

PC単純曲線箱桁の解析法とプレストレス効果に関する一考察

前田 晴人*1・小宮 正久*2・酒井 一*3

1. はじめに

PC 曲線桁について書かれた論文は極めて少ない。これは泉がその著書¹⁾の前書きの中で述べているように、曲線桁に特有のねじりがコンクリート構造部材の設計においては二次的なものと考えられているからであると思われる。しかしながら、比較的制限された立地条件下またはランプ部等における橋梁の計画・設計を行う場合、曲線桁の使用は不可欠であり、その構造特性を把握することは、設計技術者にとって重要な課題である。

箱桁橋の主方向および横方向を総合的に解析する方法としては3次元の立体FEM解析法がある。しかしながらこの方法は構造モデルの作成、作用荷重の作成および解析結果のまとめ等、非常に複雑な作業になり、時間・経費等がかさむ。

FEM解析法に比較して、箱桁全体を構造中心に沿った1本の構造部材に置き換え、支承を構造部材から張り出した剛部材の先端に設置した梁解析は、モデルの作成、荷重の作成および結果のまとめともに簡便であり、時間・経費も少なく済む。ただし、外ウエブと内ウエブの荷重分担については検討の余地がある。

外ウエブと内ウエブの荷重分担に着目して作成する解析モデルとしては、箱桁全体を内・外ウエブに沿う2本の構造部材に置き換えた格子解析モデルが考えられる。この解析を行った場合は、各構造部材に発生したねじりモーメント等から箱桁全体としてのねじりモーメントを算出する必要がある。

本論文においては、これらFEM解析、梁解析および格子解析を比較することにより、各解析法の特徴および精度を把握するとともに、梁解析における荷重分担方法および格子解析における箱桁全体としてのねじりモーメント算出方法を提案する。

また、各解析法に対応するプレストレス力の作用荷重入力方法を提案し、2本のウエブをもつ単純曲線箱桁においても、プレストレス力によってねじりモーメントが発生しない^{2) 3)}ことを、検証する。

2. 解析モデルと荷重

2.1 解析モデル

解析の対象とする構造物は支間40mのPC単純一室箱桁橋とした。また、幅員は10m、桁高は2.25m、ウエブ中心間隔は5mとした(図-1)。曲線半径は $r=150$ m、100mおよび50mの3種類とした。各曲線半径に対する交差角はそれぞれ $\phi=15.3^\circ$ 、 22.9° および 45.8° である(図-2)。

支承はウエブ下端に設置するものとし、起点の外ウエブ側をX、Y、Z3方向固定、終点の外ウエブ側をY、Z2方向固定、起・終点の内ウエブ側をZ方向固定とした。ここに、座標原点は起点側構造中心とし、X方向は起終点の構造中心を結んだ弦方向で終点側を正、Y方向はX方向に直角な水平方向で内ウエブ側を正、Z方向は鉛直方向で下向きを正とした。また、部材座標系として構造中心に沿った方向をx、直角方向をyとした。支承の配置方向はY軸に平行な方向(平行配置)と、構造中心に対して法線方向(法線配置)の2種類とした(図-2)。

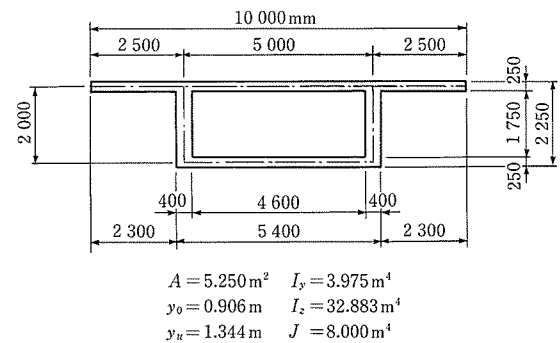


図-1 断面形状寸法および断面諸元

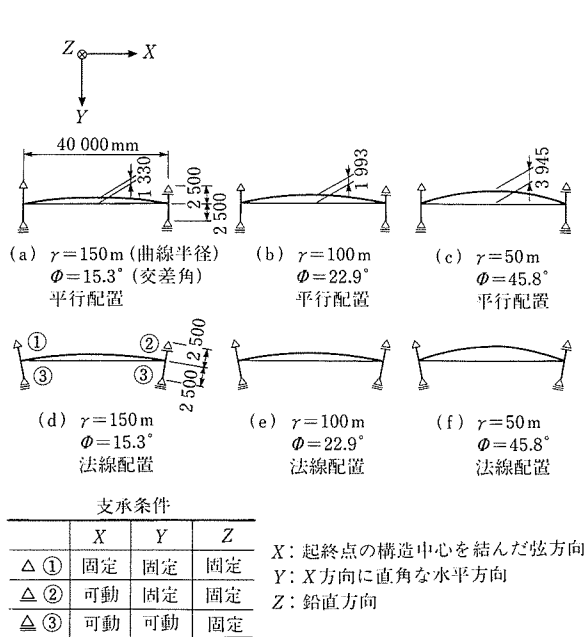
解析方法は、梁解析、格子解析およびFEM解析を対象とした。各解析方法に対応する解析モデルを図-3(a)～図-5(a)に示す。

梁解析のモデルは図-3(a)に示すとおり構造中心に沿って10等分点に節点を設け、その節点間を結んだ折線部材で構造部材を構成した。部材剛性は全断面有効とした断面剛性を用いた。支承は構造部材から剛部材を張り出し、その先端に設けるものとした。

*1 Haruhito MAEDA : (株)日本構造橋梁研究所 設計第二部

*2 Masahisa KOMIYA : 工博 (株)日本構造橋梁研究所

*3 Hajime SAKAI : (株)日本構造橋梁研究所 システム部



平行配置: 支承をY軸と平行に設置した場合
法線配置: 支承を構造中心に対して法線方向に配置した場合

図-2 平行曲線と支承条件

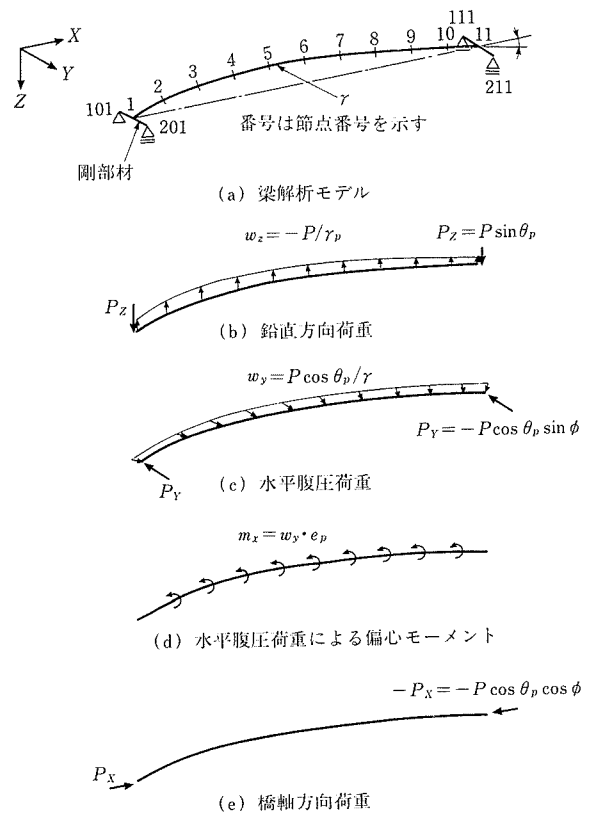
格子解析のモデルは図-4(a)に示すとおりウエブに沿った10等分点に節点を設け、その節点間を結んだ折線部材で構造部材を構成し、各部材の断面剛性は梁解析で設定した部材剛性の1/2とした。構造中心には剛性をもたないダミー部材を配置し、また、ダミー部材と構造部材とを連結する部材として分配横桁を配置した。支承は各ウエブ端に設け、端横桁位置にあたる支承線は剛部材とした。

