

(2) 連続合成桁中間支点部床版の設計計算における取り扱いに関する検討

A Study of design method of Slab at Intermediate Support of Continuous Composite Girder Bridges

山本 宏*, 尾下 里治**
Hiroshi Yamamoto, Satoji Oshita

* 工修 (株横河ブリッジ, 橋梁本部技術部 (〒273-0026 千葉県船橋市山野町 27 番地))

** 工博 (株横河ブリッジ, 橋梁本部技術部 (〒273-0026 千葉県船橋市山野町 27 番地))

Recently, many continuous steel girder bridges with a prestressed concrete slab have been constructed. However, the design method of these bridges required complicated calculation to deal with the effect of creep and shrinkage of slab concrete and difference of temperature between slab and girder.

In this paper, using the constant shear flow panels theory, a continuous composite girder bridge was designed to simplify the design procedure. Then the applicability of this method to practical design was discussed.

Key Words: the constant shear flow panel, composite girder bridges

1. まえがき

P C床版を有する連続合成桁形式の少数主桁橋は、経済性と耐久性を満たす構造形式として近年施工例が増えてきている。連続合成桁の設計指針としては「P C床版を有するプレストレスしない連続合成桁の設計要領(案)」¹⁾(以下橋建設計要領(案)と呼ぶ)が示されているが、道路橋示方書²⁾における記述内容と異なる点もあり、定式化されていない状況にある。

連続合成桁の設計では、コンクリート断面をヤング係数比によって鋼断面に換算した合成断面を用いて構造解析を行う総断面力法が一般的であるが、この方法では負曲げ領域の床版の取り扱いや、クリープ、乾燥収縮、温度差などの影響に対するヤング係数を変化させた解析など煩雑な設計計算が必要となる。そこで、連続合成桁の設計計算の簡素化・合理化を目指して、一定せん断流パネル理論を用いてコンクリート床版と鋼桁とを別々にモデル化した解析法により連続合成桁の試設計を行い、今後の連続合成桁の設計実務への適用性について考察する。具体的には、実橋モデルに対して、プレストレスしない連続合成桁として、道路橋示方書および橋建設計要領(案)に基づいて設計を行った場合と、一定せん断流パネル理論に基づいた解析法を用いて設計を行った場合とを比較し、一定せん断流パネル理論を用いた解析法の実

用性を確認する。

2. 現行規定による連続合成桁の試設計

対象橋梁は、図-1および図-2に示す3径間連続P C床版2主桁橋で、プレストレスしない連続合成桁として設計をする。解析に際しての仮定剛度および各荷重の載荷方法は文献 1), 2) を参考に以下のように決定した。

