

令和6年度 橋梁技術発表会

曲線細幅箱桁橋の試設計について

～H29道示における設計の留意点～

設計小委員会 設計東日本部会

掘井 滋則, 段下 義典

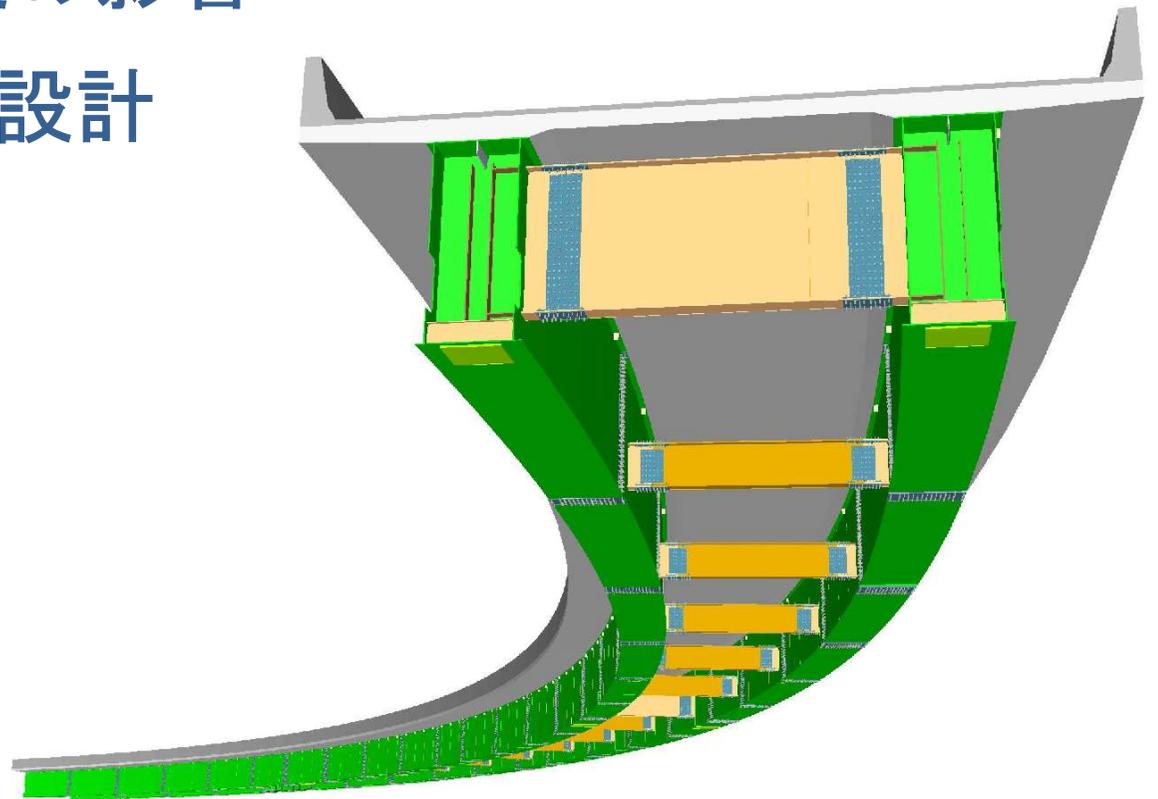


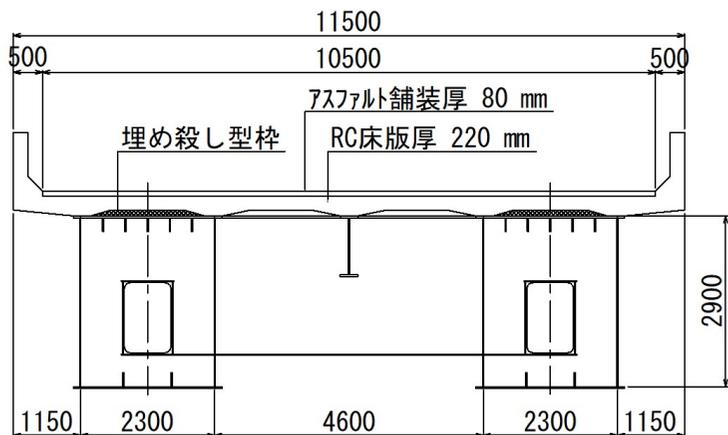
一般
社団法人

日本橋梁建設協会

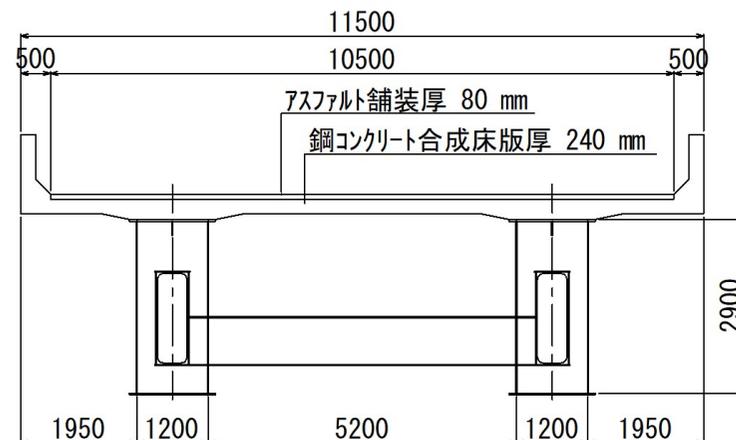
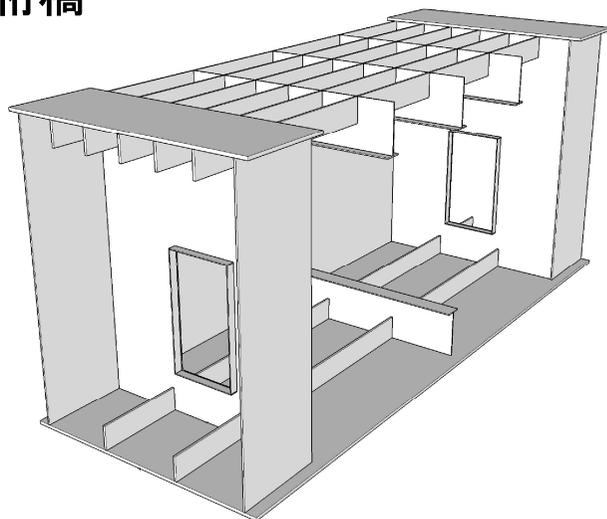
Japan Bridge Association

- ◆ 細幅箱桁橋の概要と設計フロー
- ◆ ねじりにより床版に作用するせん断応力度
(合成作用を考慮した曲線桁の適用限界)
- ◆ ずれ止めの設計
- ◆ そりねじり応力度の影響
- ◆ 横桁取付け部の設計

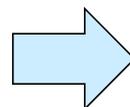
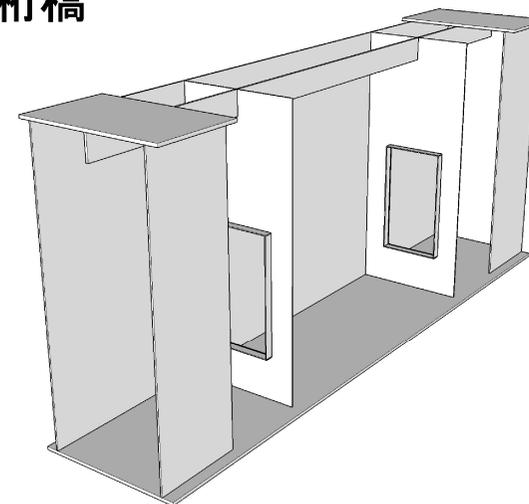




従来箱桁橋

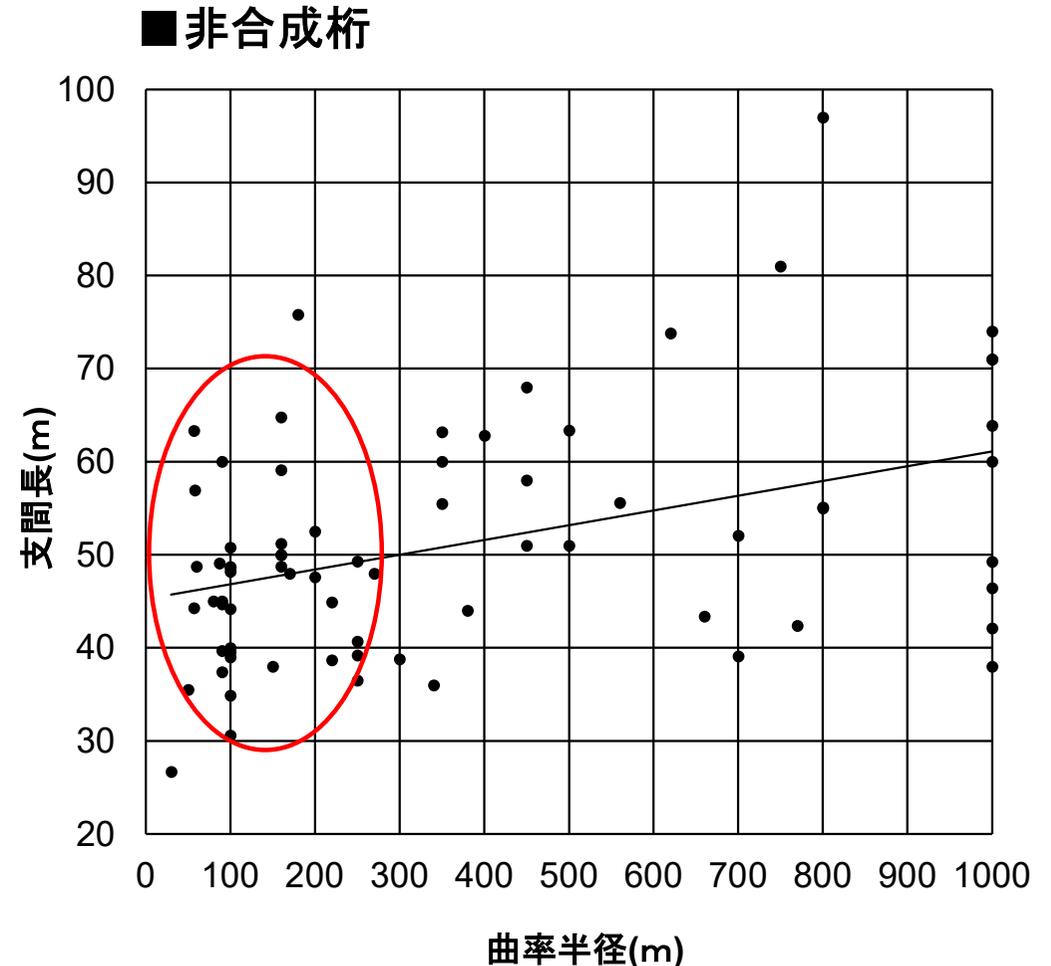
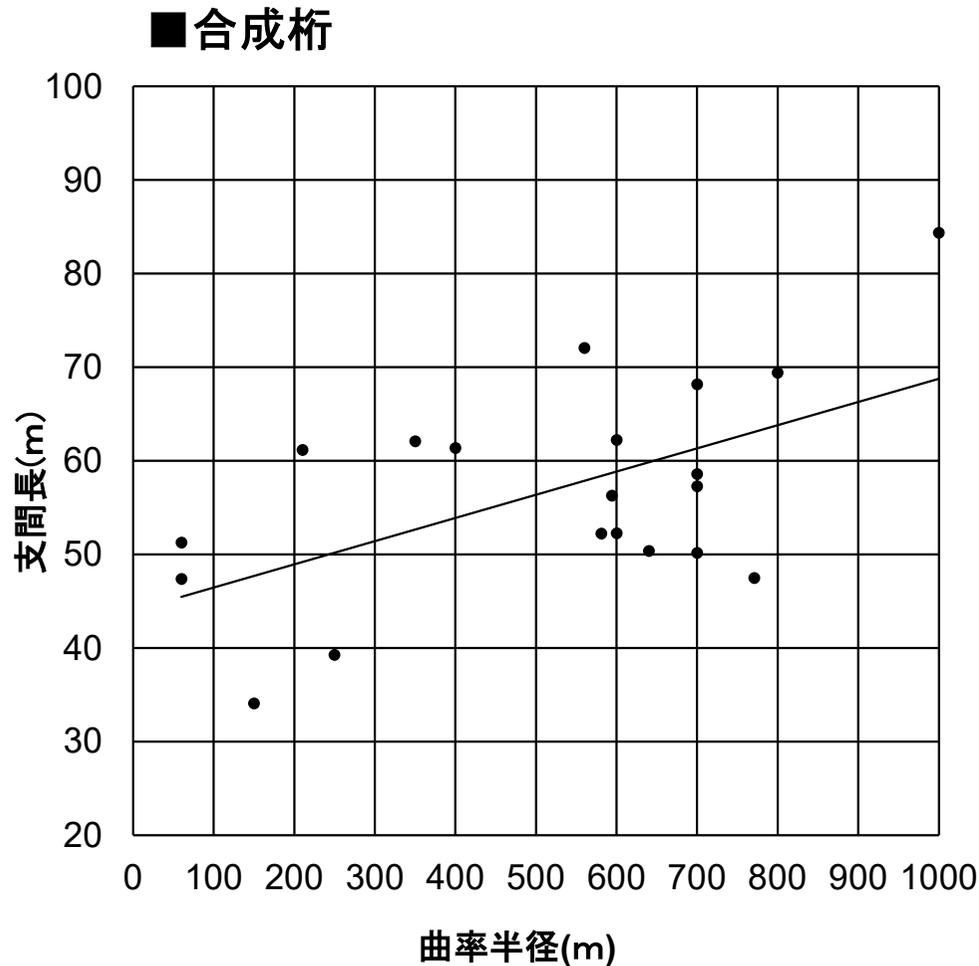


細幅箱桁橋

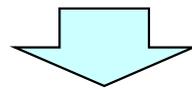


- ①箱桁の細幅化による主桁構造の合理化
箱幅の細幅化 ⇒ フランジの厚板化 ⇒ 縦リブ数の削減, 横リブの省略
- ②鋼コンクリート合成床版・プレストレストコンクリート床版の採用
床版の長支間化 ⇒ 床組構造(縦桁, ブラケット)の省略

1 曲線を有する細幅箱桁橋の実績



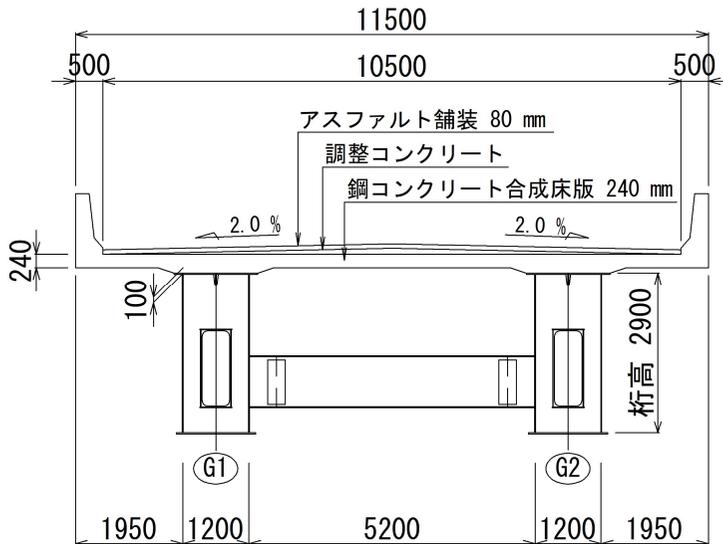
従前では非合成桁として設計されてきた比較的曲率半径が小さい細幅箱桁橋も、これからは、床版コンクリートと鋼桁の合成作用を適切に考慮して設計する必要がある。