一般の梁理論は荷重作用面内の構造挙動に対する理論であり、また、格子理論は荷重作用面外の構造挙動に対する理論である。一方PC曲線桁の解析は、荷重作用面内および面外に対して解析する必要がある、これらの理論を直接適用できないことから、基本的には3次元立体骨組解析理論を用いている。本論文で用いる梁解析とは主桁を1本の梁で置き換えた解析を意味し、格子解析は各ウエブを梁で置き換えた解析を意味する。

FEM解析のモデルは断面を図-5(a)に示す20要素で構成し、橋軸方向は10等分とした。また、起終点の端面には厚さ1mの横桁を配置し、水平方向へ倒れ込む変形を拘束した。要素はすべて板曲げ要素とし、全節点数は244となった。

解析モデルの一覧表を表-1に示す。

ヤング係数およびせん断弾性係数は、コンクリート強度40 N/mm²を想定して、それぞれE=31 000 N/mm², G=13 500 N/mm²とした。



- w_z : 鉛直方向分布荷重
- w_y : 水平方向分布荷重
- m_x : 偏心モーメント荷重
- P_z : プレストレス力鉛直分力
- P_y : プレストレス力Y方向分力
- P_x : プレストレス力X方向分力
- P : プレストレス力
- r_p : ケーブルの曲げ半径
- θ_p : ケーブルの曲げ上げ角度
- r : 曲線桁の曲げ半径
- e_p : ケーブルの偏心量
- ϕ : 曲線桁と弦とのなす角度

図-3 梁解析モデルとプレストレスによる作用荷重

表-1 解析モデル一覧表

No	曲線半径 r (m)	支承設置方向	解析方法
0	直線		梁解析
1	150	Y軸に平行 (平行配置)	梁解析
2			格子解析
3			FEM解析
4		法線方向 (法線配置)	梁解析
5			格子解析
6			FEM解析
7	100	Y軸に平行 (平行配置)	梁解析
8			格子解析
9			FEM解析
10		法線方向 (法線配置)	梁解析
11			格子解析
12			FEM解析
13	50	Y軸に平行 (平行配置)	梁解析
14			格子解析
15			FEM解析
16		法線方向 (法線配置)	梁解析
17			格子解析
18			FEM解析

2.2 死荷重の載荷方法

死荷重としては自重のみを考慮した。

梁解析モデルに対する死荷重は、構造中心線に沿って断面積に単位体積重量を乗じた等分布線荷重 $w_g=128.625$ kN/m を鉛直方向に作用させた。

格子解析モデルに対する死荷重も、構造中心線に沿った剛性をもたないダミー部材に、梁解析モデルと同様の鉛直方向等分布荷重を作用させた。

FEM 解析モデルに対する死荷重は、各板要素の部材厚に単位体積重量 (24.5 kN/m³) を乗じた面分布荷重を鉛直方向に作用させた。この場合、重複する面のある FEM 解析の総重量は他の解析に比べて 2% 程度大きくなるので、総重量を一致させた比較を行うために、FEM 解析結果はすべて 0.98 倍することとした。

2.3 プレストレス力の載荷方法

プレストレス力は、直線橋として算出した死荷重による径間中央曲げ引張応力度を打ち消すレベルとし、 $P=15\ 020$ kN を導入した。ケーブルはウエブのみに配置するものとし、形状は図 - 6 に示すように、径間中央での偏心量が 1.144 m (下縁から 0.2 m)、端支点での定着位置が断面図心となるような円曲線に配置した。梁解析モデルのように構造中心線に沿って配置した場合の端支点での曲げ上げ角 θ_p は 6.5475 度、曲線半径 r_p は 175.397 m となった。実際のプレストレス力は摩擦等の影響により橋軸方向の各断面で異なるが、ここでは問題を単純にするために桁全長にわたって一定とした。

梁解析モデルに対するプレストレス力による作用荷重は図 - 3 (b) ~ (e) に示すとおりである。

梁の鉛直方向に作用する荷重は、梁部材に対して等分布線荷重 w_z が鉛直上向きに作用し、また、端支点に鉛直分力 P_z が下向きに作用する。

梁の水平方向には腹圧力による荷重として、梁部材の求心方向に等分布線荷重 w_y が作用し、また、端支点に水平分力 P_y が Y 軸負の方向に作用する。さらに、 w_y が偏心していることから、偏心モーメント荷重 m_x が作用する。

梁の X 軸方向には水平分力 P_x が作用する。

w_z , w_y , m_x および P_z , P_y , P_x は次式により求めることができる。

$$w_z = -P/r_p \tag{1}$$

$$w_y = P \cos \theta_p / r \tag{2}$$

$$m_x = w_y \cdot e_p \tag{3}$$

$$P_z = P \sin \theta_p \tag{4}$$

$$P_y = -P \cos \theta_p \cdot \sin \phi \tag{5}$$

$$P_x = P \cos \theta_p \cdot \cos \phi \tag{6}$$

ここに、

- w_z : プレストレス力による鉛直方向部材分布荷重
- w_y : プレストレス力による水平方向部材分布荷重
- m_x : w_y による偏心モーメント荷重
- P_z : プレストレス力鉛直分力
- P_y : プレストレス力 Y 軸方向分力
- P_x : プレストレス力 X 軸方向分力