2.1 仮定剛度

現在示されている2種類の連続合成桁の設計基準の大きな違いは、構造解析時の中間支点上床版コンクリート剛度の取り扱い方である。以下にその違いを示す。

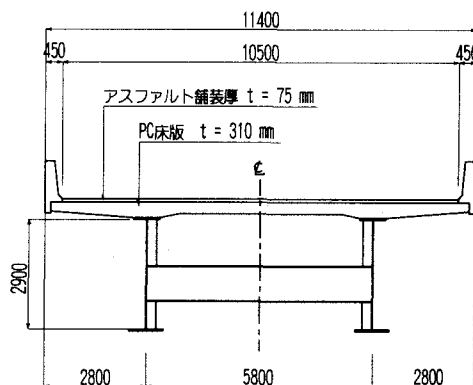


図-1 実橋モデルの横断面図

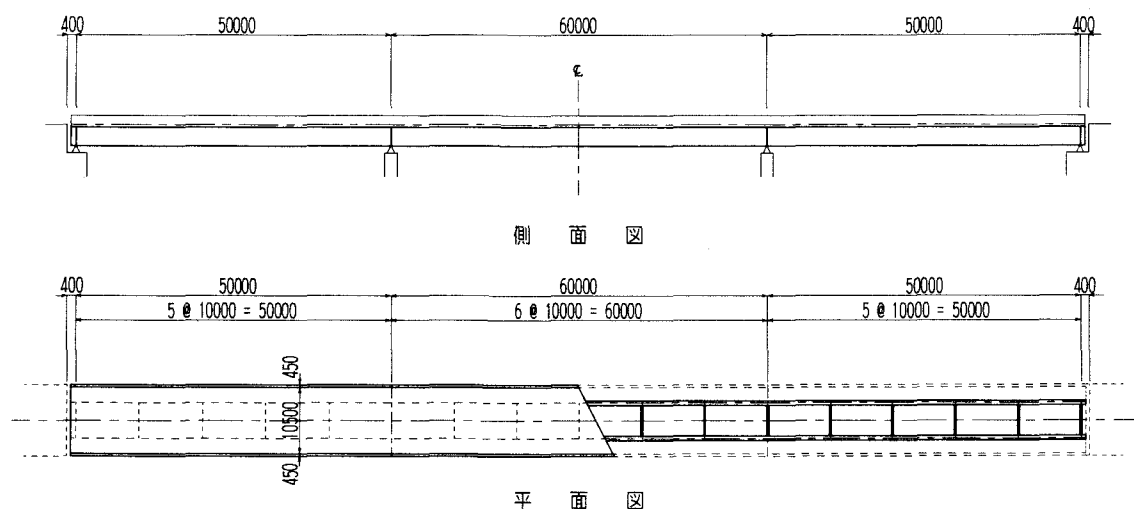


図-2 実橋モデルの一般図

(1) 橋建設計要領(案)(橋建モデル)

後死荷重および活荷重に対しては、中間支点を挟んで各支間 $0.15L$ 付近における合成断面は、橋軸方向鉄筋+鋼桁の剛度とし、その他の区間は床版コンクリートを考慮した合成断面の剛度とする。すなわち、正曲げ領域ではコンクリート床板と鋼桁との合成断面として抵抗し、負曲げ領域では、鉄筋+鋼桁断面で抵抗するという考え方である。その他の温度差荷重、乾燥収縮およびクリープに対しては、全橋に渡って床版コンクリートを考慮した合成断面の剛度を用いる。

(2) 道路橋示方書(道示モデル)

全ての荷重ケースにおいて全橋に渡って床版コンクリートを考慮した合成断面の剛度を用いる。

なお、各荷重ケースにおける床版のヤング係数およびクリープ係数は表-1に示す値を用いる。但し、合成前死荷重載荷時の床版剛度は0とする。

表-1 各荷重ケースにおける床版のヤング係数

荷重ケース	ヤング係数 $E_c(\text{tf/m}^2)$	ヤング係数比 n	クリープ係数
合成後死荷重	3.0×10^6	7	-
活荷重	3.0×10^6	7	-
クリープ	1.5×10^6	14	2
乾燥収縮	1.0×10^6	21	4
温度差荷重	3.0×10^6	7	-

2.2 荷重

解析に際しての仮定剛度および各荷重の載荷方法は文献1)を参考に以下のように決定した。なお構造解析は、鉛直荷重を1-0分配させるものとして1本梁として行い、床版打設順序については、考慮せず完成系でのみ行うものとした。

(1) 合成前死荷重 d_1 , 後死荷重 d_2 , 活荷重 $L_{\max}$, $L_{\min}$

前死荷重は鋼桁のみの断面で解析し、後死荷重と活荷重は合成断面に対して解析する。活荷重は、B活荷重を考慮し影響線載荷を行い、最大・最小値をそれぞれ算出する。

(2) 温度差

床版と主桁との温度差が全橋に渡って $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ あるものとする。温度差荷重の算出に当たっては、中間支点を挟んだ各支間 $0.15L$ の区間も床版コンクリートを考慮した合成断面と考える。