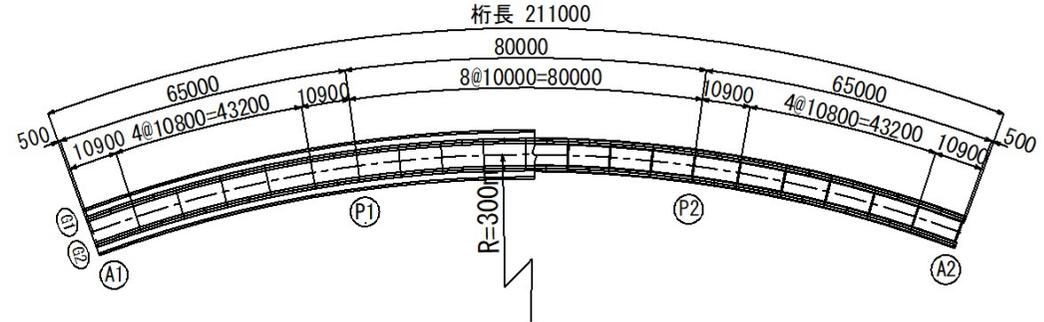
床版コンクリートと鋼桁の合成作用を考慮した試設計を行うとともに、その留意点を検証。

2 検討ケース

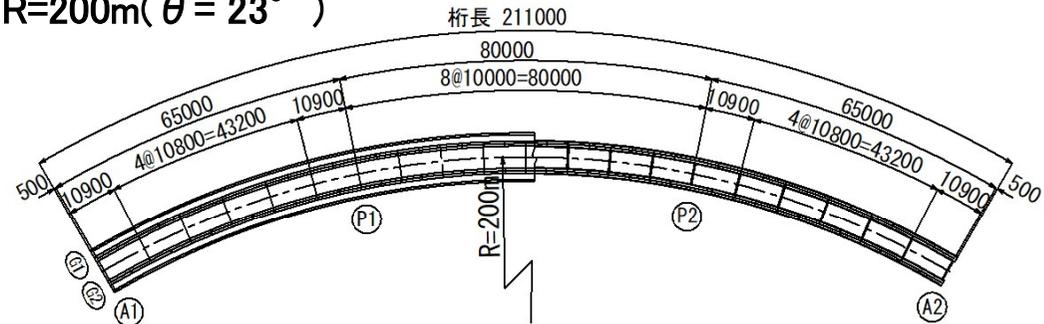
橋梁形式	3径間連続合成2主細幅箱桁橋
床版	鋼コンクリート合成床版(床版厚240mm)
総幅員	11.5m
支間長	65.0 + 80.0 + 65.0m
平面線形	$R = \infty, 300, 200, 100\text{m}$
支承条件	A1,A2 (橋軸方向可動, 橋軸直角方向固定) P1,P2 (橋軸方向弾性固定, 橋軸直角方向固定)
活荷重	B活荷重
設計震度	$Kh_1 = 0.21$ (レベル1地震動) $Kh_2 = 0.60$ (レベル2地震動) ※仮定
主要材料	鋼材 SM570,SM490Y,SM400 床版コンクリート $\sigma_{ck} = 30\text{N/mm}^2$ 鉄筋 SD345



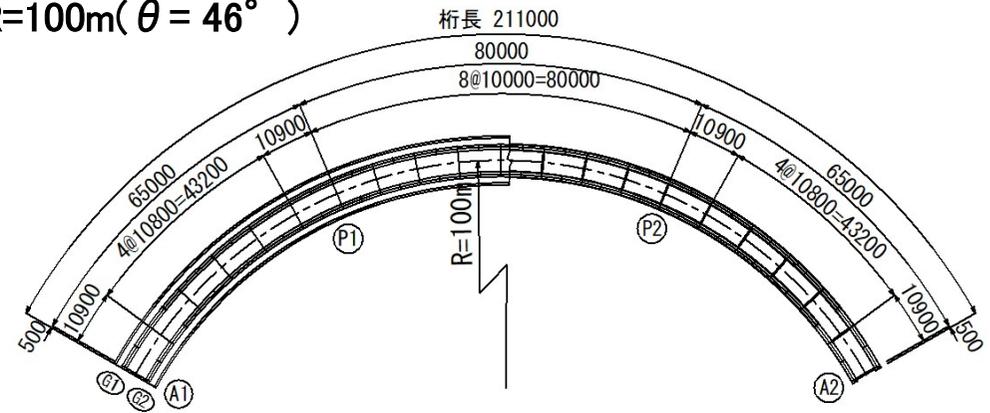
$R=300\text{m}(\theta = 15^\circ)$



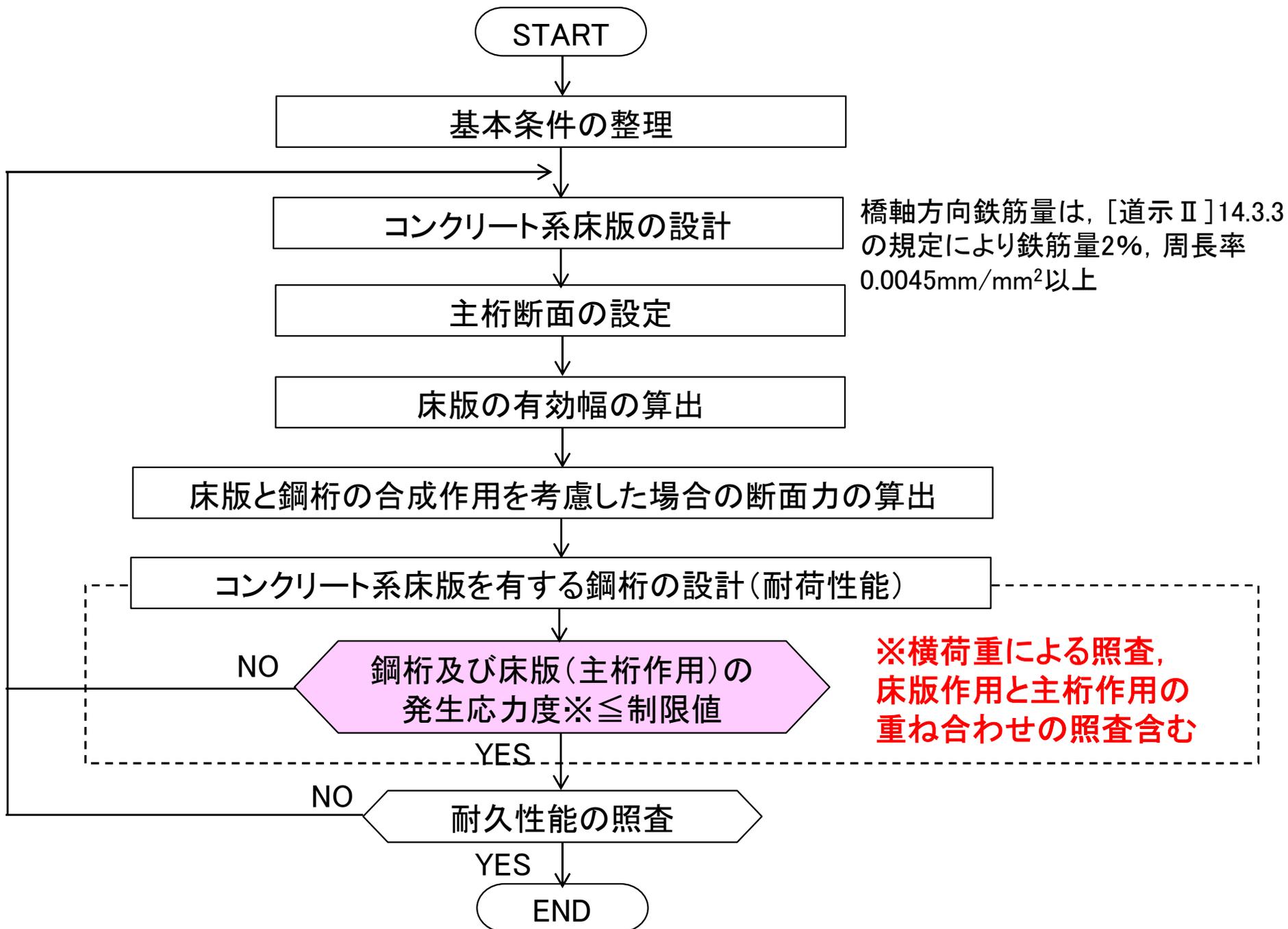
$R=200\text{m}(\theta = 23^\circ)$



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



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)

(断面力の算出)

※1)引張応力度の制限値(N/mm²)

σ_{ck}	27	30
床版の上, 下縁	2.0	2.2
床版厚中心	1.4	1.6

架設時の照査【鋼桁】

《永続作用支配状況》

《変動・偶発作用支配状況》

組合せ①の照査【合成断面】

組合せ②～⑪の照査【合成断面】
(組合せ④, ⑥～⑪:横荷重の照査)

床版コンクリート
応力度 > 0.0

NO [道示Ⅱ] 14.6.2(3)

床版コンクリート
引張応力度 $>$ 制限値※1

NO [道示Ⅱ] 14.6.2(3)

YES(コンクリート断面
を有効としない)

YES(コンクリート断面
を有効としない)

組合せ①の照査
【鋼桁+鉄筋】

組合せ①の照査
【合成断面】

組合せ②～⑪の照査
【鋼桁+鉄筋】

組合せ②～⑪の照査
【合成断面】

(床版の設計,
主桁断面の設定)

鋼桁及び床版(主桁作用)の
発生応力度※2 \leq 制限値

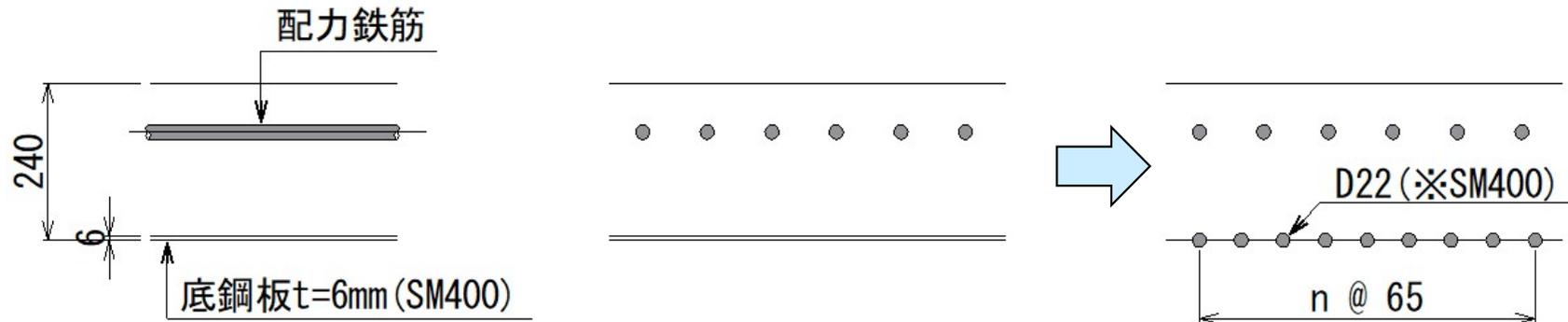
※2)床版作用と主桁作用の
重ね合わせの照査含む

YES
(耐久性能の照査)

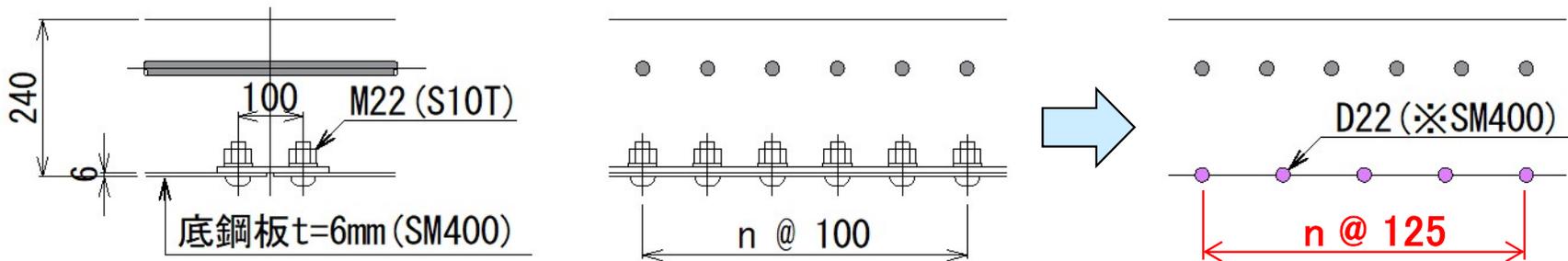
2 鋼コンクリート合成床版の底鋼板の取り扱い(1)

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、継手耐力と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) $V_{fud} = 558 \text{ kN/m}$

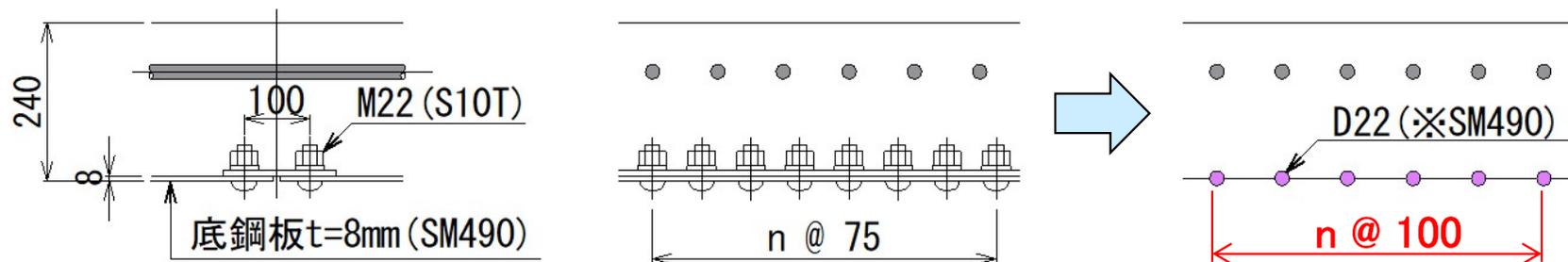
$$n = \frac{V_{fud}}{D_s \times \sigma_{tud}} = \frac{558,000}{387.1 \times 180} = 8.0 \rightarrow \text{8本/m (D22@125mm)}$$

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)

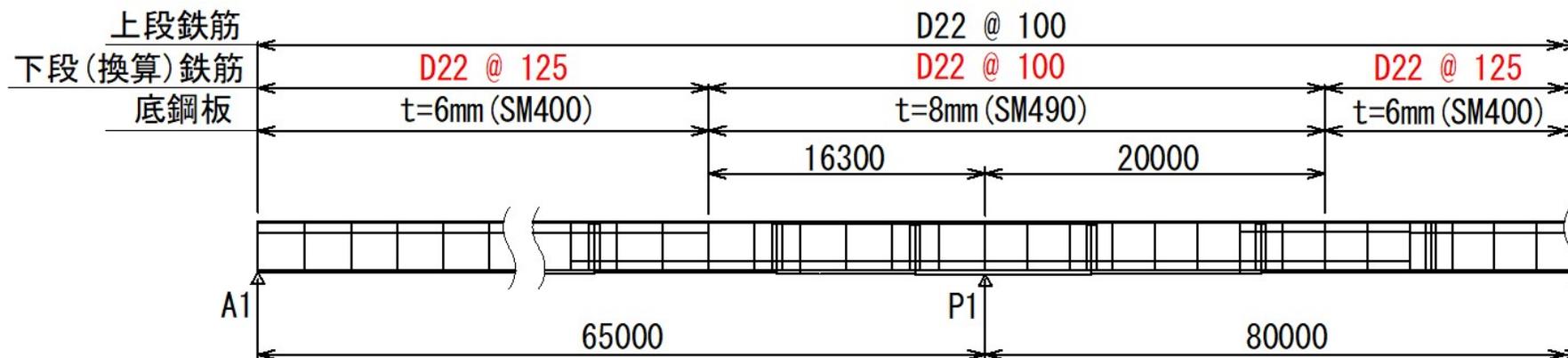
中間支点上は、横荷重により底鋼板に大きな力が作用するため、底鋼板を(t=8mm,SM490)とする。