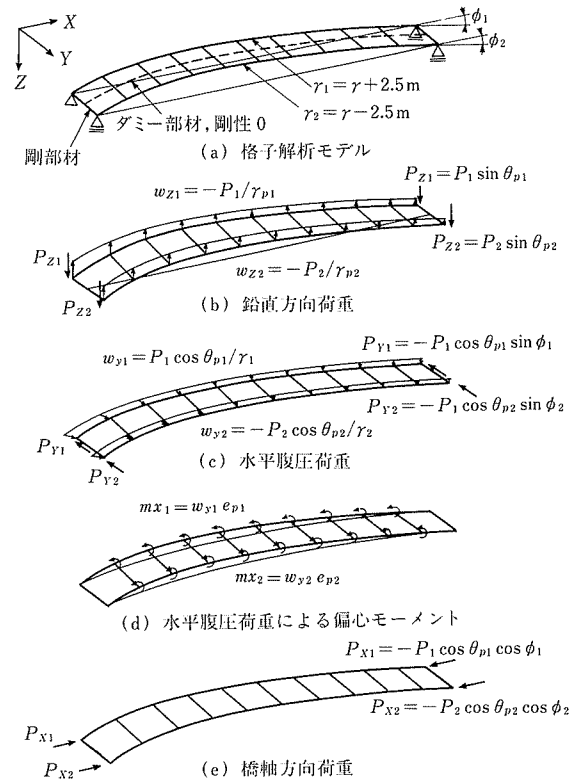


図 - 4 格子解析モデルとプレストレス力による作用荷重

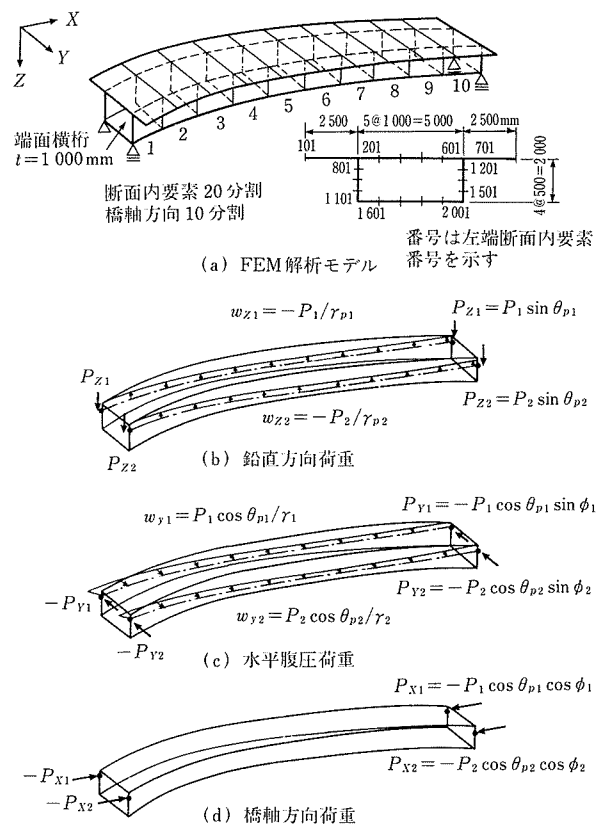


図 - 5 FEM 解析モデルとプレストレス力による作用荷重

- P : プレストレス力
- r_p : ケーブルの曲げ半径
- θ_p : 定着端におけるケーブルの曲げ上げ角度
- r : 曲線桁の曲げ半径
- e_p : ケーブルの偏心量
- ϕ : 曲線桁と弦とのなす角 (交差角 Φ の 1/2)

格子解析モデルに対するプレストレス力による作用荷重は図-4 (b)~(e) に示すとおりである。格子解析においては梁解析の 1/2 のプレストレス力をおおのこの主桁に対して梁解析と同様に作用させた。

梁解析モデルおよび格子解析モデルに対する作用荷重の一覧表を表-2 に示す。

平面曲線の摩擦低減による影響はここでは考慮していないが、考慮した場合の影響度の一例を表-3 に示す。この例の場合、平面曲線による摩擦低減効果は、長さに関する摩擦係数に上乘せて $\lambda' = \lambda + \mu/r$ としている。ここに λ は長さに関する摩擦係数、 μ は角変化に関する摩擦係数、 r は曲線半径である。表から明らかのように内外ウェブの摩擦損失差はわずかであるが、曲線半径による影響は、構造中心位置に仮想配置した場合と直線とを比較して、 $r=150$ の場合 4%、 $r=100$ の場合 6% および $r=50$ の場合 11% 低

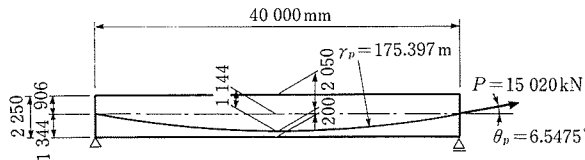


図-6 PC 鋼材配置

表-2 梁解析モデルおよび格子解析モデルに対するプレストレス力作用荷重

(a) 平面曲線半径 $r = 150$ m の場合

	梁モデル	格子モデル(平行)		格子モデル(法線)	
		外桁	内桁	外桁	内桁
支間長 L (m)	40	40	40	40.666	39.334
平面曲線半径 r (m)	150	152.5	147.5	152.5	147.5
交差角 Φ (度) $= (180 L) / (\pi r)$	15.279	15.028	15.538	15.279	15.279
プレストレス力 P (kN)	15 020	7 510	7 510	7 510	7 510
PC 鋼材の最大縦距 f (m)	1.144	1.144	1.144	1.144	1.144
PC 鋼材曲げ半径 r_p (m) $= (4 f^2 + L^2) / 8 f$	175.397	175.397	175.397	181.267	169.624
定着端での曲げ上げ角度 θ_p (度) $= \sin^{-1} (L/2 r_p)$	6.548	6.548	6.548	6.440	6.658
PC 鋼材の偏心量 e_p (m) ただし径間中央位置	-1.144	-1.144	-1.144	-1.144	-1.144
定着端での X 方向プレストレス力 $P_x = P \cos \theta_p \cdot \cos(\Phi/2)$ (kN)	14 790	7 397	7 393	7 396	7 393
定着端での Y 方向プレストレス力 $P_y = P \cos \theta_p \cdot \sin(\Phi/2)$ (kN)	-1 984	-976	-1 009	-992	-992
定着端での z 方向プレストレス力 $P_z = P \sin \theta_p$ (kN)	1 713	856	856	842	871
鉛直方向部材分布荷重 $w_p = -P/r_p$ (kN/m)	-85.634	-42.817	-42.817	-41.431	-44.274
水平方向部材分布荷重 $w_y = P \cos \theta_p / r$ (kN/m)	99.480	48.925	50.583	48.935	50.572
w_p による偏心モーメント荷重 $m_x = w_y \cdot e_p$ (kNm/m)(径間中央最大)	-113.805	-55.970	-57.867	-55.9818	-57.854

減されるので、直線と同様のプレストレス力を期待するためには、少なくともこの平面曲線による低減分は導入力を割り増しておく必要がある。

FEM 解析モデルに対するプレストレス力による作用荷重は図-5 (b)~(d) に示すとおりである。FEM 解析モデルに対しては格子解析モデルの作用荷重をそのまま用いることができる。ただし、FEM 解析モデルの場合は、各ウェブ

(b) 平面曲線半径 $r = 100$ m の場合

	梁モデル	格子モデル(平行)		格子モデル(法線)	
		外桁	内桁	外桁	内桁
支間長 L (m)	40	40	40	41.020	39.020
平面曲線半径 r (m)	100	102.5	97.5	102.5	97.5
交差角 Φ (度) $= (180 L) / (\pi r)$	22.918	22.359	23.506	22.929	22.930
プレストレス力 P (kN)	15 020	7 510	7 510	7 510	7 510
PC 鋼材の最大縦距 f (m)	1.144	1.144	1.144	1.144	1.144
PC 鋼材曲げ半径 r_p (m) $= (4 f^2 + L^2) / 8 f$	175.397	175.397	175.397	184.427	166.936
定着端での曲げ上げ角度 θ_p (度) $= \sin^{-1} (L/2 r_p)$	6.548	6.548	6.548	6.385	6.712
PC 鋼材の偏心量 e_p (m) ただし径間中央位置	-1.144	-1.144	-1.144	-1.144	-1.144
定着端での X 方向プレストレス力 $P_x = P \cos \theta_p \cdot \cos(\Phi/2)$ (kN)	14 625	7 319	7 305	7 315	7 310
定着端での Y 方向プレストレス力 $P_y = -P \cos \theta_p \cdot \sin(\Phi/2)$ (kN)	-2 964	-1 447	-1 520	-1 483	-1 482
定着端での z 方向プレストレス力 $P_z = P \sin \theta_p$ (kN)	1 713	856	856	835	878
鉛直方向部材分布荷重 $w_p = -P/r_p$ (kN/m)	-85.634	-42.817	-42.817	-40.721	-44.987
水平方向部材分布荷重 $w_y = P \cos \theta_p / r$ (kN/m)	149.220	72.790	76.523	72.814	76.498
w_p による偏心モーメント荷重 $m_x = w_y \cdot e_p$ (kNm/m)(径間中央最大)	-170.708	-83.272	-87.543	-83.299	-87.513

