

3. 道示による細幅箱桁橋の設計について

掘井 滋則

(株) 横河ブリッジ

道示による細幅箱桁橋の設計について

設計小委員会 設計東日本部会

掘井 滋則



1. 細幅箱桁橋の概要

- ・細幅箱桁橋の概要
- ・細幅箱桁橋の実績

2. 直線桁の設計

- ・横荷重の照査

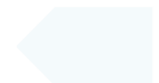
3. 曲線桁の設計

- ・曲線桁の適用限界

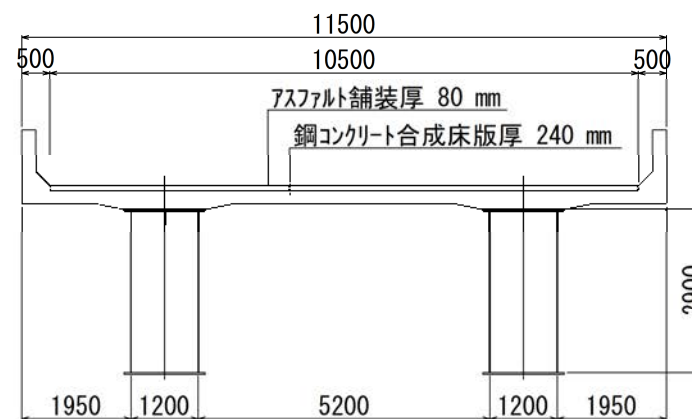
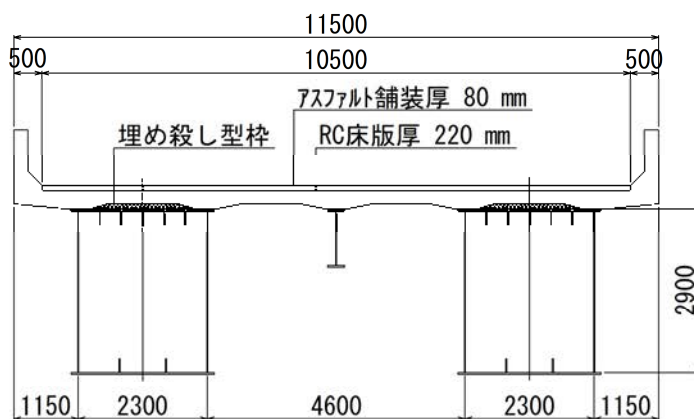
4. 曲線桁の設計上の留意点

- ・ずれ止めの設計
- ・そりねじり応力
- ・横桁取付部の設計

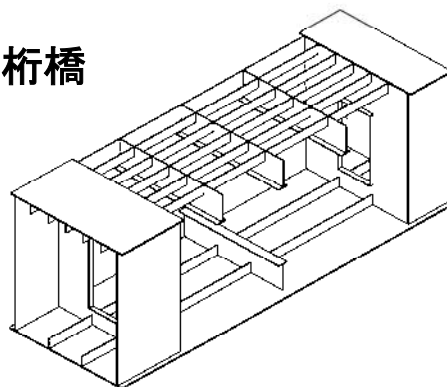
5. まとめ



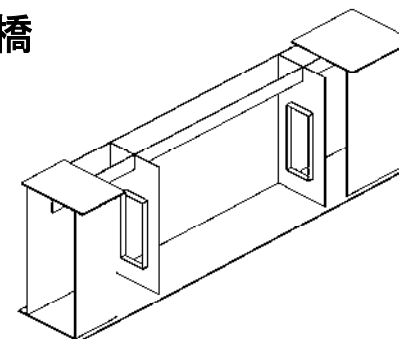
1 細幅箱桁橋の概要



従来箱桁橋

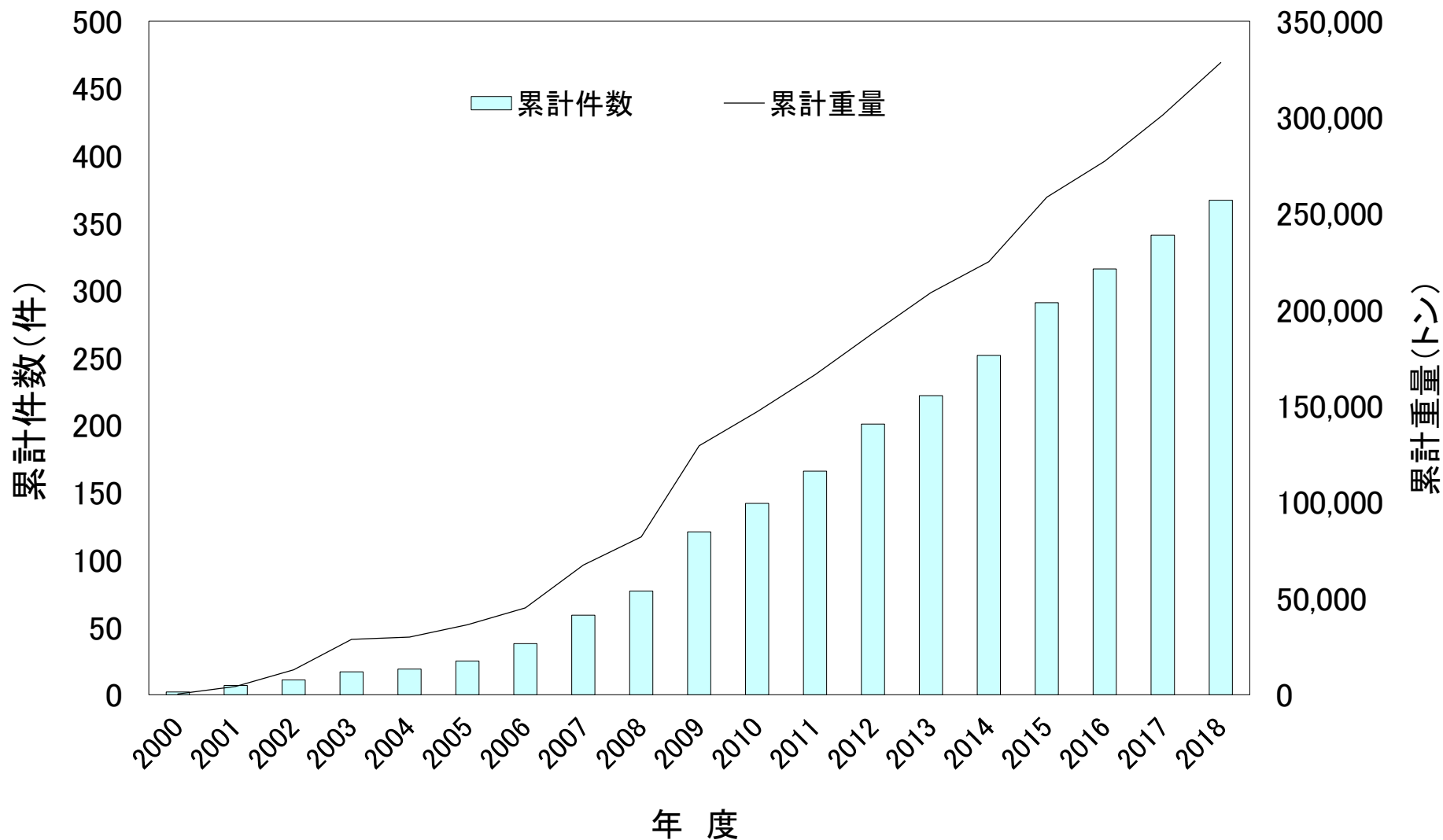


細幅箱桁橋



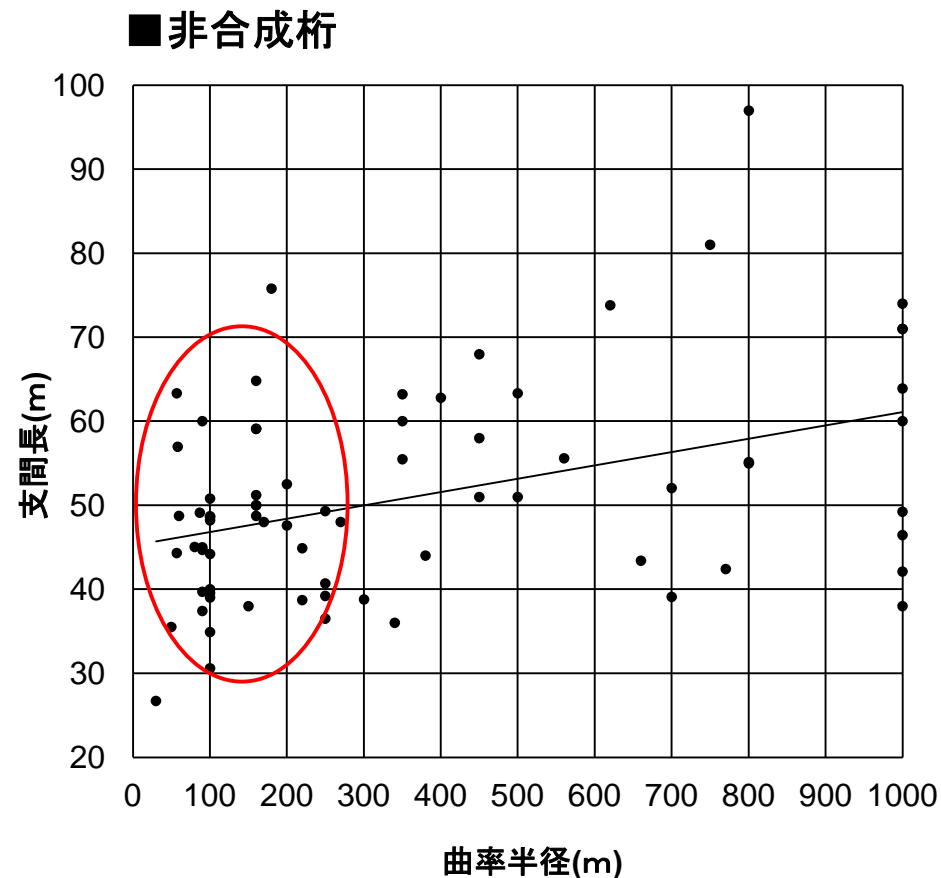
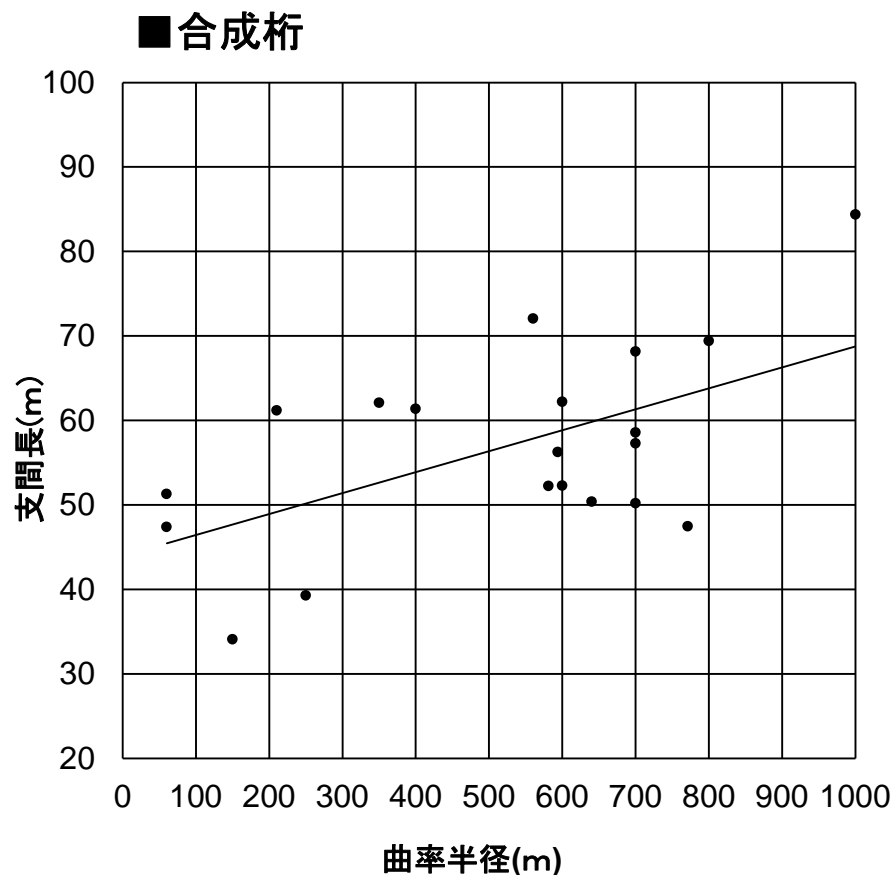
- ①箱桁の細幅化による主桁構造の合理化
箱幅の細幅化 ⇒ フランジの厚板化 ⇒ 縦リブ数の削減, 横リブの省略
- ②鋼コンクリート合成床版・プレストレストコンクリート床版の採用
床版の長支間化 ⇒ 床組構造(縦桁, ブラケット)の省略