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

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

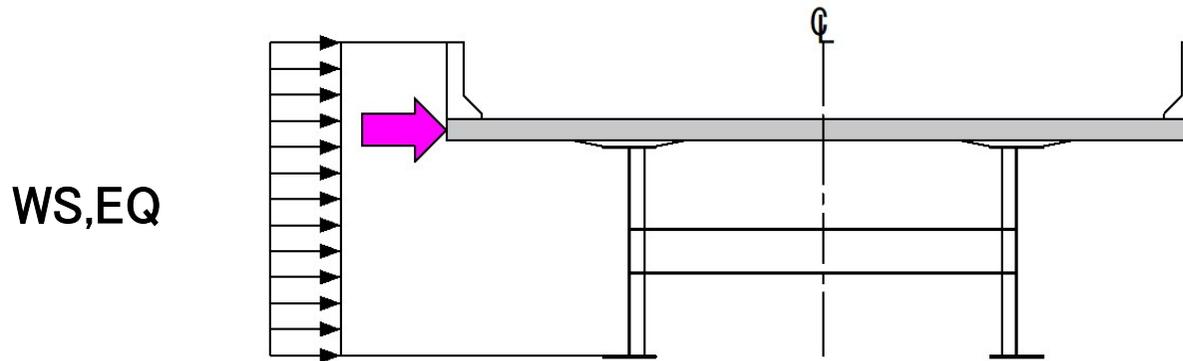
橋軸方向鉄筋の配置



2 横荷重による主桁断面の照査

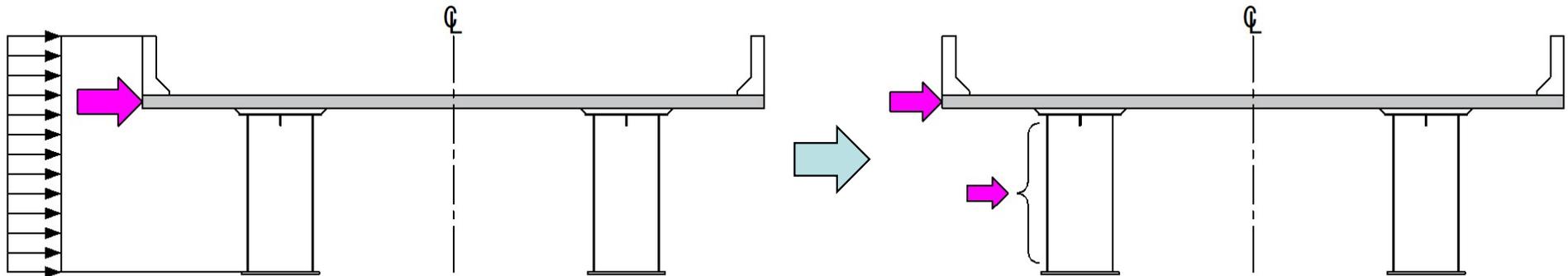
2主I桁橋のような構造の場合、横荷重に対しては全て床版で抵抗する。

➡ 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。

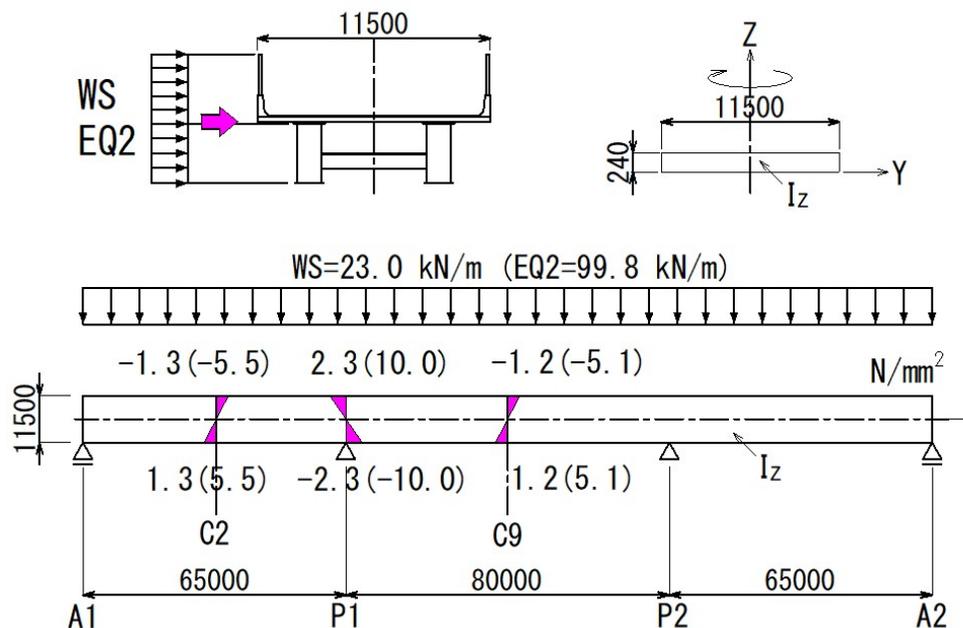
WS, EQ



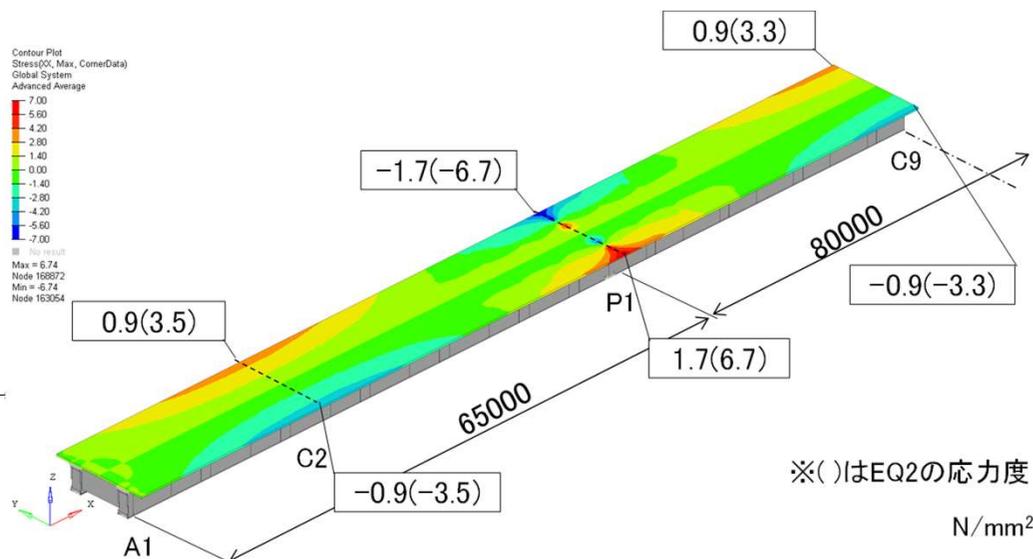
細幅箱桁橋は、鋼桁が鉛直軸回りの曲げ剛性を有する構造であることから、横荷重を床版と鋼桁に適切に分担させることとする。

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(床版のみ)

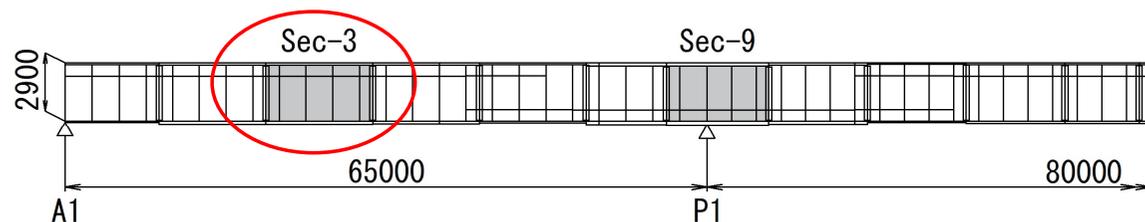
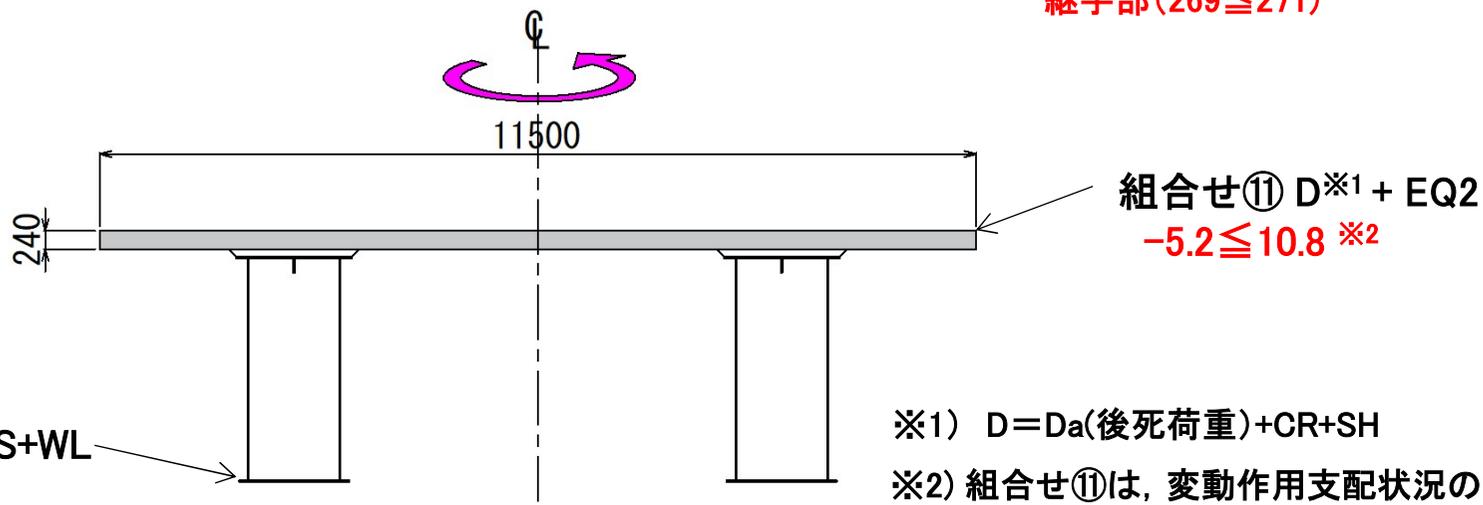
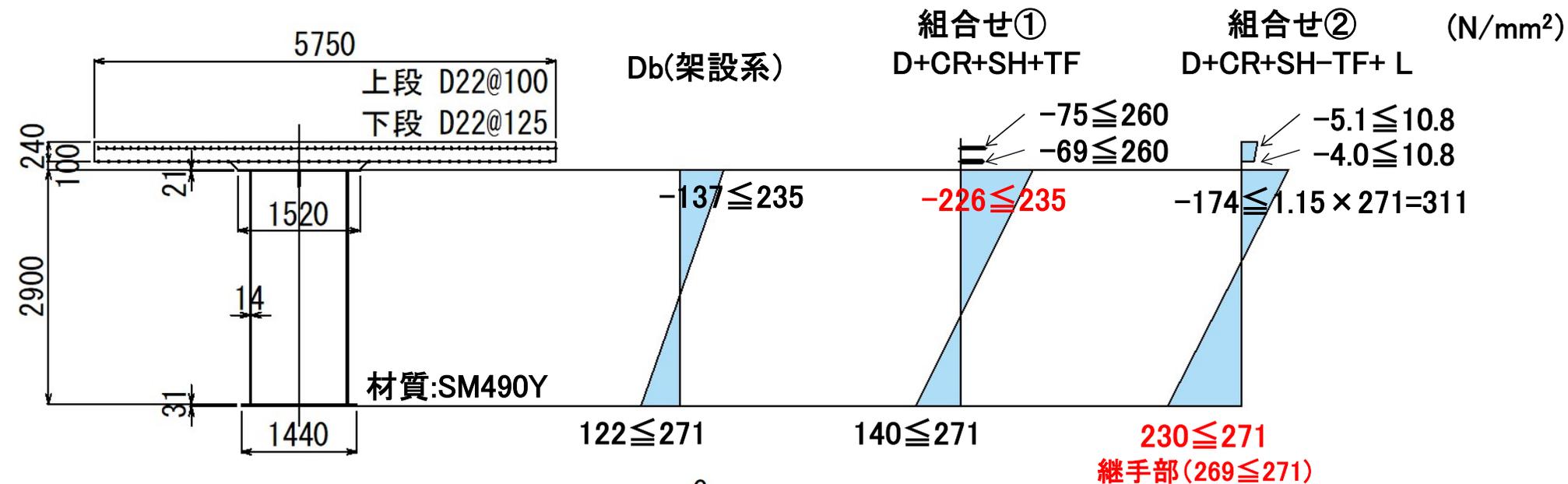


②有限要素解析(全橋 1/2モデル)

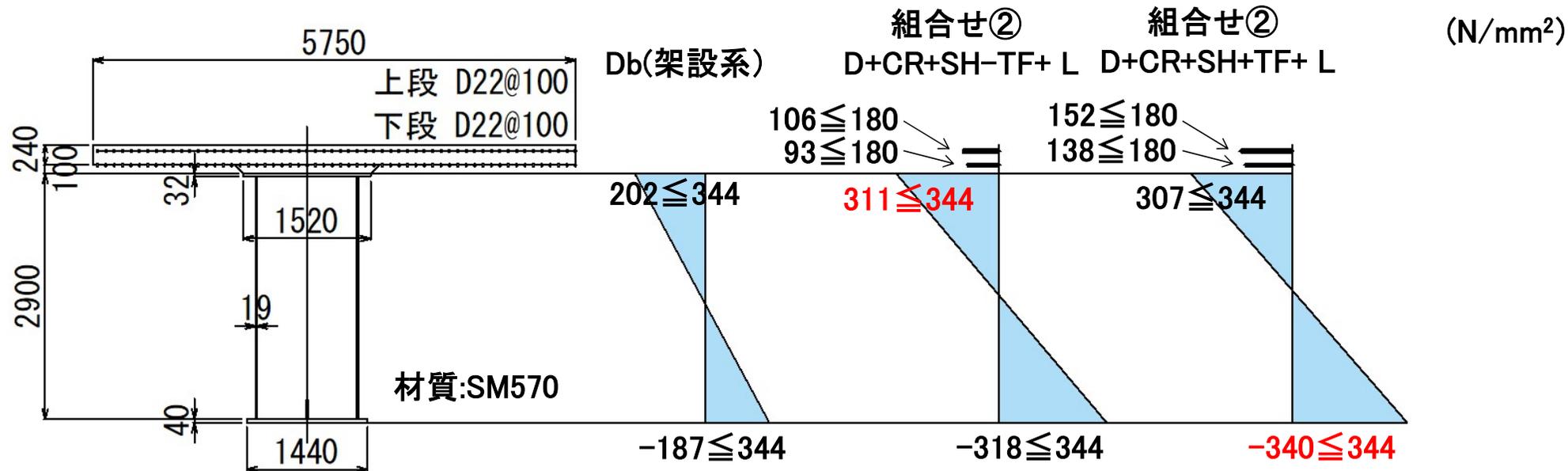
横荷重に対する床版の分担率

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 Sec-3の耐荷性能の照査(R=∞)

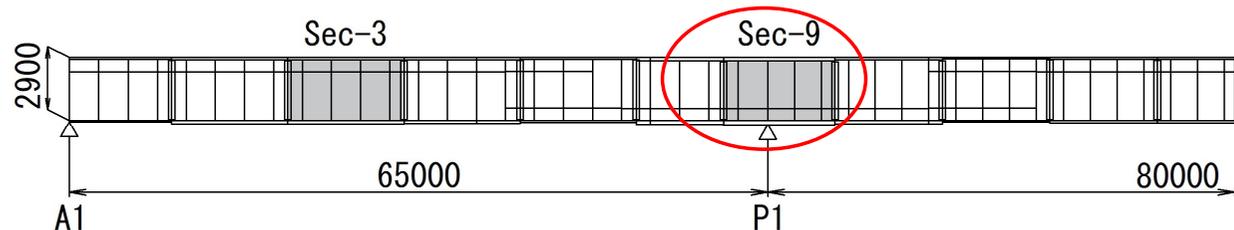
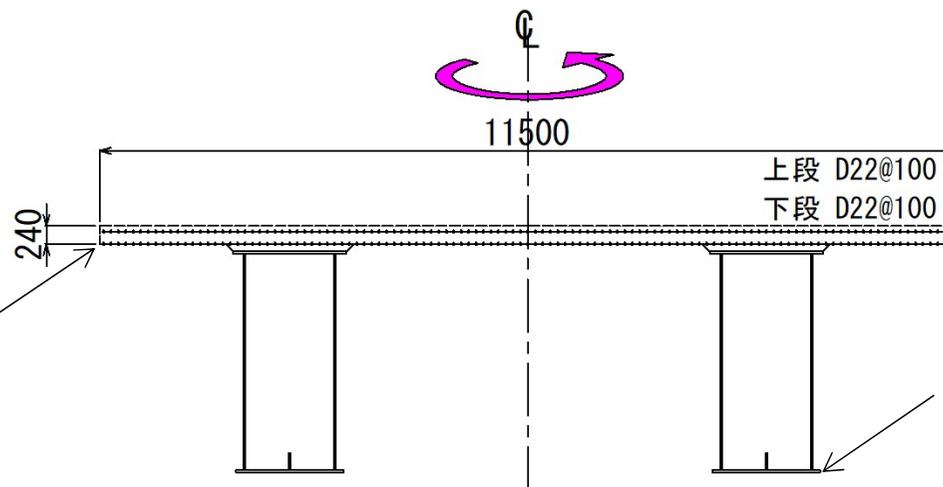