(c) 平面曲線半径 $r = 50$ m の場合

	梁モデル	格子モデル(平行)		格子モデル(法線)	
		外桁	内桁	外桁	内桁
支間長 L (m)	40	40	40	42.000	38.000
平面曲線半径 r (m)	50	52.5	47.5	52.5	47.5
交差角 Φ (度) $= (180 L) / (\pi r)$	45.837	43.654	48.249	45.837	45.837
プレストレス力 P (kN)	15 020	7 510	7 510	7 510	7 510
PC 鋼材の最大縦距 f (m)	1.144	1.144	1.144	1.144	1.144
PC 鋼材曲げ半径 r_p (m) $= (4 f^2 + L^2) / 8 f$	175.397	175.397	175.397	193.317	158.352
定着端での曲げ上げ角度 θ_p (度) $= \sin^{-1} (L/2 r_p)$	6.548	6.548	6.548	6.236	6.891
PC 鋼材の偏心量 e_p (m) ただし径間中央位置	-1.144	-1.144	-1.144	-1.144	-1.144
定着端での X 方向プレストレス力 $P_x = P \cos \theta_p \cdot \cos(\Phi/2)$ (kN)	13 744	6 926	6 809	6 876	6 867
定着端での Y 方向プレストレス力 $P_y = -P \cos \theta_p \cdot \sin(\Phi/2)$ (kN)	-5 811	-2 774	-3 049	-2 907	-2 903
定着端での z 方向プレストレス力 $P_z = P \sin \theta_p$ (kN)	1 713	856	856	816	901
鉛直方向部材分布荷重 $w_p = -P/r_p$ (kN/m)	-85.634	-42.817	-42.817	-38.848	-47.426
水平方向部材分布荷重 $w_y = P \cos \theta_p / r$ (kN/m)	298.441	142.115	157.074	142.201	156.963
w_p による偏心モーメント荷重 $m_x = w_y \cdot e_p$ (kNm/m)(径間中央最大)	-341.416	-162.579	-179.693	-162.678	-179.566

表 - 3 プレストレスの摩擦損失比較例 (支線法線配置の場合)

曲線半径 (m)	$r = \infty$	$r = 150$			$r = 100$			$r = 50$		
		外	中心	内	外	中心	内	外	中心	内
桁長の 1/2 l (m)	20	20.333	20	19.667	20.51	20	19.51	21	20	19
角変化 θ_p (度)	6.548	6.44	6.548	6.658	6.385	6.548	6.712	6.236	6.548	6.891
曲線半径 r (m)	∞	152.2	150	147.5	102.5	100	97.5	52.5	50	47.5
角変化に関する摩擦係数 μ (1/rad)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
長さに関する摩擦係数 λ (1/m)	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004	0.004
平面曲線を考慮した $\lambda' = \lambda + \mu/r$	0.00400	0.00597	0.00600	0.00603	0.00693	0.00700	0.00708	0.00971	0.01000	0.01032
低減率 $e_{\mu}[-(\lambda' + \mu \theta_p / 180)]$	0.892	0.856	0.857	0.858	0.839	0.840	0.841	0.789	0.791	0.793
低減率の内外比較 外/内	—	1.00	—	1.00	1.00	—	1.00	1.00	—	1.00
低減率の曲線半径による比較	1.00	—	0.96	—	—	0.94	—	—	0.89	—

外：外ウエブ位置 中心：構造中心位置 内：内ウエブ位置

表 - 4 (a) 死荷重による反力比較

支線配置	曲線半径 (m)	ウエブ	梁解析		格子解析		FEM 解析	
			反力 (kN)	比率	反力 (kN)	比率	反力 (kN)	比率
平行配置	$r = \infty$	外	1286	0.50	—	—	—	—
		内	1286	0.50	—	—	—	—
		合計	2572	1.00	—	—	—	—
	$r = 150$	外	1733	0.67	1733	0.67	1733	0.67
		内	838	0.33	838	0.33	838	0.33
		合計	2571	1.00	2571	1.00	2571	1.00
	$r = 100$	外	1950	0.76	1949	0.76	1948	0.76
		内	622	0.24	623	0.24	623	0.24
		合計	2572	1.00	2572	1.00	2571	1.00
	$r = 50$	外	2520	0.98	2515	0.98	2514	0.98
		内	51	0.02	56	0.02	57	0.02
		合計	2571	1.00	2571	1.00	2571	1.00
法線配置	$r = 150$	外	1741	0.68	1762	0.69	1761	0.68
		内	830	0.32	809	0.31	810	0.32
		合計	2571	1.00	2571	1.00	2571	1.00
	$r = 100$	外	1976	0.77	2009	0.78	2006	0.78
		内	596	0.23	563	0.22	565	0.22
		合計	2572	1.00	2572	1.00	2571	1.00
	$r = 50$	外	2734	1.06	2802	1.09	2794	1.09
		内	-163	-0.06	-231	-0.09	-223	-0.09
		合計	2571	1.00	2571	1.00	2571	1.00

において高さ方向の作用位置を指定できるため、水平方向部材分布荷重 w_y による偏心モーメント荷重 m_x は入力が必要がない。

3. 解析結果

3.1 反力

(1) 死荷重反力

死荷重による反力を表 - 4 (a) に示す。死荷重反力は、梁解析、格子解析および FEM 解析ではほぼ同一の値となり、解析方法による差は生じない。曲線半径の違いによる外・内ウエブの反力比は、 $r = 150$ m, 100 m, 50 m のそれぞれに対しておおむね 2 : 1, 4 : 1, 1.1 : -0.1 となっており、 $r = 50$ m で交差角 $\theta = 45.8$ 度の場合は負反力が発生した。

(2) プレストレス力による反力

プレストレス力による反力を表 - 4 (b) に示す。プレストレス力による反力も死荷重による反力同様、解析方法による差は生じない。よって、反力を算出するためには梁解析で十分であるといえる。

2.3 で設定したプレストレス力による鉛直方向荷重によっては、死荷重反力を打ち消す方向の反力が発生する。一方、

表 - 4 (b) プレストレス荷重による反力比較

支線配置	曲線半径 (m)	ウエブ	荷重	梁解析反力 (kN)	格子解析反力 (kN)	FEM 解析反力 (kN)
平行配置	$r = \infty$	外	プレストレス全体	0	—	—
		内	プレストレス全体	0	—	—
	$r = 150$	外	鉛直方向荷重	-297	-297	-297
			水平腹圧+ねじり	297	297	297
		プレストレス全体		0	0	0
		内	鉛直方向荷重	298	298	298
	水平腹圧+ねじり		-297	-297	-297	
	プレストレス全体		1	1	1	
	$r = 100$	外	鉛直方向荷重	-441	-441	-441
			水平腹圧+ねじり	440	438	438
		プレストレス全体		-1	-3	-3
		内	鉛直方向荷重	441	441	442
水平腹圧+ねじり	-440		-438	-438		
プレストレス全体		1	3	4		
$r = 50$	外	鉛直方向荷重	-817	-818	-818	
		水平腹圧+ねじり	816	818	818	
	プレストレス全体		1	0	0	
	内	鉛直方向荷重	819	819	819	
水平腹圧+ねじり		-816	-818	-818		
プレストレス全体		3	1	1		
法線配置	$r = 150$	外	鉛直方向荷重	-303	-303	-303
			水平腹圧+ねじり	303	303	303
		プレストレス全体		0	0	0
		内	鉛直方向荷重	304	304	303
	水平腹圧+ねじり		-303	-303	-303	
	プレストレス全体		1	1	0	
	$r = 100$	外	鉛直方向荷重	-459	-458	-457
			水平腹圧+ねじり	458	458	458
		プレストレス全体		-1	0	1
		内	鉛直方向荷重	459	460	459
	水平腹圧+ねじり		-458	-458	-458	
	プレストレス全体		1	2	1	
$r = 50$	外	鉛直方向荷重	-964	-964	-959	
		水平腹圧+ねじり	963	965	962	
	プレストレス全体		-1	1	3	
	内	鉛直方向荷重	965	965	960	
水平腹圧+ねじり		-963	-965	-962		
プレストレス全体		2	0	-2		

