433	-480	-479
中央径間	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-3300	-3361	-492	-492	-567	-567
	0.25	-1.843	-1.851	3.684	3.682	1128	1140	-166	-166	-237	-237
	0.5	-4.858	-4.873	5.617	5.613	2024	2057	8	8	-6	-6

L.; 線形解 N.L.; 非線形解

表 3 水平横荷重

荷目点 z/l	$\psi+\theta \cdot 10^{-3} \text{ rad.}$		$U_s \text{ m}$		上弦材 t		上橋脚 t		下橋脚 t		
	L.	N.L.	L.	N.L.	L.	N.L.	L.	N.L.	L.	N.L.	
左側径間	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-24	-24	
	0.5	0.693	0.694	-0.435	-0.434	-475	-467	-182	-182	-168	-168
	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1980	-2045	-331	-331	-369	-369
中央径間	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-1981	-2046	-328	-328	-466	-466
	0.25	-3.790	-3.812	5.950	5.938	767	774	-21	-20	-142	-142
	0.5	-8.975	-9.015	8.527	8.503	682	703	15	15	-4	-4

表 4 鉛直偏心荷重 + 水平横荷重

荷目点 z/l	$\psi+\theta \cdot 10^{-2} \text{ rad.}$		上弦材 t		下弦材 t		上橋脚 t		下橋脚 t		
	C	S	C	S	C	S	C	S	C	S	
左側径間	0.0	0.0	0.0	0.0	-182	-183	257	259	-26	-28	
	0.5	-0.111	-0.112	540	526	-1019	-1034	-69	-68	-66	-69
	1.0	0.0	0.0	907	880	-2388	-2419	-195	-195	-40	-43
中央径間	0.0	0.0	0.0	1087	1057	-2002	-2055	-965	-967	-322	-324
	0.25	1.242	1.244	-899	-896	1415	1424	7	6	-80	-83
	0.5	0.845	0.852	752	779	242	266	-59	-59	54	54
	0.75	0.455	0.461	621	627	0.0	-18	-29	-32	-96	-99
	1.0	0.0	0.0	-1523	-1546	-143	-155	136	139	-175	-179
右側径間	0.0	0.0	0.0	-1588	-1612	-217	-265	327	325	-71	-73
	0.5	-0.095	-0.096	126	108	-638	-644	33	33	-65	-67
	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-138	-132	193	193	-25	-30

C; 連成解 S; 重ね合せ 部材力は数値側について示す

表 5 鉛直偏心荷重

荷目点 z/l	$\psi+\theta \cdot 10^{-2} \text{ rad.}$		$V_s \text{ m}$		上弦材 t		下弦材 t		上橋脚 t		$\Delta T_c \text{ t}$		
	L.	N.L.	L.	N.L.	L.	N.L.	L.	N.L.	L.	N.L.	L.	N.L.	
左側径間	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	256	258	-15	-14	3959	3750	
	0.5	-0.120	-0.110	-0.426	-0.398	866	804	-75	-69	0.4	0.7	3835	3825
	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1789	1720	-176	-181	70	66	4283	3806
中央径間	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1966	1887	-983	-957	-209	-201	4832	3932
	0.25	1.342	1.290	2.049	1.926	-1254	-1179	-3	-6	-42	-42	3619	3613
	0.5	0.997	0.973	0.438	0.414	287	269	-72	-67	55	52	3843	3508
	0.75	0.509	0.506	-0.432	-0.399	370	340	-41	-43	-59	-57	3561	3555
	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-764	-722	152	149	-56	-55	3715	3692
右側径間	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	-818	-776	352	339	37	36	3853	3823
	0.5	-0.098	-0.094	-0.145	-0.141	397	385	35	33	3	3	2744	3739
	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	190	193	-13	-13	3751	3704

部材力は数値側について示す

参考文献

- 1) 小松・西村 “変形法による吊橋の立体解析の効率化” 第30回年次講演会, 50年