2 Sec-9の耐荷性能の照査(R=∞)



組合せ⑦ D*1 +L+TH+WS+WL
214 ≤ 216

※1) D=Da(後死荷重)+CR+SH

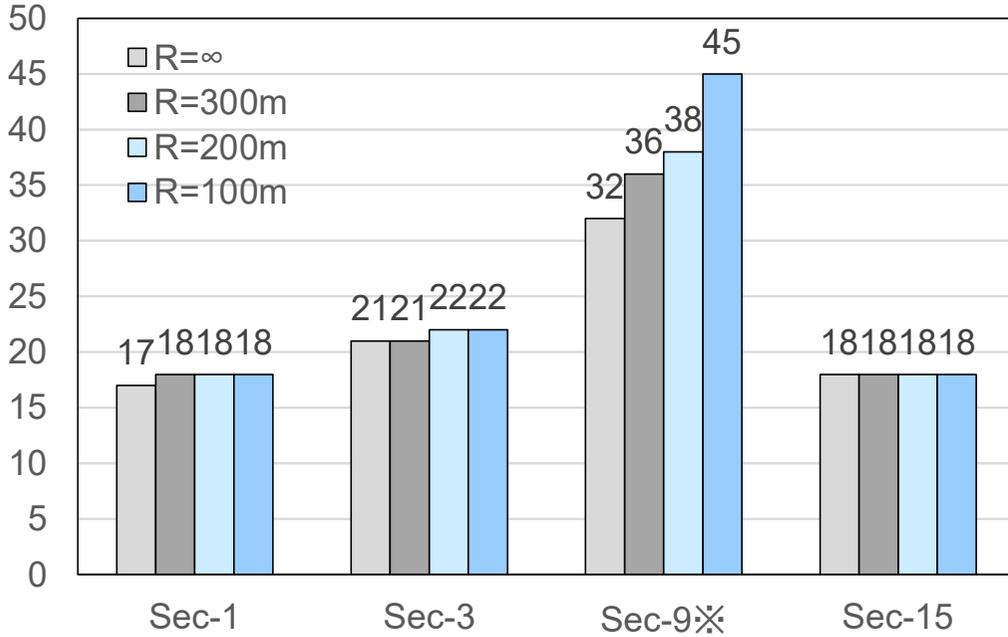


2 主桁断面の比較(1)

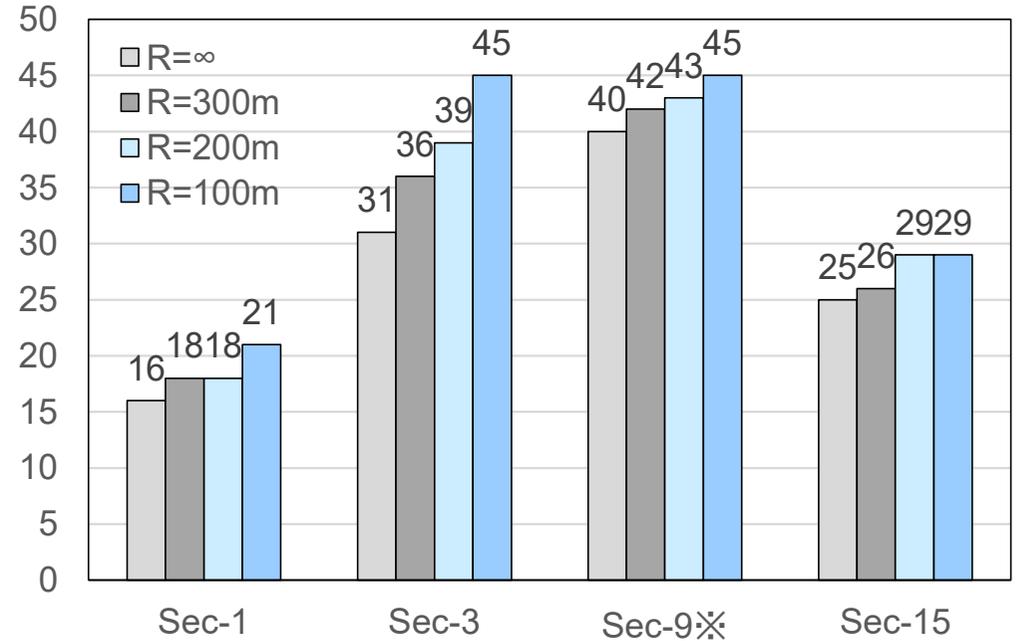
G1(外桁)上下フランジ断面の比較

板厚(mm)

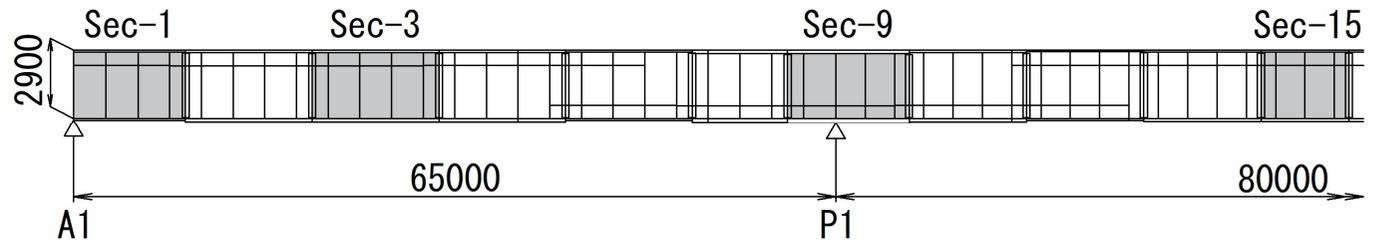
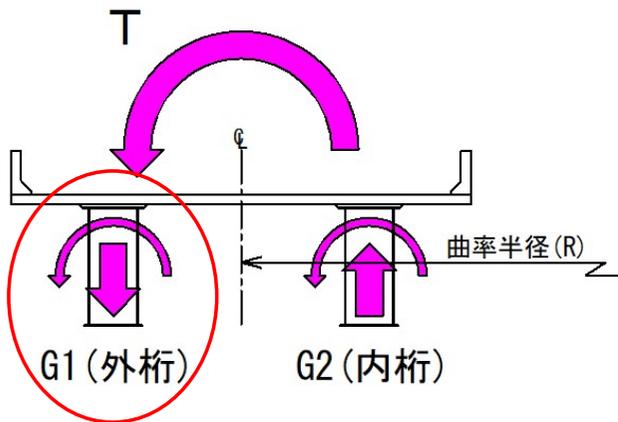
G1(外桁)上フランジ



G1(外桁)下フランジ

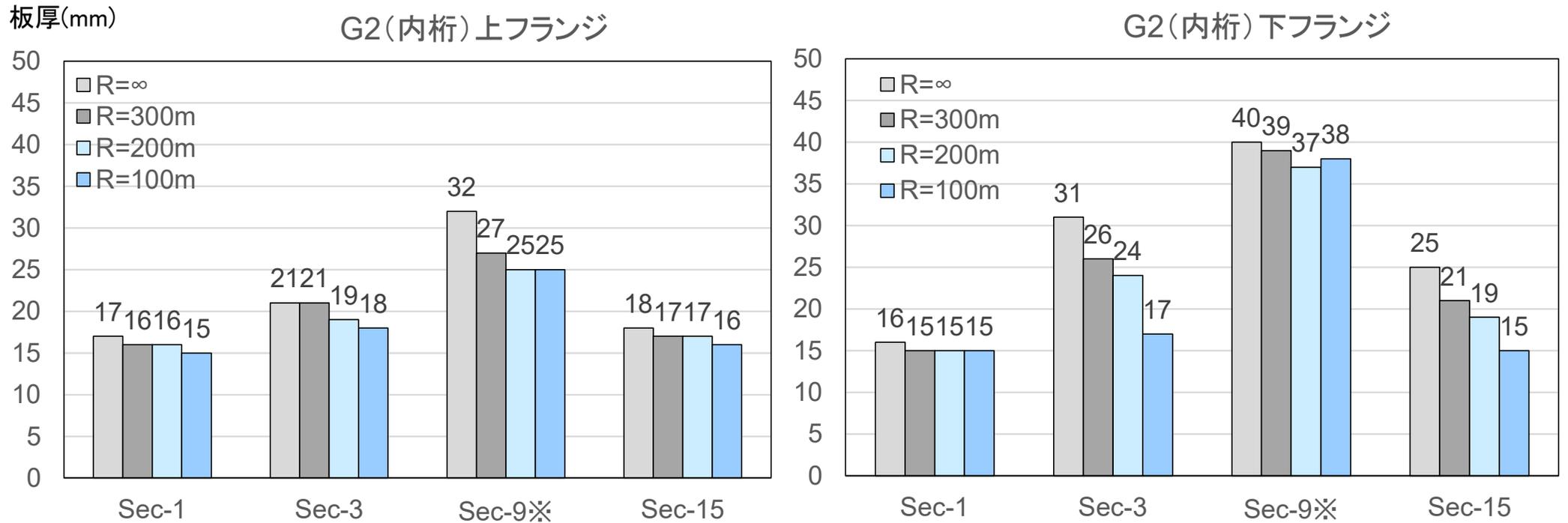


※印: SM570材, その他はSM490Y材

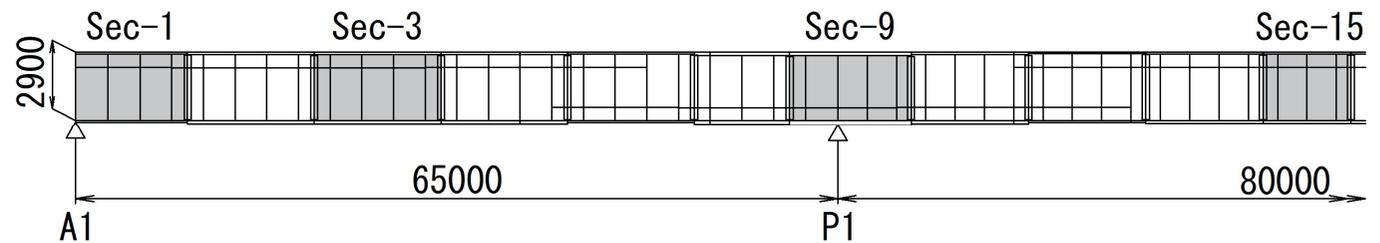
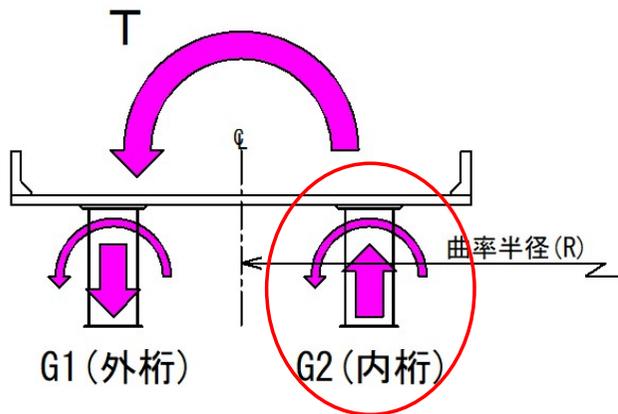


2 主桁断面の比較(2)

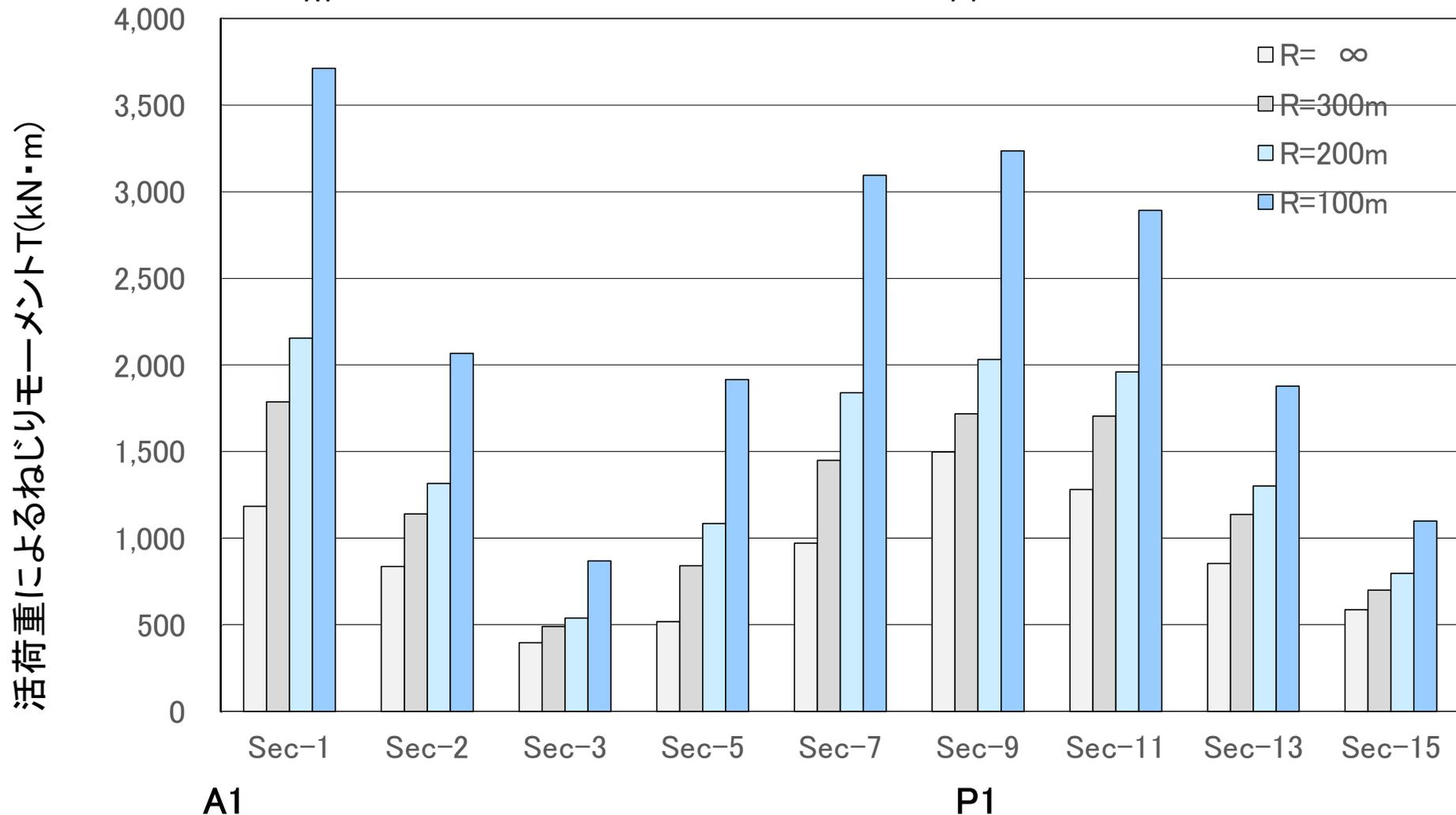
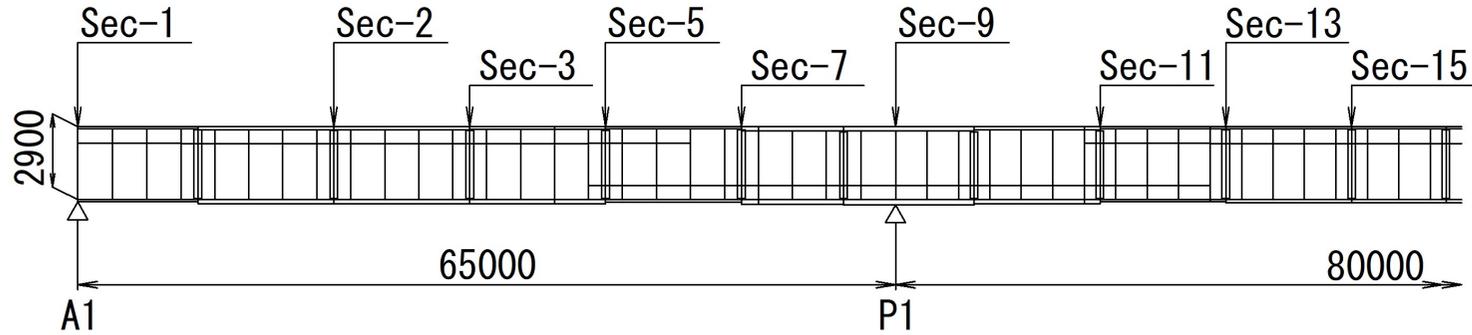
G2(内桁)上下フランジ断面の比較