注) '水平腹圧+ねじり' のうち '水平腹圧' では反力が発生せず、腹圧による 'ねじり' (偏心モーメント) により反力が発生する。

腹圧力の偏心による偏心モーメント荷重によっては、鉛直方向荷重による反力を相殺する反力が発生する。また、水平方向腹圧力および X 軸方向力によっては反力が発生しない。

最終的には、プレストレス力による反力は発生しないこととなり、死荷重によるねじりモーメントを打ち消すようなねじりモーメントも発生しない。

3.2 曲げモーメント

梁解析の曲げモーメントは、各部材の曲げモーメントとして直接求めることができる。格子解析の曲げモーメントは、外桁と内桁の曲げモーメントを合計すれば桁全体としての曲げモーメントを求めることができる。FEM解析については次式を用いることによって着目断面に発生している各要素中心の曲げ応力度から曲げモーメントを算出することができる。

$$M = \sum \{ \sigma_{xi} \cdot A_i \cdot (y_i - y_0) \} \quad (7)$$

ここに、

- M : 着目断面の曲げモーメント
- σ_{xi} : 着目断面における各要素中心の橋軸方向曲げ応力度 (引張を正)
- A_i : 各要素の断面積
- y_i : 上縁から各要素中心までの距離
- y_0 : 上縁から断面図心までの距離

表 - 5 (a) $r=50$ m, 支承平行配置とした場合の曲げモーメント

(a-1) 自重による曲げモーメント (kNm)

着目部材	断面位置	梁解析	格子解析	FEM解析	梁/格子	梁/FEM	格/FEM
1-2	0.05L	2 275	3 398	2 500	0.67	0.91	1.36
2-3	0.15L	10 972	11 251	10 780	0.98	1.02	1.04
3-4	0.25L	17 542	17 580	17 337	1.00	1.01	1.01
4-5	0.35L	21 947	21 943	21 678	1.00	1.01	1.01
5-6	0.45L	24 156	24 152	23 941	1.00	1.01	1.01

1: 端支点~6: 径間中央, 値は部材中央の値

(a-2) プレストレス力による曲げモーメント (kNm)

着目部材	断面位置	梁解析	格子解析	FEM解析	梁/格子	梁/FEM	格/FEM
1-2	0.05L	-3 075	-2 928	-3 118	1.05	0.99	0.94
2-3	0.15L	-8 549	-8 355	-8 411	1.02	1.02	0.99
3-4	0.25L	-12 653	-12 517	-12 436	1.01	1.02	1.01
4-5	0.35L	-15 390	-15 334	-15 147	1.00	1.02	1.01
5-6	0.45L	-16 758	-16 754	-16 527	1.00	1.01	1.01

表 - 5 (b) $r=50$ m, 支承法線配置とした場合の曲げモーメント

(b-1) 自重による曲げモーメント (kNm)

着目部材	断面位置	梁解析	格子解析	FEM解析	梁/格子	梁/FEM	格/FEM
1-2	0.05L	4 913	4 924	5 000	1.00	0.98	0.98
2-3	0.15L	13 681	13 711	13 597	1.00	1.01	1.01
3-4	0.25L	20 305	20 351	20 133	1.00	1.01	1.01
4-5	0.35L	24 745	24 802	24 501	1.00	1.01	1.01
5-6	0.45L	26 972	27 033	26 692	1.00	1.01	1.01

1: 端支点~6: 径間中央, 値は部材中央の値

(b-2) プレストレス力による曲げモーメント (kNm)

着目部材	断面位置	梁解析	格子解析	FEM解析	梁/格子	梁/FEM	格/FEM
1-2	0.05L	-3 079	-3 078	-3 048	1.00	1.01	1.01
2-3	0.15L	-8 552	-8 548	-8 391	1.00	1.02	1.02
3-4	0.25L	-12 657	-12 651	-12 427	1.00	1.02	1.02
4-5	0.35L	-15 393	-15 386	-15 113	1.00	1.02	1.02
5-6	0.45L	-16 762	-16 754	-16 457	1.00	1.02	1.02

このようにして算出した曲げモーメントの例を表 - 5 に示す。表 - 5 はもっとも曲線半径の小さな $r=50$ m についての結果を示している。着目部材は、橋長の 10 等分位置を 1 ~ 11 節点とした場合の各節点間を結んだ部材を示し、値はその部材中央の値である。表 - 5 (a) は支承を平行に配置したモデルに対する結果であるが、曲げモーメント値の小さい端支点付近 ($0.05L$, L =橋長) こそばらつきがあるものの、値の大きくなる径間中央付近においては、自重・プレストレス力ともに、FEM解析値との差が 1~2%程度しかない。表 - 5 (b) は支承を法線方向に配置したモデルに対する結果であるが、梁解析値と格子解析値はほぼ一致しており、FEM解析値との差も自重に対して 1%、プレストレス力に対して 2%程度しかない。以上より、梁解析および格子解析とも箱桁の設計に対して十分な精度で曲げモーメントを算出できることが明らかとなった。表 - 5 (c) は、 $r=50$ m, 支承法線配置の FEM解析モデルに自重を作用させた場合の $0.45L$ 断面における橋軸方向曲げ応力度から、式 (7) を用いてその位置における曲げモーメントを算出した例である。

表 - 6 は格子解析を用いた場合の径間中央断面 ($0.5L$) における外桁および内桁の曲げモーメントを示したものである。自重については曲線半径および支承配置の条件によらず、ほぼ 50% ずつ分担している。プレストレス力については曲線半径が小さくなるほど内桁への効きがよくなり、 $r=50$ m では 4% の差となる。自重による曲げモーメントは内外でバランスするものの、プレストレス力の効果はより内桁側にあるので、外桁側をより補強する必要がある。

表 - 5 (c) FEM解析結果からの曲げモーメント算出例 <式(7)参照>

($r=50$ m, 支承法線配置, 自重, $0.45L$ 断面)

着目要素	要素番号	曲げ応力 σ_{xi} (kN/m ²)	断面積 A_i (m ²)	上縁から y_i (m)	曲げ M_i (kNm)
上床版	105	-4 755	0.625	0.125	2 321
	205	-5 114	0.25	0.125	998
	305	-5 069	0.25	0.125	990
	405	-5 075	0.25	0.125	991
	505	-5 130	0.25	0.125	1 002
	605	-5 233	0.25	0.125	1 022
	705	-5 655	0.625	0.125	2 760
外ウエブ	805	-3 606	0.2	0.375	383
	905	-382	0.2	0.875	2
	1 005	2 839	0.2	1.375	266
	1 105	6 075	0.2	1.875	1 177
内ウエブ	1 205	-3 521	0.2	0.375	374
	1 305	159	0.2	0.875	-1
	1 405	3 827	0.2	1.375	359
	1 505	7 509	0.2	1.875	1 455
下床版	1 605	7 718	0.25	2.125	2 352
	1 705	7 905	0.25	2.125	2 409
	1 805	8 167	0.25	2.125	2 489
	1 905	8 536	0.25	2.125	2 601
	2 005	8 994	0.25	2.125	2 741
ΣM_i					26 692

注 1) 要素番号のうち 5 は橋軸方向 10 分割した 5 番目の位置, 100 ~ 2000 は図 - 5(a) に示した断面要素番号を示す。

注 2) $M_i = \sigma_{xi} \cdot A_i \cdot (y_i - y_0)$, $y_0 = 0.906$ m

表 - 6 格子解析における外桁・内桁の曲げモーメント比
(a) 自重 (径間中央 0.5L)

支承配置	曲線半径 (m)	外桁曲げ (kNm)	内桁曲げ (kNm)	外/合計	内/合計
平行	150	12 825	12 753	0.50	0.50
	100	12 783	12 676	0.50	0.50
	50	12 441	12 224	0.50	0.50
法線	150	12 950	12 938	0.50	0.50
	100	13 089	13 074	0.50	0.50
	50	13 787	13 769	0.50	0.50