(3) 乾燥収縮

乾燥収縮による作用荷重の載荷範囲は正曲げ部部のみとし、中間支点上 $0.15L$ の区間には載荷しないものとした。

(4) クリープ

合成後死荷重の解析結果を用い、床版に作用している軸方向圧縮力に対してクリープによる作用荷重を求める。ただし、引張力については載荷しない。

2.3 断面照査

断面照査においては、両規定とも同様の考え方である。それは、床版コンクリートの組合せ後の応力が圧縮の場合は、床版断面を考慮した合成断面にて応力照査を行い、床版コンクリートの組合せ後の応力が引張応力の場合は、床版断面を無視した橋軸方向鉄筋+鋼桁断面によって応力照査を行うものである。また、両規定とも応力の照査式には総断面力法が用いられている。

2.4 断面照査結果

表-2に道示モデルおよび橋建モデルの端支間部、中間支点上および中間支間部の応力照査結果を示す。なお、照査断面は両モデルの違いによる応力の違いを検討するため両モデルとも同一断面で照査を行った。表より明らかなように、中間支点上における道示モデルの各組合せ後の鋼桁応力は橋建モデルに比べて最大で 120 kgf/cm^2 程

表-2 現行設計基準による断面照査結果

(kgf/cm²)

		端支間部				中間支点上				中間支間部			
		道示モデル		橋建モデル		道示モデル		橋建モデル		道示モデル		橋建モデル	
		床版	鋼桁	床版	鋼桁	床版	鉄筋	鋼桁	床版	鉄筋	鋼桁	床版	鋼桁
(1) 合成前死荷重	σ_u	-	-1069	-	-1069	-	1114	-	1114	-	-810	-	-810
	σ_l	-	937	-	937	-	-1067	-	-1067	-	768	-	768
(2) 合成後死荷重	σ_u	-9	-29	-10	-32	17	325	260	15	283	226	-7	-23
	σ_l	-5	220	-6	241	12	291	-305	10	253	-266	-4	217
(3) 活荷重	σ_u	-31	-104	-32	-107	34	630	504	29	547	437	-31	-99
	σ_l	-18	782	-19	804	23	563	-592	20	488	-513	-17	813
(4) クリーフ	σ_u	4	-67	4	-72	1	22	18	1	-28	23	3	-47
	σ_l	0	8	1	7	1	20	-21	1	-25	-27	1	-15
(5) 乾燥収縮	σ_u	8	-247	8	-247	6	177	142	6	177	142	12	-193
	σ_l	9	-14	9	-14	5	158	-166	5	158	-166	12	-174
(6) 温度差	σ_u	7	-194	7	-194	21	607	-54	21	607	-54	16	-172
	σ_l	9	-67	9	-67	21	682	-187	21	680	-187	14	-283
	σ_u	-7	194	-7	194	-21	-607	54	-21	-607	54	-16	172
	σ_l	-9	67	-9	67	-21	-682	187	-21	-680	187	-14	283
(1)+(2)+(3)	σ_u	-40	-1202	-42	-1208	51	955	2178	44	830	2077	-38	-932
	σ_a	-100	-2100	-100	-2100	-	1600	2600	-	1600	2600	-100	-2100
	σ_l	-23	1939	-25	1982	35	854	-1964	30	741	-1846	-21	1798
	σ_a	-100	2100	-100	2100	-	1600	-2197	-	1600	-2197	-100	2100
(1)+(2)+(3) +(4)+(5)	σ_u	-28	-1516	-30	-1527	58	1154	2338	51	979	2242	-23	-1172
	σ_a	-100	-2415	-100	-2415	-	1600	2600	-	1600	2600	-100	-2415
	σ_l	-14	1933	-15	1975	41	1032	-2151	36	874	-2039	-8	1609
	σ_a	-100	2100	-100	2100	-	1600	-2197	-	1600	-2197	-100	2100
(1)+(2)+(3) +(4)+(5)+(6)	σ_u	-21	-1710	-23	-1721	79	1761	2284	72	1586	2188	-7	-1344
	σ_a	-100	-2730	-100	-2730	-	1840	2990	-	1840	2990	-100	-2730
	σ_l	-5	1866	-6	1908	62	1714	-2338	57	1554	-2226	6	1326
	σ_a	-100	2415	-100	2415	-	1840	-2527	-	1840	-2527	-100	2415
(1)+(2)+(3) +(4)+(5)-(6)	σ_u	-35	-1322	-37	-1333	37	547	2392	30	372	2296	-39	-1000
	σ_a	-100	-2730	-100	-2730	-	1840	2990	-	1840	2990	-100	-2730
	σ_l	-23	2000	-24	1908	20	350	-1964	15	194	-1852	-22	1892
	σ_a	-100	2415	-100	2415	-	1840	-2527	-	1840	-2527	-100	2415

