

7章 PC橋の鉄筋配置を考慮した解析による検証

7.1 概要

近年、耐震設計法の影響やコンクリートの高強度化による部材断面の縮小化の影響などにより通常のPC橋であっても多くの鉄筋が配置される傾向となっている。しかし、設計段階においては、クリープおよび乾燥収縮の鉄筋拘束に伴う応力変化の影響を考慮していないのが現状である。

3章、4章の調査結果や6章の実験結果が示すように、軸方向鉄筋比等の影響によりクリープ特性に違いが生じることが明らかになってきており、実構造と設計段階で前提としている条件の相違により、発生応力度に差異が生じるケースが想定される。そこで、道路橋示方書に示すクリープ係数と6章の計測結果から算出されたクリープ係数（道路橋示方書の約1/2）を用いて、実構造物に近い鉄筋量を上縁・下縁、そしてウェブにそれぞれに配置し、鉄筋拘束を考慮した感度解析を行うことで、鉄筋拘束の違いによる設計上の影響を確認することとする。

感度解析を実施する構造形式は、5章で用いた表7.1.1に示す2橋とし、表7.1.2に示すクリープ係数の変化と鉄筋拘束の有無が比較できるように行う。

表 7.1.1 感度解析を実施する構造形式

No.	構造形式 (架設方法)	製作方法 (打設方法)	橋長 (m)	支間割 (m)
①	3 径間連続ラーメン箱桁橋 (片持架設)	場所打ち (分割打設)	190.0	55.0+80.0+55.0
②	6 径間連続中空床版橋 (固定支保工架設)	場所打ち (分割打設)	151.0	6@25.0

検討に用いるクリープ係数は、道路橋示方書に準じた値と、道路橋示方書に従い算出したクリープ係数の1/2倍の値とした。この理由は、図7.1.1に示すように供試体試験による2カ年の実測クリープ係数が道路橋示方書に従い算出したクリープ係数の0.4～0.6倍の範囲にあり、平均すると1/2倍程度であったためである。

表 7.1.2 感度解析の検討ケース

ケース	クリープ	鉄筋拘束	備考
CASE1	道示に従う	無視	一般的なPC橋の設計手法に従う (5章で解析済み)
CASE2	〃	考慮	クリープ値は道示のままとし、鉄筋拘束力の有無の影響をCASE1と比較する
CASE3	実測値 (道示×1/2)	考慮	実構造に最も近いケースとして、クリープ係数の違いをCASE2と比較する

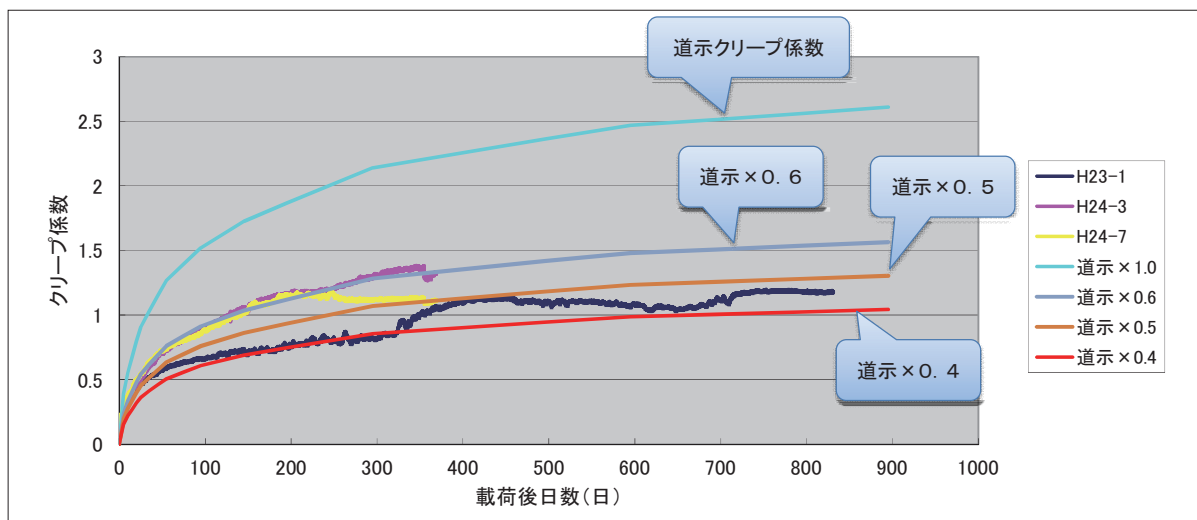


図 7.1.1 道路橋示方書のクリープ係数と実測クリープ係数の比較

7.2 3径間連続ラーメン箱桁橋における鉄筋拘束の影響による感度解析

7.2.1 検討ケース

鉄筋拘束の違いによる設計上の影響を確認することを目的として、図 7.2.1 に示す 3 径間連続ラーメン箱桁橋を対象とした検討を行った。架設方法は張出し架設を想定し、図 7.2.2 に示す施工ステップと図 7.2.3 に示す P C 鋼材を配置した、段階解析によって断面力を算出した。さらに供試体試験で得られた実測クリープ係数による影響についても検討した。