(b) プレストレス力

支承配置	曲線半径 (m)	外桁曲げ (kNm)	内桁曲げ (kNm)	外/合計	内/合計
平行	150	-8 441	-8 663	0.49	0.51
	100	-8 393	-8 725	0.49	0.51
	50	-8 215	-8 881	0.48	0.52
法線	150	-8 415	-8 690	0.49	0.51
	100	-8 347	-8 760	0.49	0.51
	50	-8 135	-8 960	0.48	0.52

3.3 せん断力

梁解析のせん断力は、各部材のせん断力として直接求めることができる。自重による外桁および内桁のせん断力配分は、各部材のせん断力とねじりモーメントとを用いて、せん断流一定の法則を利用すれば、次式により簡易的に求めることができる。

$$S_d(in,out) = S_d/2 \pm T_d \cdot h / (2A_m) \quad (8)$$

ここに、

- $S_d(in,out)$: 自重による内桁および外桁のせん断力
- S_d : 梁解析の自重による各部材のせん断力
- T_d : 梁解析の自重による各部材のねじりモーメント
- h : 上下床版図心間の距離
- A_m : 部材中心で囲まれた閉断面の断面積

せん断流一定の法則によると、ねじりモーメント T_d によって閉断面の各部材に流れる単位長さ当たりのせん断流は一定で、 $T_d / (2A_m)$ で表すことができる。よって、この値にウェブ高 h を乗ずれば、ねじりモーメント T_d によるせん断力を算出することができる。

また、プレストレス力による内桁および外桁のせん断力配分は、定着端での Z 方向プレストレス力の比、すなわち次式によって簡易的に求めることができる。

$$S_{psin} = S_p \cdot K_{sin} / (K_{sin} + K_{sout}) \quad (9)$$

$$S_{psout} = S_p \cdot K_{sout} / (K_{sin} + K_{sout})$$

ここに、

- $S_{psin} (out)$: プレストレス力による内桁および外桁のせん断力
- S_p : 梁解析のプレストレス力による各部材のせん断力
- K_{sin}, K_{sout} : $= L_{sin} / (2r_{psin}), L_{sout} / (2r_{psout})$
- L_{sin}, L_{sout} : 内・外ウェブの長さ
- r_{psin}, r_{psout} : 内・外ケーブルの曲げ半径

格子解析のせん断力は、外桁および内桁のせん断力とし

て直接求めることができる。桁全体のせん断力は、それらを合計して求めることができる。

FEM 解析については次式を用いることによって着目断面に発生しているウェブ要素中心のせん断応力度からせん断力を算出することができる。

$$S = \sum (\tau_i \cdot A_i) \quad (10)$$

ここに、

- S : 着目断面、着目ウェブのせん断力
- τ_i : 着目断面、着目ウェブにおける各要素中心のせん断応力度
- A_i : 各要素の断面積

このようにして算出した主桁全体としてのせん断力の例を表 - 7 に示す。表 - 7 はもっとも曲線半径の小さな $r=50$ m についての結果を示している。表 - 7 (a) は支承を平行に配置したモデルに対する結果であるが、梁解析値と格子解析値はほぼ一致している。FEM 解析値との差は自重で最大 7%、プレストレス力で最大 4% あるが、梁解析値および格子解析値の方が大きめの値となっており安全側である。

表 - 7 (a) $r=50$ m, 支承平行配置とした場合のせん断力 (a-1) 自重によるせん断力 (kN)

着目部材	断面位置	梁解析	格子解析	FEM 解析	梁/格子	梁/FEM	格子/FEM
1-2	0.05L	2 314	2 314	2 153	1.00	1.07	1.07
2-3	0.15L	1 799	1 799	1 814	1.00	0.99	0.99
3-4	0.25L	1 285	1 285	1 212	1.00	1.06	1.06
4-5	0.35L	771	771	758	1.00	1.02	1.02
5-6	0.45L	257	257	248	1.00	1.04	1.04

1: 端支点 ~ 6: 径間中央, 値は部材中央の値, L: 桁長

(a-2) プレストレス力によるせん断力 (kN)

着目部材	断面位置	梁解析	格子解析	FEM 解析	梁/格子	梁/FEM	格子/FEM
1-2	0.05L	-1 540	-1 541	-1 481	1.00	1.04	1.04
2-3	0.15L	-1 198	-1 198	-1 201	1.00	1.00	1.00
3-4	0.25L	-856	-856	-846	1.00	1.01	1.01
4-5	0.35L	-514	-514	-514	1.00	1.00	1.00
5-6	0.45L	-171	-172	-170	0.99	1.01	1.01

表 - 7 (b) は支承を法線方向に配置したモデルに対する結果であるが、梁解析値と格子解析値はほぼ一致しており、FEM 解析値との差も主要断面においては 1% 程度しかない。表 - 7 (c) は、 $r=50$ m, 支承法線配置の FEM 解析モデルに自重を作用させた場合の 0.05 L 断面におけるせん断応力度から、式 (10) を用いてその位置におけるせん断力を算出した例である。

表 - 8 は支承配置および曲線半径を変化させた場合の、端支点付近 (0.05 L) における外桁および内桁のせん断力を示したものである。

表 - 8 (a) に示した自重に対して、梁全体としてのせん断力を比較した場合、梁解析値と格子解析値とはほぼ一致する。支承法線方向配置の場合は FEM 解析値に対しても 1% の差しかないが、支承平行配置の場合は多少精度が落ち、FEM 解析値に対して 4~7% の差が生じる。荷重分担

表 - 7 (b) $r=50$ m, 支承法線配置とした場合のせん断力 (b-1) 自重によるせん断力 (kN)

着目部材	断面位置	梁解析	格子解析	FEM解析	梁/格子	梁/FEM	格子/FEM
1-2	0.05L	2 314	2 313	2 280	1.00	1.01	1.01
2-3	0.15L	1 799	1 799	1 788	1.00	1.01	1.01
3-4	0.25L	1 285	1 285	1 269	1.00	1.01	1.01
4-5	0.35L	771	771	764	1.00	1.01	1.01
5-6	0.45L	257	257	255	1.00	1.01	1.01

1: 端支点 ~ 6: 径間中央, 値は部材中央の値, L: 桁長

(b-2) プレストレス力によるせん断力 (kN)

着目部材	断面位置	梁解析	格子解析	FEM解析	梁/格子	梁/FEM	格子/FEM
1-2	0.05L	-1 540	-1 544	-1 533	1.00	1.00	1.01
2-3	0.15L	-1 198	-1 201	-1 186	1.00	1.01	1.01
3-4	0.25L	-856	-858	-852	1.00	1.00	1.01
4-5	0.35L	-514	-515	-509	1.00	1.01	1.01
5-6	0.45L	-171	-172	-167	0.99	1.02	1.03

表 - 7 (c) FEM 解析結果からのせん断力算出例 <式 (10) 参照>

($r=50$ m, 支承法線配置, 自重, $0.05L$ 断面)

着目要素	要素番号	せん断応力 τ_i (kN/m ²)	断面積 A_i (m ²)	せん断力 S_i (kN)
外ウエブ	801	2 204	0.2	441
	901	2 338	0.2	468
	1 001	2 334	0.2	467
	1 101	2 160	0.2	432
	小計			1 807
内ウエブ	1 201	632	0.2	126
	1 301	727	0.2	145
	1 401	642	0.2	128
	1 501	362	0.2	72
	小計			473
合計				2 280

注 1) 要素番号のうち 1 は橋軸方向 10 分割した 1 番目の位置, 800 ~ 1 500 は断面内要素番号 (図 - 5 (a)) を示す.