度大きい値となっているのに対し、その他の端支間部および中間支間部においては橋建モデルの方が最大で 100 kgf/cm² 程度大きな値となる。これは、橋建モデルでは構造解析時の断面剛度が、中間支点から各支間 0.15L の区間の床版コンクリート剛度を無視し鉄筋+鋼桁の剛度を用いるため、中間支点部の断面剛度が他の領域の断面剛度に比べて小さくなり、負の曲げモーメントのピーク値が下がり逆に正曲げ領域への断面力の配分が大きくなるためである。

中間支点上の鉄筋応力についても同様の傾向があり、道示モデルの方が最大で 180 kgf/cm² 程度大きくなった。プレストレスしない連続合成桁の場合、中間支点上の鉄筋応力が厳しくなるため、橋建モデルの方が設計上有利となるようであるが、いずれの設計基準によっても大差はないと言える。また、ずれ止めの計算には、着目点の曲げモーメント符号に関わらず床版コンクリートを有効として扱わなければならないことを考えると、全ての荷重ケースにおいて合成断面の剛度が同じとなる道示モデルの方が合理的であると思われる。

3. 一定せん断流パネル理論を用いた設計

先に示した総断面力法では、載荷荷重によって異なるヤング係数比を用いた剛度算出という煩雑な計算が必要となってくる。そこで本文では、合成部材を 1 部材でモデル化するのではなくコンクリート部材と鋼部材とを独立した 2 部材でモデル化し、一定せん断流パネル理論に基づいて解析する方法を設計に適用し、その有用性について検討する。

3.1 解析の概要³⁾

本解析法は図-3に示すように、コンクリート床版と鋼桁との図心間に一定せん断流パネルを挿入し、そのパネルの四辺には線形に変化する軸力を伝える縁部材を取り付ける。一定せん断流パネルは、床版と鋼桁間に働く水平せん断力を伝達し、一方四辺に取り付けた縁部材は曲げに伴う垂直応力に対して抵抗するとともに床版と鋼桁との間隔

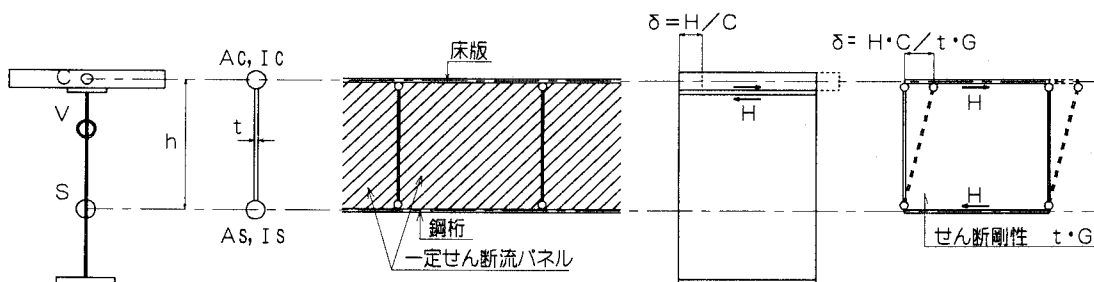


図-3 合成桁のモデル化

を保持する。従って、一定せん断流パネルの板厚（せん断剛性）を変化させることにより、上下部材間の弾性結合の影響を考慮できる。また、従来の総断面力法では、各荷重ケースによって床版コンクリートのヤング係数が異なるため、組合せ荷重ケースに対する応力を算出する場合、各荷重ケース単体の応力を算出した後に足し合わせなければならないが、本解析では床版および鋼桁の各部材毎に作用する断面力が算出されるため断面力段階での組合せが可能となり、各荷重ケース単体による応力は算出しなくても良いという利点がある。さらに、温度差荷重や床版のクリープ、乾燥収縮による影響を直接床版部材を伸縮させることによって解析できるため、荷重データの作成や、応力への変換作業が大幅に単純化できる点や、ずれ止めに作用する水平せん断力を直接算出できるなど利点が多い。