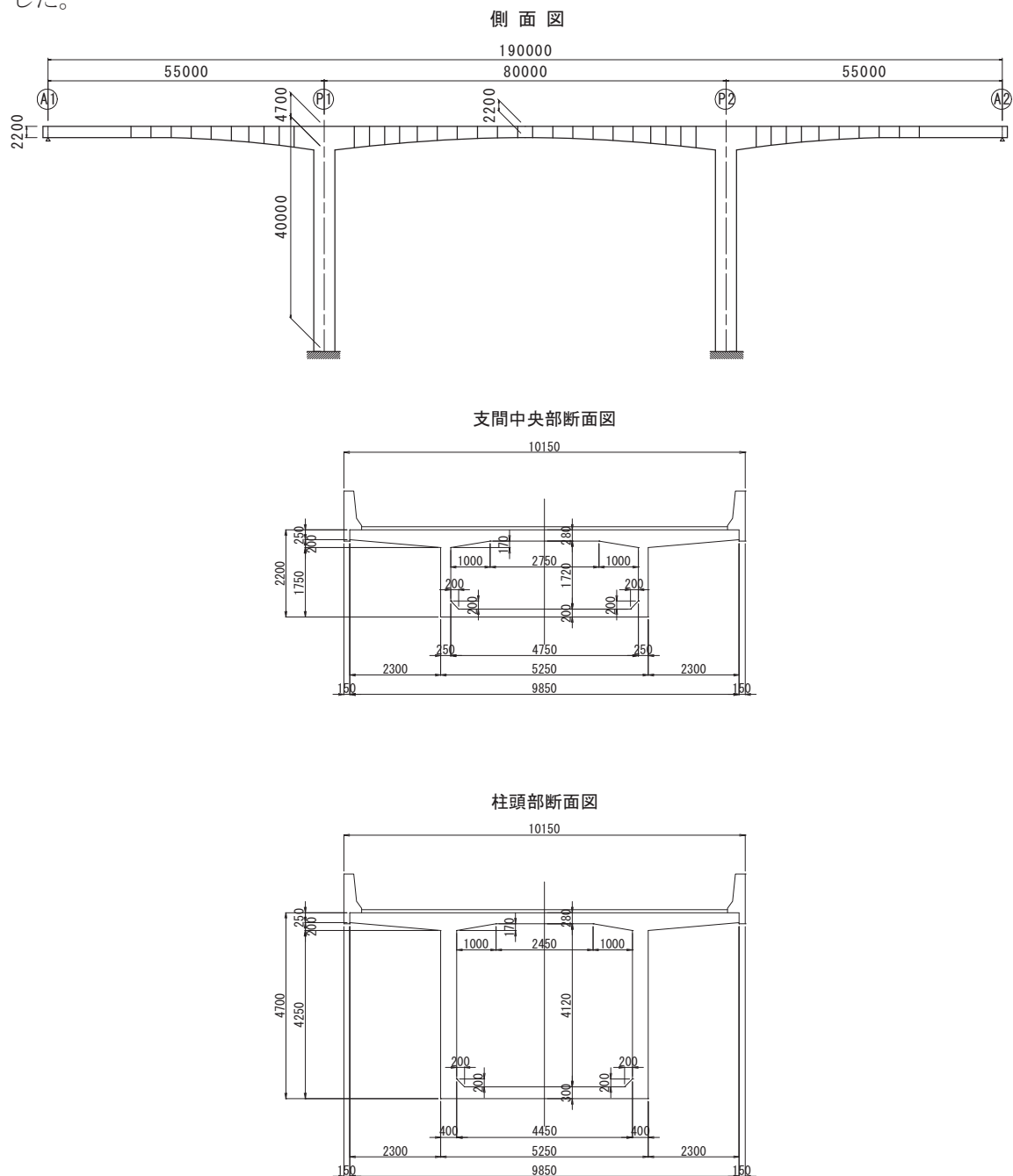


図 7.2.1 検討対象橋梁

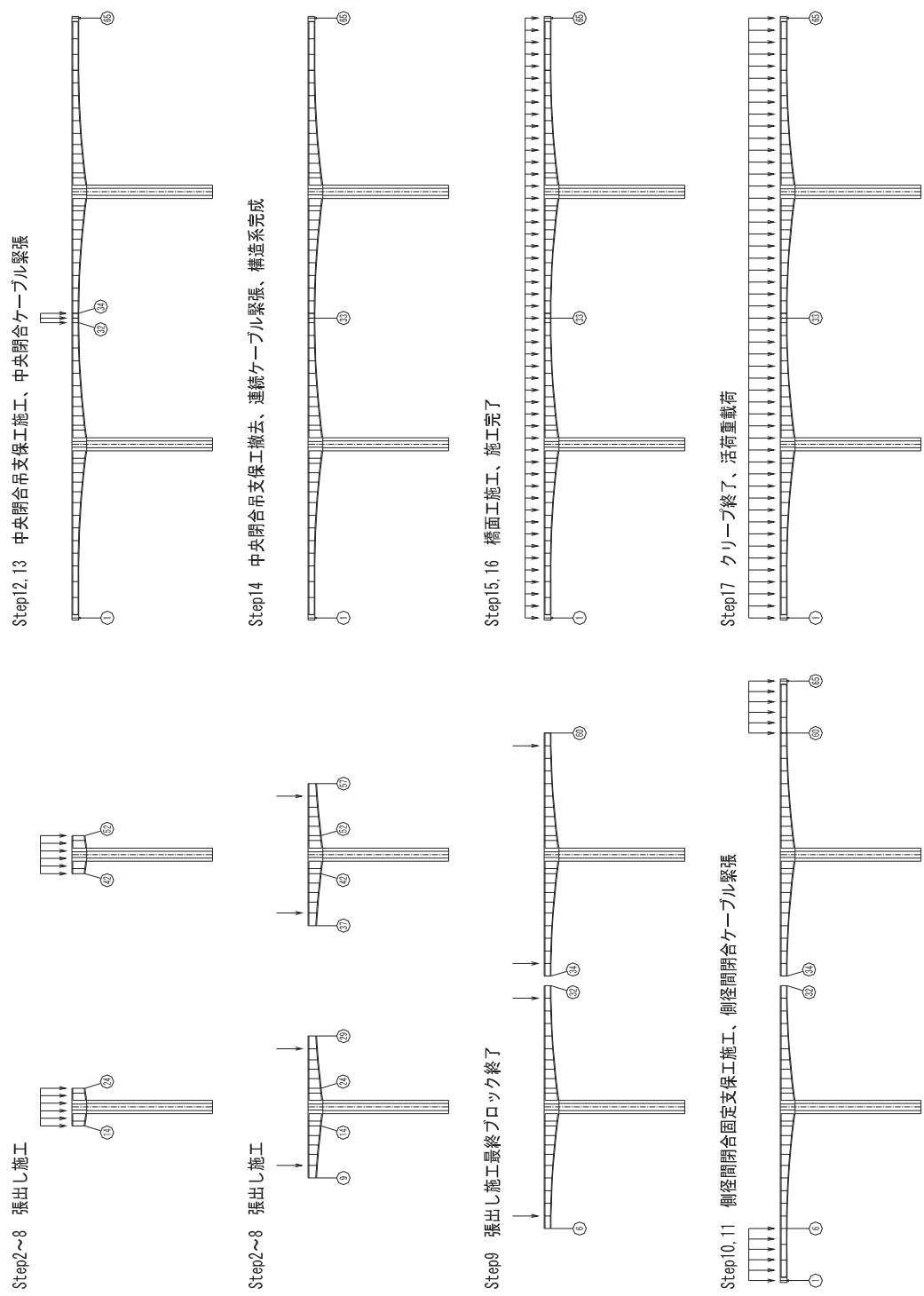


図 7.2.2 施工ステップ図

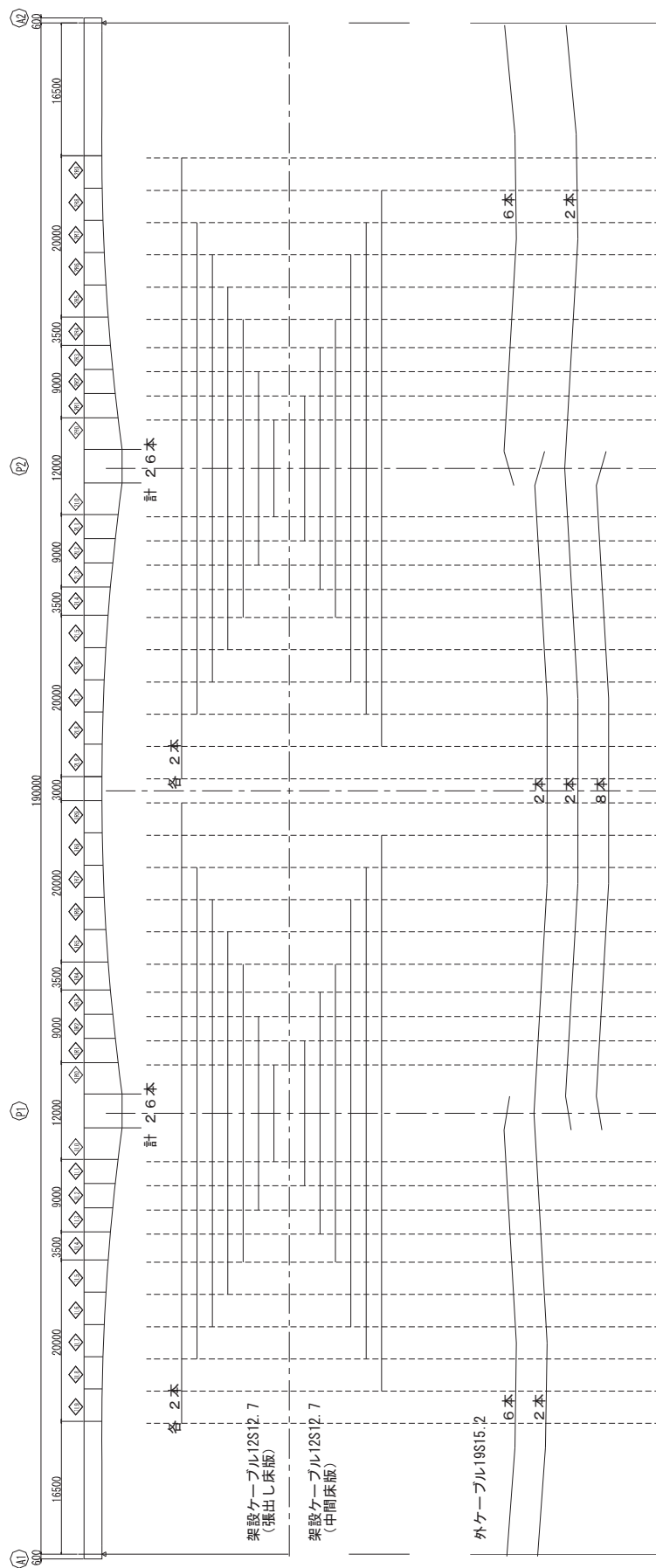


図 7.2.3 PC 鋼材配置

検討ケースは、表 7.2.1 に示す 3 ケースとした。CASE1 が H24 道路橋示方書に従い設計した検討ケースである。

表 7.2.1 検討ケース

CASE	クリープ係数	鉄筋拘束力
CASE1	道路橋示方書	無視
CASE2	道路橋示方書	考慮※
CASE3	実測値(道示×0.5)	考慮※

※ 後述する耐震設計で決定される程度の鉄筋を配置

橋軸方向鉄筋量と鉄筋比を、図 7.2.4 に示す。

柱頭部は、部材厚が厚い割に鉄筋量が少ないので、鉄筋比が比較的小さい。一方端支点付近及び中央径間のインフレクションポイントから径間中央部は鉄筋量も多く部材厚が小さいため、鉄筋比が大きい。

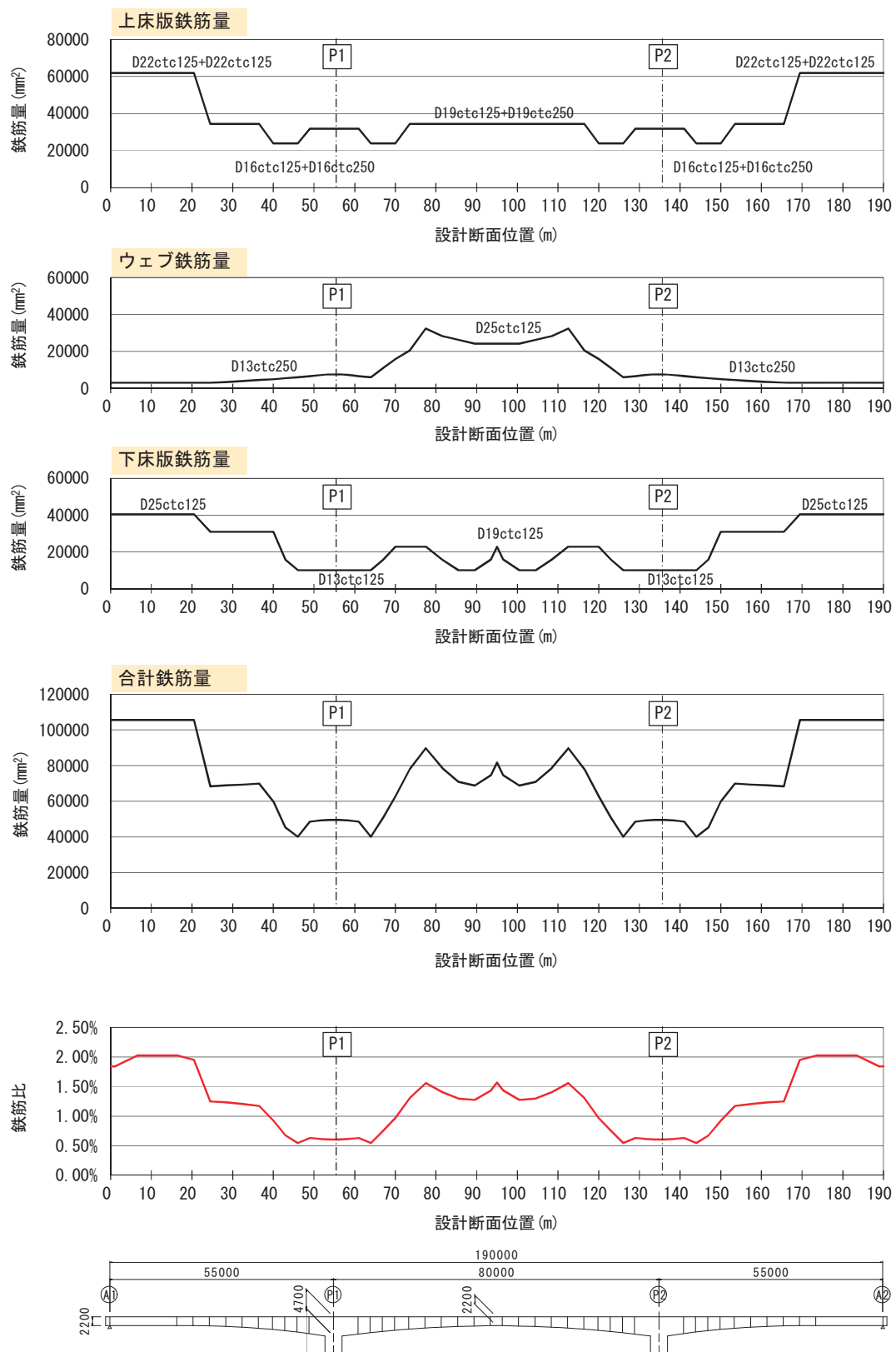


図 7.2.4 鉄筋量と鉄筋比

7.2.2 感度解析結果

3 径間連続ラーメン箱桁橋における鉄筋拘束の影響による感度解析結果を次ページより示す。

■ 断面力 (死荷重時)