1 細幅箱桁橋の実績

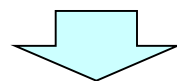


※当協会調べ

1 曲線を有する細幅箱桁橋の実績



従前では非合成桁として設計されてきた比較的曲率半径が小さい細幅箱桁橋も、これからは、床版コンクリートと鋼桁の合成作用を適切に考慮して設計する必要がある。

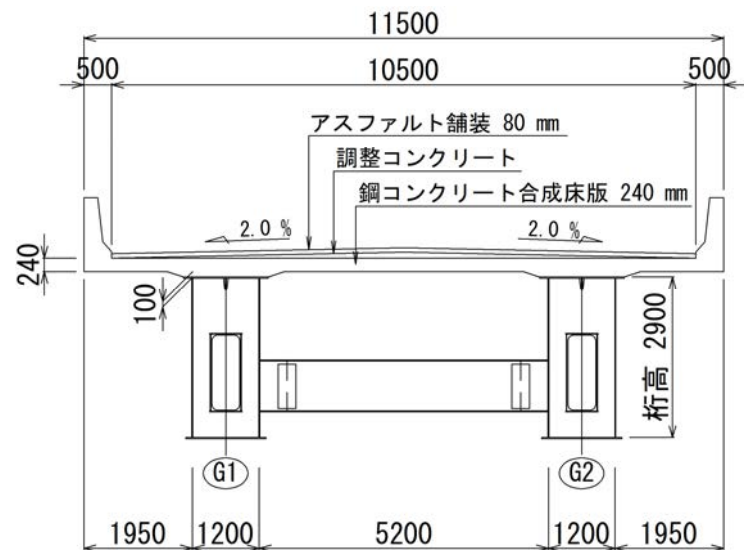


床版コンクリートと鋼桁の合成作用を考慮した試設計を行うとともに、その留意点を検証。

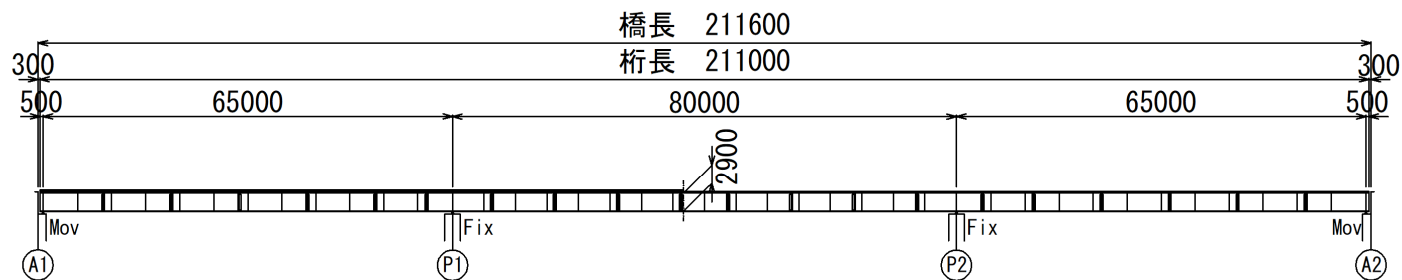
2 直線桁の設計

■設計条件

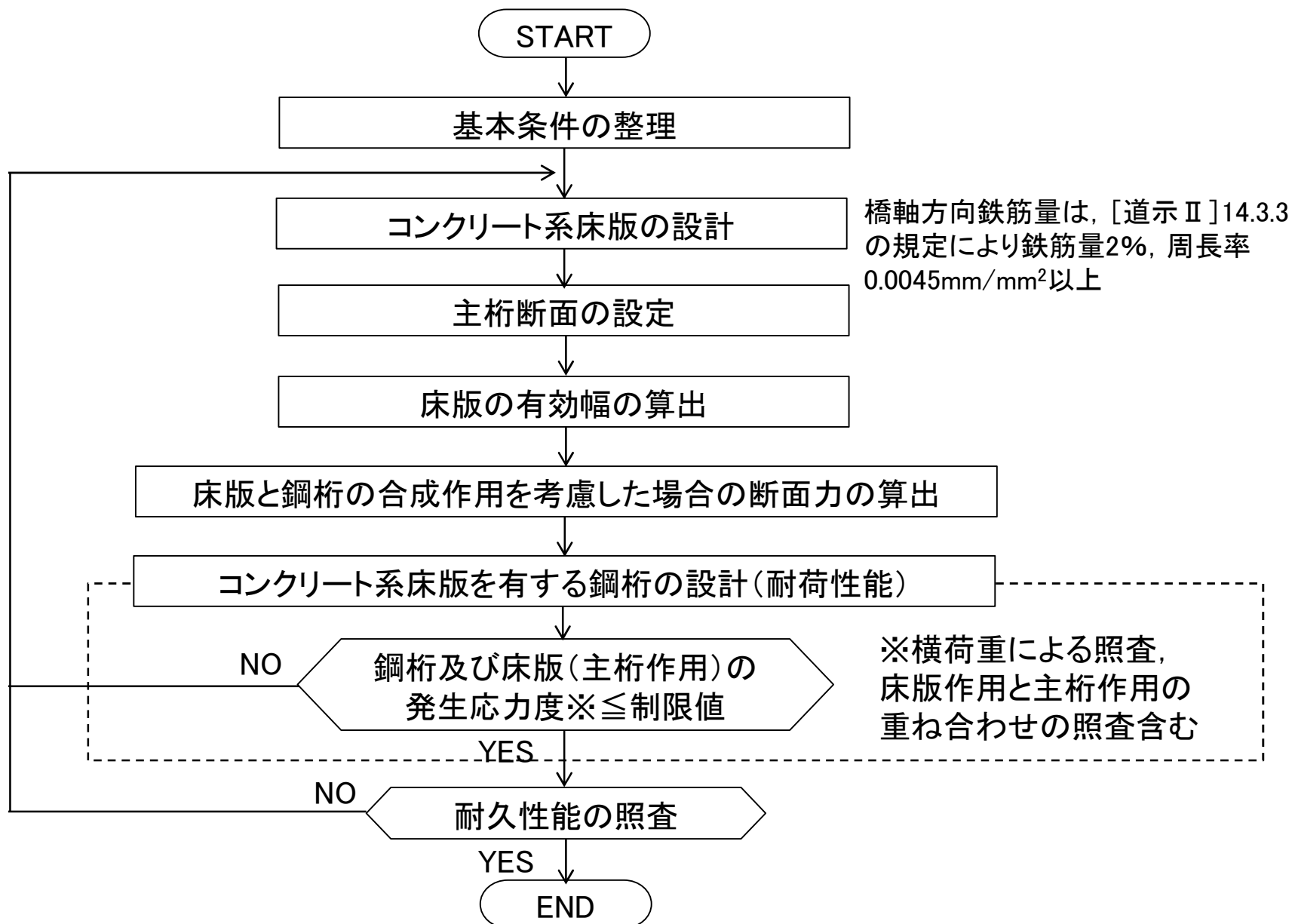
橋梁形式	3径間連続合成2主細幅箱桁橋
床版	鋼コンクリート合成床版(床版厚240mm)
総幅員	11.5m
支間長	65.0 + 80.0 + 65.0m
平面線形	R = ∞
支承条件	A1,A2 (橋軸方向可動, 橋軸直角方向固定) P1,P2 (橋軸方向弾性固定, 橋軸直角方向固定)
活荷重	B活荷重
設計震度	Kh ₁ = 0.21(レベル1地震動) Kh ₂ = 0.60(レベル2地震動) ※仮定
主要材料	鋼材 SM570,SM490Y,SM400 床版コンクリート $\sigma_{ck} = 30\text{N/mm}^2$ 鉄筋 SD345



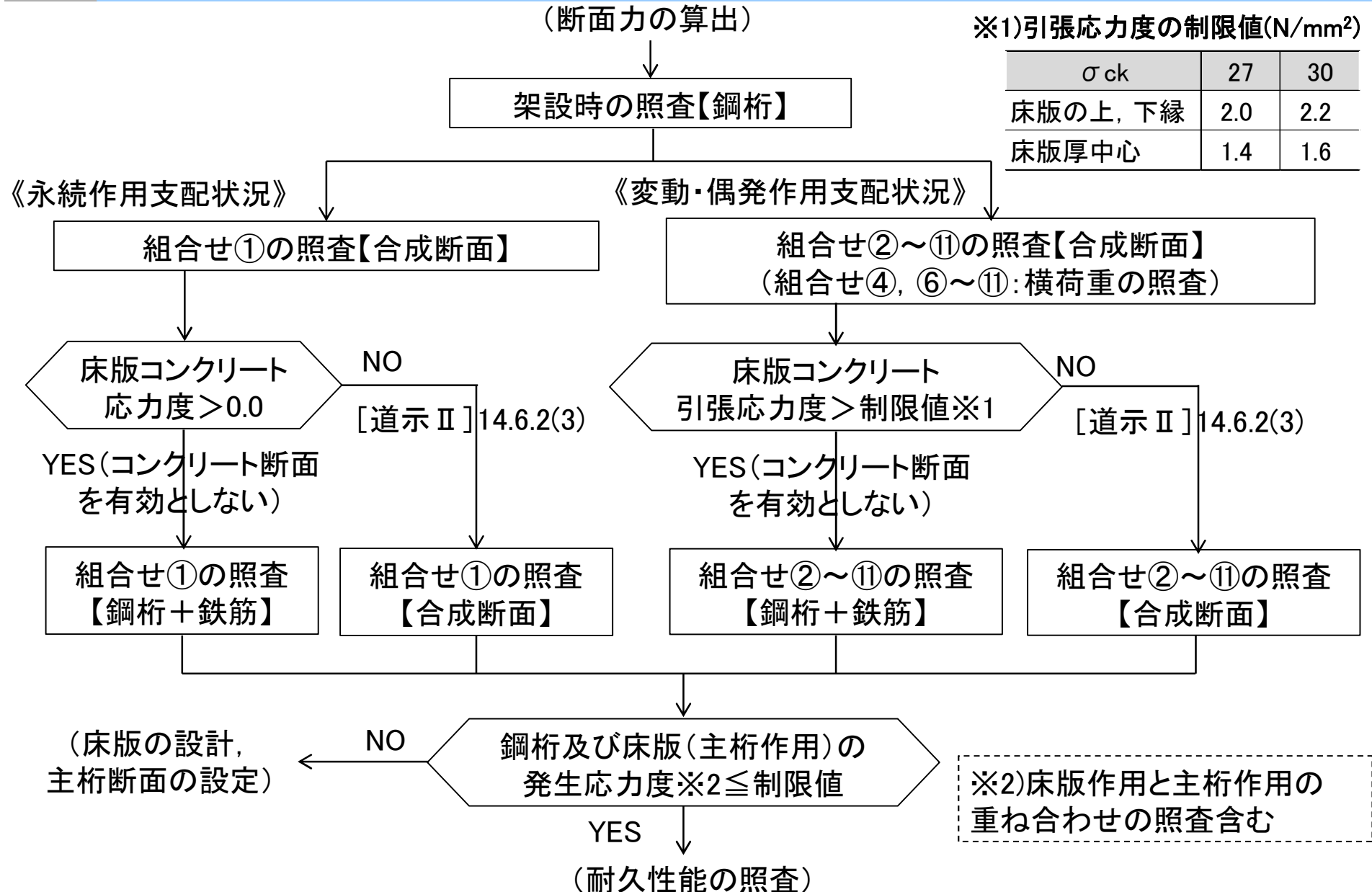
側面図



2 主桁の設計フロー



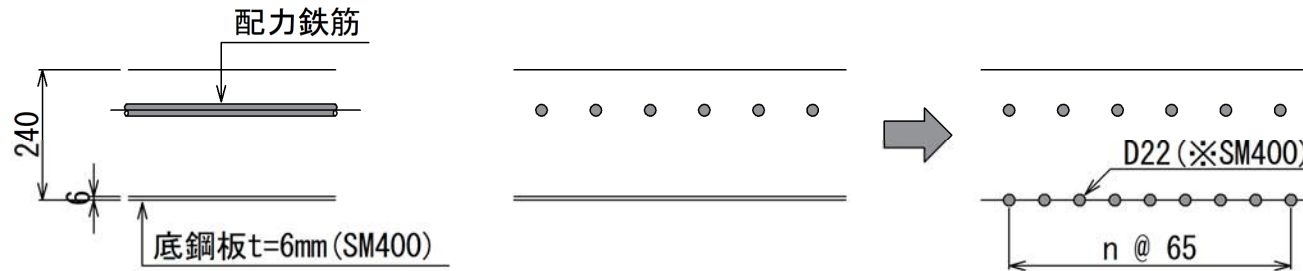
2 コンクリート系床版を有する鋼桁の設計(耐荷性能)



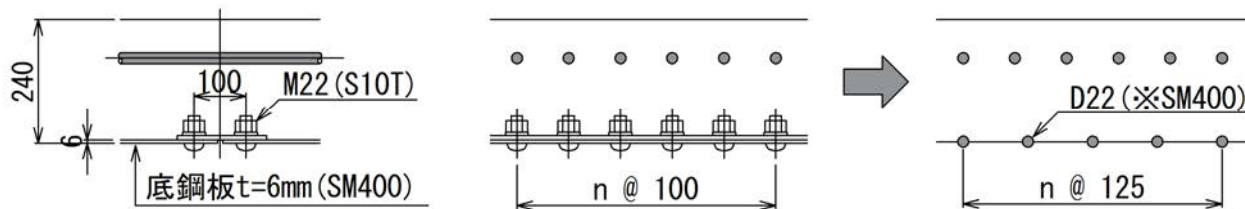
2 鋼コンクリート合成床版の底鋼板の取り扱い(1)

鋼コンクリート合成床版の底鋼板を主桁の抵抗断面に見込む設計とする。

底鋼板(t=6mm, SM400)の断面積を鉄筋断面(D22)に換算 → D22@65mm



ただし、(継手耐力 ≤ 母材の引張耐力)の場合、継手耐力を等価な鉄筋断面に換算する必要がある。



底鋼板の継手耐力(限界状態3, 変動作用支配状況) $V_{fud} = 558 \text{ kN/m}$

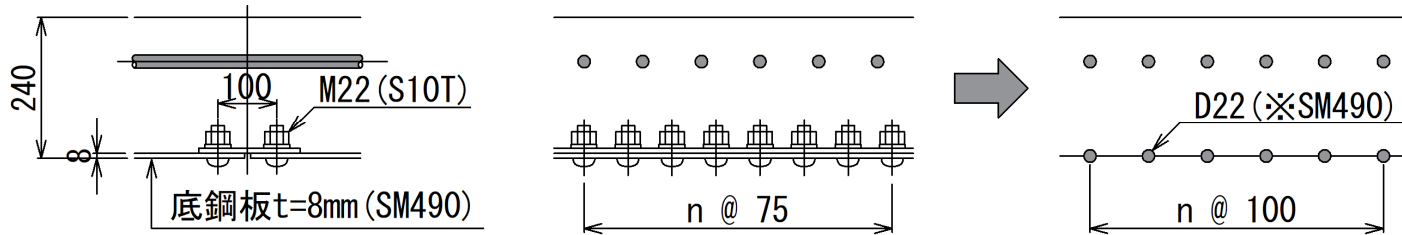
$$n = \frac{V_{fud}}{D_s \times \sigma_{tud}} = \frac{558,000}{387.1 \times 180} = 8.0 \rightarrow 8 \text{本/m (D22@125mm)}$$

D_s : 鉄筋断面積 (mm^2)

σ_{tud} : 底鋼板の引張応力度の制限値 (N/mm^2)

2 鋼コンクリート合成床版の底鋼板の取り扱い(2)

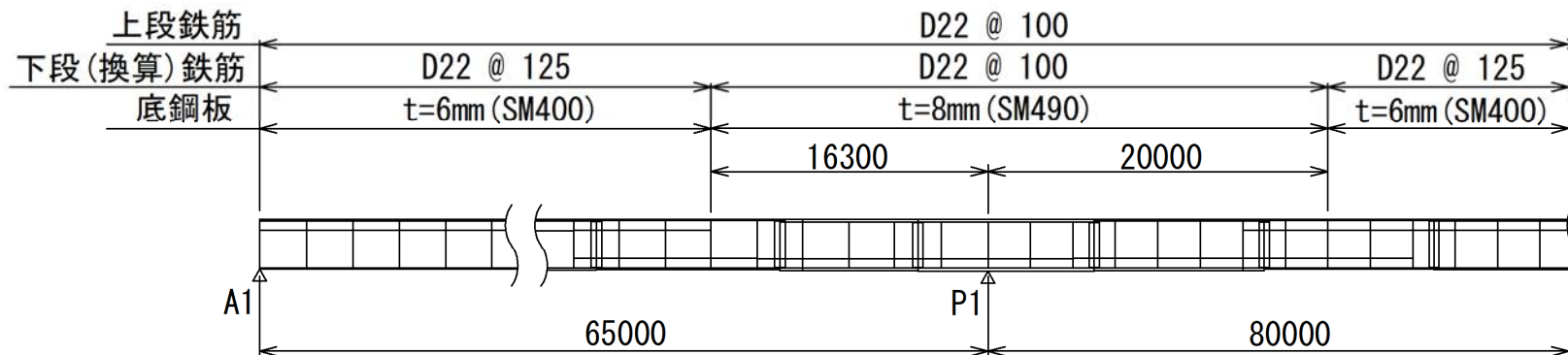
中間支点上は、横荷重により底鋼板に大きな力が作用するため、底鋼板を(t=8mm, SM490)とする。



底鋼板の継手耐力(限界状態1, 変動作用支配状況) $V_{fud} = 936 \text{ kN/m}$

$$n = \frac{V_{fud}}{D_s \times \sigma_{tud}} = \frac{936,000}{387.1 \times 241} = 10.0 \rightarrow 10 \text{本/m (D22@100mm)}$$

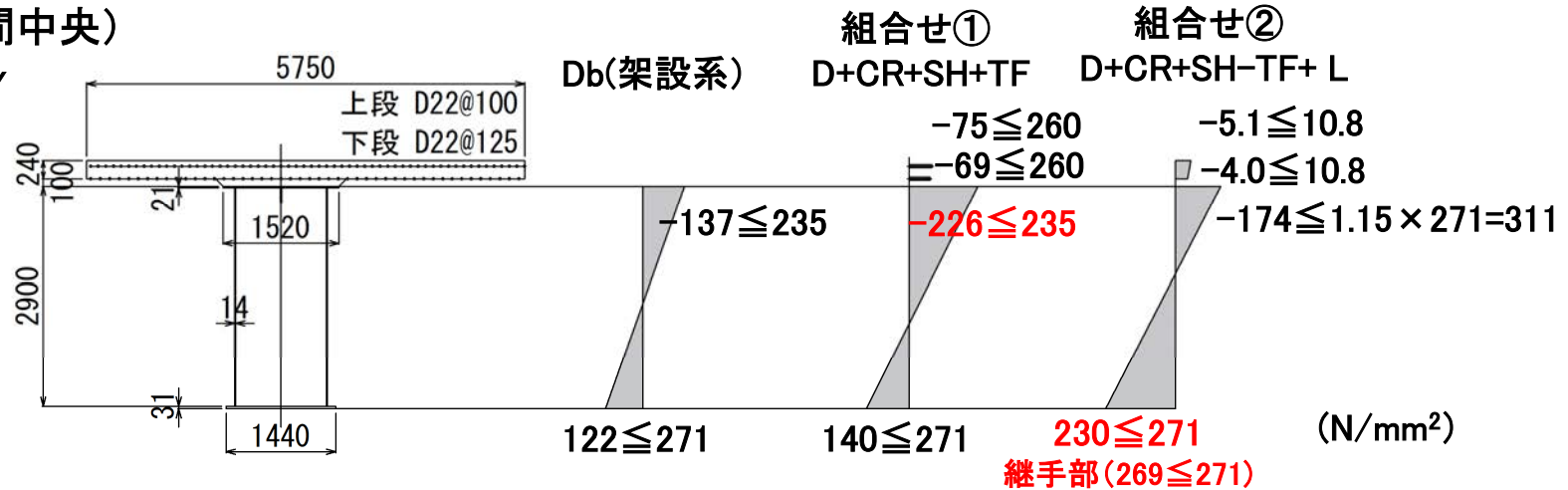
橋軸方向鉄筋の配置



2 鉛直方向の作用による主桁断面の照査

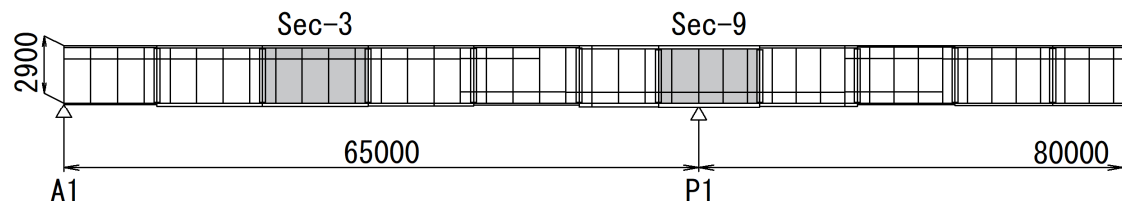
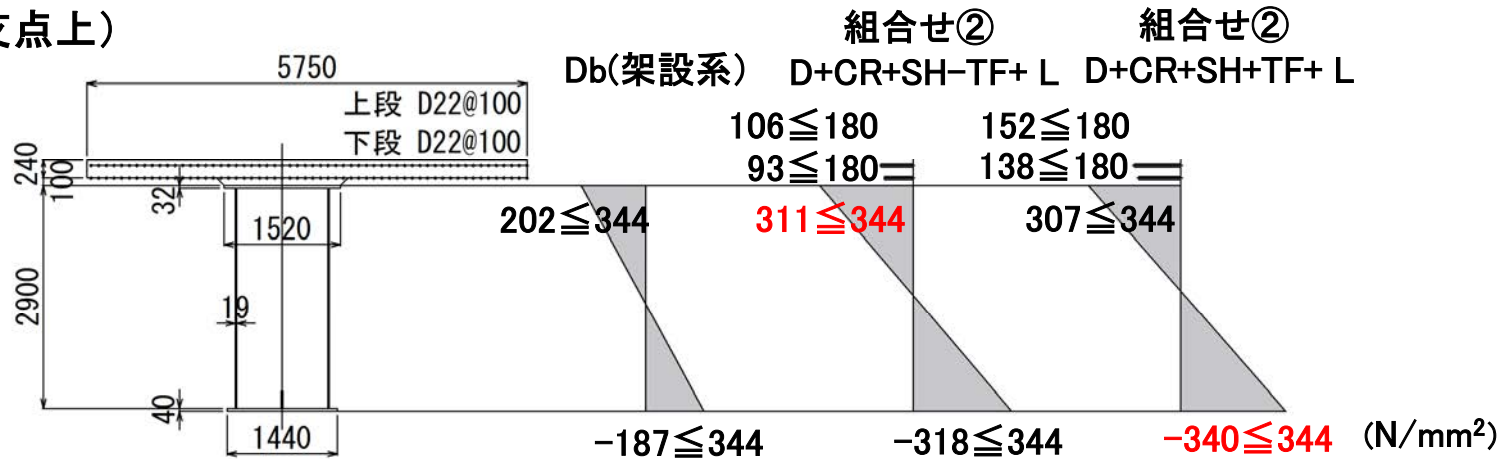
Sec-3(側径間中央)