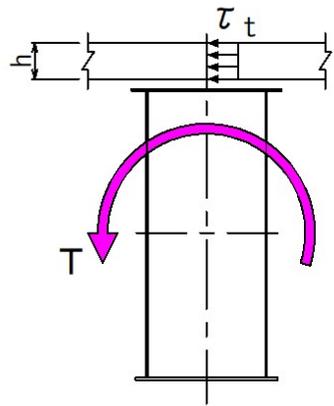
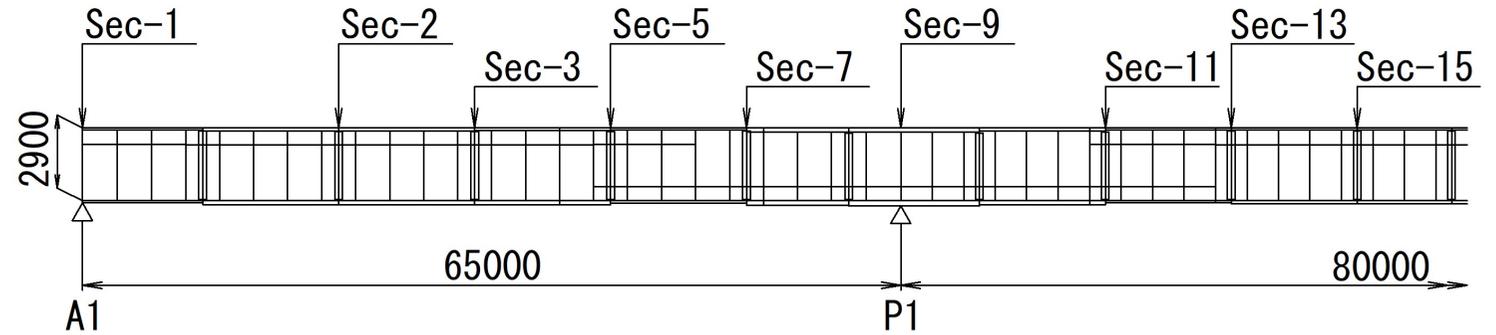
※印: SM570材, その他はSM490Y材



3 G1(外桁)に作用するねじりモーメント



3 ねじりにより床版に作用するせん断応力度



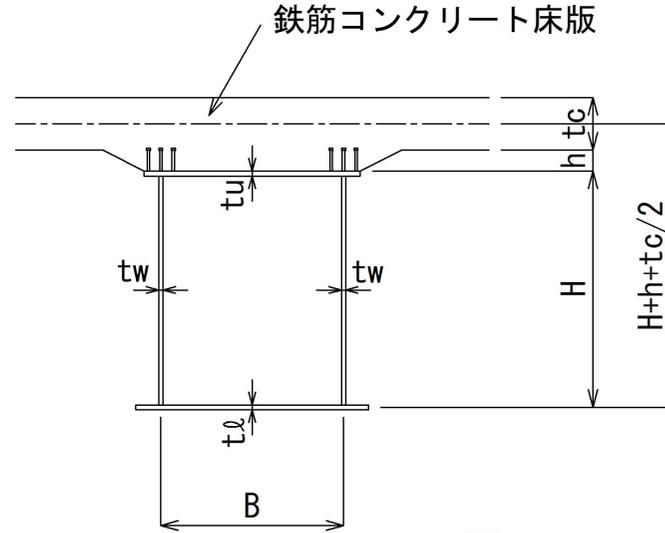
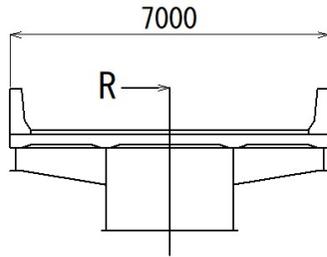
ねじりによるせん断応力度 τ_t (N/mm²)



3 床版コンクリートのせん断応力度の制限値

[H29道示]には、ねじりにより床版に作用するせん断応力度の制限値の規定がない

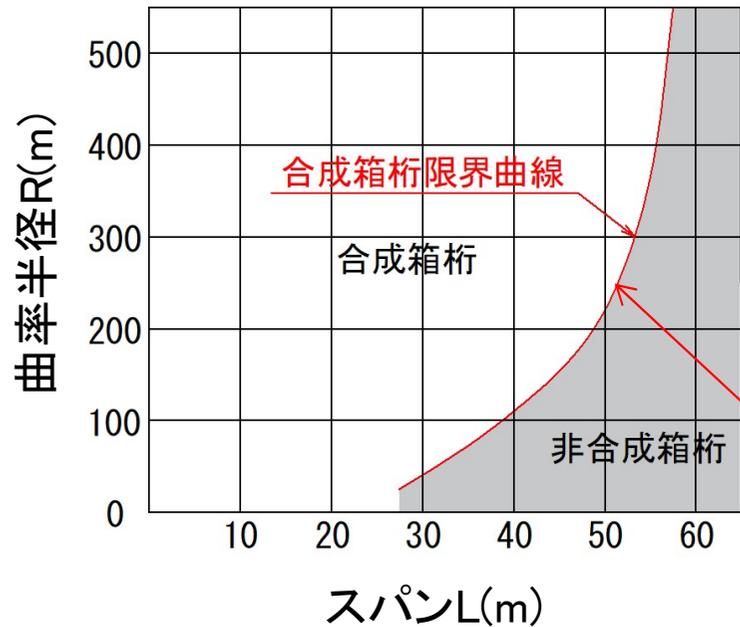
➡ 「曲線桁設計の手引き(案)」(阪神高速道路公団 昭和63年10月)



$$q = \frac{T}{2B(H+h+tc/2)}$$

q : せん断流(N/mm)

T : ねじりモーメント(N・mm)



$$\tau_b + \tau_t \leq \text{コンクリートの許容引張応力度}$$

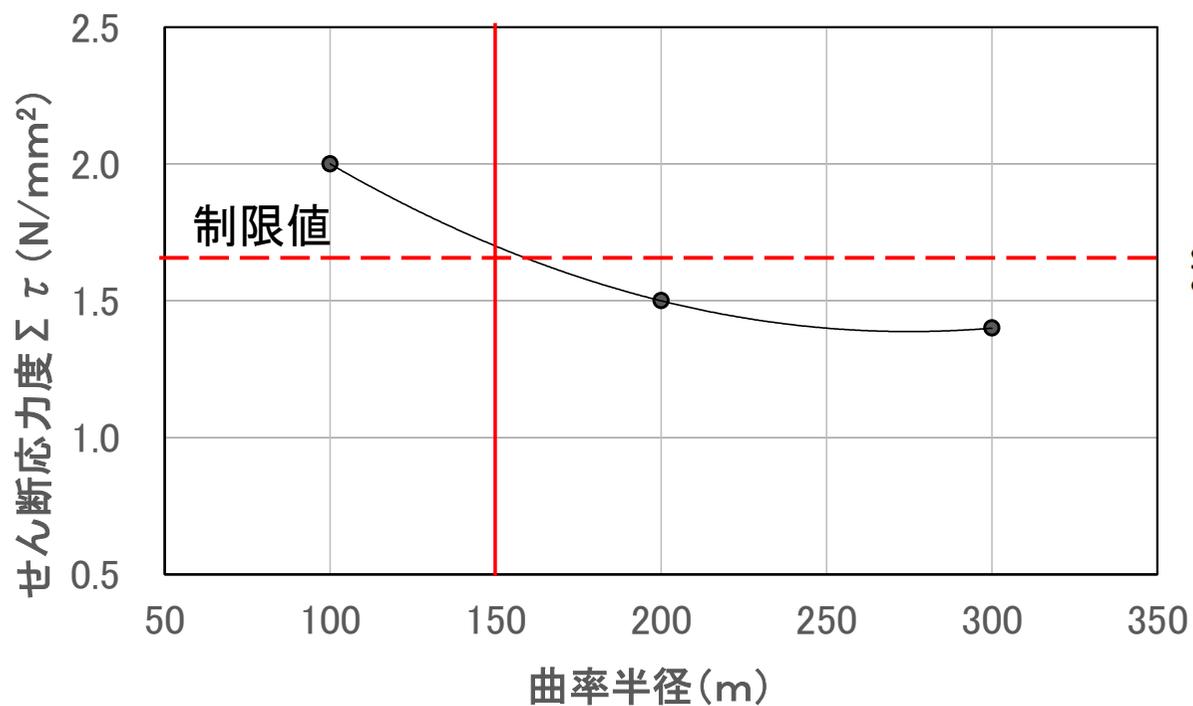
τ_b : 曲げに伴い床版に生じるせん断応力度(N/mm²)

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)