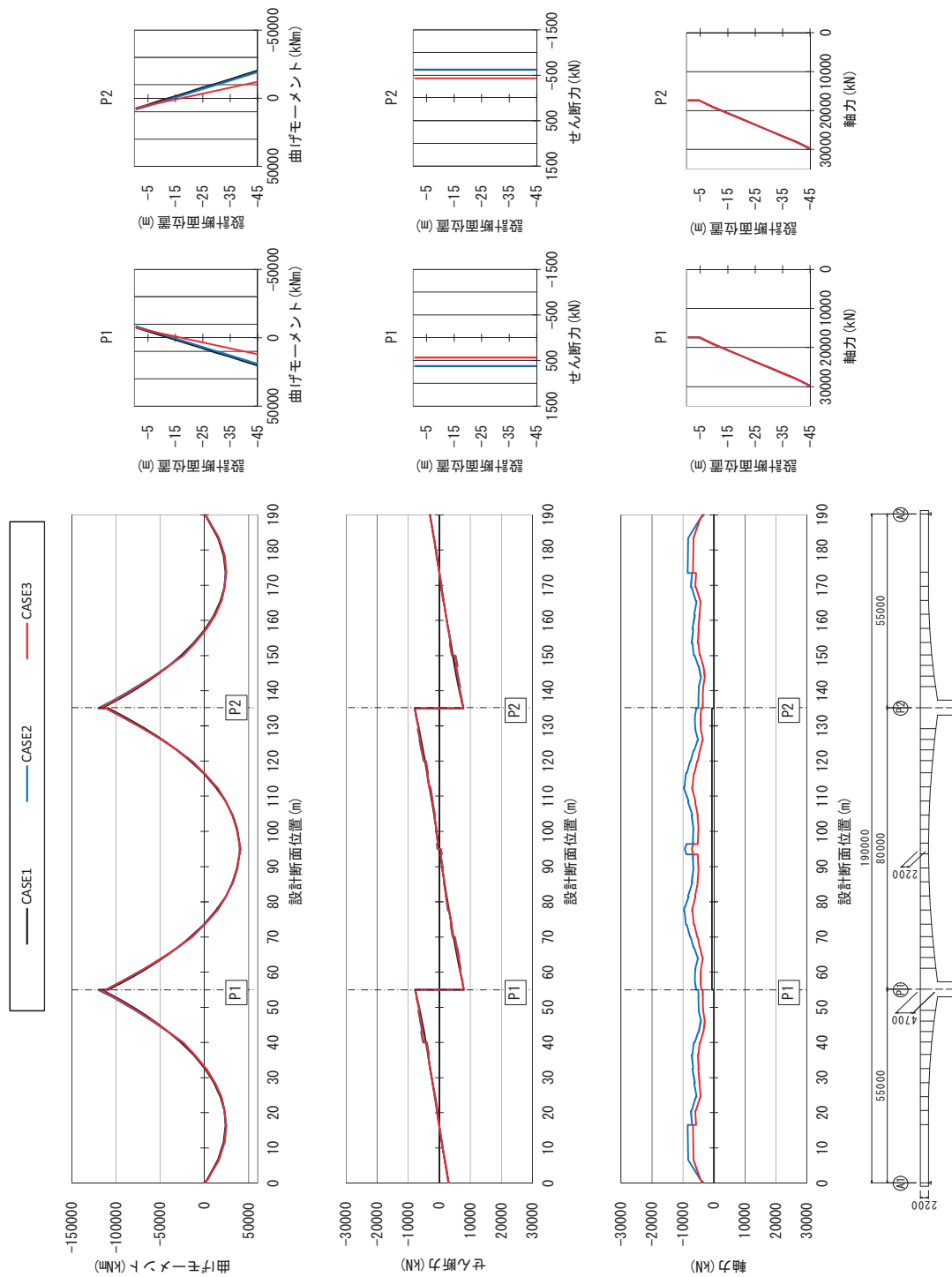


図 7.2.5 死荷重時の断面力の比較

■断面力(設計荷重時一最大)

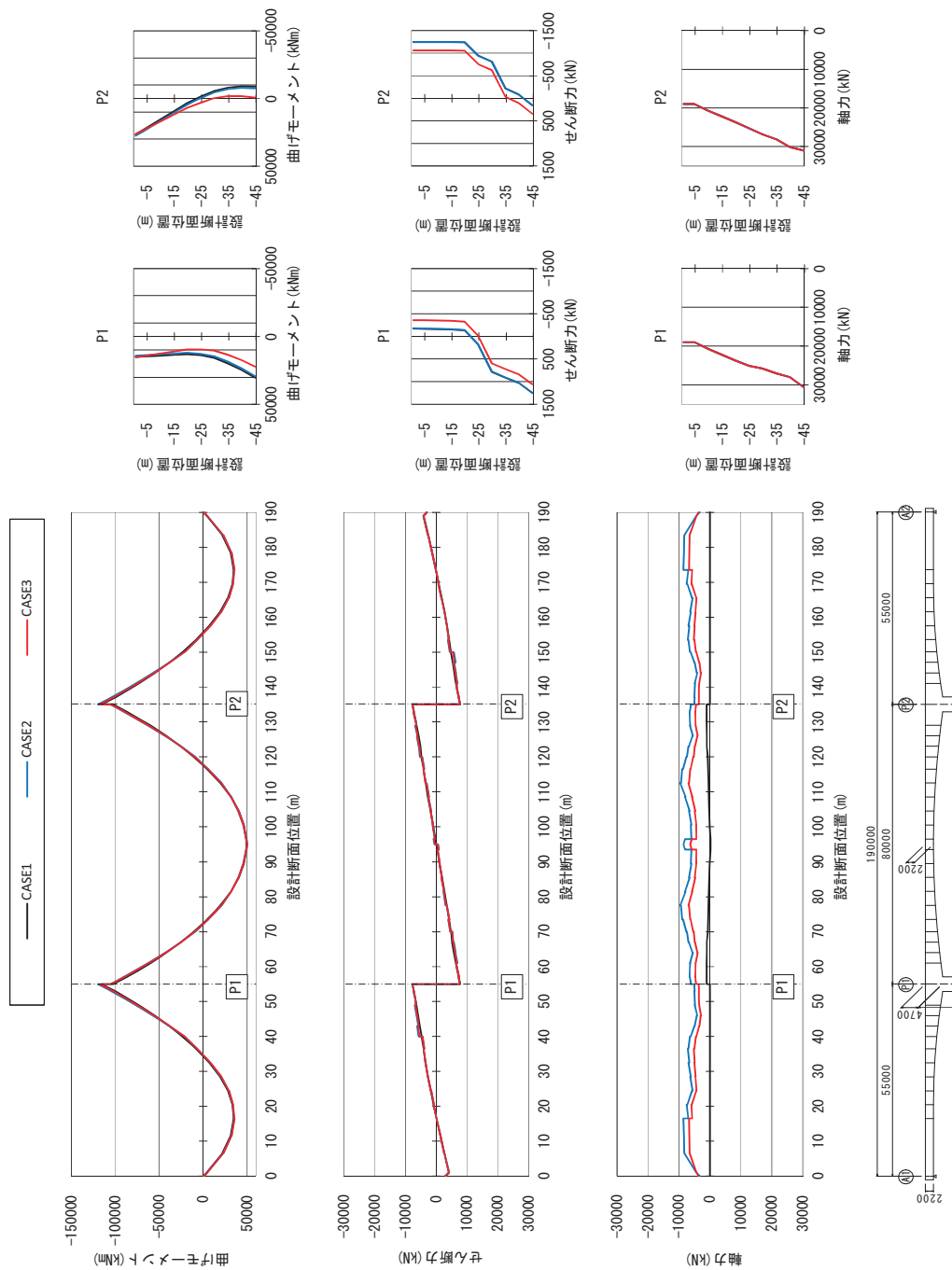


図 7.2.6 設計荷重時Mmax の断面力の比較

■ 断面力 (設計荷重時一最小)