注 2) $S_i = \tau_i \cdot A_i$

表 - 8 外桁・内桁のせん断力比較 (0.05L)

(a) 自重

支承配置	曲線半径 (m)	全 体						外 桁						内 桁					
		梁解析 (kN)	格子解析 (kN)	FEM解析 (kN)	梁/格子	梁/FEM	格子/FEM	梁解析 (kN)	格子解析 (kN)	FEM解析 (kN)	梁/格子	梁/FEM	格子/FEM	梁解析 (kN)	格子解析 (kN)	FEM解析 (kN)	梁/格子	梁/FEM	格子/FEM
平行	150	2 314	2 313	2 225	1.00	1.04	1.04	1 381	1 365	1 325	1.01	1.04	1.03	933	949	900	0.98	1.04	1.05
	100	2 315	2 315	2 197	1.00	1.05	1.05	1 490	1 469	1 410	1.01	1.06	1.04	825	847	788	0.97	1.05	1.07
	50	2 314	2 314	2 153	1.00	1.07	1.07	1 781	1 758	1 675	1.01	1.06	1.05	532	556	478	0.96	1.11	1.16
法線	150	2 314	2 314	2 290	1.00	1.01	1.01	1 385	1 408	1 355	0.98	1.02	1.04	929	907	935	1.02	0.99	0.97
	100	2 315	2 315	2 295	1.00	1.01	1.01	1 503	1 537	1 466	0.98	1.03	1.05	813	778	829	1.04	0.98	0.94
	50	2 314	2 313	2 280	1.00	1.01	1.01	1 880	1 954	1 807	0.96	1.04	1.08	433	359	473	1.21	0.92	0.76

(b) プレストレス力

支承配置	曲線半径 (m)	全 体						外 桁						内 桁					
		梁解析 (kN)	格子解析 (kN)	FEM解析 (kN)	梁/格子	梁/FEM	格子/FEM	梁解析 (kN)	格子解析 (kN)	FEM解析 (kN)	梁/格子	梁/FEM	格子/FEM	梁解析 (kN)	格子解析 (kN)	FEM解析 (kN)	梁/格子	梁/FEM	格子/FEM
平行	150	-1 541	-1 541	-1 517	1.00	1.02	1.02	-770	-755	-767	1.02	1.00	0.98	-770	-786	-751	0.98	1.03	1.05
	100	-1 542	-1 541	-1 503	1.00	1.03	1.03	-771	-732	-763	1.05	1.01	0.96	-771	-810	-739	0.95	1.04	1.10
	50	-1 540	-1 541	-1 481	1.00	1.04	1.04	-770	-690	-766	1.12	1.01	0.90	-770	-851	-714	0.90	1.08	1.19
法線	150	-1 541	-1 541	-1 529	1.00	1.01	1.01	-757	-755	-750	1.00	1.01	1.01	-783	-786	-779	1.00	1.01	1.01
	100	-1 542	-1 541	-1 528	1.00	1.01	1.01	-751	-747	-742	1.01	1.01	1.01	-790	-794	-786	0.99	1.01	1.01
	50	-1 540	-1 544	-1 533	1.00	1.00	1.01	-732	-723	-721	1.01	1.02	1.00	-808	-821	-812	0.98	1.00	1.01

を考慮した場合, より多くのせん断力を分担する外桁に着目すると, 式 (8) を用いた梁解析値と格子解析値との差は最大でも 4% であり, FEM 解析値との差も最大 6% であることから式 (8) の妥当性が立証された。

表 - 8 (b) に示したプレストレス力に対して, 梁全体としてのせん断力を比較した場合, 梁解析値と格子解析値とはほぼ一致する。支承法線方向配置の場合は FEM 解析値に対しても 1% の差しかないが, 支承平行配置の場合は多少精度が落ち, FEM 解析値に対して最大 4% の差が生じる。荷重分担を考慮した場合, より多くのせん断力を分担する外桁に着目すると, 式 (9) を用いた梁解析値と格子解析値との差は, 支承法線方向配置の場合最大 1% であるが, 支承平行配置の場合 $r=50$ m で最大 12% の差が生じる。しかしながら, 梁解析値と FEM 解析値との差は最大 2% しかなく, 式 (9) の妥当性が立証された。

以上より, 梁解析を行った場合においても式 (8) および式 (9) を用いることにより, 外桁・内桁へのせん断力分担量を決定できることが明らかとなった。また, 格子解析を支承平行配置の桁に適用した場合, せん断力分担率の精度が梁解析および FEM 解析に比べて劣ることも明らかとなった。

表 - 8 (c) (d) は, $r=50$ m および支承法線配置の条件で, 自重およびプレストレス力に対する $0.05L$ 断面の梁解析によるせん断力から, 式 (8) (9) を用いて外・内ウエブのせん断力分担を算出した例である。

3.4 ねじりモーメント

梁解析のねじりモーメントは, 各部材のねじりモーメントとして直接求めることができる。格子解析のねじりモーメントは, 外桁と内桁のねじりモーメントを合計し, 横桁に発生するせん断力にウエブ間距離を乗じた値を加えることで式 (11) により求めることができる。

$$T = T_{in} + T_{out} - S \cdot b \quad (11)$$

(c) 梁解析における自重の外・内ウェブせん断力分配
 <式 (8) 参照>
 (r=50 m, 支承法線配置, 0.05 L 断面)

せん断力		ねじり	ねじり せん断	外ウェブ	内ウェブ
S_d (kN)	$S_d/2$ (kN)	T_d (kNm)	S_i (kN)	$S_d/2-T_d$ (kN)	$S_d/2-T_d$ (kN)
2 314	1 157	-7 237	-724	1 880	433

$$S_i = T_d \cdot h / (2A_m) = T_d \times 2.0 / (2 \times 2.0 \times 5.0) = 0.1 T_d$$

(d) 梁解析におけるプレストレス力の外・内ウェブせん断力分配
 <式 (9) 参照>
 (r=50 m, 支承法線配置, 0.05 L 断面)

せん断力	外ウェブ 長	ケーブル 半径	内ウェブ 長	ケーブル 半径	$K_{out} =$ L_{out}	$K_{in} =$ L_{in}	外ウェブ	内ウェブ
S_p (kN)	L_{out} (m)	$r_{p,out}$ (m)	L_{in} (m)	$r_{p,in}$ (m)	$/2r_{p,out}$ (m)	$/2r_{p,in}$ (m)	$S_{p,out}$ (kN)	$S_{p,in}$ (kN)
-1 540	42	193.317	38	158.352	0.1086	0.1200	-732	-808

$$S_{p,out} = S_p \cdot K_{out} / (K_{in} + K_{out}) \quad S_{p,in} = S_p \cdot K_{in} / (K_{in} + K_{out})$$

ここに、

- T : 着目断面の桁全体としてのねじりモーメント
- T_{in} : 内桁のねじりモーメント
- T_{out} : 外桁のねじりモーメント
- S : 横桁のせん断力
- b : ウェブ間距離

FEM 解析については次式を用いることによって各断面に発生している閉断面要素のせん断応力度からねじりモーメントを算出することができる。

$$T = (H_{up} - H_{lo}) \cdot h/2 + (-H_{out} + H_{in}) \cdot b/2 \quad (12)$$

ここに、

- T : 着目断面のねじりモーメント
- $H_{up}, H_{lo}, H_{out}, H_{in}$: 閉断面内の上床版, 下床版, 外ウェブおよび内ウェブに作用するせん断力で $\Sigma(\tau_i \cdot A_i)$
- h : 上下床版図心間の距離
- b : ウェブ間距離