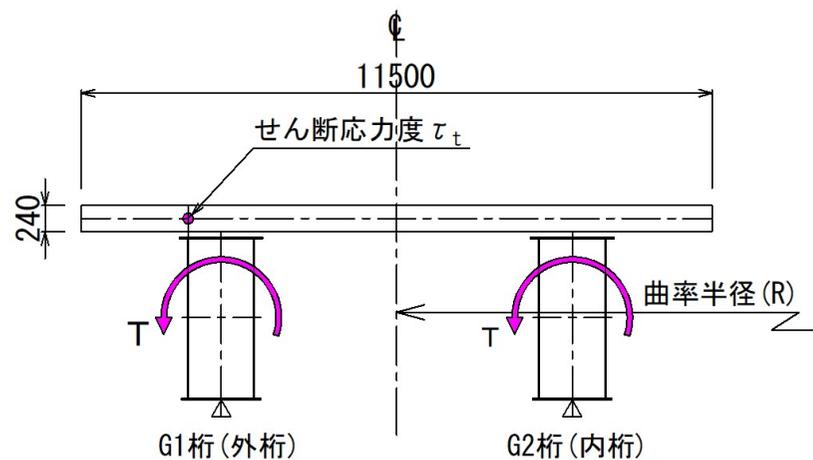
3 曲線桁の適用限界の試算結果

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	

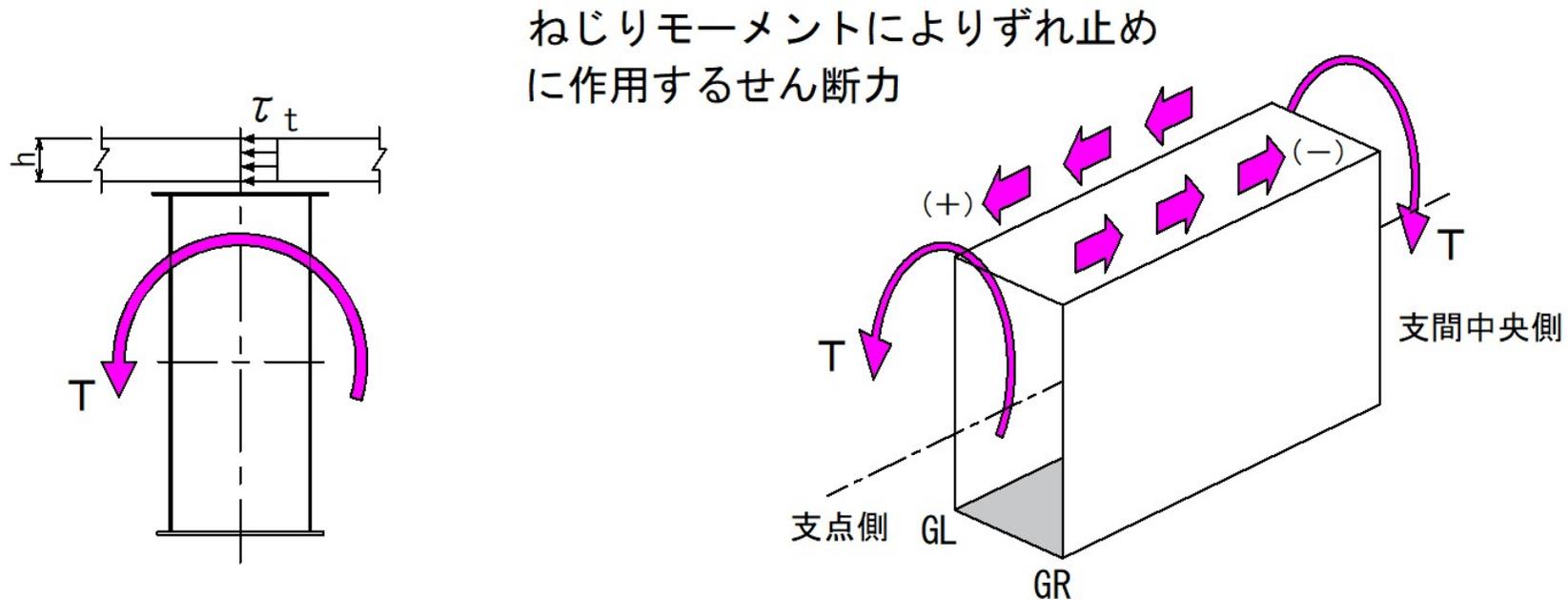


G1桁端支点上の床版のせん断応力度



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。



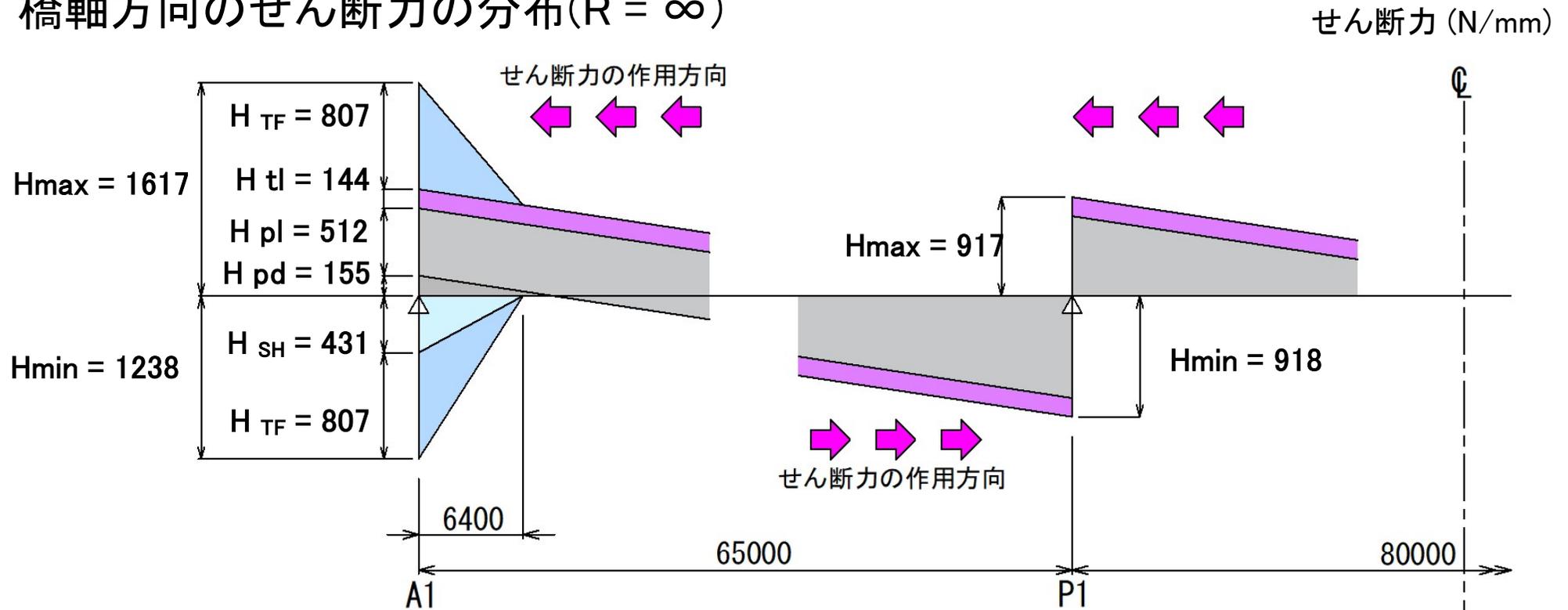
よって、ずれ止めの設計にも、これらの影響を考慮する必要がある。



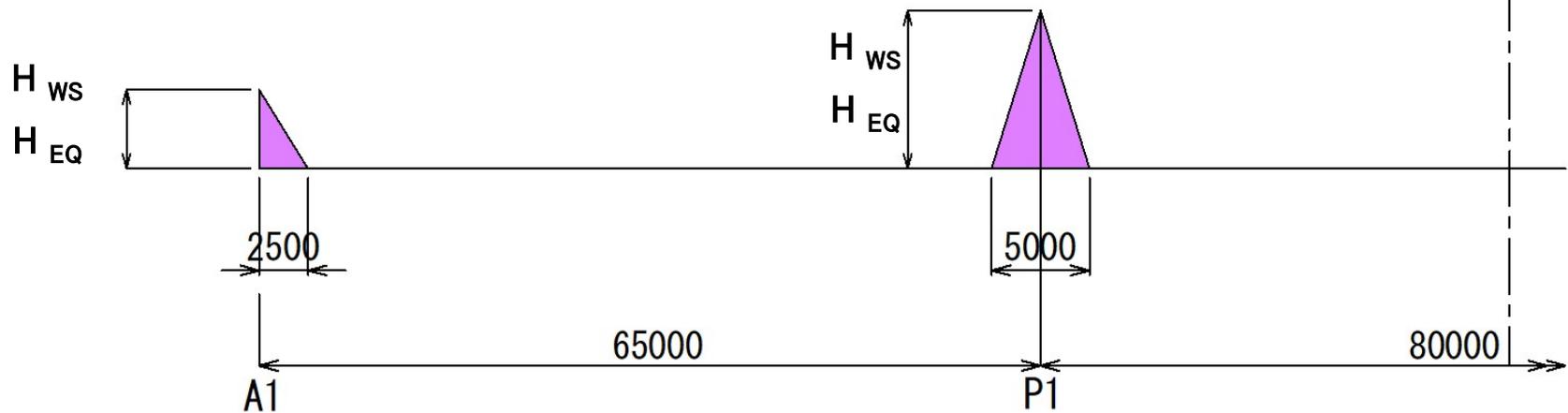
曲率半径の大小が、ずれ止め配置に与える影響を検討
ずれ止めの配置には、横荷重の影響も考慮

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($R = \infty$)

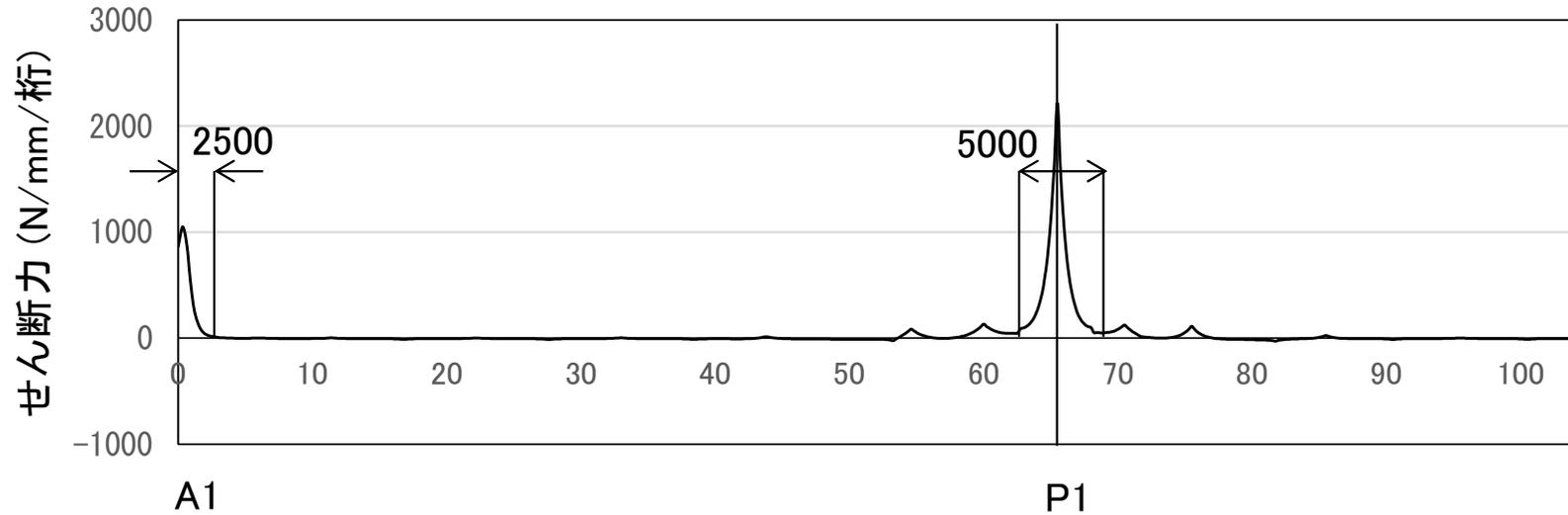


橋軸直角方向のせん断力の分布



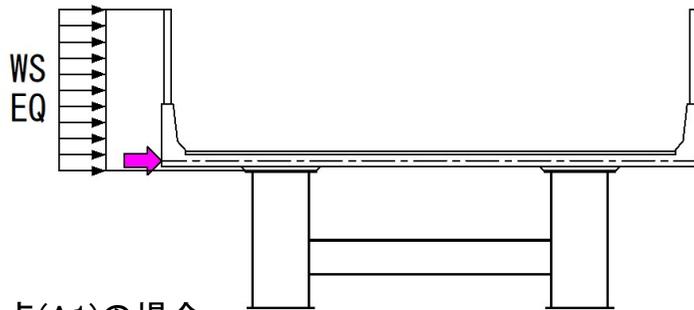
4 ずれ止めに作用する橋軸直角方向の力

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)

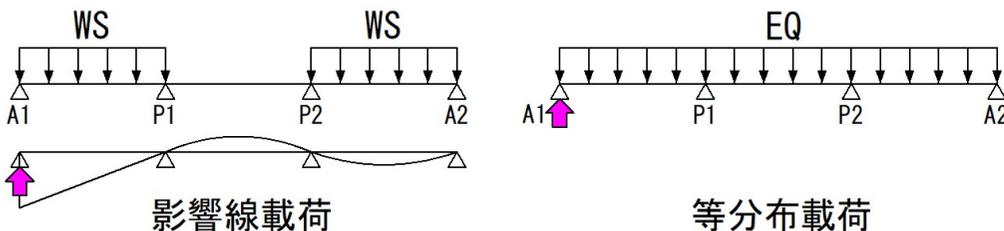


ずれ止めに作用する橋軸直角方向の力

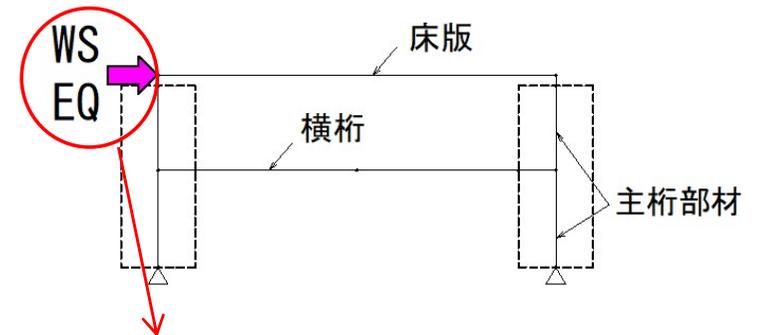
ハンチより上側に作用する横荷重を考慮



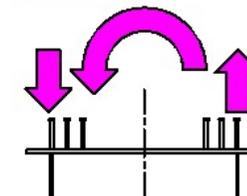
端支点(A1)の場合



支点上横桁のモデル化

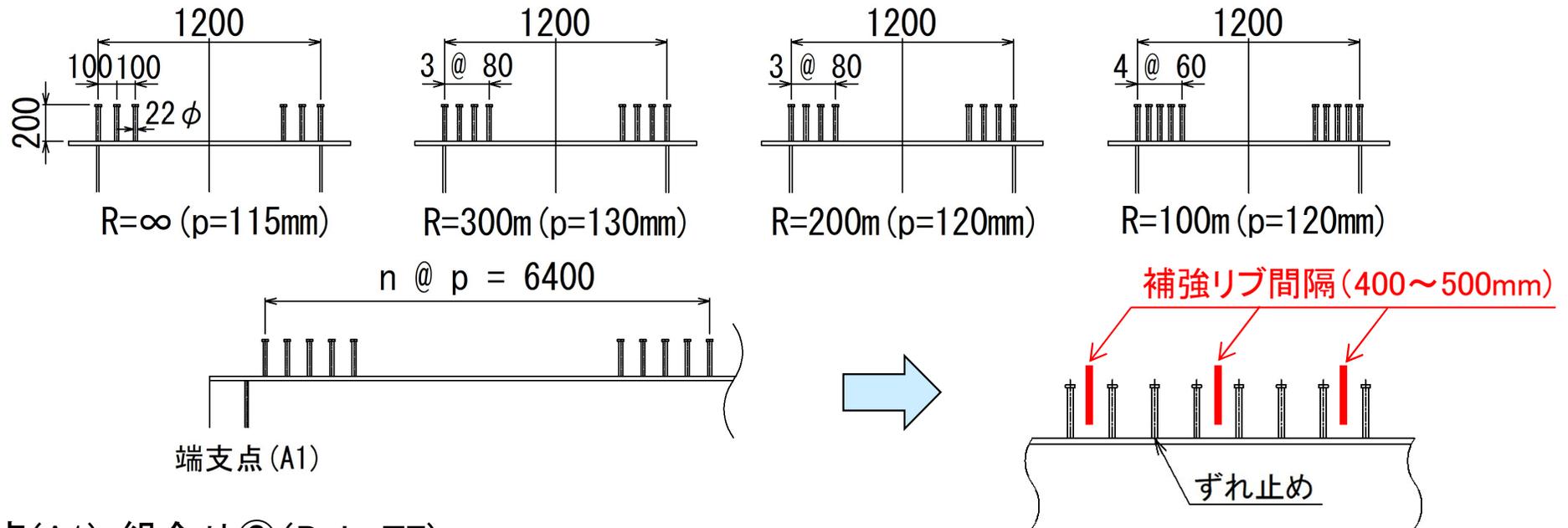


M_{WS}, M_{EQ}



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)

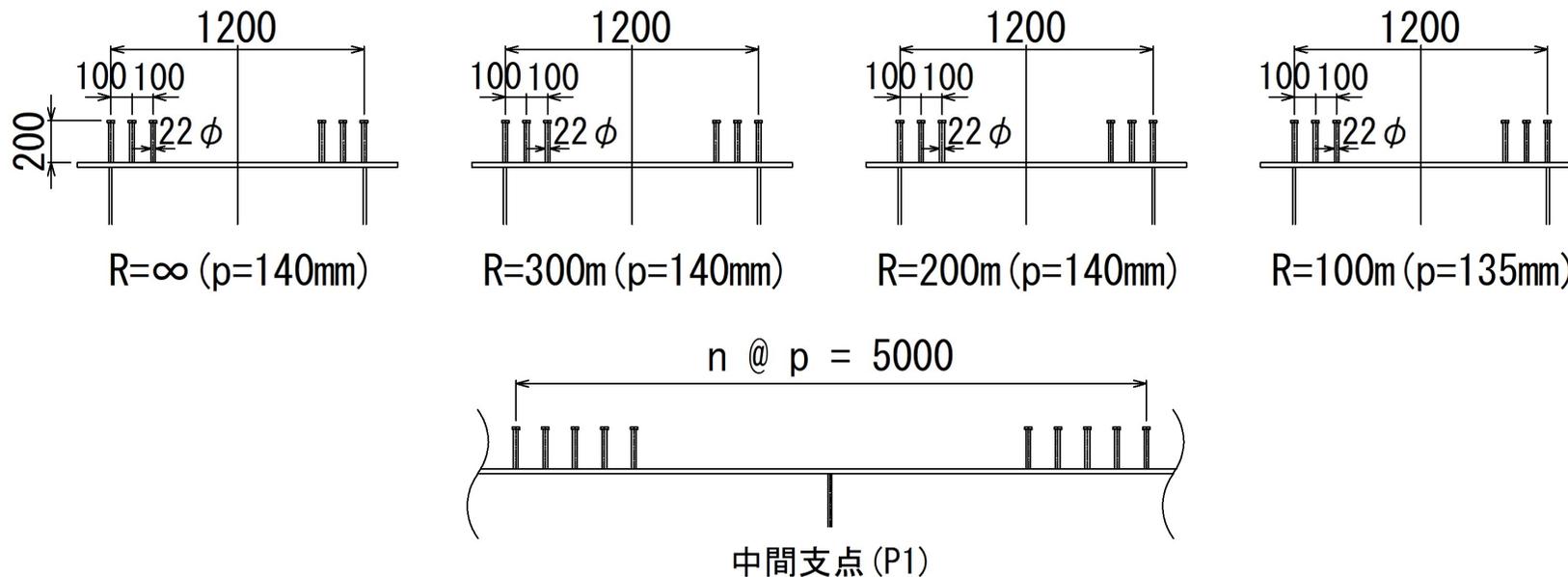
T_{ud} : ずれ止めのせん断応力度の制限値(N/mm²)

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)

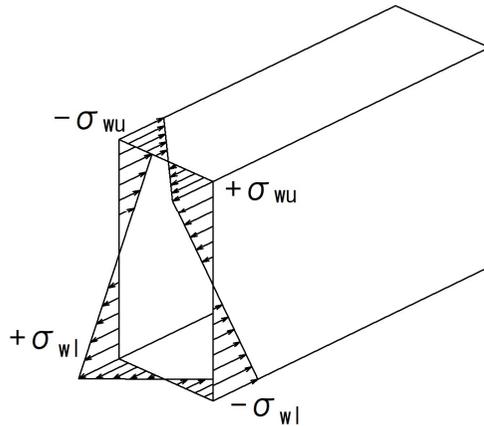
σ_t : ずれ止めに作用する引張応力(N/mm²)

σ_{tyd} : ずれ止めの引張応力の制限値(N/mm²)

K' : せん断応力と引張応力の合成応力の照査

5 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、式(6.6.5)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)

細幅箱桁橋の場合、一般的に $\kappa = 15$ 程度

ここに、 $\kappa = L \sqrt{GK/EI_w}$

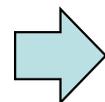
L : ねじりに対する支間長(mm)

G : せん断弾性係数(N/mm²)

K : 断面のねじり定数(mm⁴)