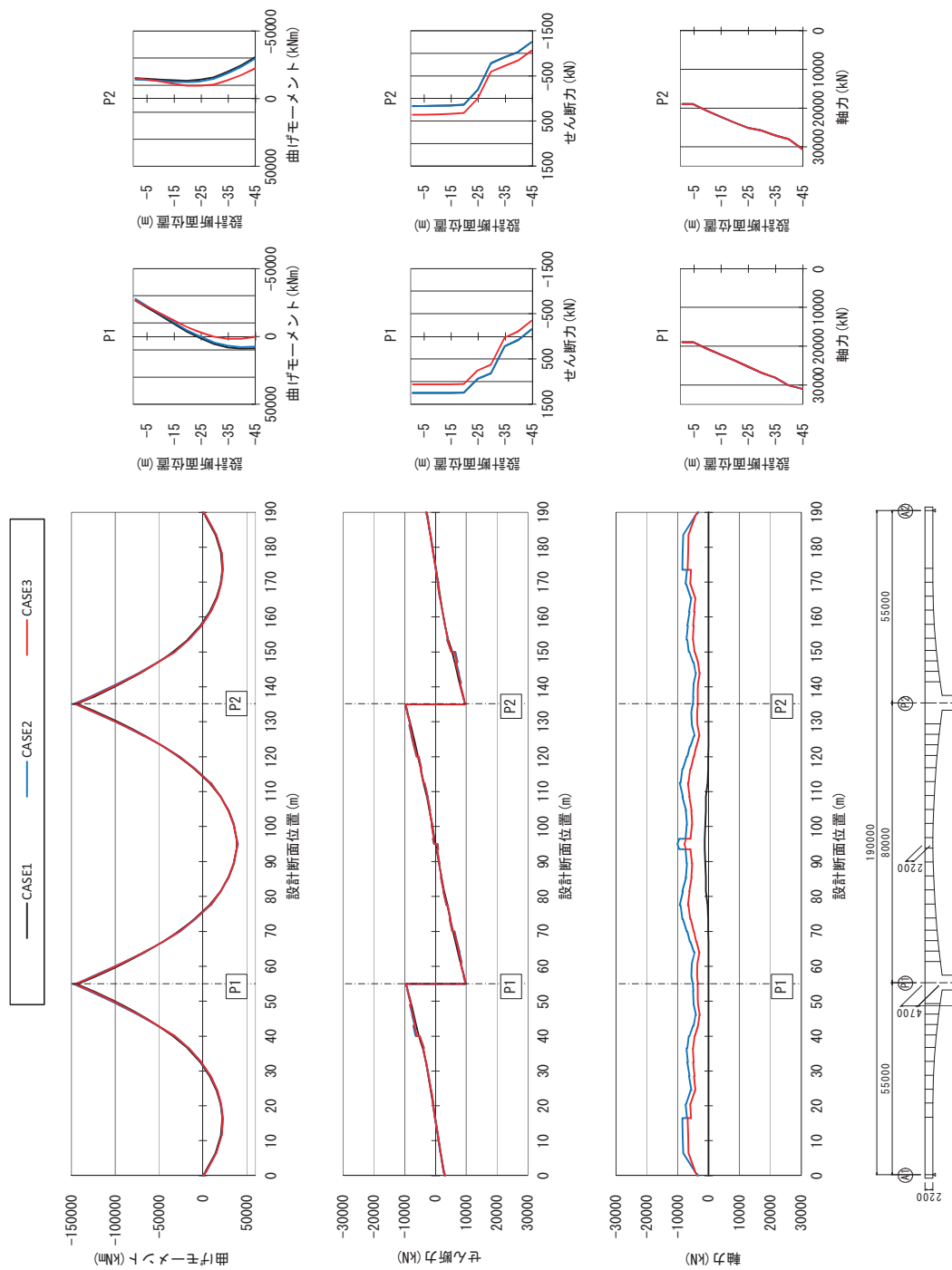


図 7.2.7 設計荷重時Mmin の断面力の比較

■断面上縁応力度

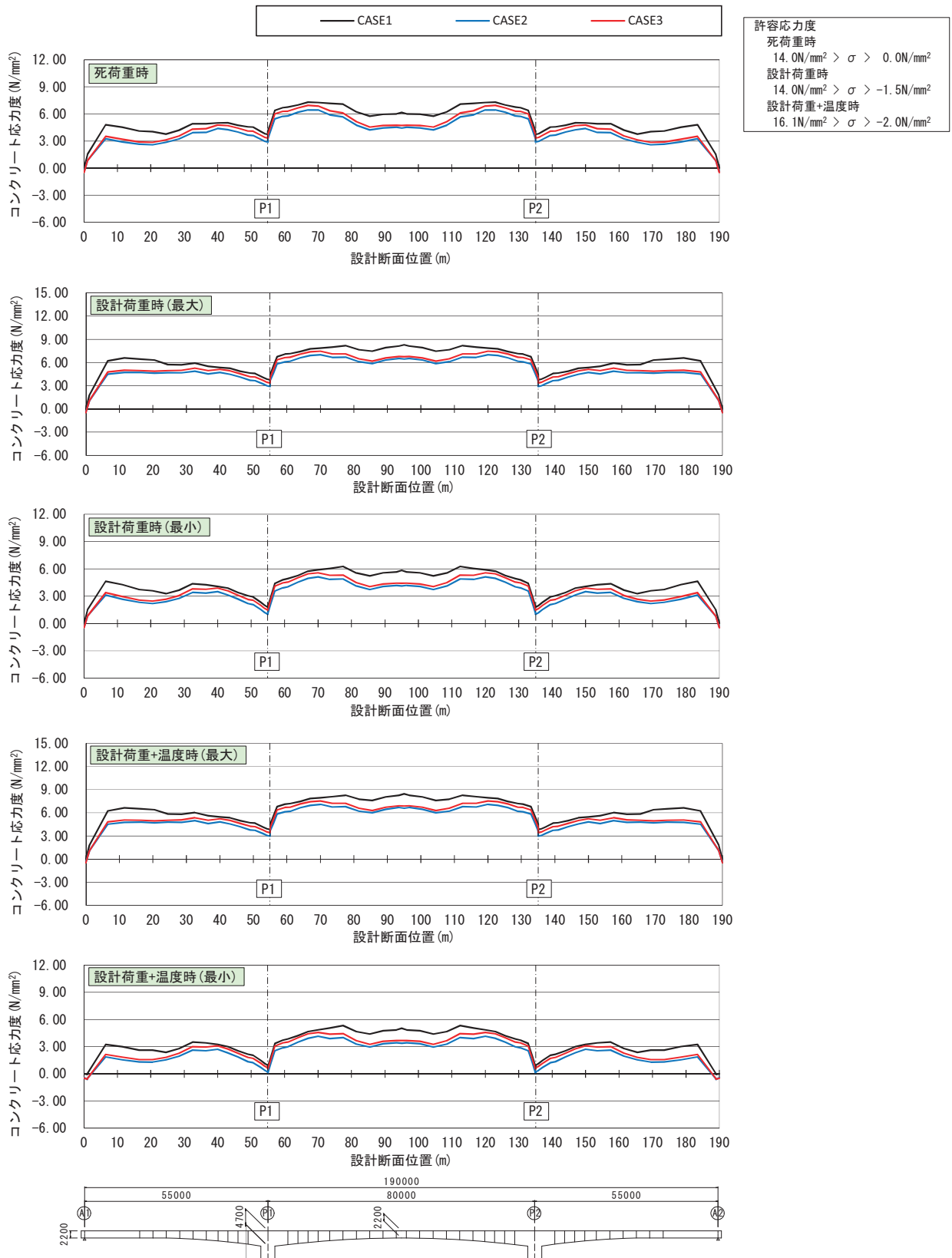
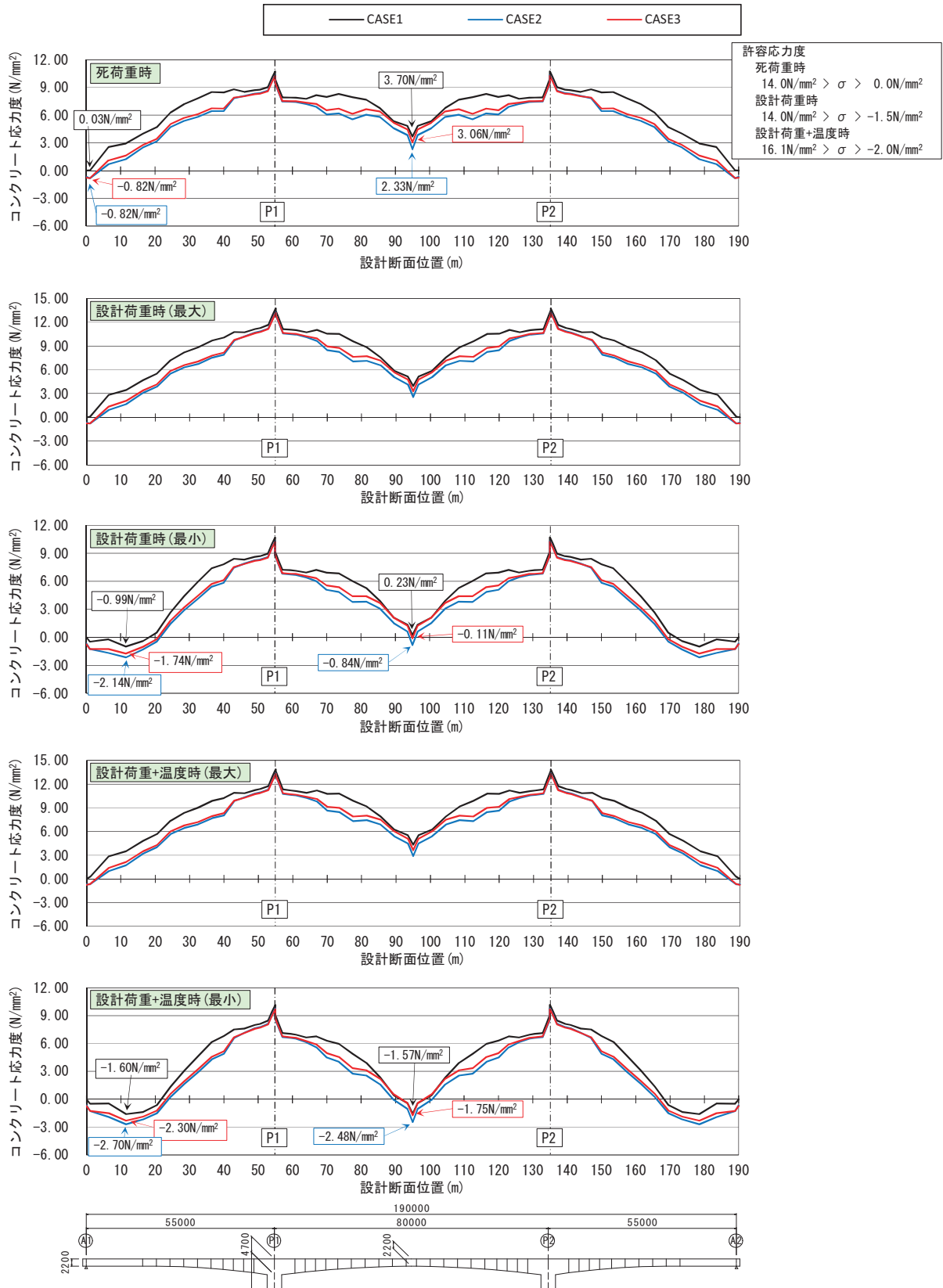