3. 2モデル化⁴⁾

- 1) コンクリート床版および鋼桁の梁部材は、それぞれの図心位置で一定せん断流パネルの縁部材としてモデル化され、それらの剛性には断面積と断面2次モーメントを考慮する。そのため、載荷荷重ケースによって各部材の断面剛性を変化させる必要がなく、コンクリートのヤング係数のみを変化させればよい。
- 2) コンクリート床版と鋼桁との図心を結ぶ縁部材の剛性には、断面積（仮定の大きな値）のみ考慮し、両端はピン結合とする。通常断面変化に伴ってこの2部材の図心間隔は多少異なるが、本試設計では解析モデルの簡素化のため全橋に渡って一定とし、各断面の図心間隔の平均値 $h = 1.858\text{m}$ を用いた。
- 3) 橋軸方向の要素分割は横桁あるいは対傾構間隔および現場継手位置を基本とした。

3. 2一定せん断流パネル板厚の算定

コンクリート床版と鋼桁との弾性結合の影響は、一定せん断流パネルの板厚 t として以下の式で算

出できる。コンクリート床版と鋼桁間に水平せん断力 $H(\text{tf/m})$ が作用したときのずれ量は、

$$\delta = H / C \quad (1)$$

C : ずれ止めのバネ定数 (tf/m^2)

一定せん断流パネルにせん断力 H が作用した場合のせん断変形量は、

$$\delta = H \cdot h / (t \cdot G) \quad (2)$$

h : 鋼桁とコンクリート床版との図心間隔 (m)

G : 一定せん断流パネルのせん断弾性係数

$$= 8.1 \times 10^6 \text{ tf/m}^2$$

(1), (2) 式より

$$t = C \cdot h / G \quad (3)$$

一定せん断流パネルの板厚は、ずれ止めのバネ定数が解っていれば(3)式にて算出することができる。本試設計では、コンクリート床版と鋼桁との合成の評価に対して、一般的によく使われているフレキシビリティ一定数 S^3 より一定せん断流パネルの板厚を求めた。つまり、実橋の合成桁のフレキシビリティ一定数が、 $S=0.6$ 程度であることから次式を用いてバネ定数を算出し、板厚を $t = 0.127\text{ m}$ とし、全橋に渡って一定とした。

$$S = \sqrt{k_0 / C} \quad (4)$$

k_0 : 基準バネ定数 ($= 2.0 \times 10^5 \text{ tf/m/m}$)

3. 4構造解析および断面照査

解析モデルにおける中間支点部の床版コンクリートについては先に示した道路橋示方書に基づいたモデルとする。すなわち、全ての荷重ケースにおいて全橋に渡って床版コンクリートの剛性を考慮したモデルである。図-4に解析に使用した骨組み図を示す。

解析結果は、床版および鋼桁の断面力が個別に求められるため、応力の算出に当たってはそれぞれの部材に作用する軸力と曲げモーメントから直接算出することができる。しかし、中間支点上のように負曲げ領域となる断面では、引張力が作用する床版コンクリートを無視して、鉄筋+鋼桁断面にて照査を行わなければならない。このように、解析時と応力算出時とで断面剛度を変えることは、