材質:SM490Y



Sec-9(中間支点上)

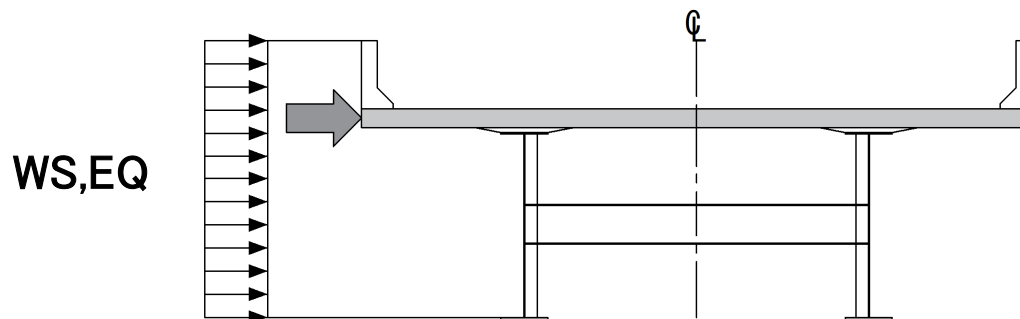
材質:SM570



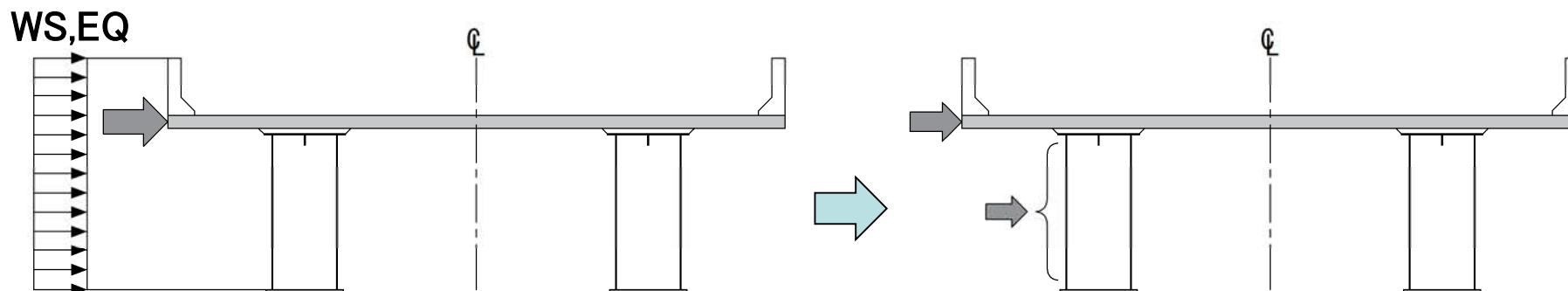
2 横荷重による主桁断面の照査

2主I桁橋のような構造の場合、横荷重に対しては全て床版で抵抗する。

→ 上部構造に作用する横荷重をすべて床版部材に載荷。



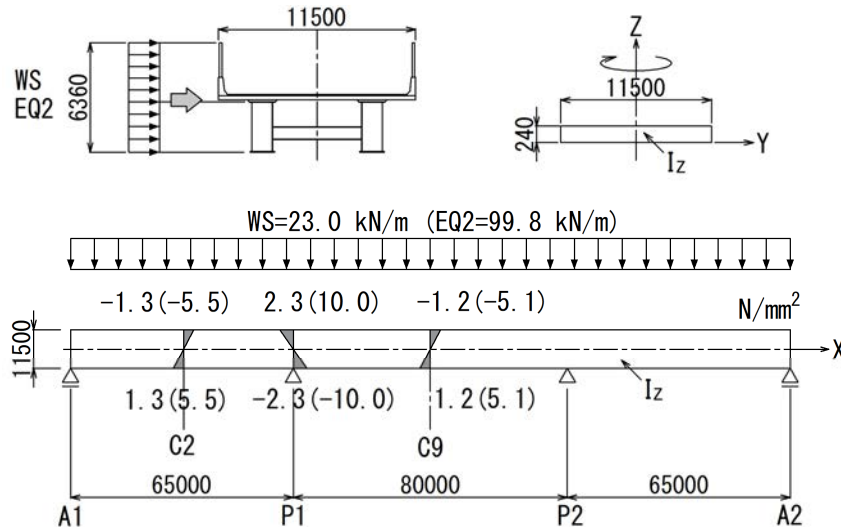
細幅箱桁橋の場合も、下図のような載荷とすれば床版に対しては安全側の設計となる。ただし、条件によっては橋軸方向鉄筋の径や間隔が非現実的なものとなる場合もある。



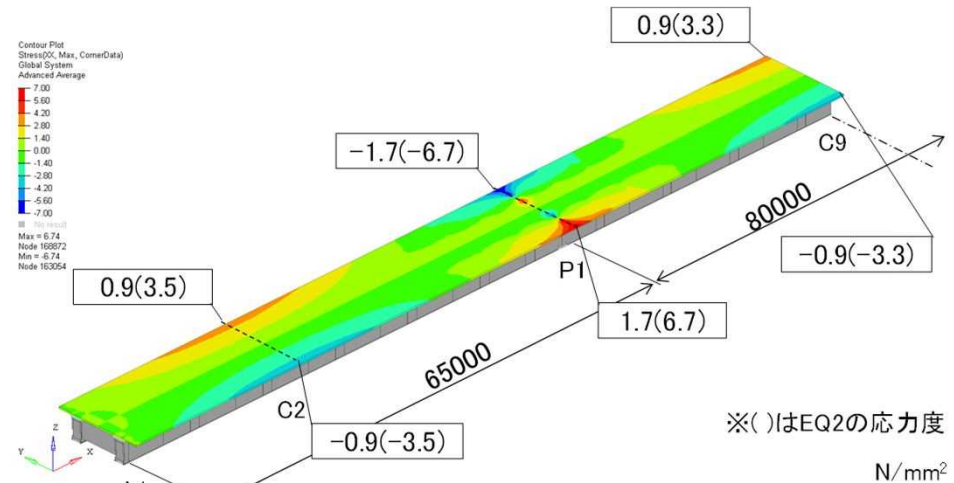
細幅箱桁橋は、鋼桁が鉛直軸回りの曲げ剛性を有する構造であることから、横荷重を床版と鋼桁に適切に分担させることとする。

2 横荷重に対する床版の分担率

床版に作用する横荷重を適切に考慮するため、有限要素解析により横荷重に対する床版の分担率を算出



①梁モデル



②有限要素解析(1/2モデル)

横荷重に対する床版の分担率

横断線		WS			EQ2(Kh ₂ =0.60)		
		C2	P1	C9	C2	P1	C9
σ _x (N/mm ²)	①梁モデル	-1.3	2.3	-1.2	-5.5	10	-5.1
	②有限要素解析	-0.9	1.7	-0.9	-3.5	6.7	-3.3
②/①		0.69	0.74	0.75	0.64	0.67	0.65
床版分担率		0.75			0.70		

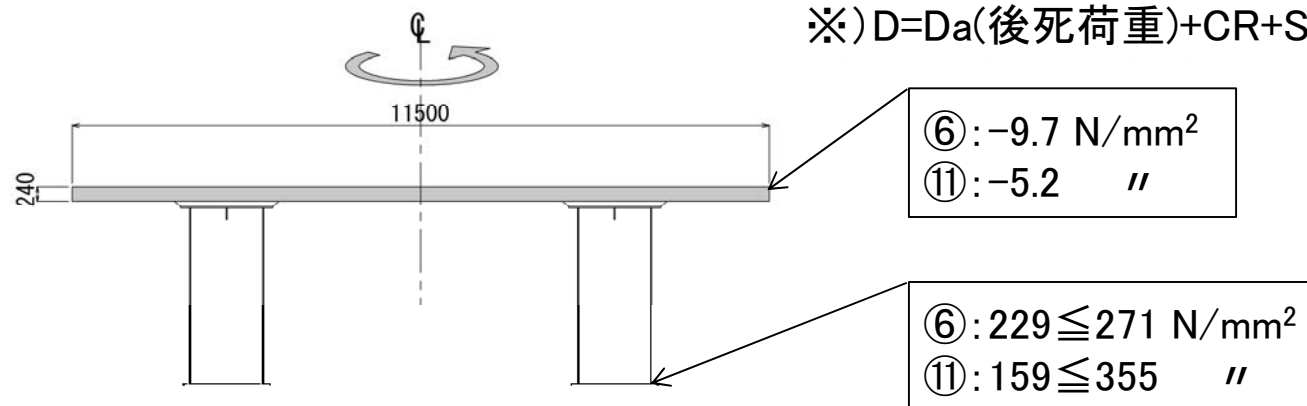
2 横荷重によるSec-3(側径間中央)の照査

Sec-3(側径間中央)のコンクリートの圧縮応力度

(N/mm²)

	床版作用		主桁作用				合計	制限値	
	L	D	TF	L	TH	WS			EQ2
⑥D+L+WS+WL	-3.7	0.2	-0.9	-4.2	-	-1.1	-	-9.7	≤ 15.8
⑪D+EQ2	-	0.2	-	-	-	-	-5.4	-5.2	≤ 10.8

※) D=Da(後死荷重)+CR+SH

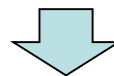


[道示Ⅱ]14.6.2(2)

偶発作用支配状況におけるコンクリートの圧縮応力度の制限値は規定されていない。

[鋼道路橋設計便覧(R2.9)]

偶発作用支配状況における制限値は、床版に生じるひび割れや応力をどの程度に留めるかも含め個別に検討する必要がある。



Sec-3は、鉛直方向の作用に対して、床版コンクリートを主桁の抵抗断面に見込んでいるため、偶発作用支配状況の制限値については、[道示Ⅱ]14.6.2(2)の変動作用支配状況の制限値を用いる。

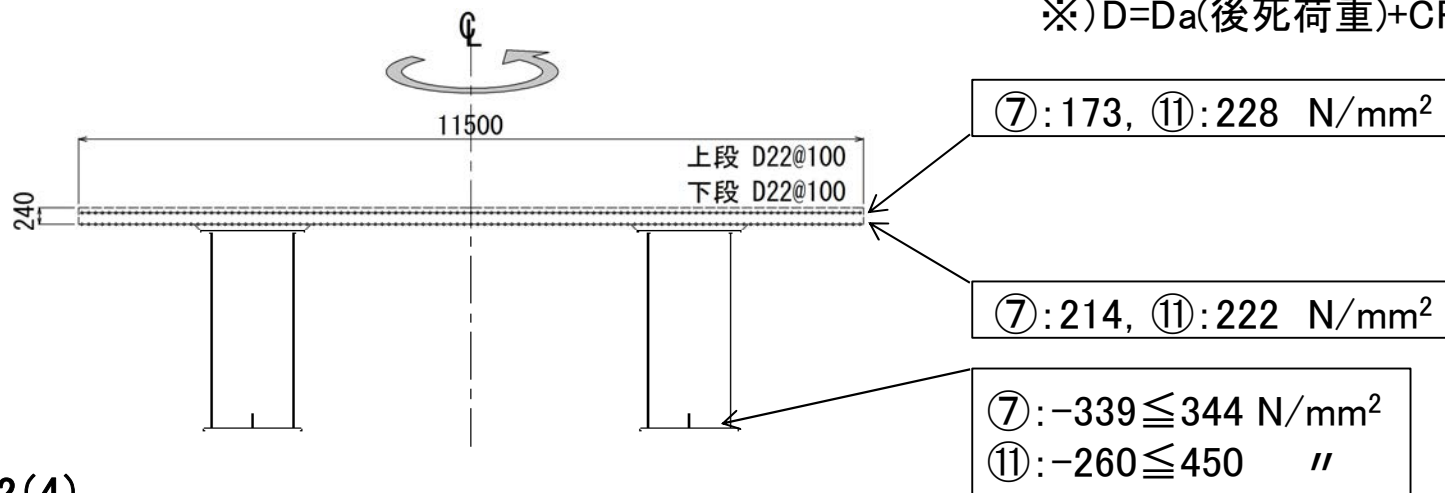
2 横荷重によるSec-9(中間支点上)の照査(1)

Sec-9(中間支点上)の鉄筋の引張応力度の照査

		床版作用							合計		制限値
		主桁作用			床版作用						
		L	D	TF	L	TH	WS	EQ2			
⑦D+L+TH +WS+WL	上段	-6	54	23	71	2	29	-	173	\leq	216
	下段	49	48	22	64	2	29	-	214	\leq	216
⑪D+EQ2	上段	-	54	-	-	-	-	174	228		-
	下段	-	48	-	-	-	-	174	222		-

(N/mm²)

※) D=Da(後死荷重)+CR+SH



[道示Ⅱ]14.6.2(4)

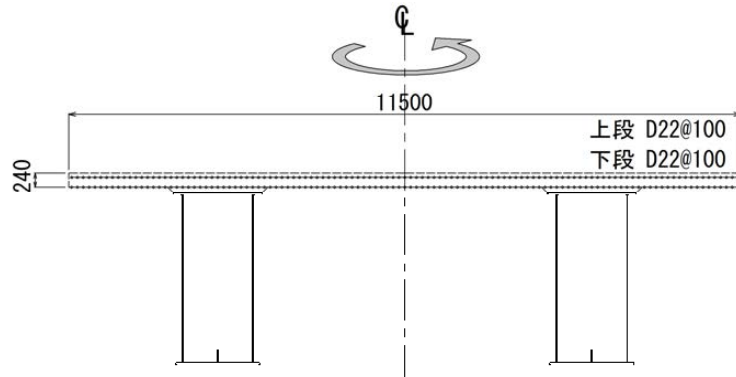
偶発作用支配状況における鉄筋の引張応力度の制限値は規定されていない。

[鋼道路橋設計便覧(R2.9)]

偶発作用支配状況における制限値は、床版に生じるひび割れや応力をどの程度に留めるかも含め個別に検討する必要がある。

2 横荷重によるSec-9(中間支点上)の照査(2)

Sec-9は、鉛直方向の作用に対して、床版コンクリートを**主桁の抵抗断面に見込んでいない。**



[道示Ⅱ]14.6.2の規定によらず、床版を鉛直軸回りの曲げモーメントを受ける鉄筋コンクリート部材として取り扱い、曲げモーメントにより床版コンクリートにひび割れが生じるものの、部材等の挙動が可逆性を有する限界の状態に留めることを限界状態1とする。

限界状態 1 → 部材降伏に対する曲げモーメントの制限値 M_{yd} [道示Ⅲ]式(5.5.1)

限界状態 3 → 部材破壊に対する曲げモーメントの制限値 M_{ud} [道示Ⅲ]式(5.8.1)

(kN・m)

	M_y		[道示Ⅲ]式(5.5.1)	[道示Ⅲ]式(5.8.1)
			$M_{yd} = \xi_1 \cdot \phi_y \cdot M_{yc}$	$M_{ud} = \xi_1 \xi_2 \phi_u M_{uc}$
⑪D+EQ2	-39,459.9	\leq	60,812.7	98,069.0