図 7.2.8 主桁上縁 合成応力度の比較

■断面下縁応力度



■ P C鋼材応力度

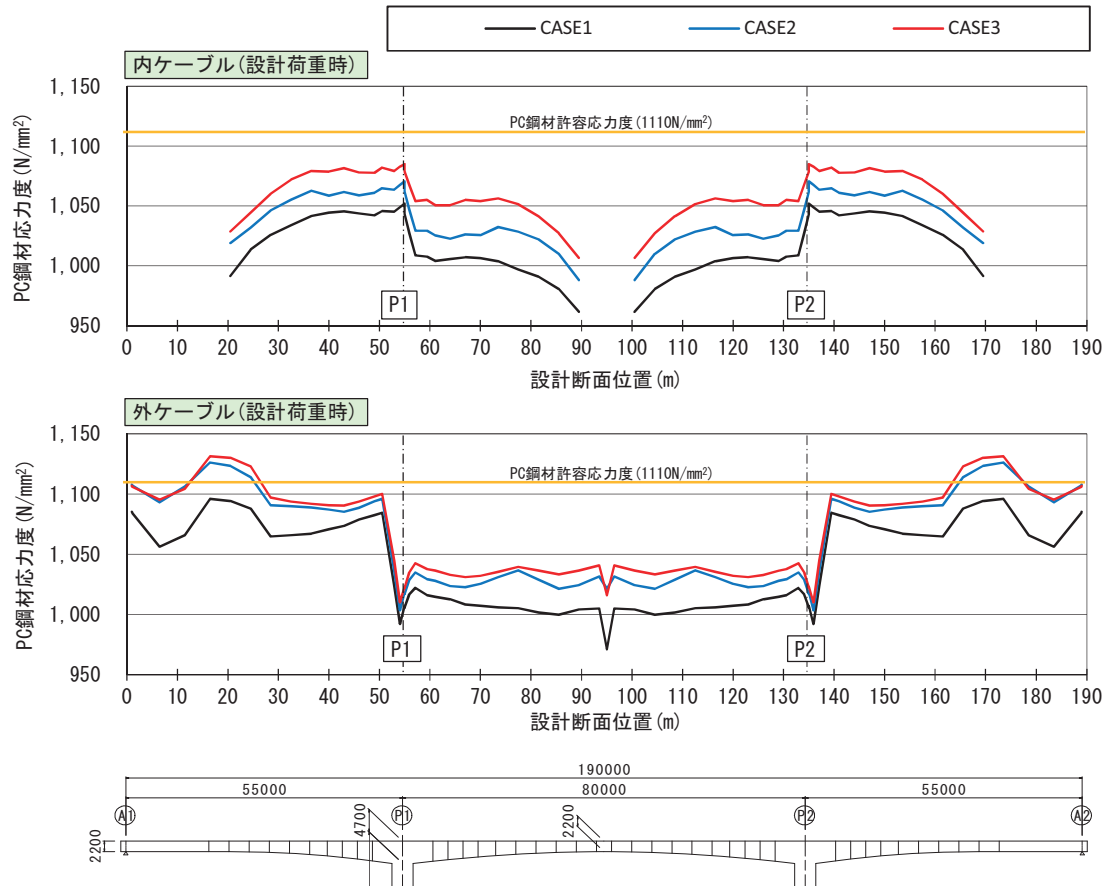


図 7. 2. 10 P C鋼材応力度の比較

■斜引張応力度

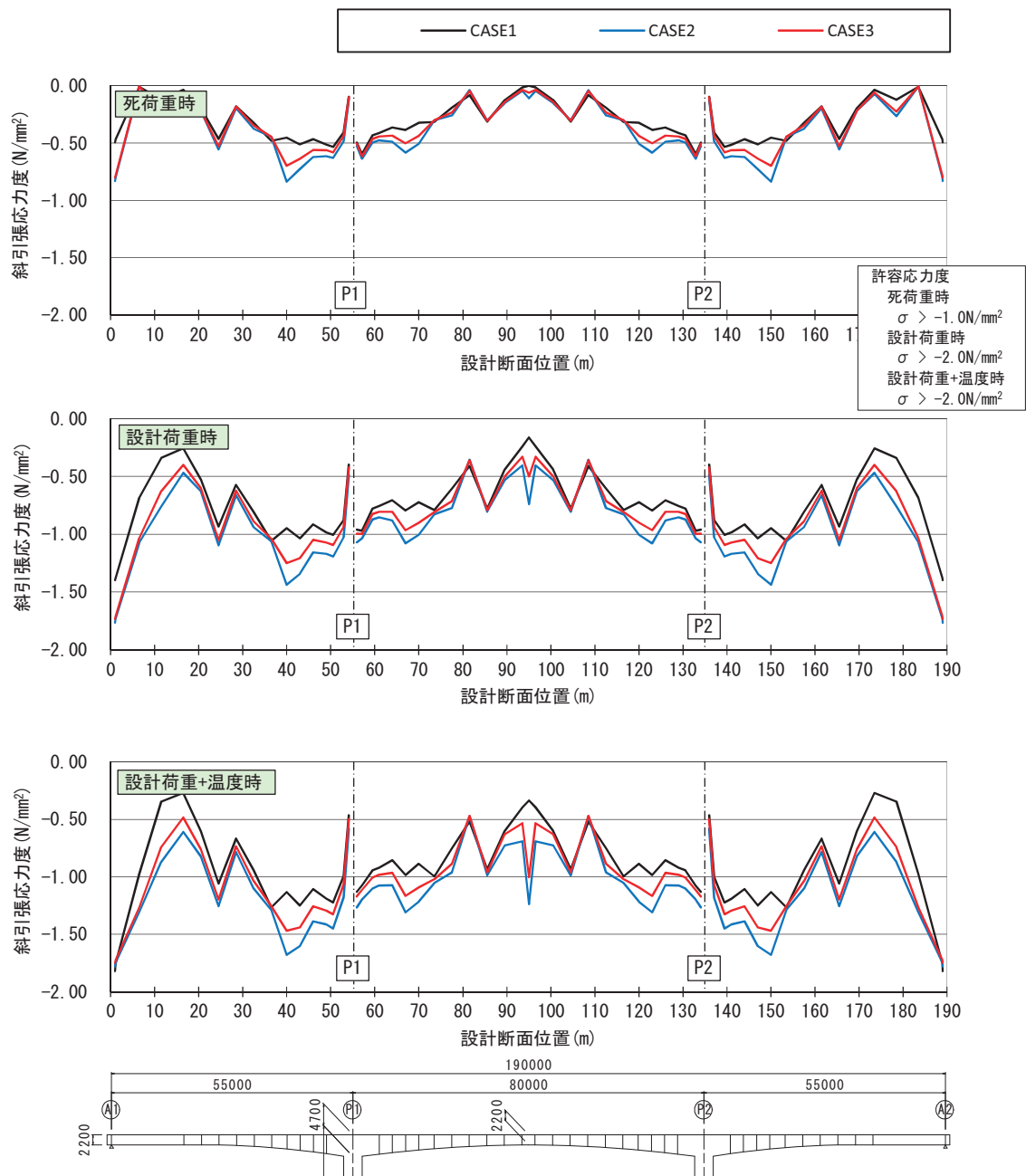


図 7.2.11 斜引張応力度の比較

■鉛直変位

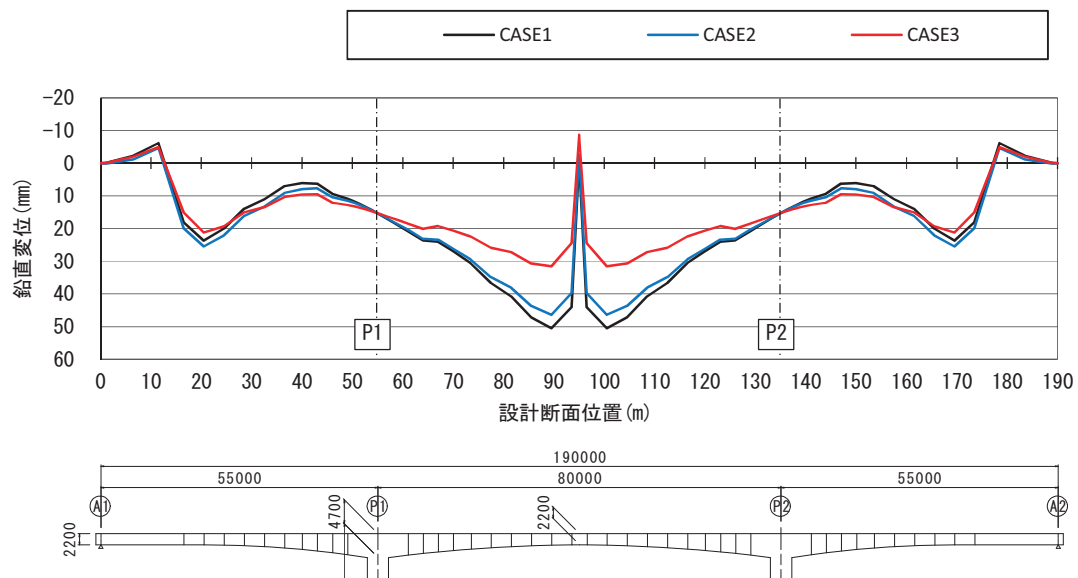


図 7.2.12 鉛直変位の比較

■水平変位(A2 側への変形を正とする)