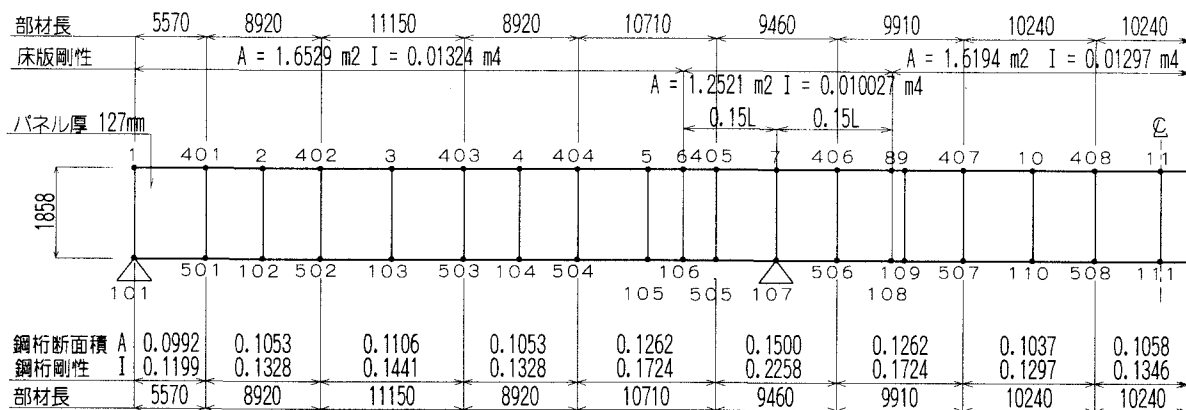


図-4 骨組み図

本解析法のようなモデル化を行った場合、取り扱いが難しい。この解決策として、個別部材の断面力を一旦合成断面の断面力に置き換え、その後鉄筋断面と鋼桁断面との分担率に基づいて各部材の断面力を算出し直すこととした。具体的な算出方法を以下に示す。

合成断面（床版+鋼桁）の断面力（図-5 参照）

$$\Sigma M = M_c + M_s + N \cdot h \quad (5)$$

$$\Sigma Q = Q_c + Q_s + S \cdot h \quad (6)$$

M_c : 床版の曲げモーメント

M_s : 鋼桁の曲げモーメント

N : 床版および鋼桁の軸力

h : 床版と鋼桁の偏心距離

Q_c : 床版のせん断力

Q_s : 鋼桁のせん断力

S : 一定せん断流パネルのせん断流

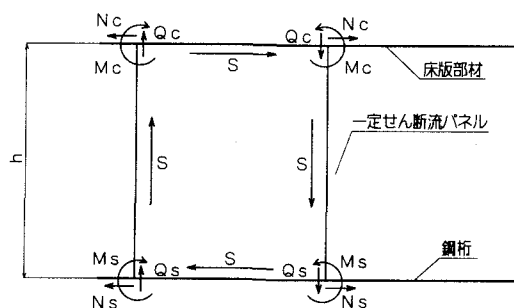


図-5 合成断面の断面力

表-3 断面力の算出結果

表-4 一定せん断流パネル理論に基づいた解析を用いた断面照査結果
(kgf/cm²)