M_y : 地震の影響(EQ2)による鉛直軸まわりの曲げモーメント

M_{ud} : 部材破壊に対する曲げモーメントの制限値

M_{yd} : 部材降伏に対する曲げモーメントの制限値

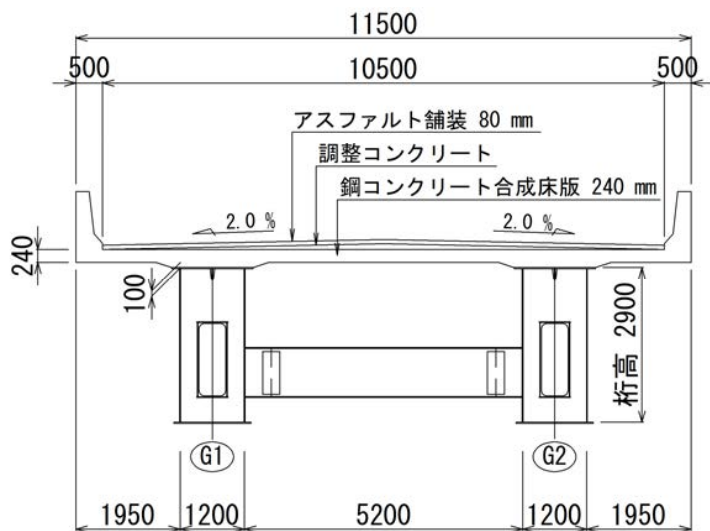
M_{uc} : 破壊抵抗曲げモーメントの特性値

M_{yc} : 降伏曲げモーメントの特性値

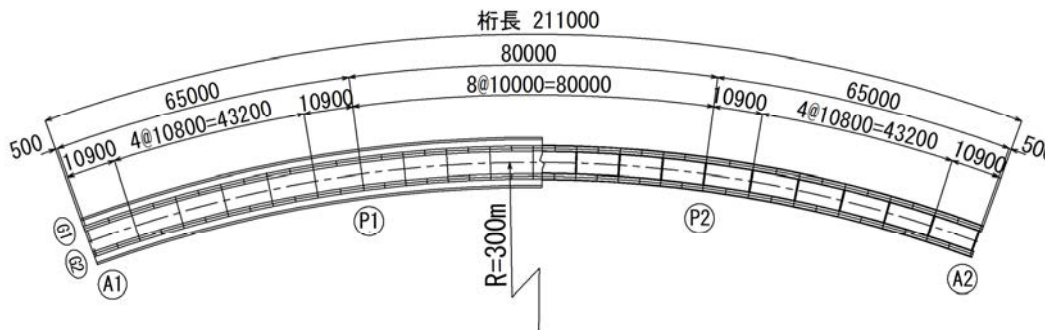
Sec-9は、組合⑦(D+L+TH+WS+WL)が、制限値に対してもっともクリティカルとなる。

3 曲線桁の設計

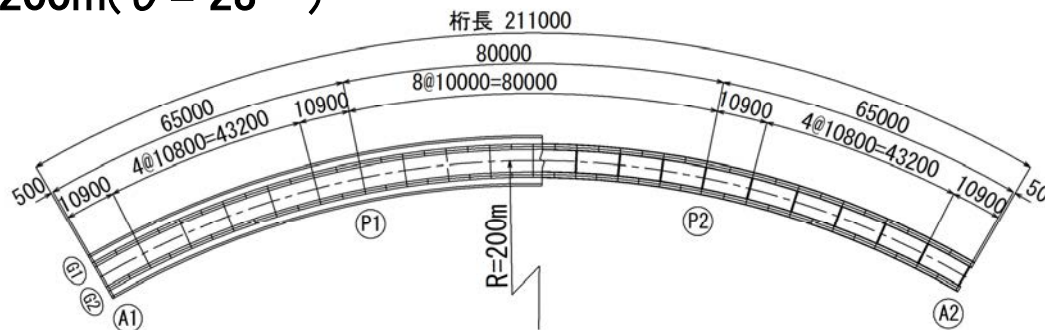
■検討ケース



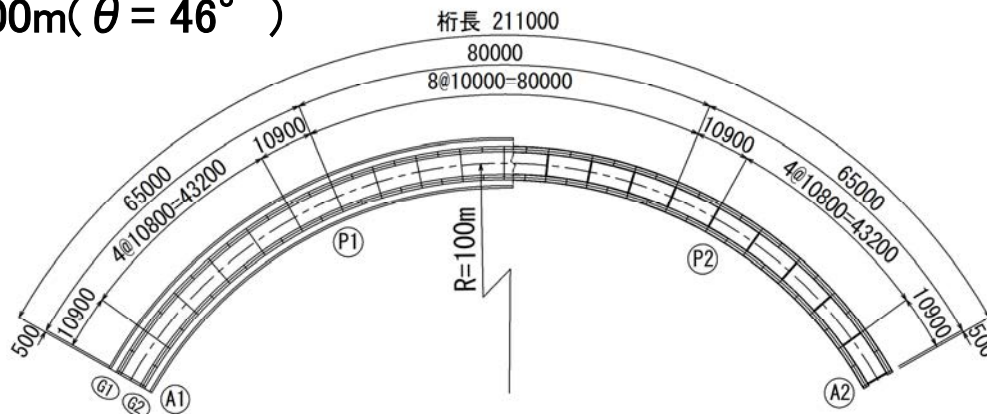
R=300m($\theta = 15^\circ$)



R=200m($\theta = 23^\circ$)



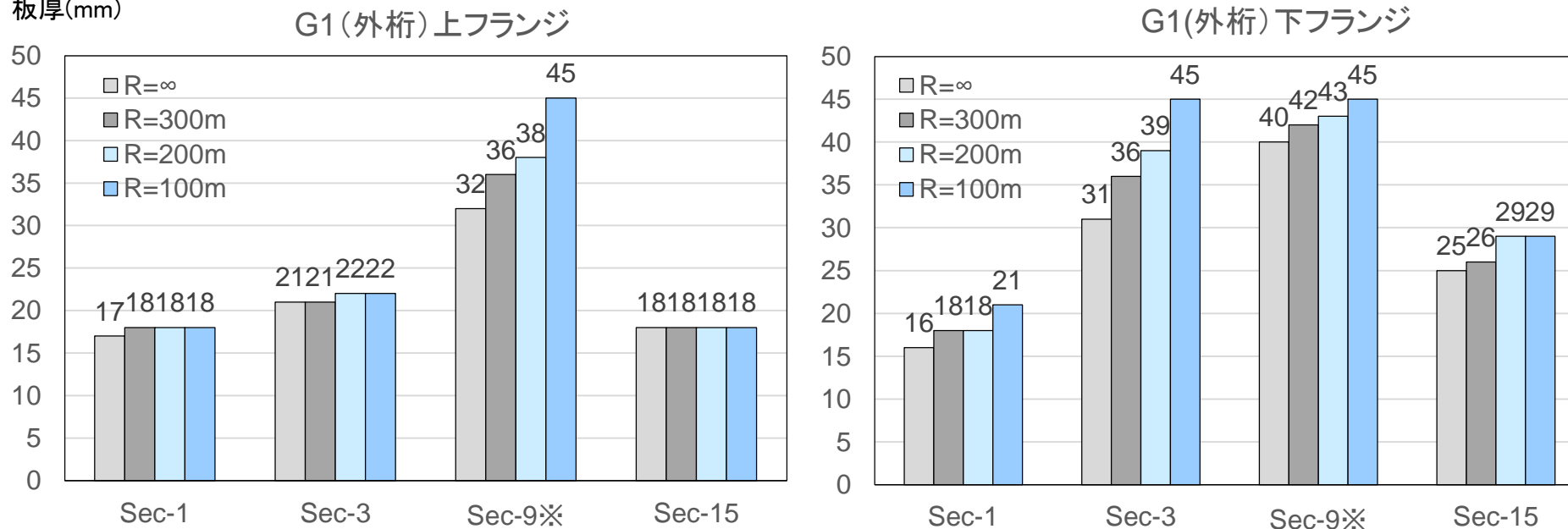
R=100m($\theta = 46^\circ$)



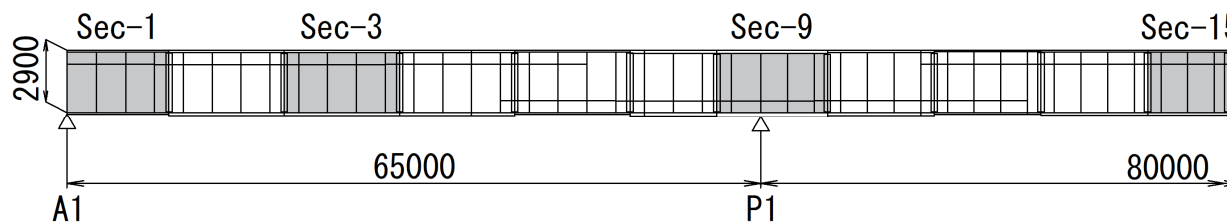
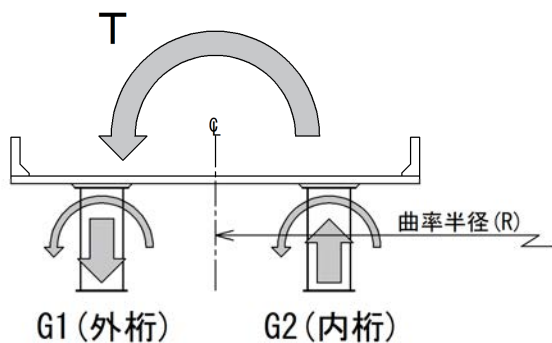
3 主桁断面の比較(1)

G1(外桁)上下フランジ断面の比較

板厚(mm)



※印: SM570材, その他はSM490Y材

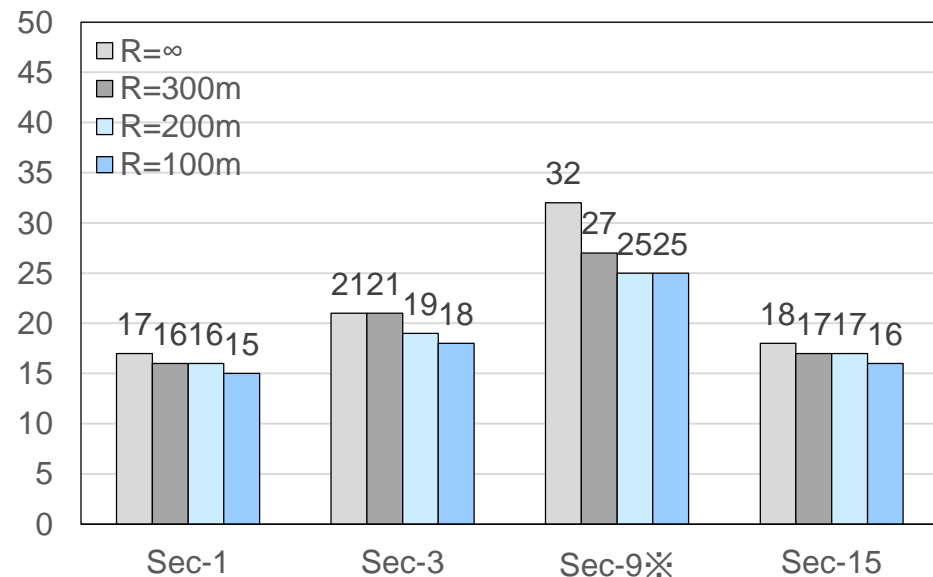


3 主桁断面の比較(2)

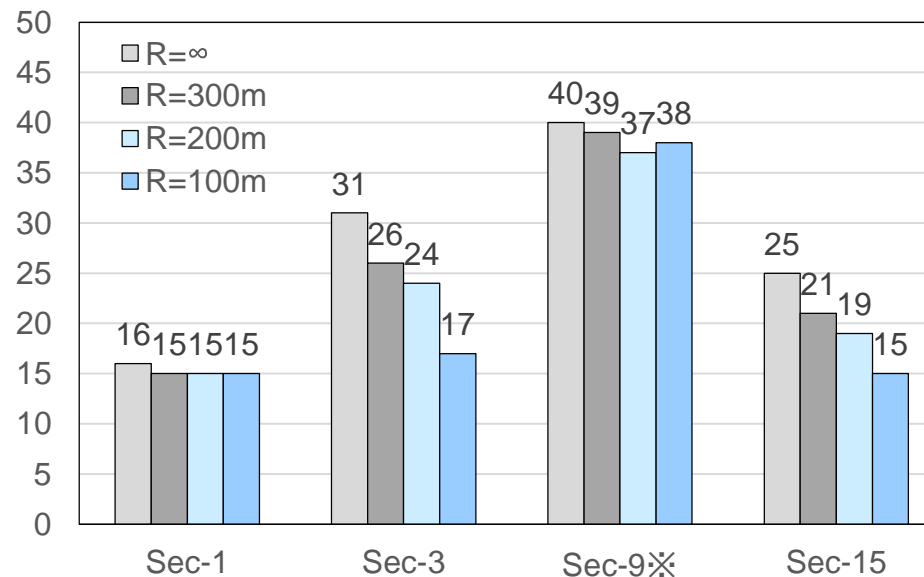
G2(内桁)上下フランジ断面の比較

板厚(mm)

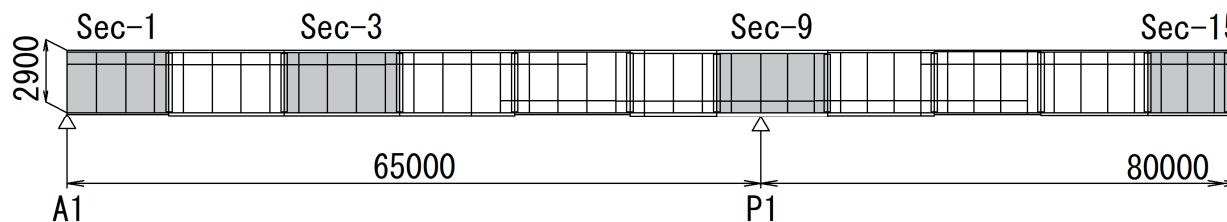
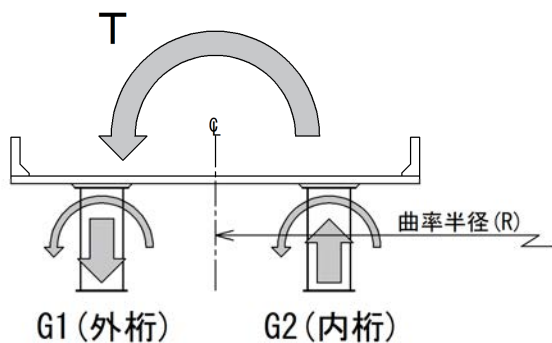
G2(内桁)上フランジ



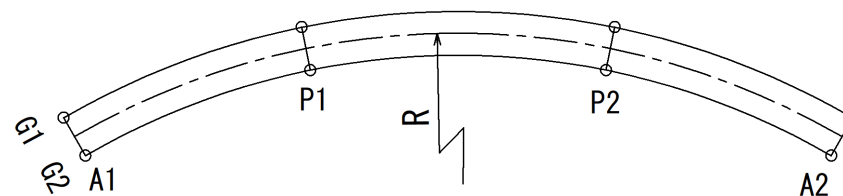
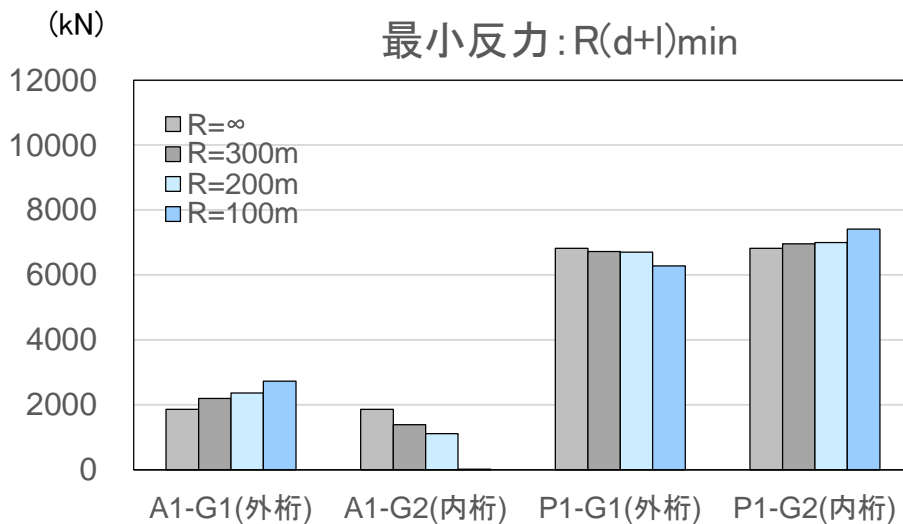
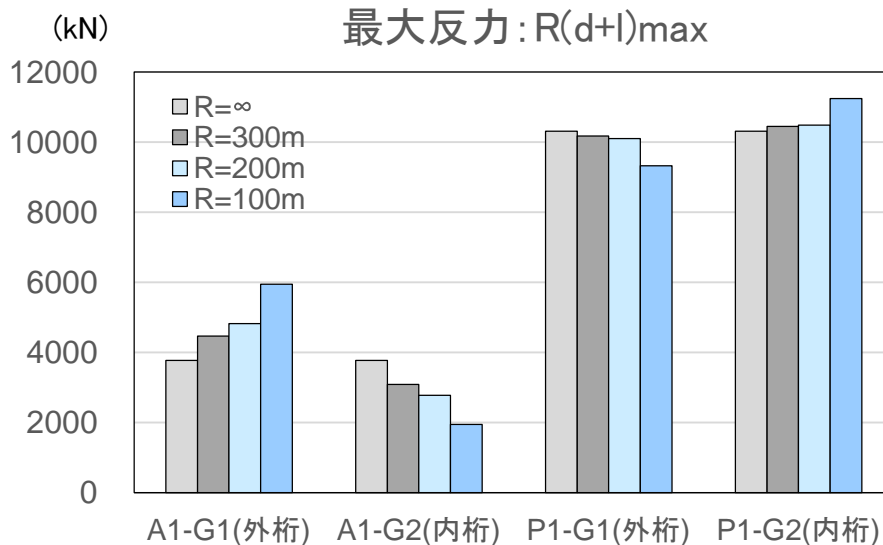
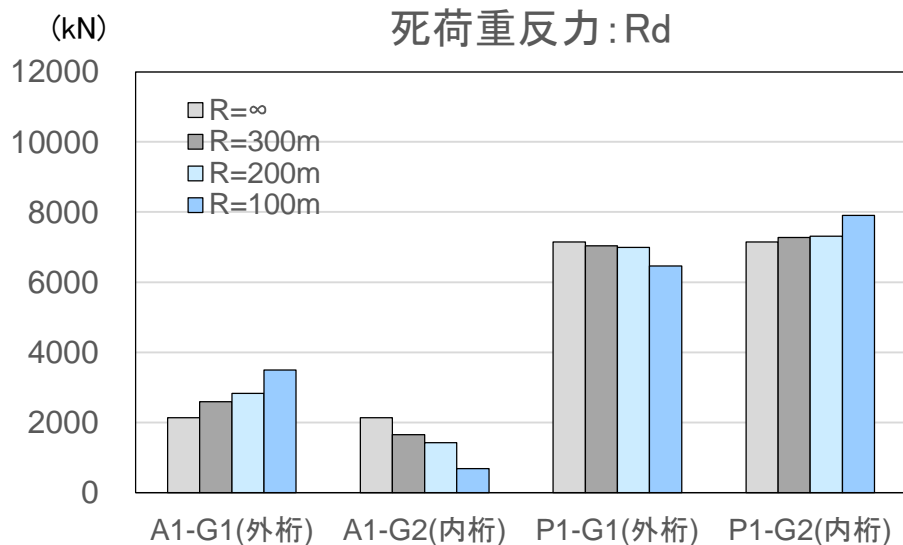
G2(内桁)下フランジ