表 7.2.2 水平変位の比較

CASE1

	A1 支点	P1 橋脚上	P2 橋脚上	A2 支点
自重	−14.7 mm	−14.7 mm	14.7 mm	14.7 mm
プレストレス	29.2 mm	22.8 mm	−22.8 mm	−29.2 mm
プレクリープ	34.6 mm	18.9 mm	−18.9 mm	−34.6 mm
乾燥収縮	11.2 mm	4.4 mm	−4.4 mm	−11.2 mm
鉄筋拘束力	0.0 mm	0.0 mm	0.0 mm	0.0 mm
合計	60.4 mm	31.4 mm	−31.4 mm	−60.4 mm

CASE2

	A1 支点	P1 橋脚上	P2 橋脚上	A2 支点
自重	−14.8 mm	−14.8 mm	14.8 mm	14.8 mm
プレストレス	29.0 mm	22.5 mm	−22.5 mm	−29.0 mm
プレクリープ	34.8 mm	18.9 mm	−18.9 mm	−34.8 mm
乾燥収縮	11.2 mm	4.3 mm	−4.3 mm	−11.2 mm
鉄筋拘束力	−3.1 mm	−1.4 mm	1.4 mm	3.1 mm
合計	57.0 mm	29.5 mm	−29.5 mm	−57.0 mm

CASE3

	A1 支点	P1 橋脚上	P2 橋脚上	A2 支点
自重	−14.4 mm	−14.4 mm	14.4 mm	14.4 mm
プレストレス	29.5 mm	22.7 mm	−22.7 mm	−29.5 mm
プレクリープ	18.7 mm	10.9 mm	−10.9 mm	−18.7 mm
乾燥収縮	11.2 mm	4.3 mm	−4.3 mm	−11.2 mm
鉄筋拘束力	−2.3 mm	−1.0 mm	1.0 mm	2.3 mm
合計	42.7 mm	22.5 mm	−22.5 mm	−42.7 mm

7.2.3 解析結果

(1) 断面力について

- ・ 鉄筋拘束力を考慮することで新たに引張方向の軸力が生じ、クリープ係数が大きいほど軸力も大きくなった。
- ・ 今回検討した規模の橋梁の場合、上部工では主桁の曲げモーメントおよびせん断力は自重の影響を大きく受けるため、鉄筋拘束の有無やクリープ係数が異なってもその影響は相対的に小さく、合計断面力としては各ケースで大差のない結果であった。

(2) 有効プレストレスについて

- ・ クリープ・乾燥収縮による P C 鋼材応力度の減少量の計算において、鉄筋拘束の影響を考慮すると、プレストレスの損失は小さくなり有効プレストレスが増加する。そのため一部で設計荷重時における P C 鋼材の許容値を超過するケースも見られた。
- ・ 比較的太径の鉄筋が配置される箱桁橋（最大 D25ctc125）の試設計の結果、有効プレストレス時の鋼材応力度は、 30N/mm^2 程度大きくなり 3% 程度変化する。内ケーブルは許容値を満足したが、外ケーブルでは許容値を超える結果となった。
- ・ 鉄筋がコンクリートのひずみを拘束する影響が大きい場合は、クリープや乾燥収縮によるコンクリートの軸方向の短縮量が小さくなることから、プレストレスの損失が小さくなり、有効プレストレス時に P C 鋼材応力度の制限値を超過する可能性がある。このため、P C 鋼材の疲労耐久性を確保するために、P C 鋼材に導入する初期緊張力を低減させるなどの対策が必要となる。

(3) 合成応力度について

- ・ 鉄筋拘束を考慮することで上下縁とも引張応力度が増加し、径間中央の下縁の一部で引張応力度が許容応力度を超過する断面があった。このことから、耐震設計等によって鉄筋比が大きい場合には鉄筋拘束力の影響が無視できないと考えられる。
- ・ 支点近傍は主桁断面積が大きいことから鉄筋比が小さく、鉄筋拘束力の影響は比較的小さい傾向であった。
- ・ クリープ係数が小さくなると鉄筋拘束力による応力度も同様に小さくなるため、実測クリープ係数で計算した CASE3 の引張応力度は CASE2 より幾分小さい値を示した。
- ・ 鉄筋拘束力を考慮したケースでは鉄筋を応力照査に用いる抵抗断面として考慮していることから、活荷重など各ケースで断面力が同じ値であっても、応力度には若干の差が生じている。

(4) 斜引張応力度について

- ・ 鉄筋拘束力を考慮することで引張方向の軸力が生じ、主桁の部材軸方向圧縮応力度が低下するため、斜引張応力度は増加する。今回検討したケースの様に太径の鉄筋が配置される箱桁橋（最大 D25c125）の試設計の結果は、斜引張応力度が 0.2N/mm^2 程度の小さな変動であり、許容値を超過するような箇所は生じていない。

(5) 鉛直変位について

- ・ 鉄筋拘束を考慮した CASE2 は、考慮しない CASE1 に比べ、鉛直変位の差は最大でも 4mm 程度であり鉄筋拘束の影響は少ない。
- ・ 実測クリープ係数で計算した CASE3 は CASE2 に比べ、最大 15mm 程度鉛直変位が小さくなっており、鉛直変位は鉄筋拘束力よりクリープ係数の違いが影響を及ぼす。

(6) 水平変位について

- ・ 鉄筋拘束を考慮した CASE2 は、考慮しない CASE1 に比べ、水平変位の差は最大でも 3mm 程度であり鉄筋拘束の影響は少ない。
- ・ 実測クリープ係数で計算した CASE3 は CASE2 に比べ、端支点部で 14mm 程度水平変位が小さくなっており、鉛直変位と同様に鉄筋拘束力よりクリープ係数の違いが影響を及ぼしている。

7.3 6 径間連続中空床版橋における鉄筋拘束の影響による感度解析

7.3.1 検討ケース

6 径間連続中空床版橋において、鉄筋拘束力を考慮した場合の断面力、合成応力度などの変化を確認する。

検討は、5章で行った「5.4 6 径間連続中空床版橋におけるクリープの影響による感度解析」のモデルに通常配置される鉄筋量を反映して計算を行う。

構造形式	6 径間連続中空床版橋
支 間 長	6@25.0m
有効幅員	9.50m
主 桁 高	1.20m
架設方法	固定支保工
分割施工	3 分割による主桁製作（2 径間+2 径間+2 径間）
施工日数	主桁製作は 1 施工区分あたり 45 日で施工 橋面工は主桁製作完了から 30 日後に施工

検討ケースは、表 7.3.1 に示す 3 ケースとする。

5章で行った基本ケース（道路橋示方書のクリープ係数）を CASE1 として、CASE2 は実橋レベルの鉄筋量を配置した鉄筋拘束の影響を考慮する。CASE3 は、鉄筋拘束の影響に加えて 6章で計測したクリープ係数の実測値を用いた計算を行う。

表 7.3.1 各ケースと配置鉄筋量

	鉄筋拘束	クリープ係数	備考
CASE1	なし	道路橋示方書	基本ケース
CASE2	考慮※	道路橋示方書	実橋レベルの配置鉄筋
CASE3	考慮※	実測値（道示×0.5）	実橋レベルの配置鉄筋+実測クリープ係数