このようにして算出したもつとも曲線半径の小さな r=50 m についての結果を表 - 9 に示す。表 - 9 (a) は支承を平行に配置したモデルに対する結果であるが、各解析ともややばらついた結果となった。ただし、設計でもつとも重要となる 1-2 部材中央 (0.05 L) における値は、FEM 解析に対して梁解析は 6% 増加、格子解析は 9% 増加程度であり、設計実務的には使用しても問題ない値といえる。表 - 9 (b) は支承を法線方向に配置したモデルに対する結果であるが、梁解析値と格子解析値の差は主要断面において 2~5% であった。また、梁解析値と FEM 解析値との差は 1% でありよく一致していた。表 - 9 (c) は、r=50 m, 支承法線配置および自重の条件で 0.05 L 断面における格子解析の主桁ねじりモーメントおよび横桁せん断力から、式 (11) を用いてその位置におけるねじりモーメントを算出した例である。また表 - 9 (d) は、同様の条件で 0.05 L 断面における FEM 解析の閉断面要素中心せん断応力度から、式 (12) を用いてその位置におけるねじりモーメントを算出した例である。

表 - 9 r=50 m, 自重によるねじりモーメント

(a) 支承平行配置

着目 部材	断面 位置	梁 解析	格子 解析	FEM 解析	梁 /格子	梁/FEM	格子 /FEM
1-2	0.05L	-6 245	-6 413	-5 874	0.97	1.06	1.09
2-3	0.15L	-5 674	-6 710	-5 462	0.85	1.04	1.23
3-4	0.25L	-4 495	-5 073	-4 289	0.89	1.05	1.18
4-5	0.35L	-2 871	-3 069	-2 732	0.94	1.05	1.12
5-6	0.45L	-988	-1 019	-918	0.97	1.08	1.11

1: 端支点~6: 径間中央, 値は部材中央の値

端面を横桁で拘束しない FEM 解析モデルを用いた場合、せん断応力度には水平方向へ倒れ込もうとする要素も含まれてしまい、式 (12) を用いても梁解析および格子解析結果に見合う解は得られなかった。

(b) 支承法線配置

着目 部材	断面 位置	梁 解析	格子 解析	FEM 解析	梁/格子	梁/FEM	格子 /FEM
1-2	0.05L	-7 237	-7 119	-7 171	1.02	1.01	0.99
2-3	0.15L	-6 453	-6 779	-6 366	0.95	1.01	1.06
3-4	0.25L	-5 055	-4 830	-4 994	1.05	1.01	0.97
4-5	0.35L	-3 208	-3 025	-3 162	1.06	1.01	0.96
5-6	0.45L	-1 101	-1 282	-1 083	0.86	1.02	1.18

(c) 格子解析結果からのねじりモーメント算出例
 <式 (11) 参照>

(r=50 m, 支承法線配置, 自重, 0.05 L 断面)

外桁ねじり T_{out} (kNm)	内桁ねじり T_{in} (kNm)	横梁せん断 S (kN)	横梁長 b (m)	桁全体ねじり T (kNm)
-1 601	-1 958	712	5	-7 119

$$T = T_{in} + T_{out} - S \cdot b$$

(d) FEM 解析結果からのねじりモーメント算出例
 <式 (12) 参照>

(r=50 m, 支承法線配置, 自重, 0.05 L 断面)

着目 要素	要素番号	せん断 応力 τ_i (kN/m ²)	断面積 A_i (m ²)	$T_i \cdot A_i$ (kN)	ねじり中 心からの 偏心 (m)	ねじり T (kNm)
上床版	201	-2 045	0.25	-511	1	-1 866
	301	-1 776	0.25	-444		
	401	-1 521	0.25	-380		
	501	-1 240	0.25	-310		
	601	-884	0.25	-221		
	小計 H_{up}			-1 866		
外ウェブ	801	2 204	0.2	441	-2.5	-4 518
	901	2 338	0.2	468		
	1 001	2 334	0.2	467		
	1 101	2 160	0.2	432		
	小計 H_{out}			1 807		
内ウェブ	1 201	630	0.2	126	-2.5	1 181
	1 301	727	0.2	145		
	1 401	642	0.2	128		
	1 501	362	0.2	72		
	小計 H_{in}			473		
下床版	1 601	2 594	0.25	649	-1	-1 967
	1 701	2 100	0.25	525		
	1 801	1 617	0.25	404		
	1 901	1 099	0.25	275		
	2 001	460	0.25	115		
	小計 H_{lo}			1 967		
合計 T						-7 171

注 1) 要素断面のうち 1 は橋軸方向 10 分割した 1 番目の位置, 200~2 000 は断面内要素番号 (図 - 5 (a)) を示す。

注 2) $T = (H_{up} - H_{lo}) \cdot h/2 + (-H_{out} + H_{in}) \cdot b/2$

表 - 10 は支承配置および曲線半径を変化させた場合の、端支点付近 ($0.05 L$) における自重によるねじりモーメントを比較したものである。

支承法線方向配置の場合は、梁解析値、格子解析値および FEM 解析値はほぼ一致しており最大 2% の差しかない。支承平行配置の場合は多少精度が落ち、FEM 解析値に対して梁解析値は最大 6%、格子解析値は最大 11% の差が生じる。ただし両者とも FEM 解析値よりも大きな値となっている。

プレストレス力によるねじりモーメントは各解析とも発生しない。

表 - 10 各解析法によるねじりモーメント比較 ($0.05 L$)

支承配置	曲線半径 (m)	梁解析 (kNm)	格子解析 (kNm)	FEM 解析 (kNm)	梁/格子	梁/FEM	格子/FEM
平行	150	-2 240	-2 395	-2 189	0.94	1.02	1.09
	100	-3 327	-3 537	-3 188	0.94	1.04	1.11
	50	-6 245	-6 413	-5 874	0.97	1.06	1.09
法線	150	-2 276	-2 240	-2 266	1.02	1.00	0.99
	100	-3 450	-3 399	-3 436	1.02	1.00	0.99
	50	-7 237	-7 119	-7 171	1.02	1.01	0.99

4. まとめ

本論文により PC 単純曲線箱桁について得られた結論は次のとおりである。

① 梁解析、格子解析および FEM 解析によってプレストレス力の影響を求める際の作用荷重を式 (1) ~ (6) で表現して問題のないことを明らかにした。

② 構造部材から剛部材を張り出し、支承位置を正しく設定した梁解析モデルにおいては、格子解析および FEM 解析と同一の反力を求めることができる。

③ 梁解析により求めた自重によるせん断力を、外桁と内桁に分配するための簡易式として式 (8) を提案した。

④ 梁解析により求めたプレストレス力によるせん断力を、外桁と内桁に分配するための簡易式として式 (9) を提案した。

⑤ 格子解析により求めた外桁および内桁のねじりモーメントと横桁のせん断力から、箱桁全体としてのねじりモーメントを求めるための簡易式として式 (11) を提案した。

⑥ PC 単純曲線箱桁においては、プレストレス力によってねじりモーメントが発生しないことを明らかにした。

⑦ 梁解析は最も簡易で十分な精度をもち、内外ウエブのせん断力分担も簡易式 (8) (9) を用いれば算出できるため、箱桁に対して有効な解析法といえる。

⑧ 格子解析は箱桁全体としてのねじりモーメントを直接求めることはできないが、簡易式 (11) を用いれば算出できる。しかしながら、支承を平行配置した場合におけるプレストレス力によるせん断力分配およびねじりモーメントの算出精度が若干劣る。

参考文献

- 1) 泉満明：ねじりを受けるコンクリート部材の設計法，技報堂，1972.
- 2) 道路橋示方書Ⅲコンクリート橋編，日本道路協会，2002.3.
- 3) コンクリート道路橋設計便覧，日本道路協会，1994.12

【2002年6月20日受付】