※印: SM570材, その他はSM490Y材

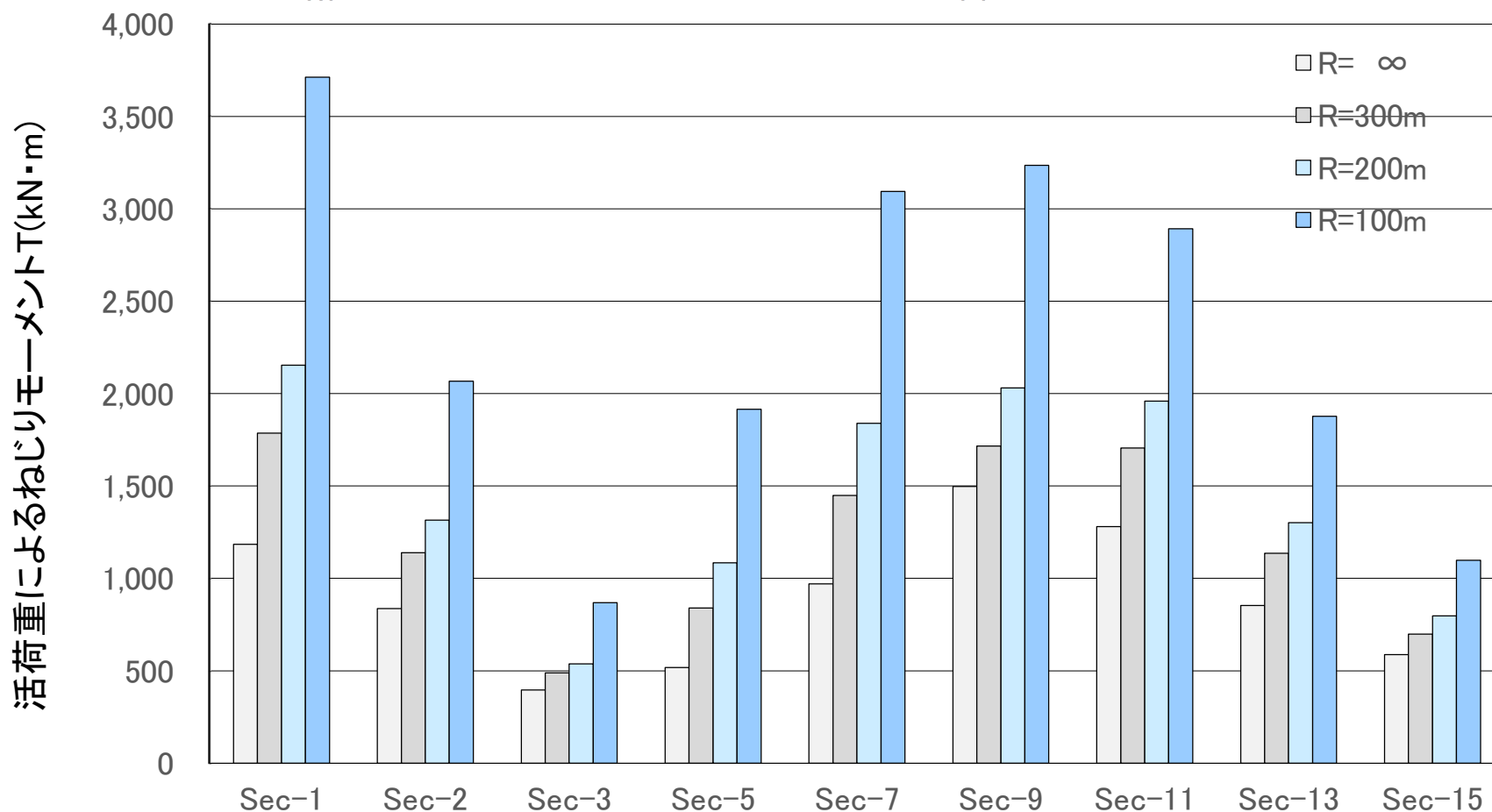
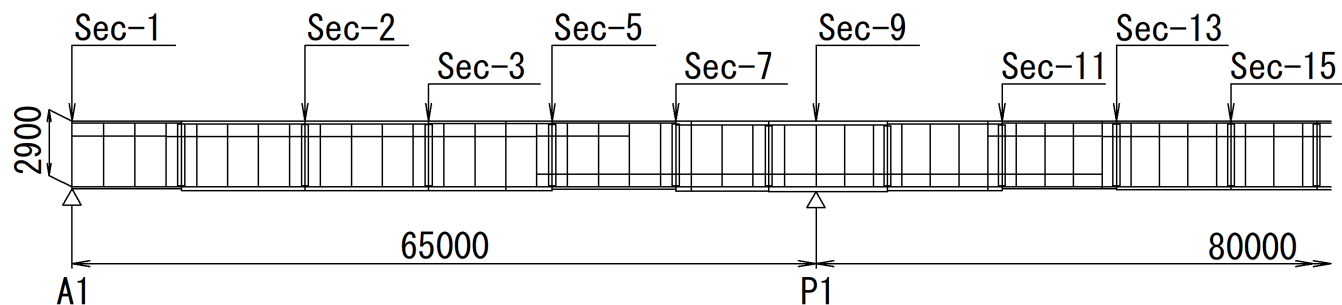


3 支点反力の比較



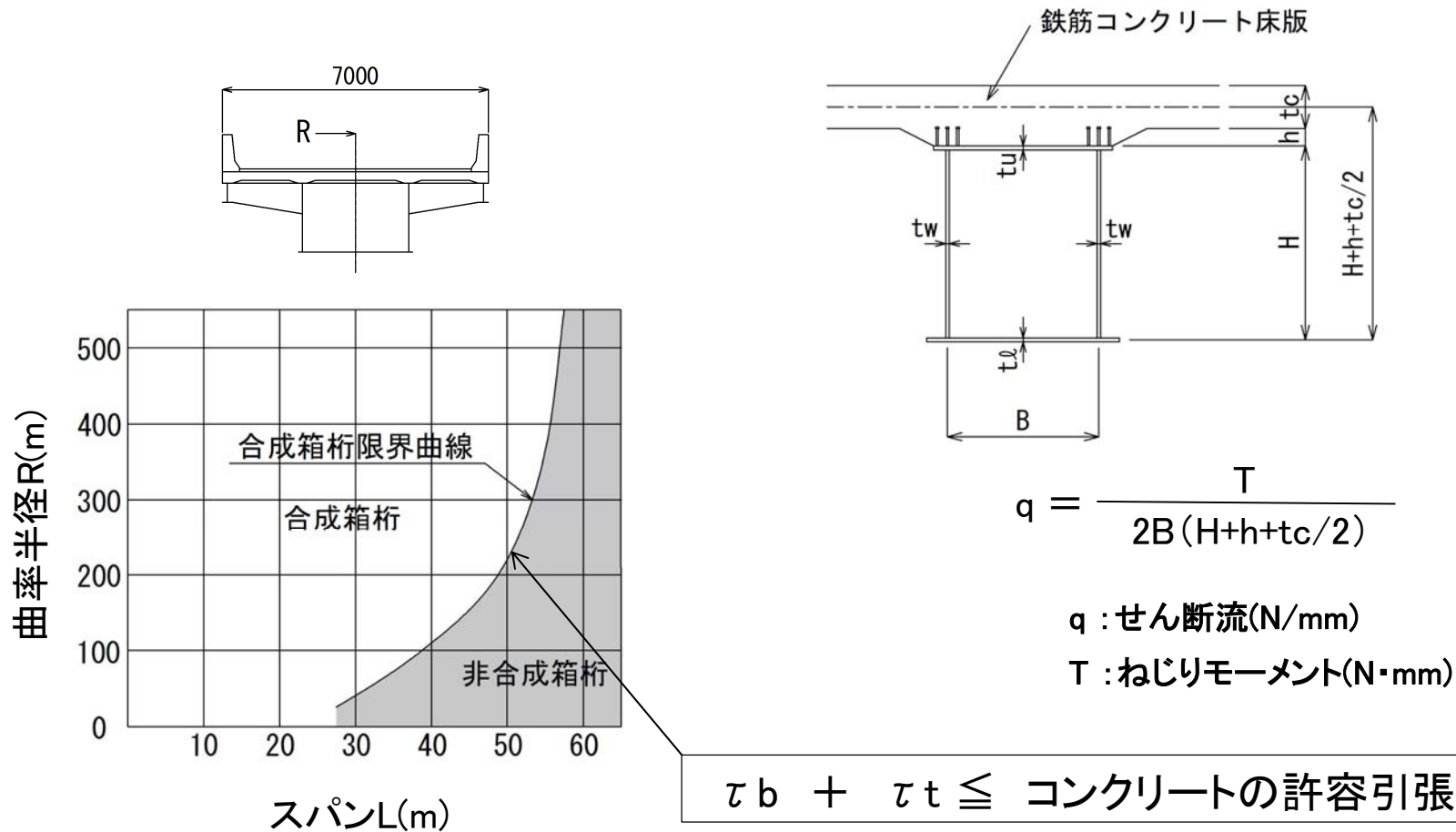
※荷重組合せ係数及び荷重係数を考慮した値

3 G1(外桁)に作用するねじりモーメント



3 曲線桁の適用限界

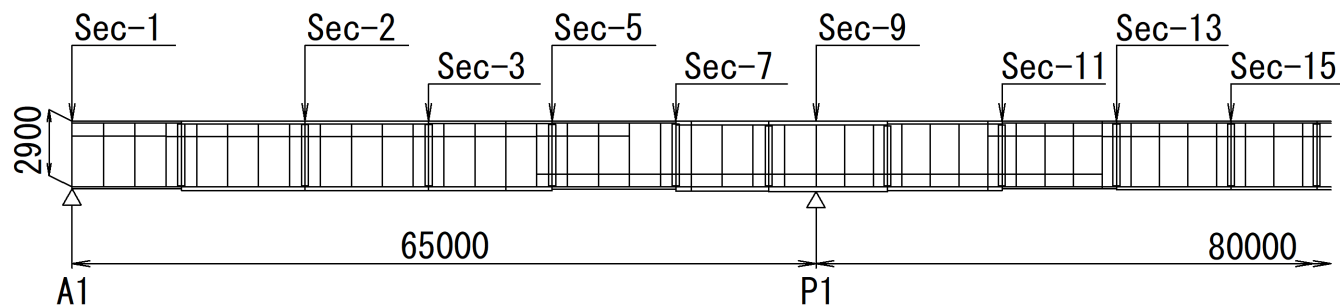
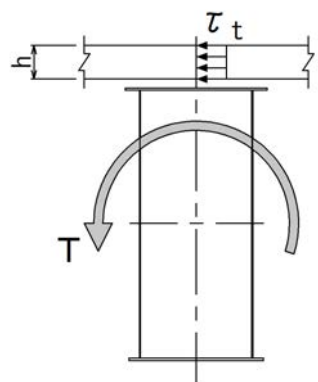
「曲線桁設計の手引き(案)」 阪神高速道路公団 昭和63年10月



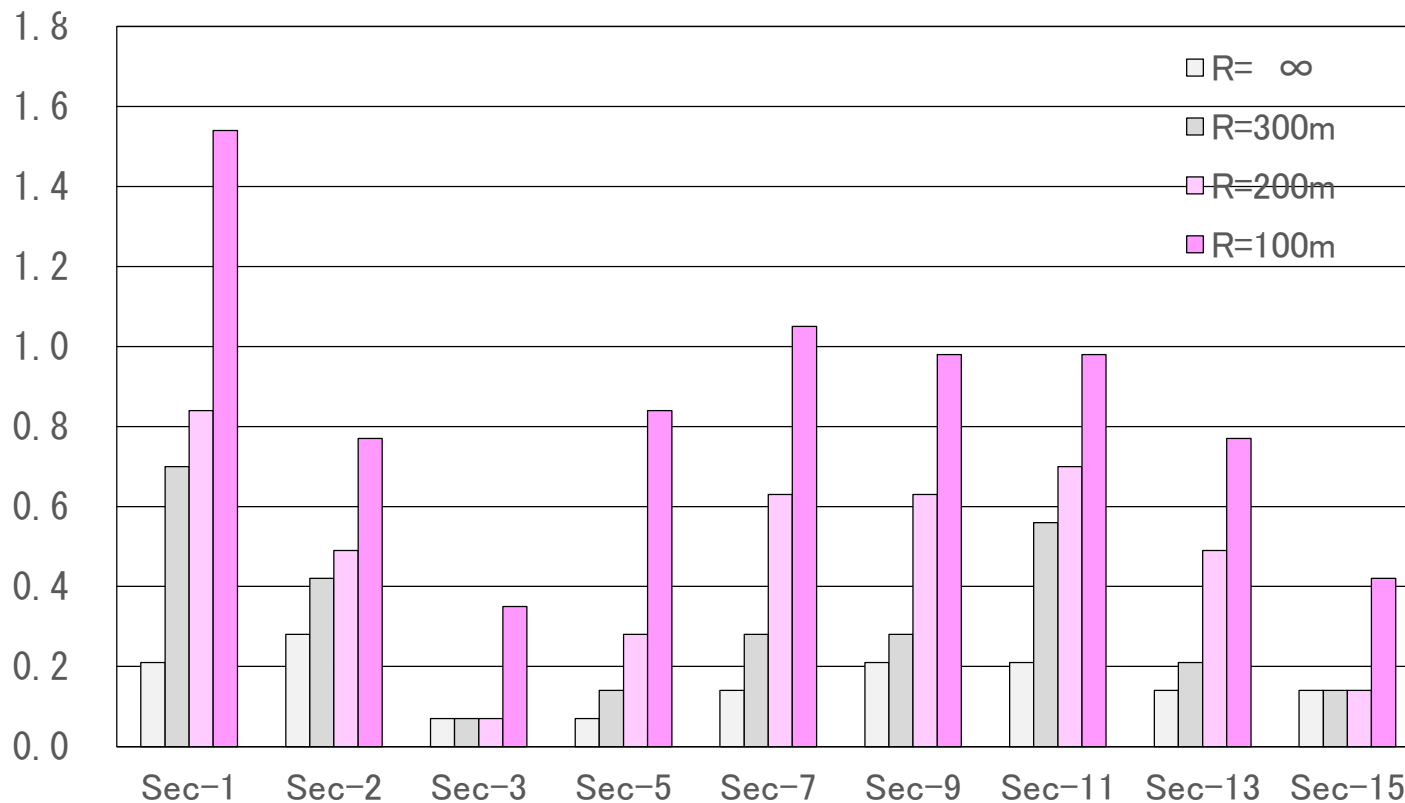
τ_b : 曲げに伴い床版に生じるせん断応力度(N/mm²)

τ_t : ねじりモーメントにより床版に生じるせん断応力度(N/mm²)