7.3.2 6径間連続中空床版橋（形式②）における鉄筋拘束の影響による感度解析

(1) 条件

1) 構造図

検討する構造モデルを図 7.3.1 および図 7.3.2 に示す。

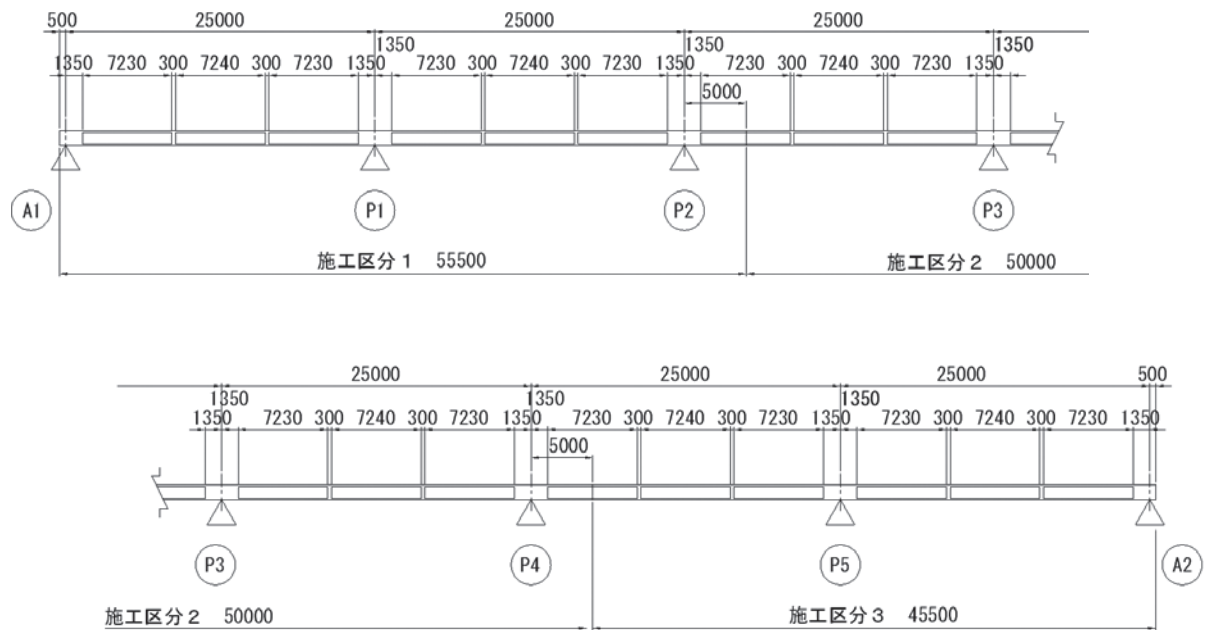


図 7.3.1 側面図

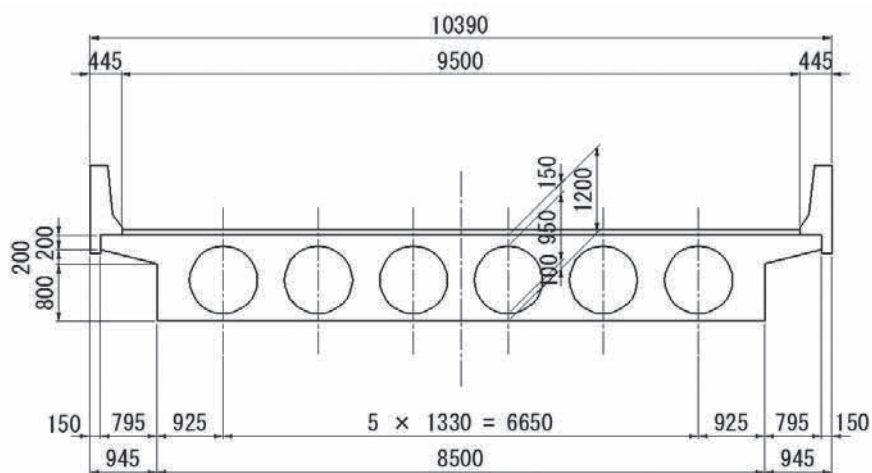


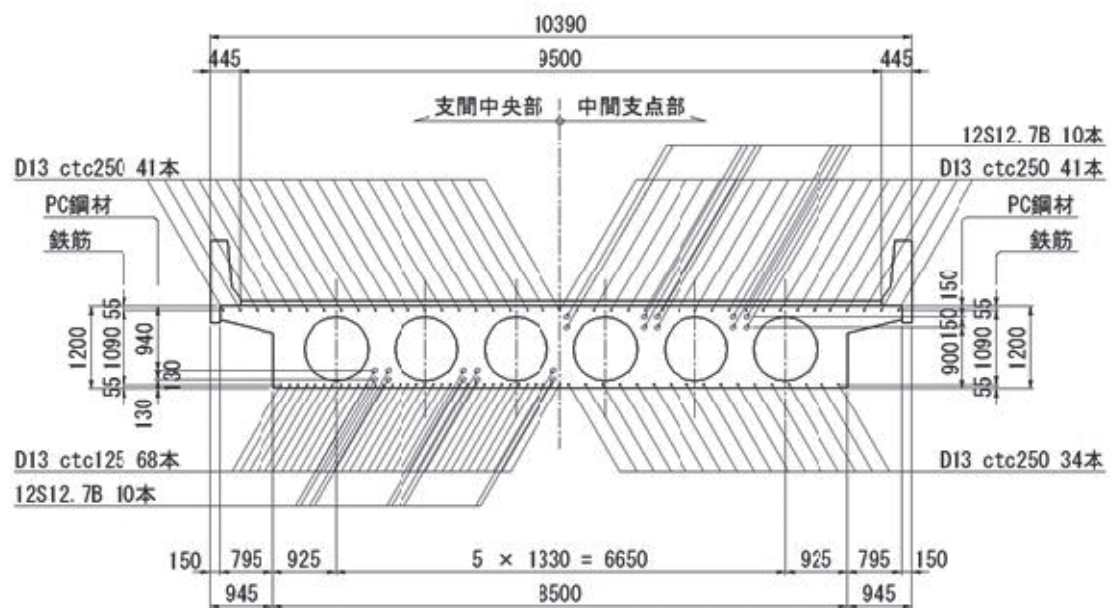
図 7.3.2 断面図

2) 材料条件

上部工コンクリート強度 : $\sigma_{ck}=36\text{N/mm}^2$
 主ケーブル : 12S12.7 (SWPR7BL)
 鉄筋 : SD345

3) 鋼材配置

支間中央部と中間支点上のP C鋼材および鉄筋の配置を図 7.3.3、鉄筋配置および鉄筋量を表 7.3.2 に示す。



注) 鋼材本数は全断面の本数を示す。

図 7.3.3 P C鋼材配置および鉄筋配置図

表 7.3.2 鉄筋配置

支間中央					
	配置鉄筋	鉄筋本数	鉄筋量 mm ²	主桁断面積 mm ²	鉄筋比 %
CASE 1	-	-	-	-	-
CASE 2	上) D13 ctc250 1段 下) D13 ctc125 1段	上) 41本 下) 68本	13810.3	6424069	0.21%
CASE 3	上) D13 ctc250 1段 下) D13 ctc125 1段	上) 41本 下) 68本	13810.3	6424069	0.21%

中間支点					
	配置鉄筋	鉄筋量	鉄筋量 mm ²	主桁断面積 mm ²	鉄筋比 %
CASE 1	-	-	-	-	-
CASE 2	上) D13 ctc250 1段 下) D13 ctc250 1段	上) 41本 下) 34本	9502.5	6424069	0.15%
CASE 3	上) D13 ctc250 1段 下) D13 ctc250 1段	上) 41本 下) 34本	9502.5	6424069	0.15%

4) 解析ステップ

施工ステップを図 7.3.4 に、クリープ計算用の施工日数を表 7.3.3 に示す。

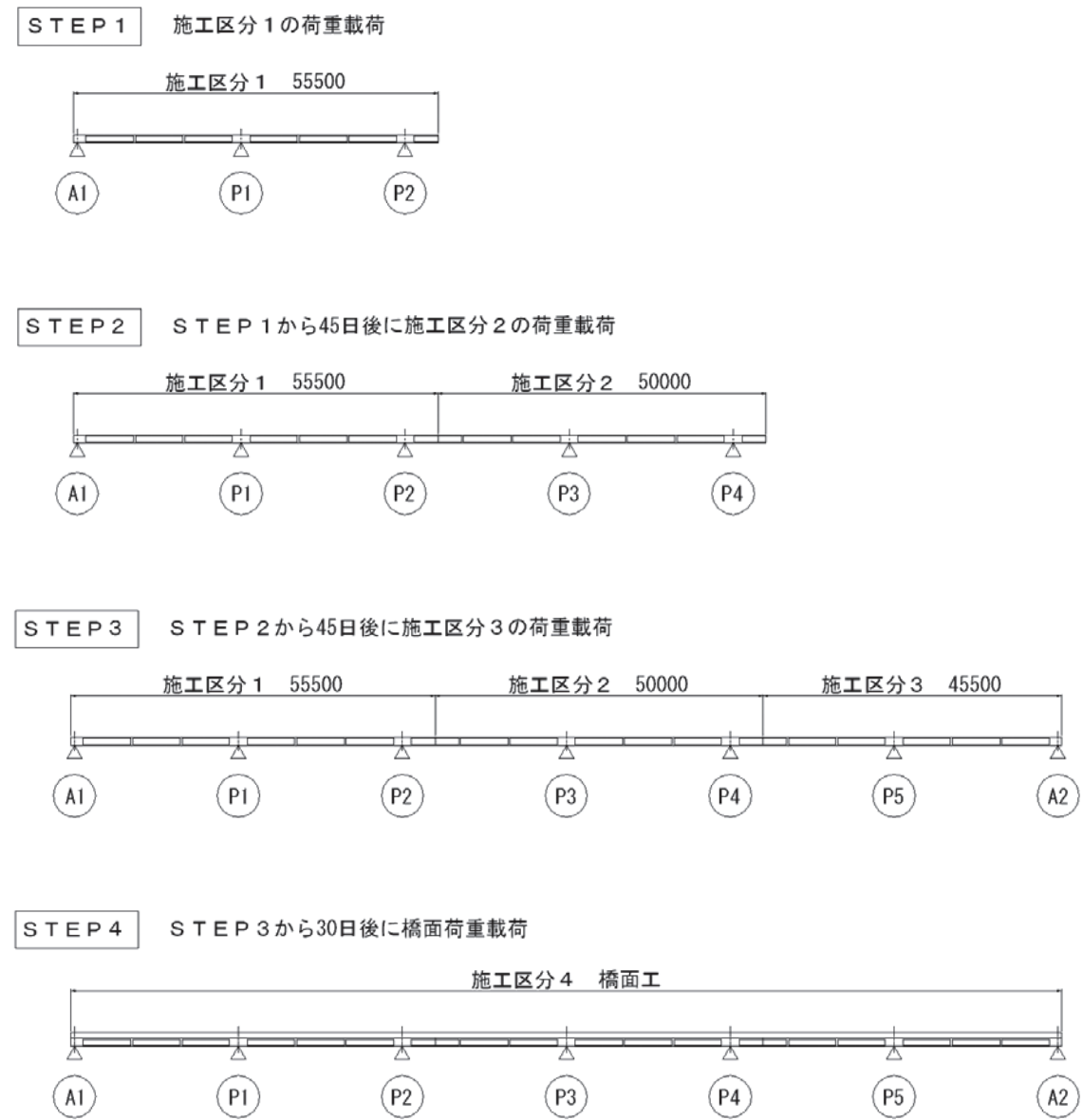


図 7.3.4 施工ステップ概要図

表 7.3.3 施工ステップ毎の施工日数表

	材 齢		(日)
	STAT	END	
STEP1	0	45	45
STEP2	45	90	45
STEP3	90	120	30
STEP4	120	∞	∞

5) クリープ係数

各検討ケースで使用するクリープ値は下記の通りとする。

CASE1：道示クリープ値

CASE2：道示クリープ値

CASE3：実測値（道示クリープ値×0.5）

ステップ終了までに進行するクリープ値を表 7.3.4 下表に示す。

表 7.3.4 各ケースのクリープ係数表

CASE1、CASE2：道示クリープ値

	STEP1 (45日)	STEP2 (45日)	STEP3 (30日)	クリープ終了時
施工区分1の部材	1.078	1.264	1.370	2.878
施工区分2の部材	—	1.078	1.200	2.878
施工区分3の部材	—	—	0.988	2.878

CASE3：実測値（道示クリープ値×0.5）

	STEP1 (45日)	STEP2 (45日)	STEP3 (30日)	クリープ終了時
施工区分1の部材	0.539	0.632	0.685	1.439
施工区分2の部材	—	0.539	0.600	1.439
施工区分3の部材	—	—	0.494	1.439