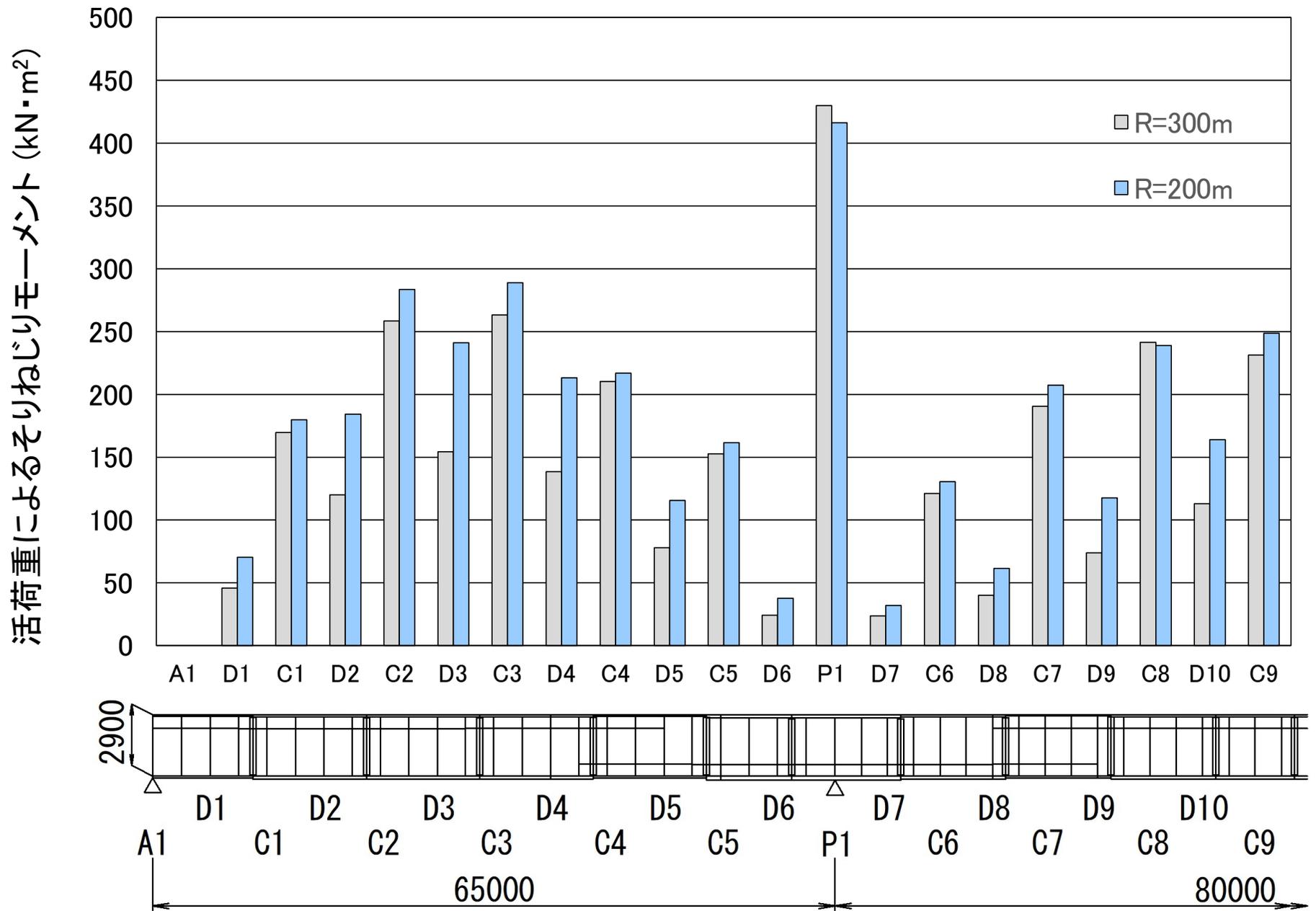
E : ヤング係数(N/mm²)

I_w : 断面のそりねじり定数(mm⁶)



曲率半径によるそりねじり応力度の影響を検証

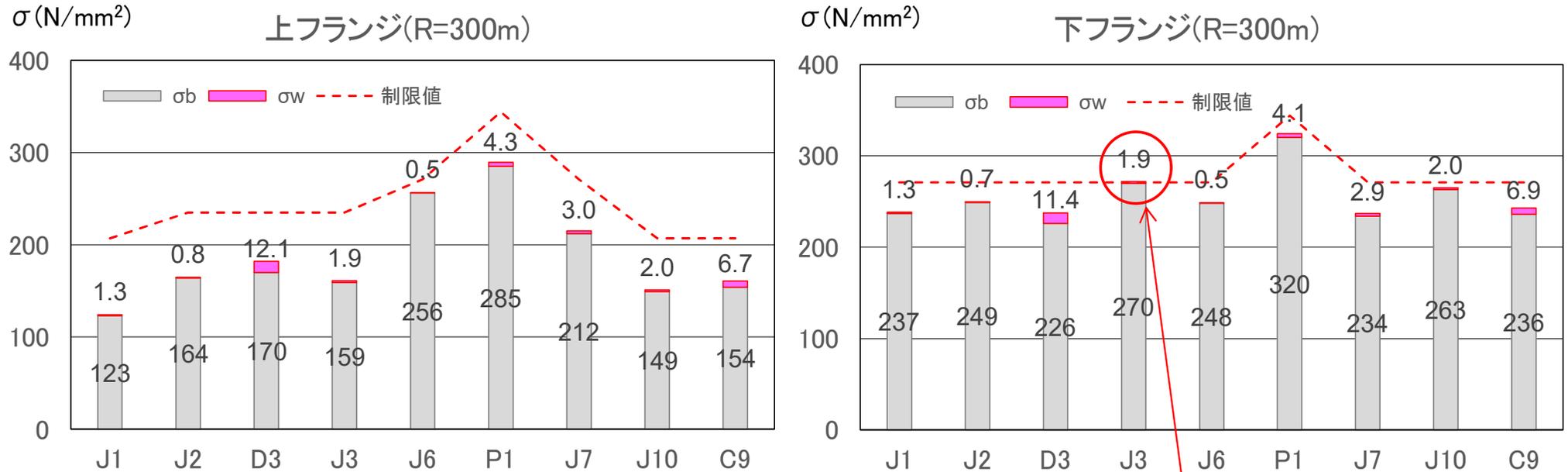
5 そりねじりモーメント



※) C: 中間横桁, D: 中間ダイアフラム

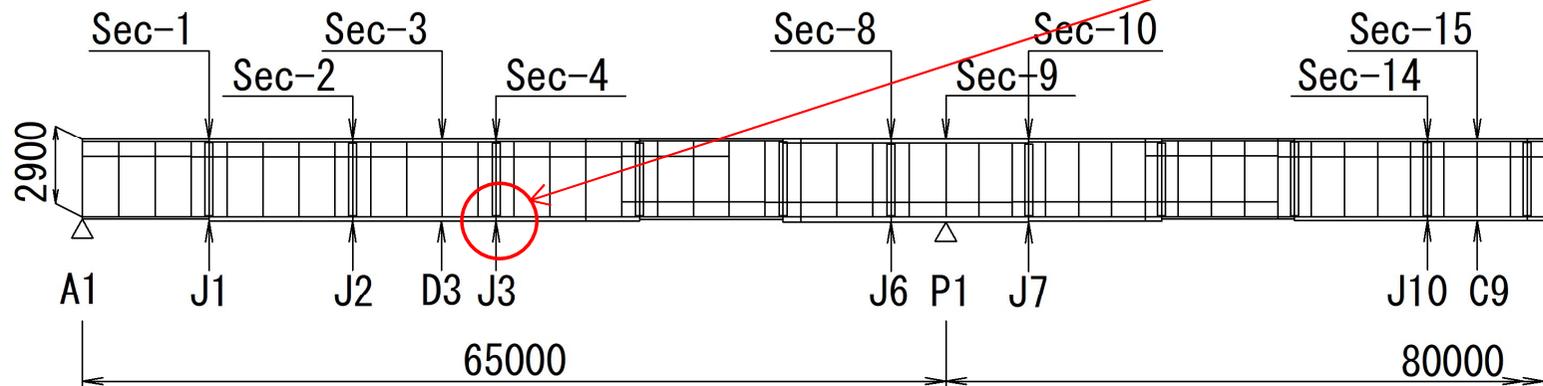
5 曲げ応力度とそりねじり応力度(1)

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



上下フランジとも σ_w は、最大で制限値の5%程度

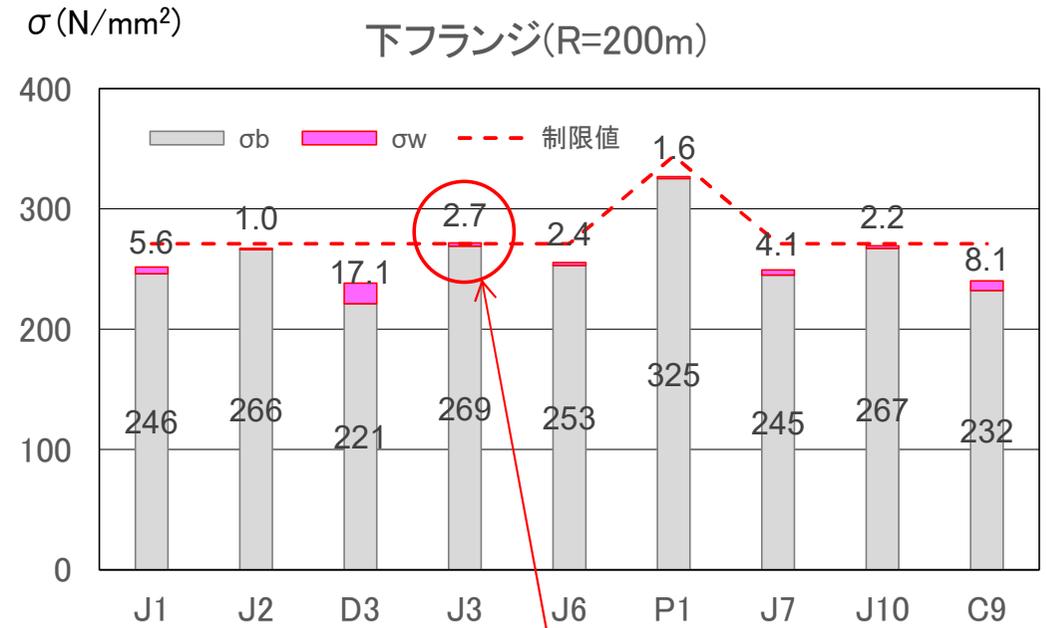
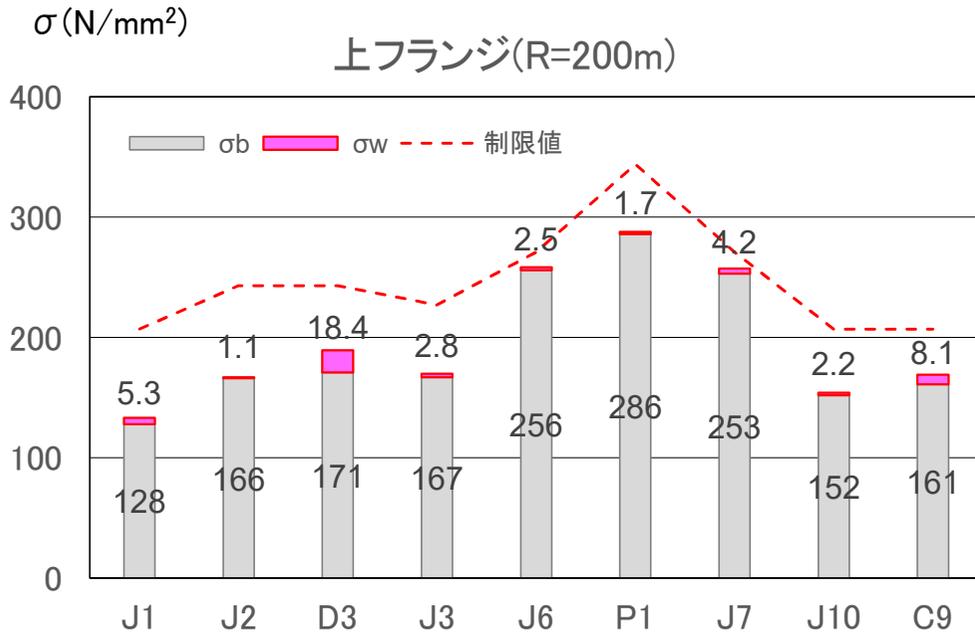
制限値を1N/mm²超過



※) J:現場継手

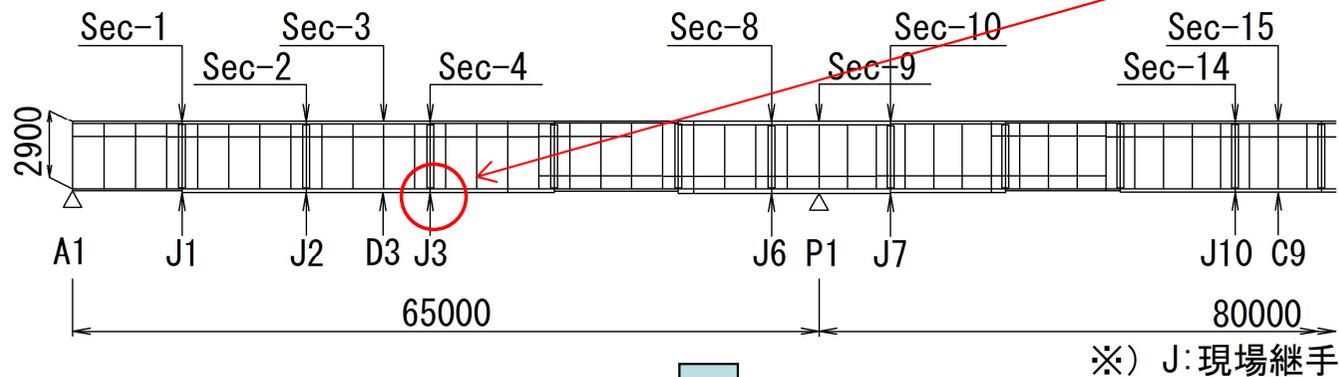
5 曲げ応力度とそりねじり応力度(2)