3 ねじりにより床版に作用するせん断応力度



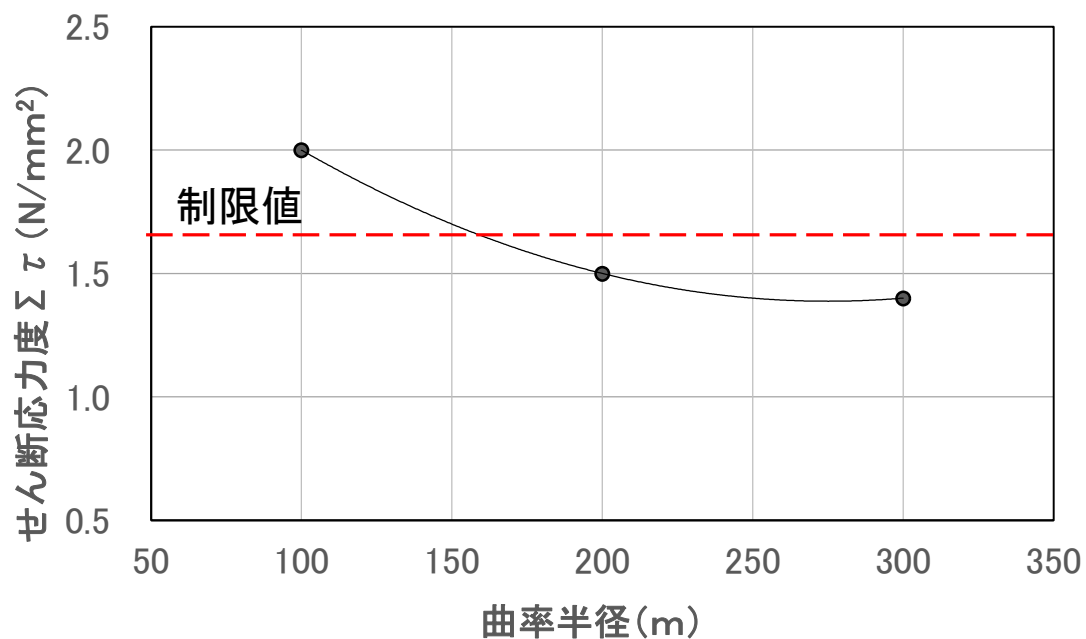
ねじりによるせん断応力度 τ_t (N/mm²)



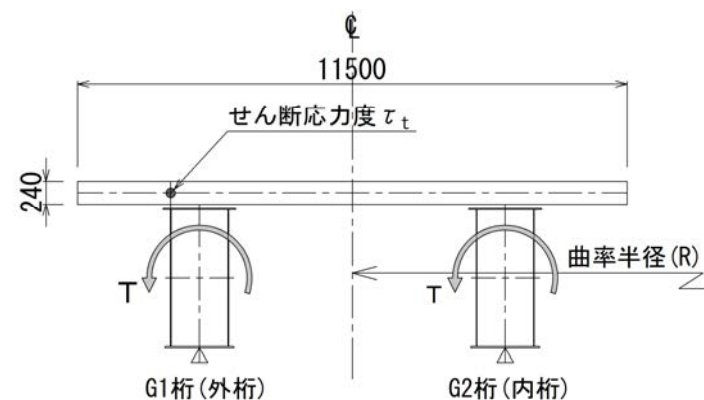
3 曲線桁の適用限界の試算結果

コンクリートの引張応力度の制限値 [道示Ⅱ] 表-14.6.2

作用の組合せ		コンクリート設計基準強度 (N/mm ²)		
		27	30	
1	変動作用が支配的な状況	床版の上, 下縁	2.0	2.2
		床版厚中心	1.4	1.6
2	永続作用が支配的な状況	0.0	0.0	

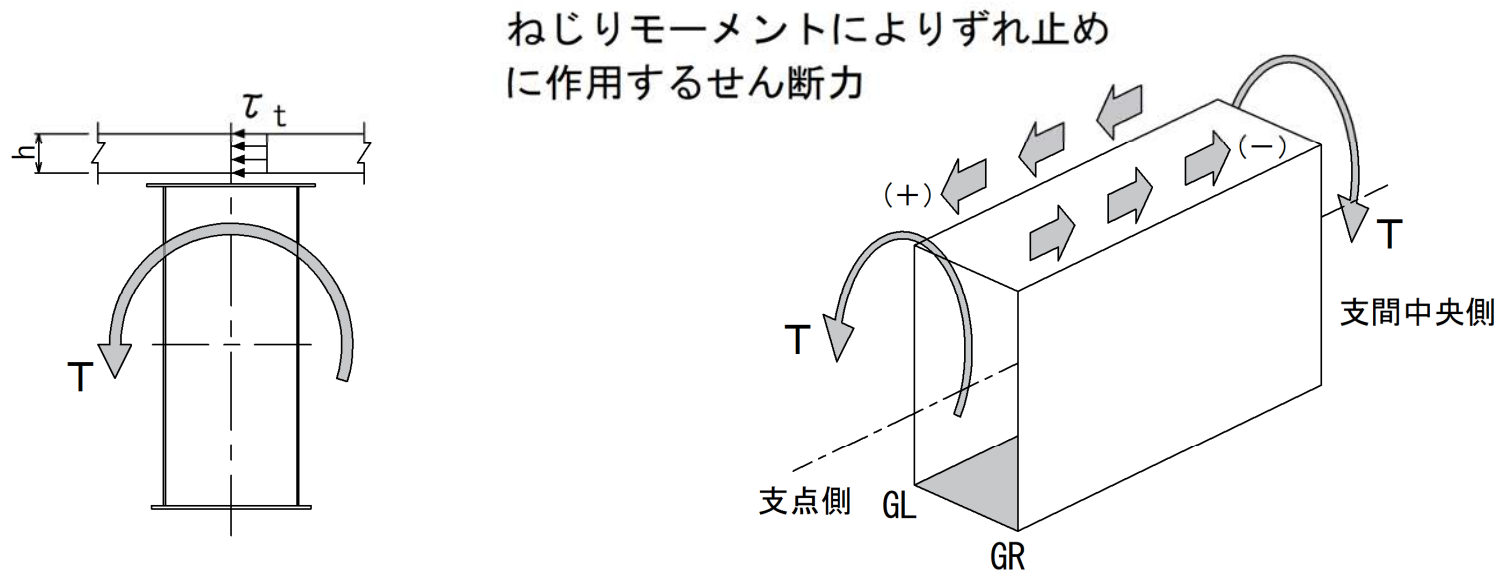


G1桁端支点上の床版のせん断応力度

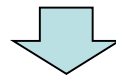


4 曲線桁のずれ止めの設計

ねじりモーメントにより床版に作用するせん断力によって、ずれ止めには下図のようなせん断力が付加される。



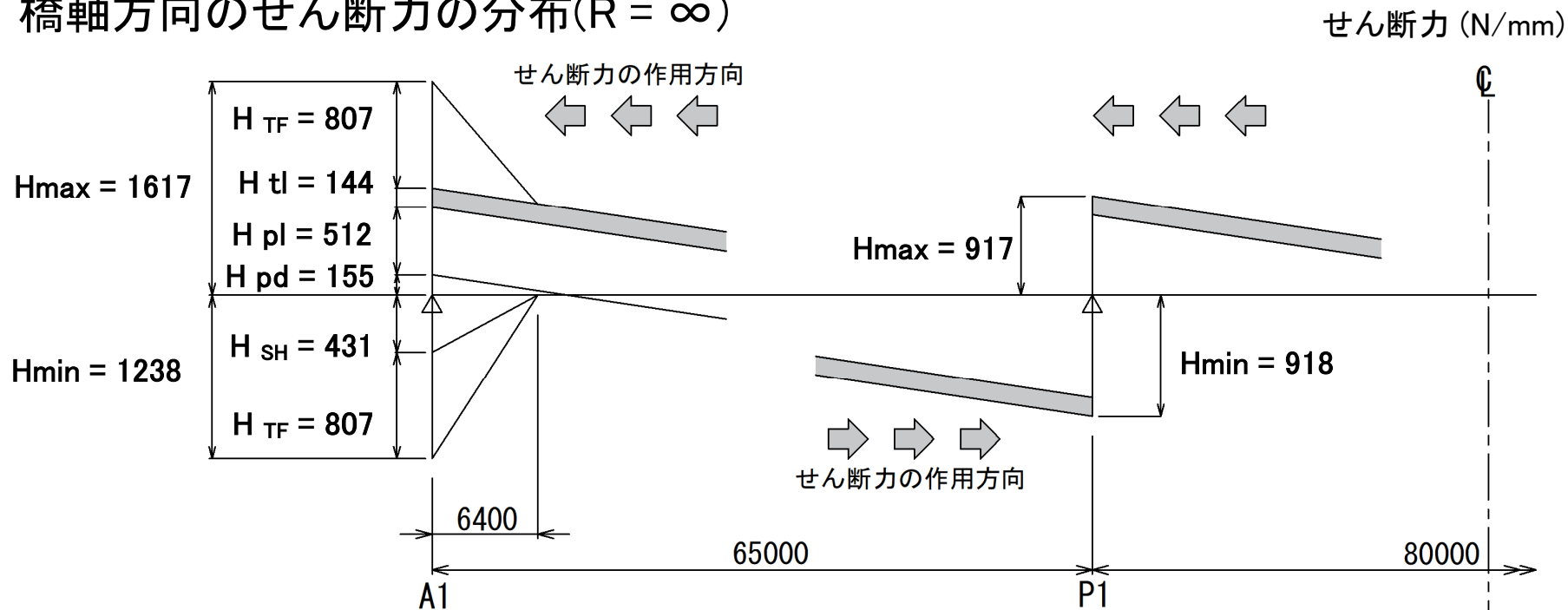
よって、ずれ止めの設計にも、これらの影響を考慮する必要がある。



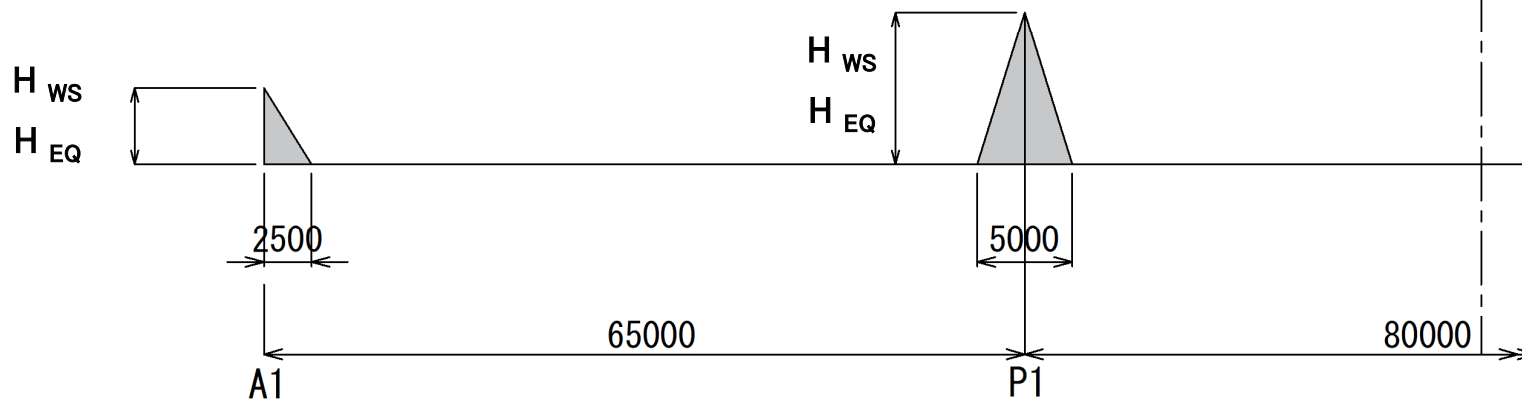
曲率半径の大小が、ずれ止め配置に与える影響を検討
ずれ止めの配置には、横荷重の影響も考慮

4 ずれ止め作用するせん断力の分布

橋軸方向のせん断力の分布($R = \infty$)

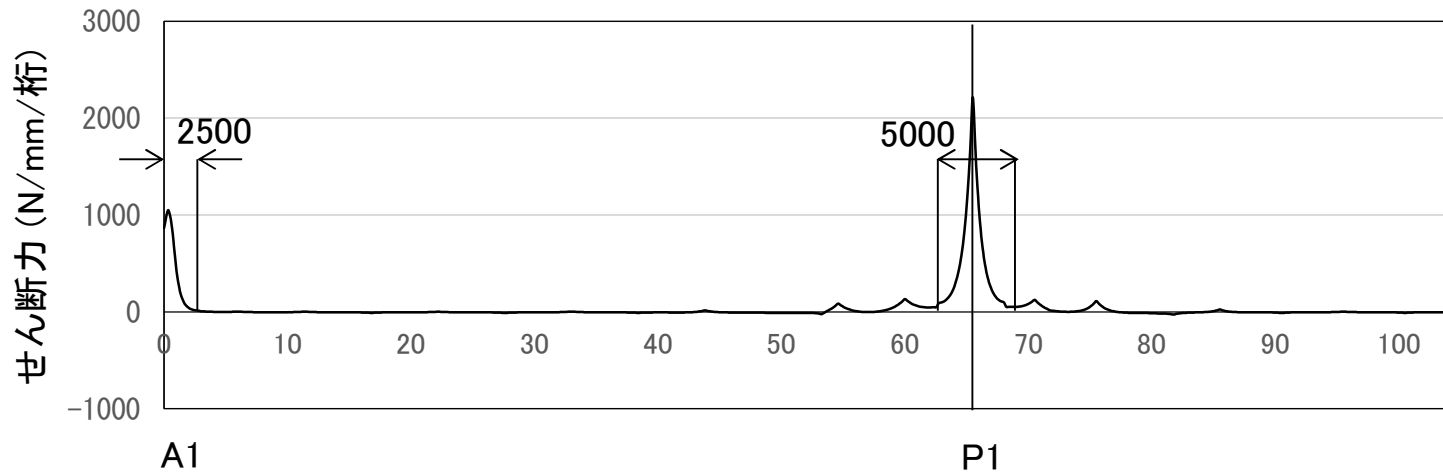


橋軸直角方向のせん断力の分布



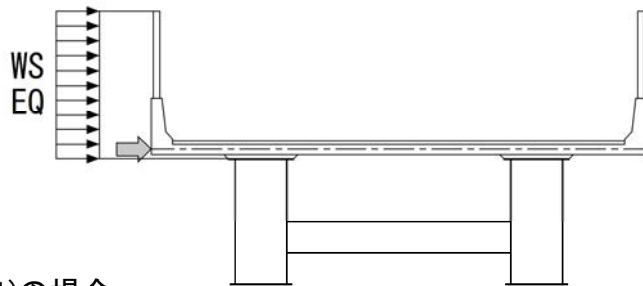
4 ずれ止めに作用する橋軸直角方向の力

レベル2地震動(Kh=0.60)による橋軸直角方向のせん断力分布(有限要素解析結果)

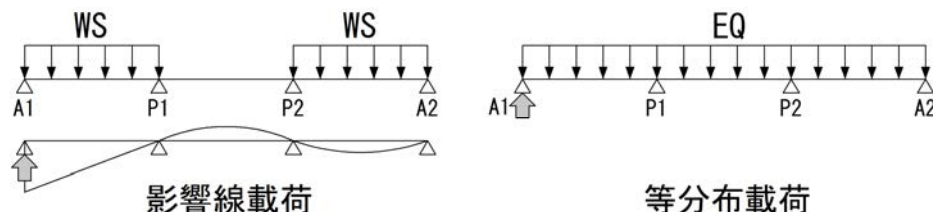


ずれ止めに作用するせん断力

ハンチより上側に作用する横荷重を考慮



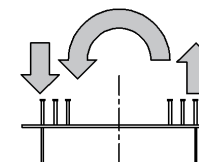
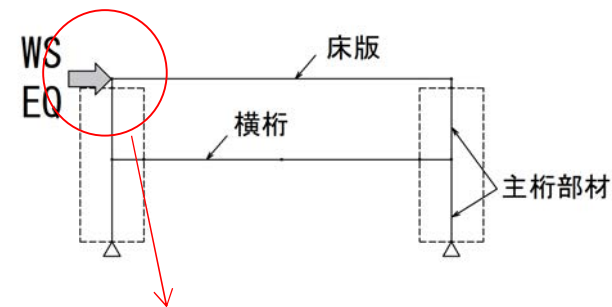
端止点(A1)の場合