		端支間部		中間支点上				端支間部		中間支点上			中間支間部			
床版剛度		考慮		考慮 鉄筋				床版 鋼桁		床版 鉄筋 鋼桁			床版 鉄筋 鋼桁			
前死荷重		M tf・m	974.9	-1849.2		(1) 合成前死荷重	σ u	-	-1068	-			1403	-	-807	
		Q tf	-24.8	-180.5			σ l	-	936	-			-1059	-	766	
後死荷重	床版	Mc tf・m	1.5	-2.1	-0.49	(2) 合成後死荷重	σ u	-9	-29	17	321	255	-7	-147	-20	
		Nc tf	-113.2	167.6	95.8		σ l	-5	218	10	285	-305	-4	-126	182	
		Qc tf	0.0	-3.0	-0.05	(3) 活荷重	σ u	-31	-107	32	616	490	-30	-635	-85	
							σ l	-18	773	20	547	-585	-17	-544	787	
	鋼桁	Ms tf・m	120.2	-286.0	-420.8	(4) クリープ	σ u	2	-66	1	22	18	2	59	-48	
		Ns tf	113.2	-167.6	-95.8		σ l	2	9	1	20	-21	2	73	12	
		Qs tf	5.3	-50.3	-40.3	(5) 乾燥収縮	σ u	8	-265	6	175	139	12	437	-205	
							σ l	9	-2	5	156	-159	12	368	-152	
	S tf・m	4.9	-2.2	-9.2	+ -	σ u	7	-195	21	593	-58	15	393	-180		
	Σ M tf・m	332.0	-599.4	σ l		9	-64	21	670	-168	14	447	-260			
	Σ Q tf	14.4	-57.4	σ u		-7	195	-21	-593	-58	-15	-393	180			
				σ l		-9	64	-21	-670	168	-14	-447	260			
活荷重	床版	Mc tf・m	5.4	-4.1	-0.9	(1)+(2)+(3)	σ u	-40	-1204	49	937	2148	-37	-782	-912	
		Nc tf	-400.2	327.5	183.8		σ a	-100	-2100	-	1600	2600	-100	-2100	-100	
		Qc tf	-0.2	-7.5	-0.12		σ l	-23	1927	30	832	-1949	-21	-670	1735	
	鋼桁	Ms tf・m	428.0	-537.2	-807.2		σ a	-100	2100	-	1600	-2197	-100	2100	-100	
		Ns tf	400.2	-327.5	-183.8		σ u	-30	-1535	56	1134	2305	-23	-286	-1165	
		Qs tf	-19.5	-109.5	-103.3		σ a	-100	-2415	-	1600	2600	-100	-2415	-100	
	S tf・m	-17.2	-16.2	-23.5	σ l		-12	1934	36	1008	-2129	-7	-229	1571		
	Σ M tf・m	1176.8	-1149.7	(1)+(2)+(3) +(4)+(5)	σ a		-100	2100	-	1600	-2197	-100	2100	-100		
Σ Q tf	-51.7	-147.1	σ u		-23	-1730	77	1727	2247	-8	107	-1345				
死 + 活	床版	Mc tf・m	6.9		-6.2	-1.4	(1)+(2)+(3) +(4)+(5)+(6)	σ a	-100	-2730	-	1840	2990	-100	-2730	-100
		Nc tf	-513.4		495.1	279.6		σ l	-3	1870	57	1678	-2297	7	218	1311
		Qc tf	-0.2		-10.5	-0.2		σ a	-100	2415	-	1840	-2527	-100	2415	-100
	鋼桁	Ms tf・m	1523.1		-2672.4	-3077.2		σ u	-37	-1340	35	541	2247	-38	-679	-985
		Ns tf	513.4		-495.1	-279.6		σ a	-100	-2730	-	1840	2990	-100	-2730	-100
Qs tf		-39.0	-340.3		-324.1	σ l	-21	1998	15	338	-1961	-21	-676	1831		
S tf・m	-12.3	-18.4	-32.7	(1)+(2)+(3) +(4)+(5)-(6)	σ a	-100	2415	-	1840	-2527	-100	2415	-100			
Σ M tf・m	2483.7	-3598.3														
Σ Q tf	-62.1	-385														