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



上下フランジとも σ_w は、最大で制限値の7%程度

制限値を1N/mm²超過

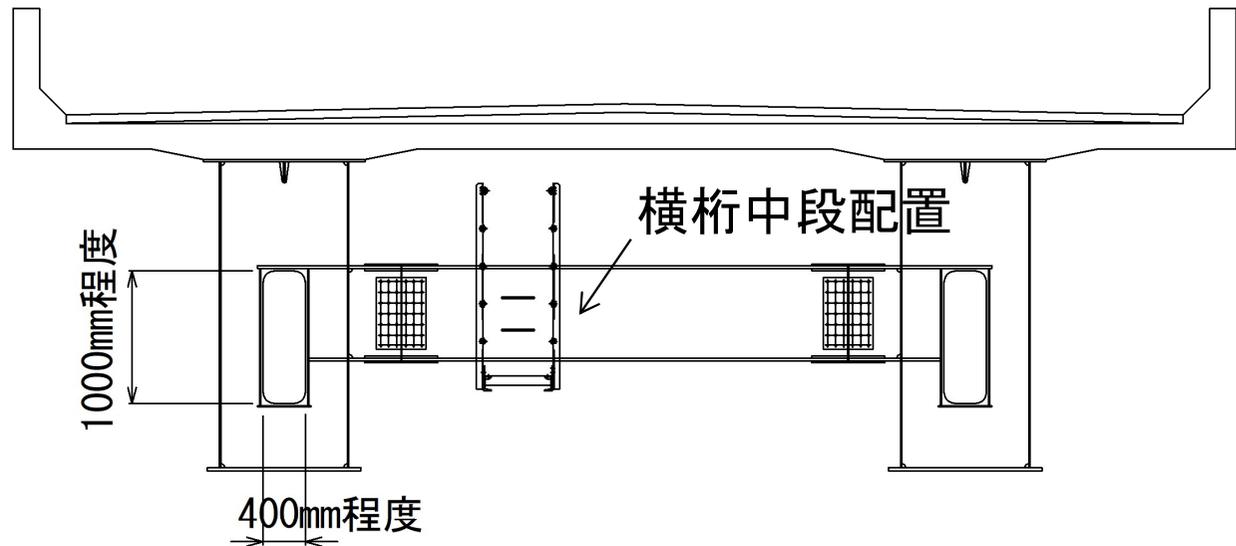


曲げモーメント最大断面の下フランジやその付近の継手は、制限値に対して余裕を持たせる。

6 中間横桁取付け部の設計

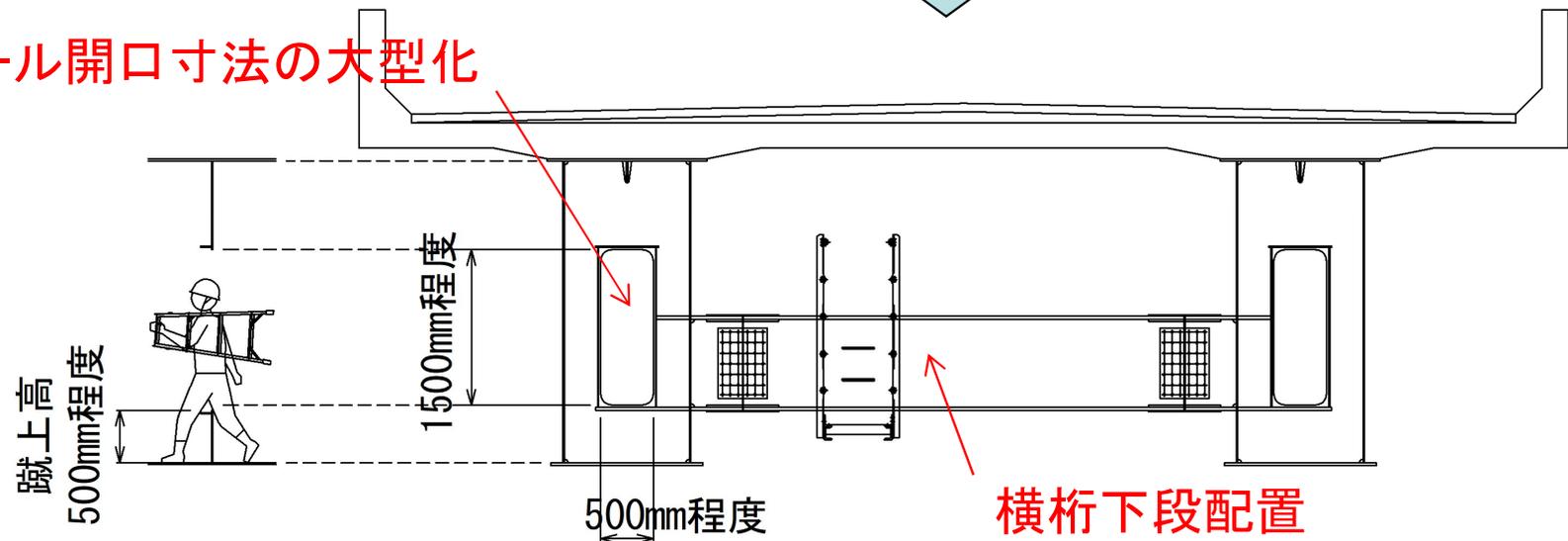
主桁と横桁の取合い部の構造

・当初の構造



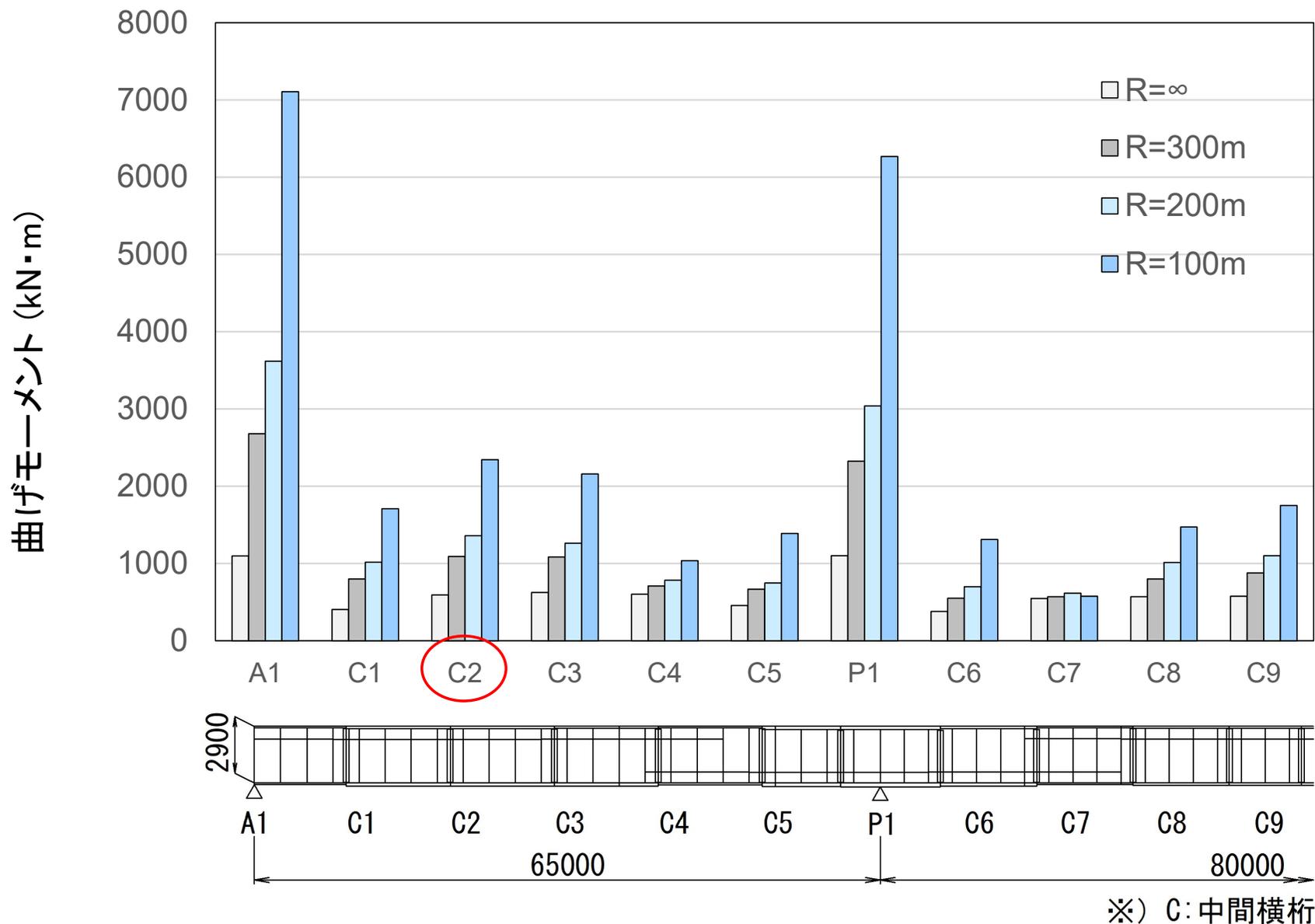
・最近の構造

マンホール開口寸法の大型化



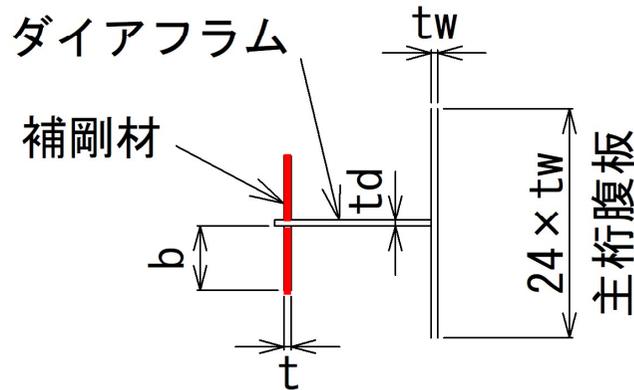
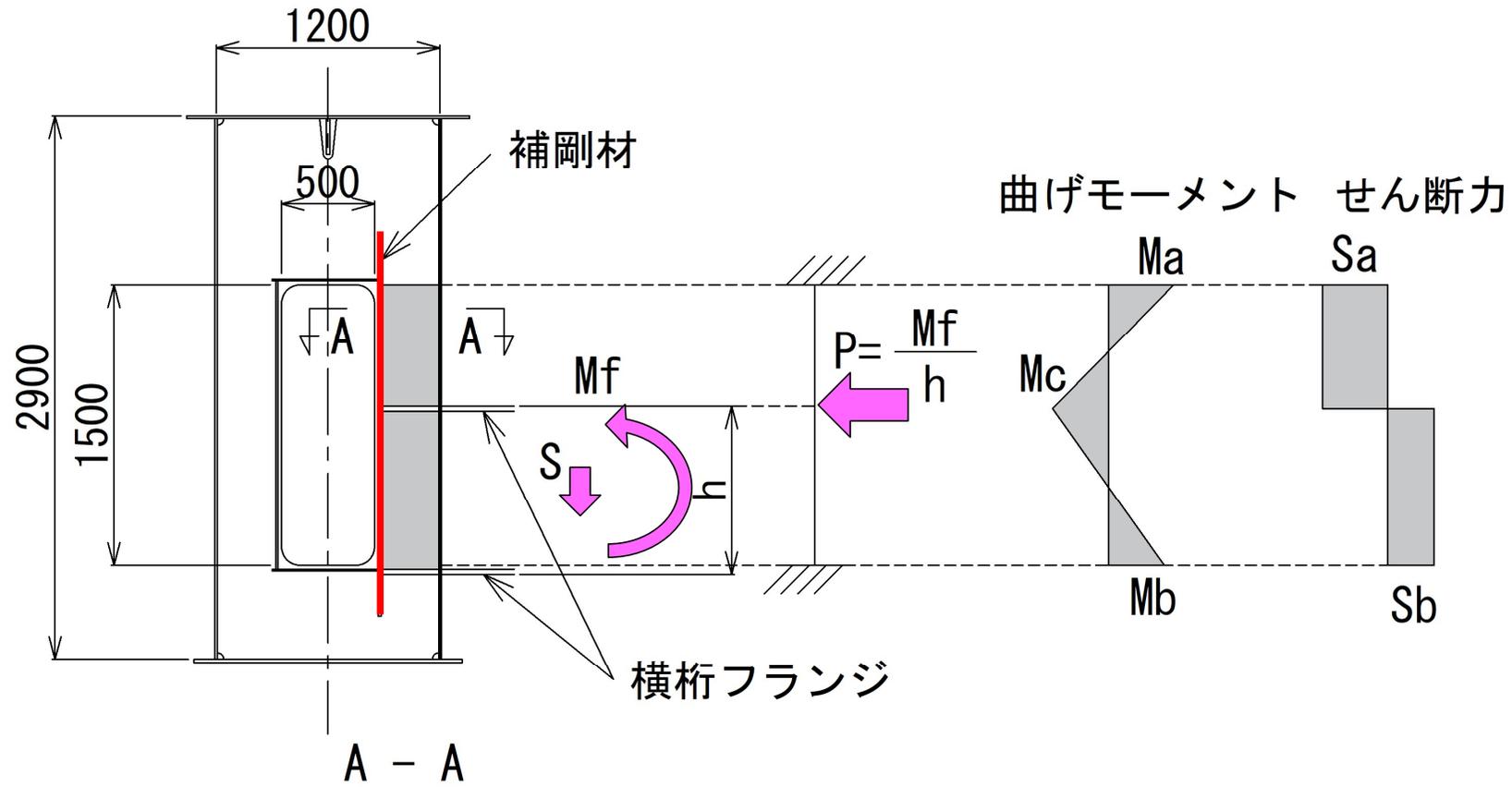
6 横桁に作用する曲げモーメント

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



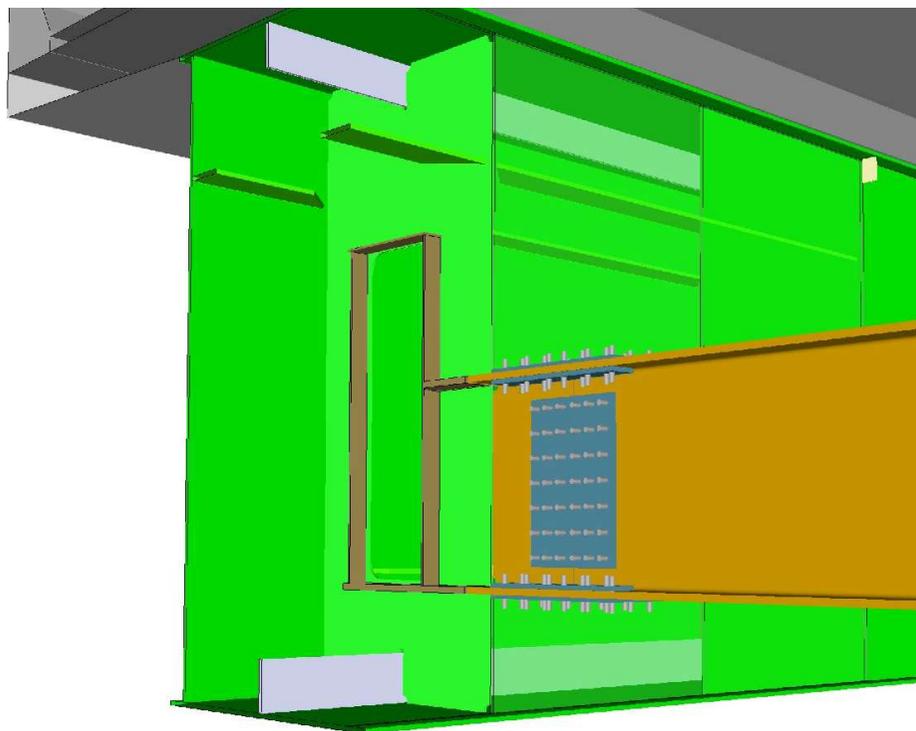
6 中間横桁取付け部の設計(1)

中間横桁取付け部を，両端固定梁にモデル化して設計

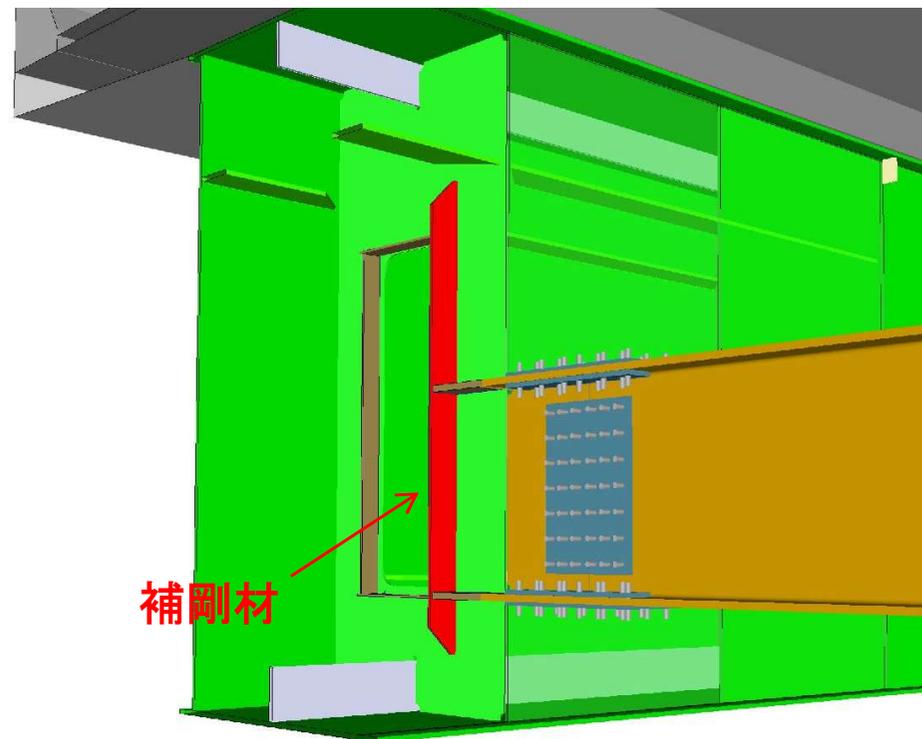


赤い補剛材は，ダイアフラムの両面に設け
応力伝達できるように上下端を延長.

6 中間横桁取付け部の設計(2)



a) 従来構造



b) 推奨構造

	取付け部の断面力		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、横桁取付け部の補強が重要

まとめ

- 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床版やずれ止めには、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)=150m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できる限界と考えられる。
- R 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には、底鋼板の補強リブとずれ止めと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 $R=300$ m及び 200 mの細幅箱桁橋の場合、制限値の5~7%程度であるが、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。
- 横桁取付け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。特に曲線桁の場合は留意が必要である。

曲線細幅箱桁橋の試設計について
～H29道示における設計の留意点～

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