影響線載荷

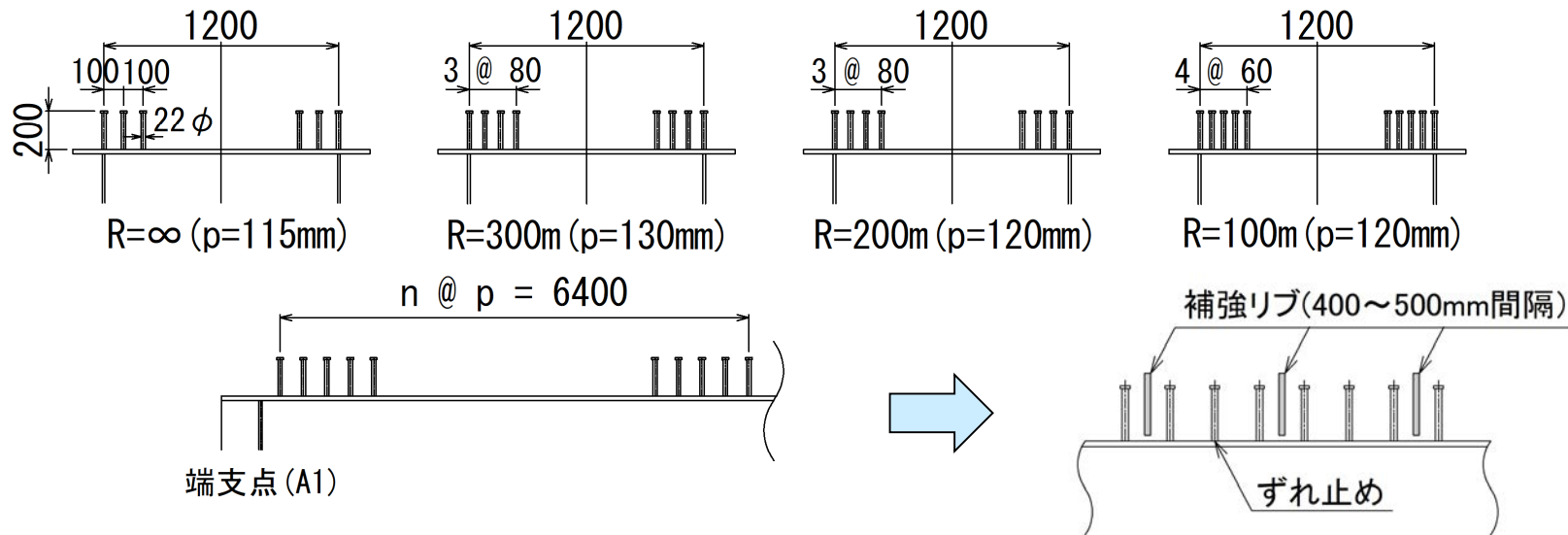
等分布載荷

支点上横桁のモデル化



引抜き力の考慮

4 ずれ止めの設計(1)



端支点(A1): 組合せ②(D+L+TF)

	n	p	τ_x	τ_y	τ_{xy}		τ_{ud}	σ_t	σ_{tyd}	K'
R=∞	3	115	81.3	8.6	81.8	\leq	85.1	35.6	179	0.96 \leq 1.2
R=300m	4	130	83.8	7.3	84.1	\leq	85.1	37.5	179	1.02 \leq 1.2
R=200m	4	120	82.8	6.8	83.1	\leq	85.1	34.6	179	0.99 \leq 1.2
R=100m	5	120	81.8	5.4	82.0	\leq	85.1	24.0	179	0.95 \leq 1.2

n : 1列あたりのずれ止め本数(本/列)

p : ずれ止めの橋軸方向間隔(mm)

τ_x : ずれ止めに作用する橋軸方向せん断応力(N/mm²)

τ_y : ずれ止めに作用する橋軸直角方向せん断応力(N/mm²)

τ_{xy} : ずれ止めに作用する合成せん断応力(N/mm²)

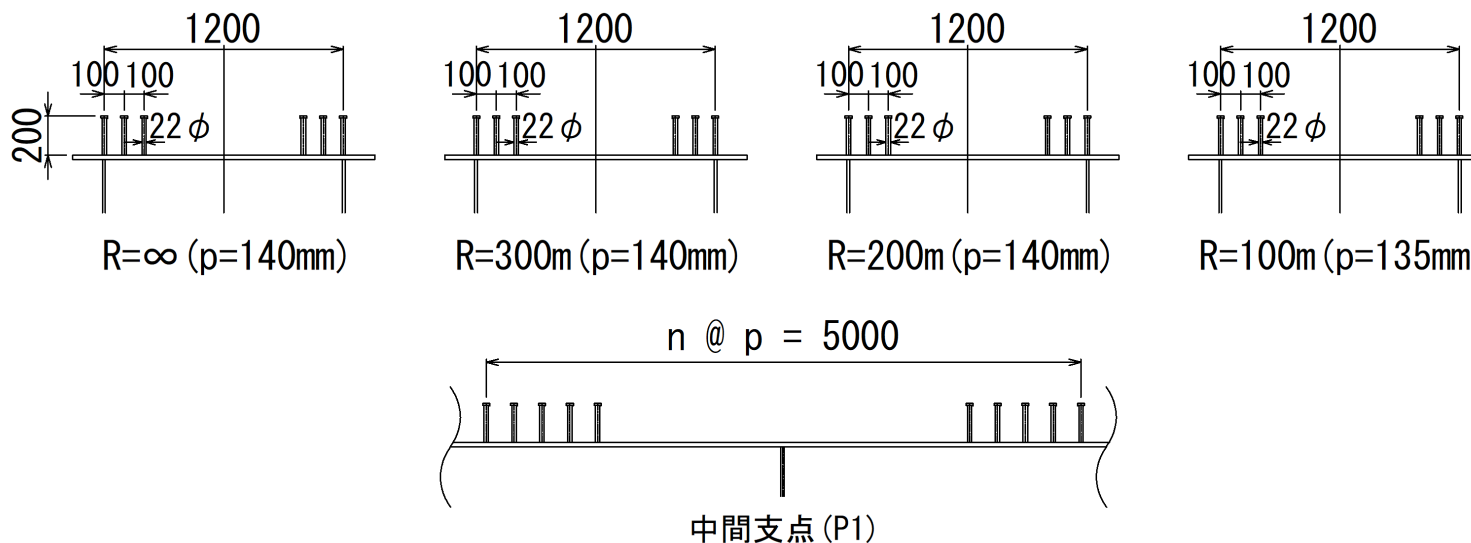
T_{ud} : ずれ止めのせん断応力度の制限値(N/mm²)

σ_t : ずれ止めに作用する引張応力(N/mm²)

σ_{tyd} : ずれ止めの引張応力度の制限値(N/mm²)

K' : せん断応力と引張応力の合成応力度の照査

4 ずれ止めの設計(2)



中間支点(P1): 組合せ⑪(D+EQ2)

	n	p	τ_x	τ_y	τ_{xy}		τ_{ud}	σ_t	σ_{tyd}	K'	
R= ∞	3	140	13.3	81.7	82.8	≦	85.1	31.0	235	0.96	≦ 1.2
R=300m	3	140	13.3	81.7	82.8	≦	85.1	31.0	235	0.96	≦ 1.2
R=200m	3	140	13.8	81.7	82.9	≦	85.1	31.0	235	0.97	≦ 1.2
R=100m	3	135	13.3	78.9	80.0	≦	85.1	30.0	235	0.90	≦ 1.2

n : 1列あたりのずれ止め本数(本/列)

p : ずれ止めの橋軸方向間隔(mm)

τ_x : ずれ止めに作用する橋軸方向せん断応力(N/mm²)

τ_y : ずれ止めに作用する橋軸直角方向せん断応力(N/mm²)

τ_{xy} : ずれ止めに作用する合成せん断応力(N/mm²)

τ_{ud} : ずれ止めのせん断応力度の制限値(N/mm²)

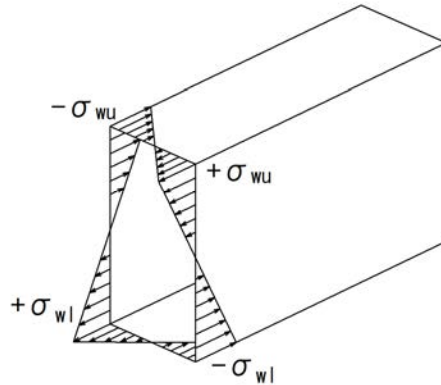
σ_t : ずれ止めに作用する引張応力(N/mm²)

σ_{tyd} : ずれ止めの引張応力度の制限値(N/mm²)

K' : せん断応力と引張応力の合成応力度の照査

4 そりねじり応力度

箱桁断面にねじりモーメントが作用すると、断面にはそりねじり応力度が生じる。



$$\sigma_w = \frac{M_w}{C_w} \omega$$

- σ_w : そりねじり応力度 (N/mm²)
- M_w : そりねじりモーメント (N・mm²)
- C_w : そりねじり定数 (mm⁶)
- ω : そり関数 (mm²)

[鋼道路橋設計便覧(R2.9)]では、曲線橋の断面計算において、そりねじり応力度を無視できる範囲として、次式が示されている。

$$\left. \begin{aligned} \kappa > 10 + 40 \phi \quad (0 \leq \phi < 0.5) \\ \kappa > 30 \quad (0.5 \leq \phi) \end{aligned} \right\} \text{式(6.6.5)}$$

※ ϕ は曲線径間の中心角(rad)

ここに、 $\kappa = L \sqrt{GK/EI_w}$

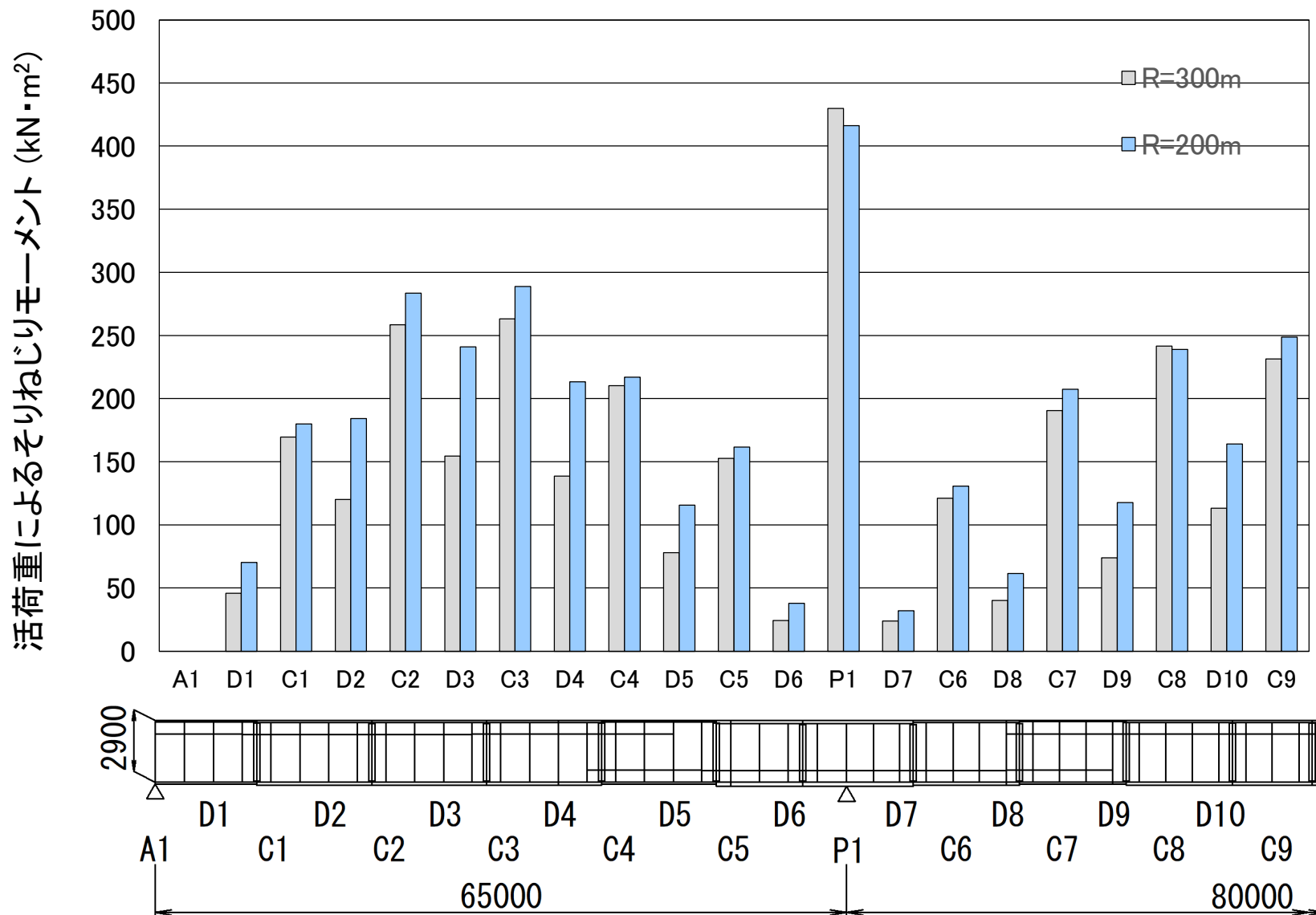
- L : ねじりに対する支間長(mm)
- G : せん断弾性係数(N/mm²)
- K : 断面のねじり定数(mm⁴)
- E : ヤング係数(N/mm²)
- I_w : 断面のそりねじり定数(mm⁶)

細幅箱桁橋の場合、一般的に $\kappa=15$ 程度



曲率半径によるそりねじり応力度の影響を検証

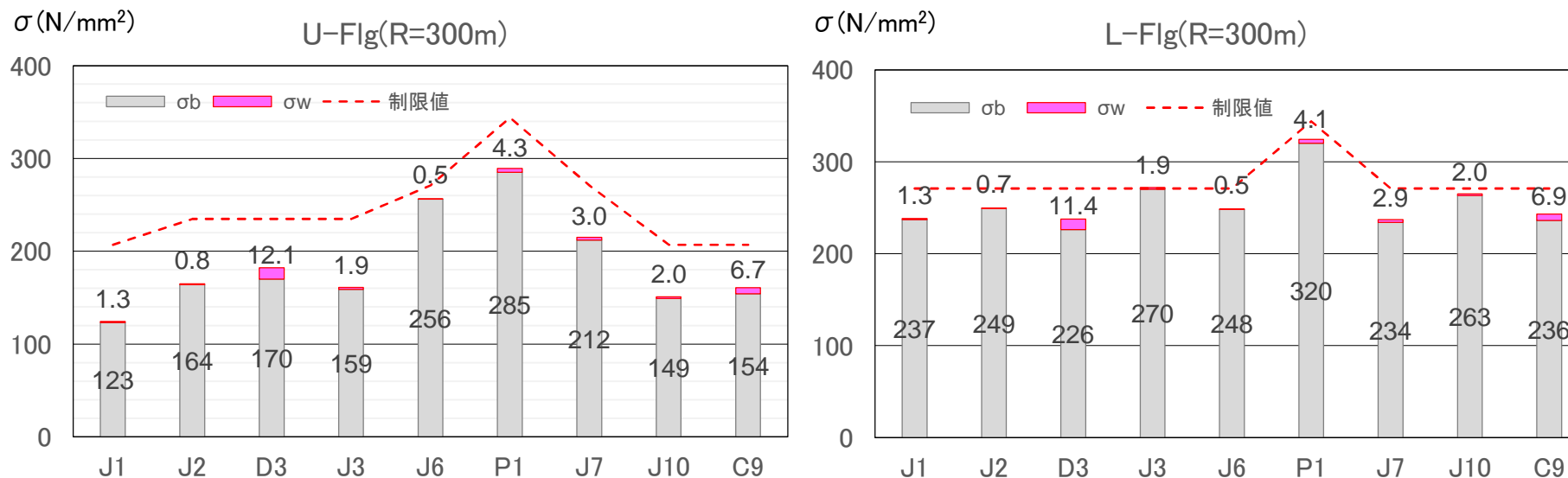
4 そりねじりモーメント



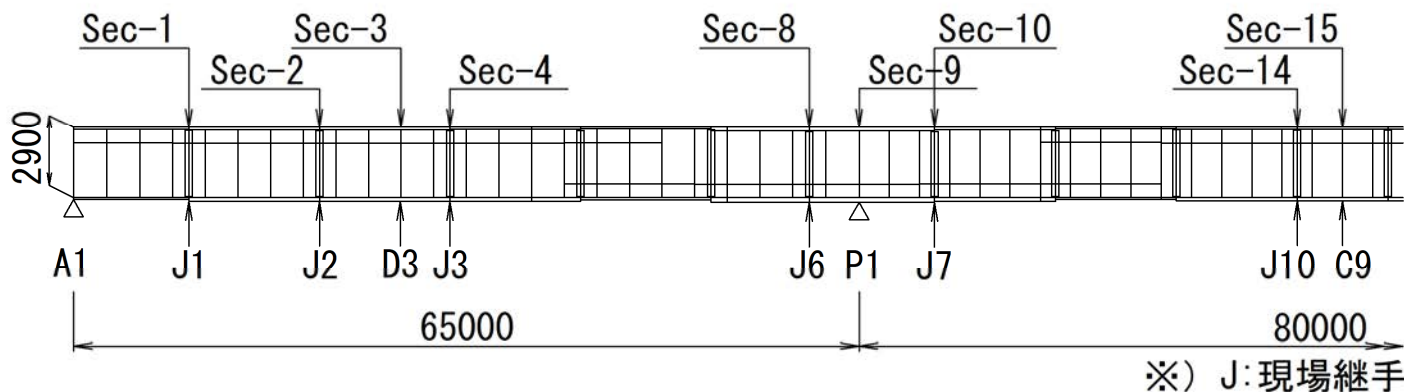
※) C: 中間横桁, D: 中間ダイアフラム

4 曲げ応力度とそりねじり応力度(1)