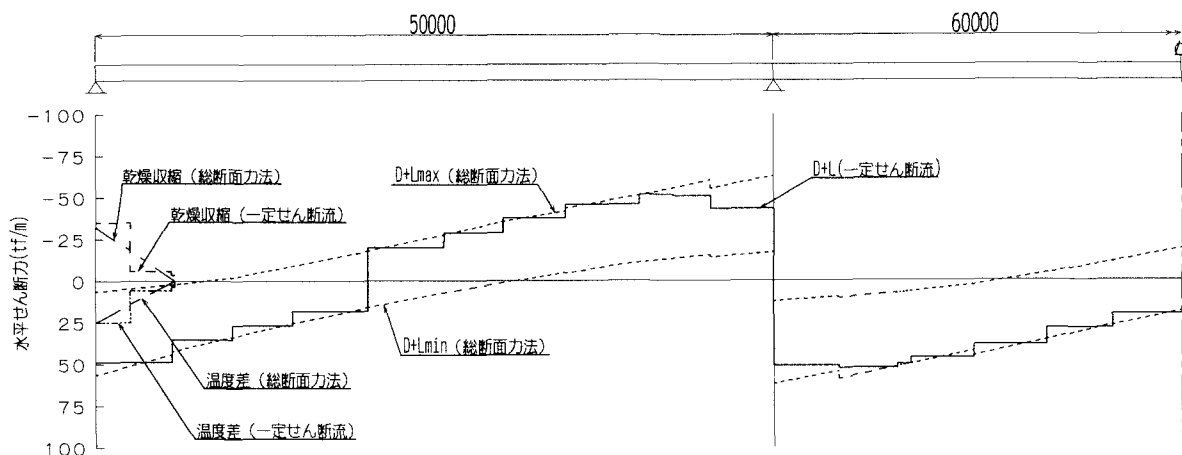


図-6 水平せん断力図

ん断力が作用している。このことから、支間部では合成断面全体に作用するせん断力の内ずれ止めの負担分が大きく、逆に中間支点上では鋼桁の負担分が大きくなっていることが解る。またどちらの断面においても鋼桁には合計せん断力に比べ小さなせん断力しか作用しないことから、総断面力法ではせん断力および合成応力の照査に対して安全側の設計がなされていることが解る。

表-4に端支間部、中間支点上および中間支間部の断面照査結果を示す。表中には、各荷重ケース単体に対する各部材の応力も記載してあるが、これは従来の総断面力法による断面照査結果と比較するためである。表-3および表-2の道示モデルの応力を比較するとほぼ同一値を採っていることが解る。両者の応力度に若干の違いがあるがこの原因としては、解析モデルの作成時に床版部材と鋼桁部材を結ぶ縁部材の高さ h を、各断面における各部材の図心間隔とせず、全橋に渡って一定値(図心間隔の平均値)を用いたためと考えられる。しかし、その影響も組合せ後の応力で最大約 40kgf/cm^2 程度であり、本試設計モデルのように桁高が変化しない場合には、断面決定に大きな影響を与える要因にはならないものと思われる。

図-6に総断面力法および本解析法により算出された水平せん断力図を示す。図より明らかなように、支間部については両者の値はほぼ同一値となるが、中間支点上では本解析法による算出結果は、総断面力法の値に比べて小さくなる。先にも述べたように、本解析法ではずれ止めの弾性変形が評価できるため、中間支点上におけるずれ止めの弾性変形の影響により中間支点付近の水平せん断力が総断面力法の値に比べ小さくなるものと考えられる。また、橋端部で生じる温度差や乾燥収縮による水平せん断力についても、本解析法により直接算出された値と、道示の規定による値とよく一致している。

4. まとめ

- (1) 道路橋示方書と橋建設要領(案)とにより、プレストレスしない連続合成桁の試設計を行った結果、本設計例では両者の差異はわずかであった。解析の煩雑さを考えると全ての荷重ケースに対して全橋の床版コンクリートを有効とする道路橋示方書の方式の方が実用的であると考えられる。
- (2) 一定せん断流パネル理論に基づいた解析法を連続合成桁に適用して試設計を行った結果、総断面力法によるものと同様の結果が得られた。プレストレスしない連続合成桁のように床版と鋼桁との温度差やクリープ、乾燥収縮など複雑な設計が必要な場合は、本解析法が設計の手間を省くことができ合理的であると思われる。また、本解析法によると鋼桁のせん断力は、現行の総断面力法に比べてかなり小さくなることが解った。現行設計法では、合成断面に働く全てのせん断力を鋼桁で負担させているが、実際はずれ止めが負担するせん断力も大きく、合成断面の設計にはこの点を考慮すべきと思われる。

参考文献

- 1) 連続合成桁ワーキンググループ：PC床版を有するプレストレスしない連続合成桁，設計要領(案)，1995.
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1996.12
- 3) J.S. シムスキー：マトリックス構造解析の基礎理論，培風館，1971.
- 4) 明橋・熊谷・尾下：一定せん断流パネルを用いた鋼・コンクリート合成桁の解析法，構造工学論文集，Vol.43A,1997.3
- 5) 小松・佐々木：不完全合成格子桁橋の理論と近似計算法について，土木学会論文集，1977.3