R=300mの場合の曲げ応力度 σ_b とそりねじり応力度 σ_w の比較

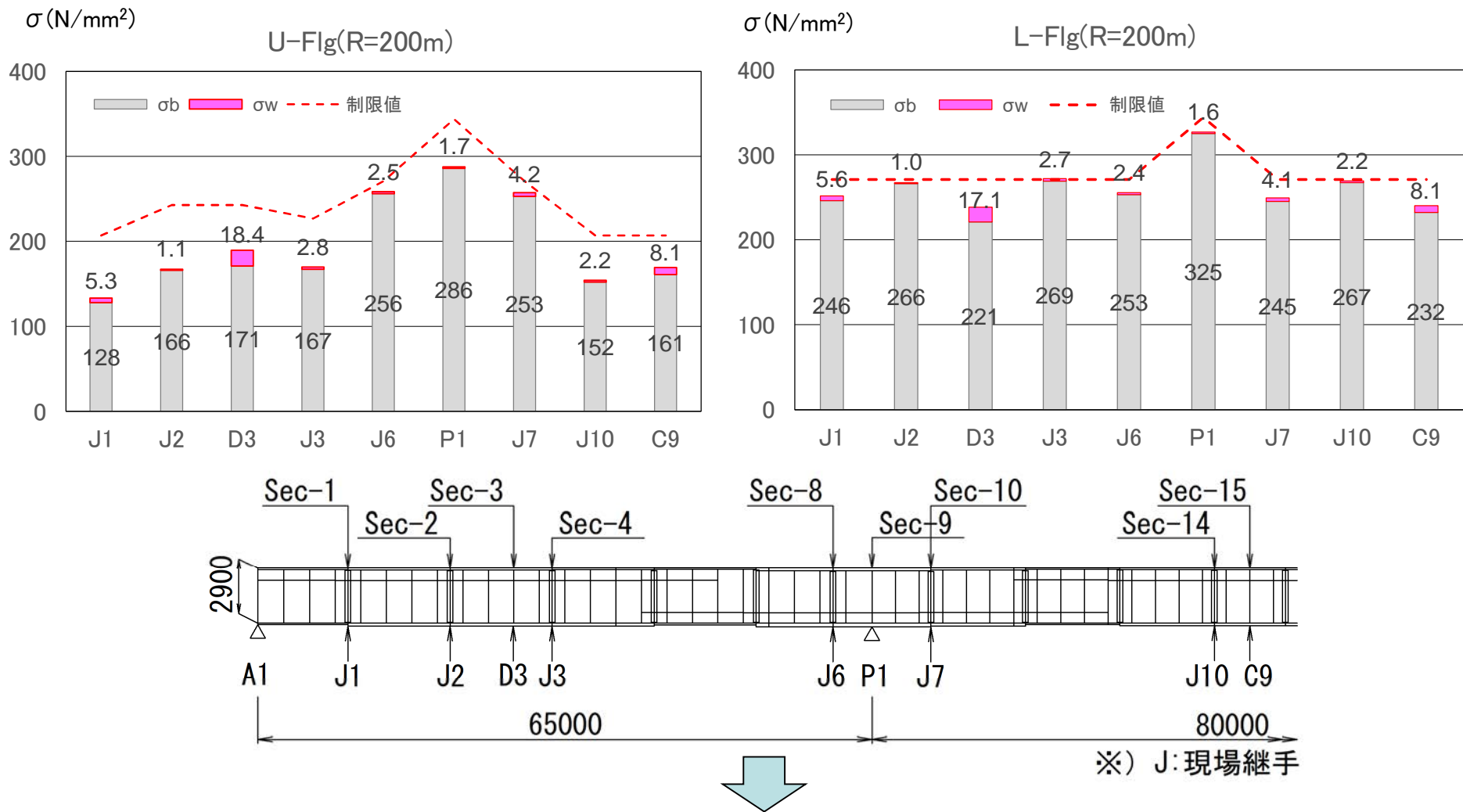


※そりねじり応力度 σ_w は、制限値の5%程度



4 曲げ応力度とそりねじり応力度(2)

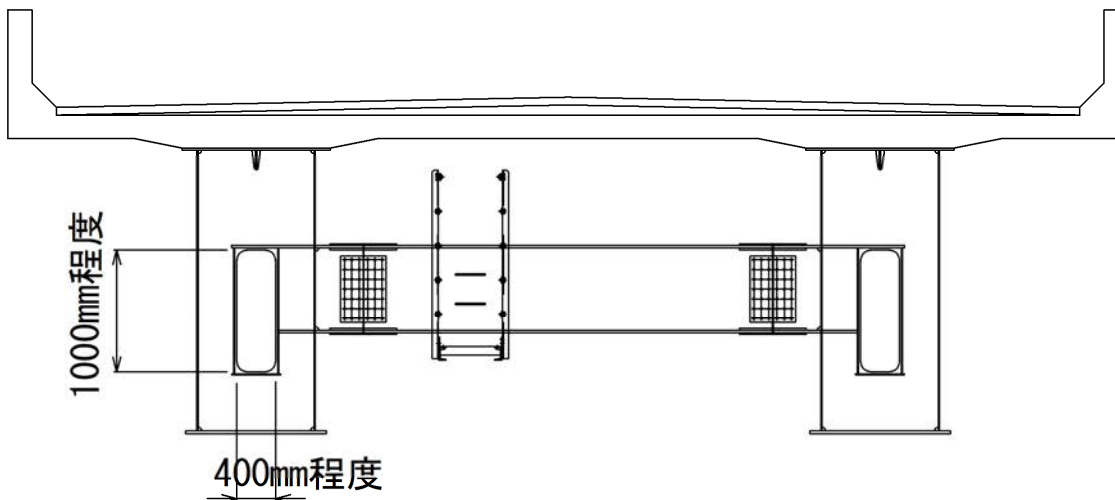
R=200mの場合の曲げ応力度 σ_b とそりねじり応力度 σ_w の比較



曲げモーメント最大断面の下フランジやその付近の継手は、制限値に対して余裕を持たせる。

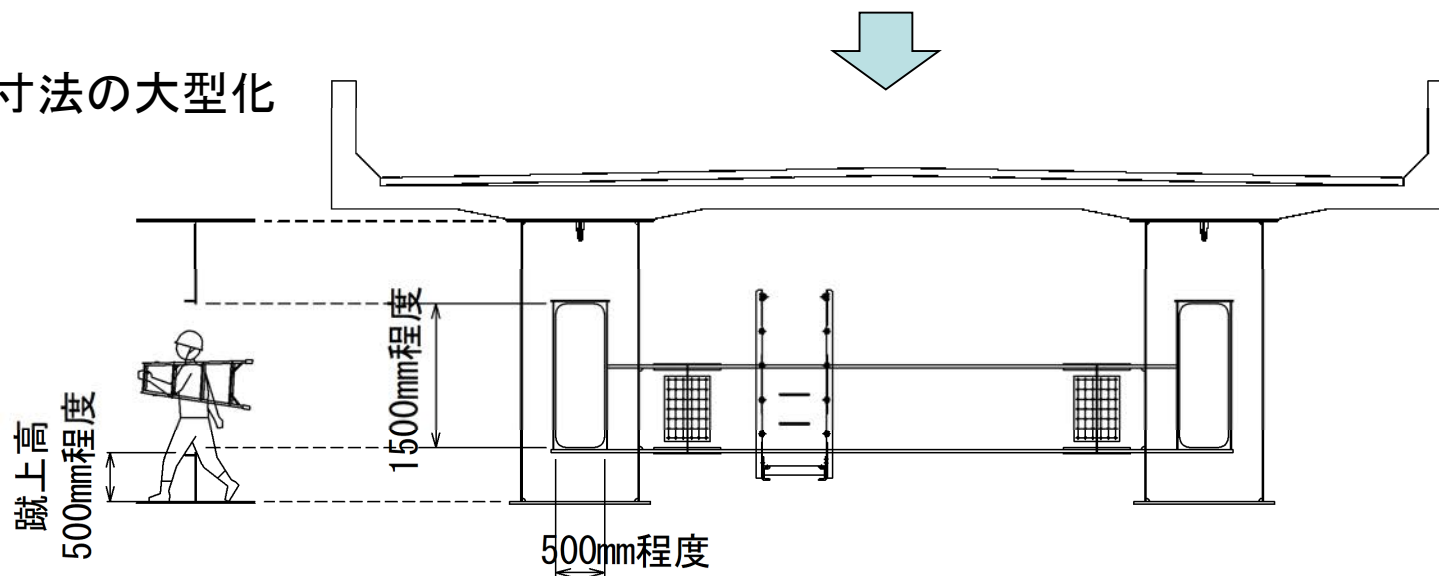
4 横桁取付部の設計

横桁中段配置



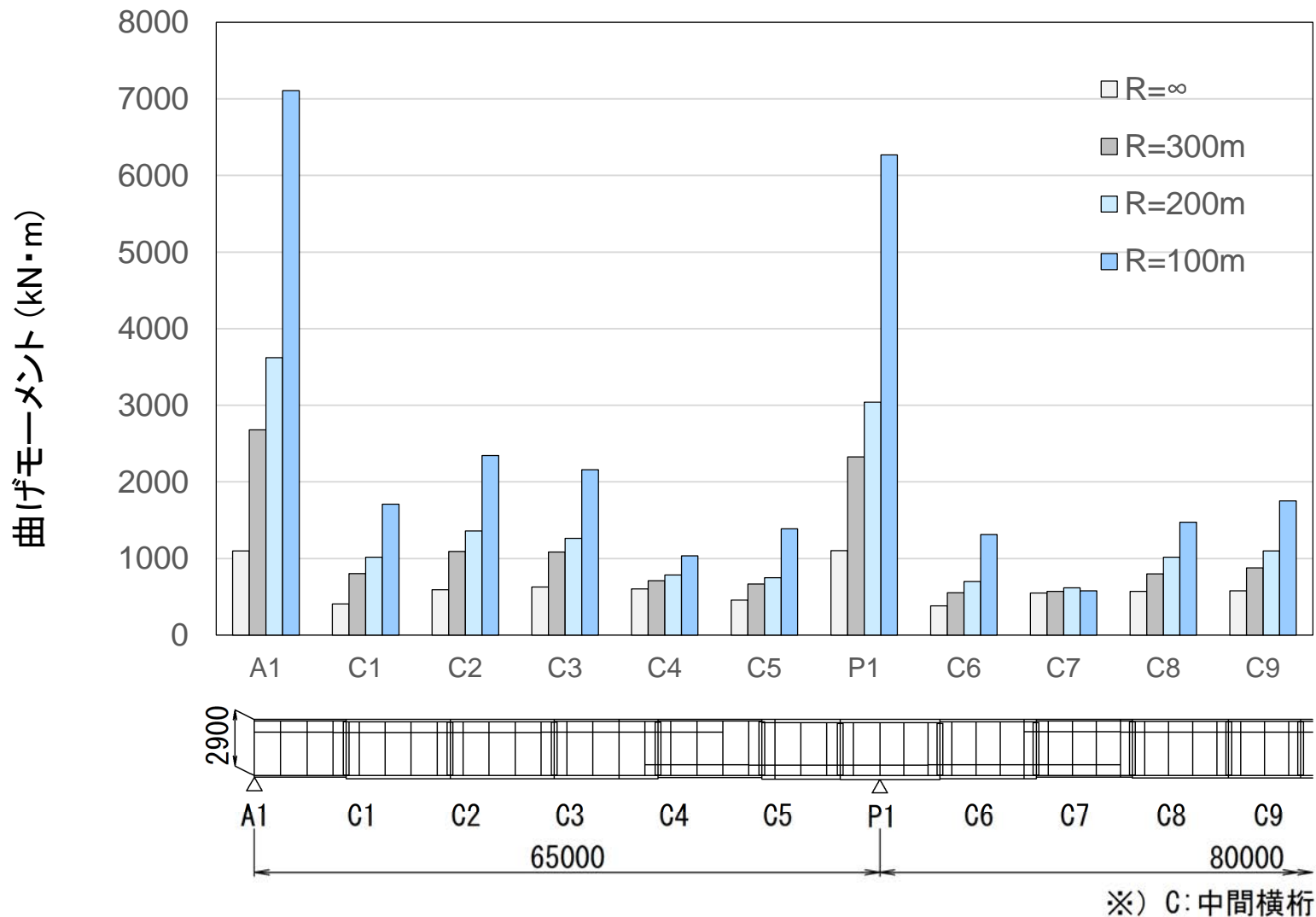
横桁下段配置

マンホール開口寸法の大型化



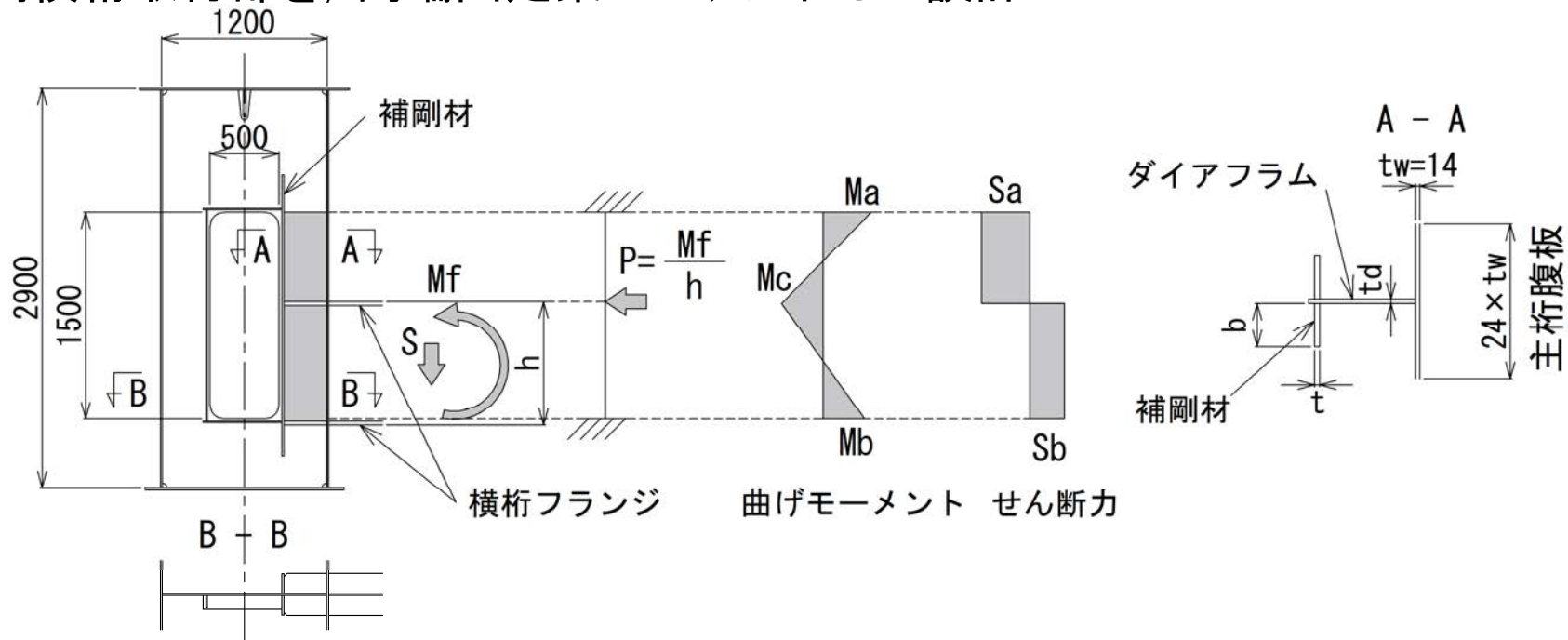
4 横桁に作用する曲げモーメント

横桁に作用する死荷重(D)と活荷重(L)による曲げモーメント



4 中間横桁取付部の設計

中間横桁取付部を、両端固定梁にモデル化して設計



	取付部の断面力		横桁断面 (SS400)	ダイアフラム		補剛材	
	Mf(kN・m)	S(kN)		td (mm)	材質	b × t (mm)	材質
R=∞	705	235	H-900 × 300 × 16 × 28	14	SM400	140 × 16	SM400
R=300m	1281	357	H-950 × 300 × 16 × 28	19	SM490Y	140 × 16	SM490Y
R=200m	1631	413	H-950 × 400 × 16 × 28	22	SM490Y	170 × 22	SM490Y
R=100m	2883	566	—	—	—	—	—

※)横桁断面の決定ケースは、すべて組合せ⑥D+L+WS+WL



曲率半径が小さいほど、横桁取付部の補強が重要

- 連続桁の場合，中間支点上の断面は鉛直方向の作用だけではなく，横荷重が支配的となるため，それらの影響を適切に考慮する必要がある。
- 曲線桁の場合，床版コンクリートと鋼桁の合成効果を考慮することにより，桁端部の床版コンクリートやずれ止めには，ねじりモーメントによるせん断力が作用するため，それらの影響を設計に考慮する必要がある。
- ここで対象とした支間80m程度の細幅箱桁橋の場合，曲率半径 $R=150\text{m}$ 程度が，床版コンクリートと鋼桁の合成効果を考慮して設計する限界と考えられる。

まとめ(2)

- 曲率半径が小さくなるにつれて、桁端部のずれ止め間隔も小さくなるため、鋼コンクリート合成床版を採用する場合は、底鋼板の補強リブとずれ止めの離隔に注意が必要である。
- そりねじり応力は、ここで対象とした $R=300\text{m}$ 及び 200m の細幅箱桁橋の場合、制限値の5~7%程度であり、曲げモーメント最大断面については、これらの影響に留意する必要がある。
- 横桁取付部のダイヤフラムは、横桁に作用する曲げモーメントを確実に伝達できるように補強する必要がある。特に曲線桁の場合、作用する曲げモーメントが大きいため留意が必要である。



道示による細幅箱桁橋の設計について

完

ご清聴ありがとうございました。



一般
社団法人

日本橋梁建設協会

Japan Bridge Association