(2) 計算結果

1) 断面力比較

■死荷重時

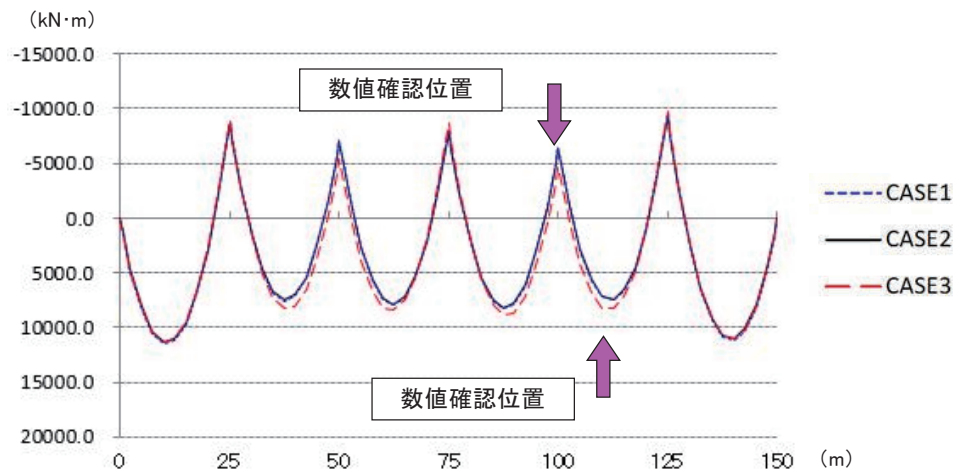


図 7.3.5 死荷重時 曲げモーメント

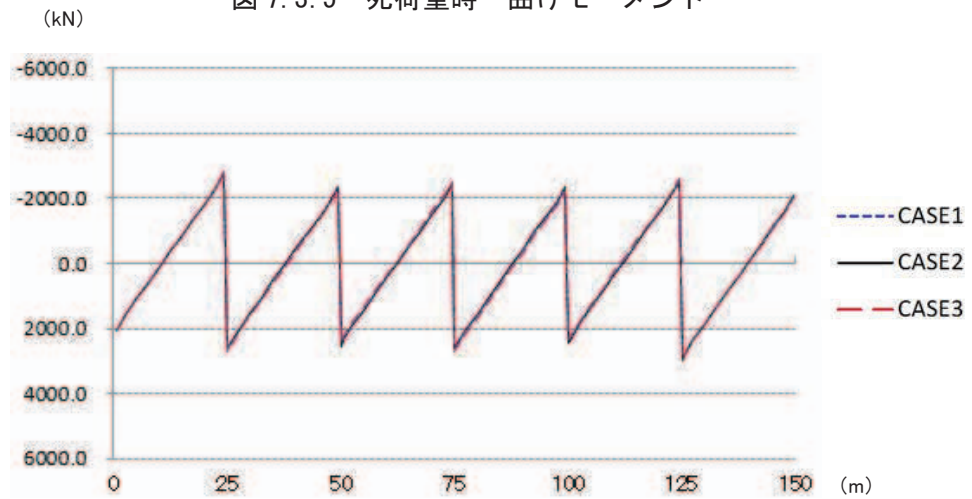


図 7.3.6 死荷重時 せん断力

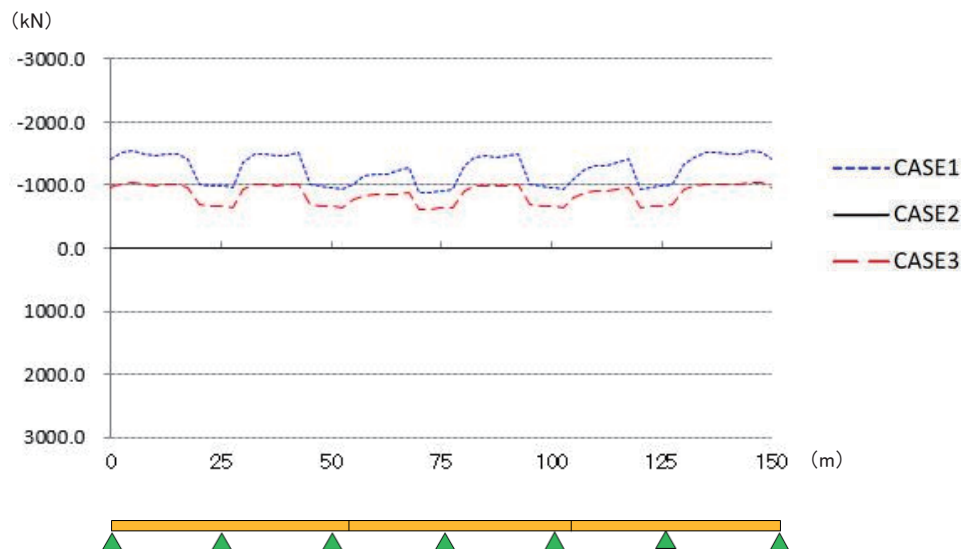


図 7.3.7 死荷重時 軸力

■設計荷重時-最大

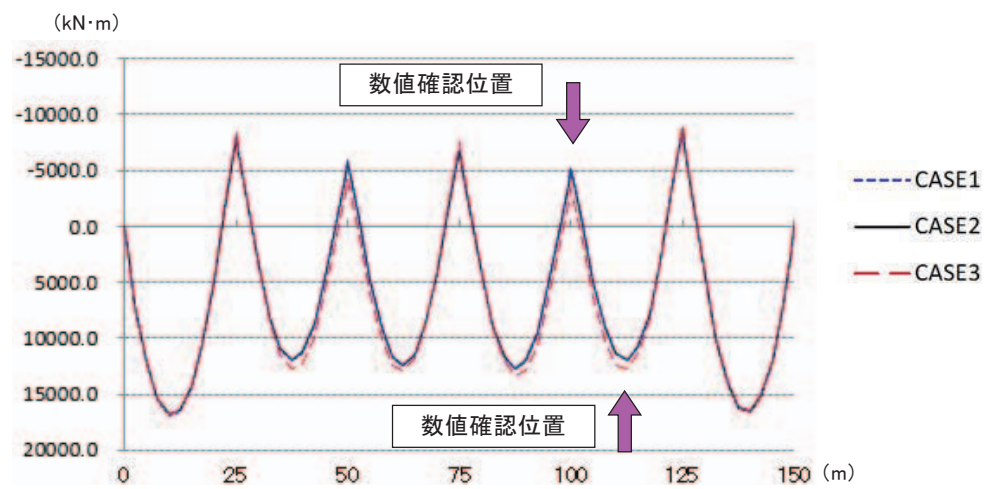


図 7.3.8 設計荷重時Mmax 曲げモーメント

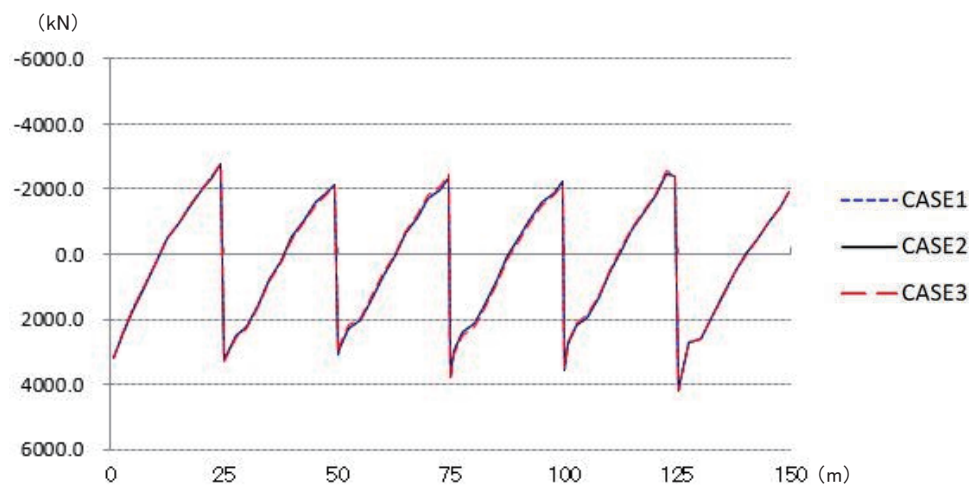


図 7.3.9 設計荷重時Mmax せん断力

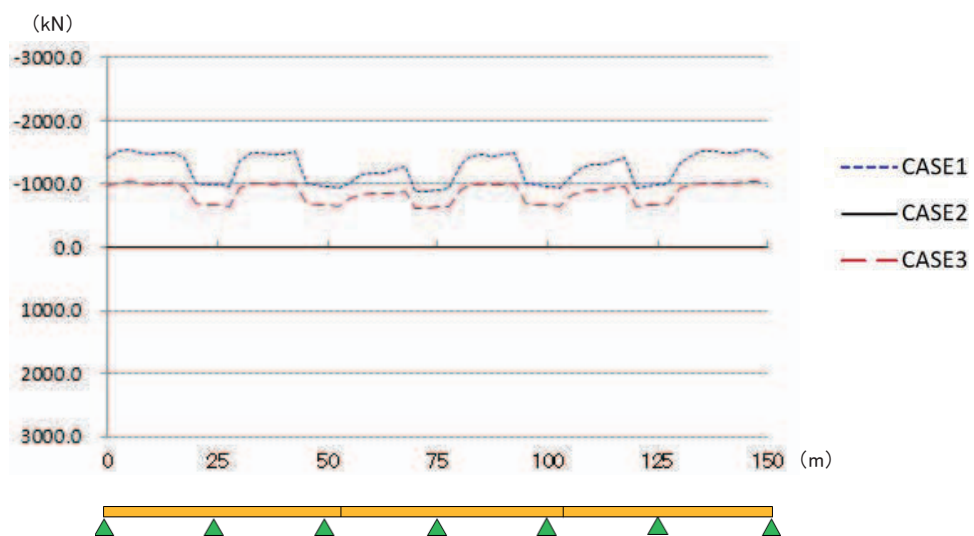


図 7.3.10 設計荷重時Mmax 軸力

■設計荷重時-最小

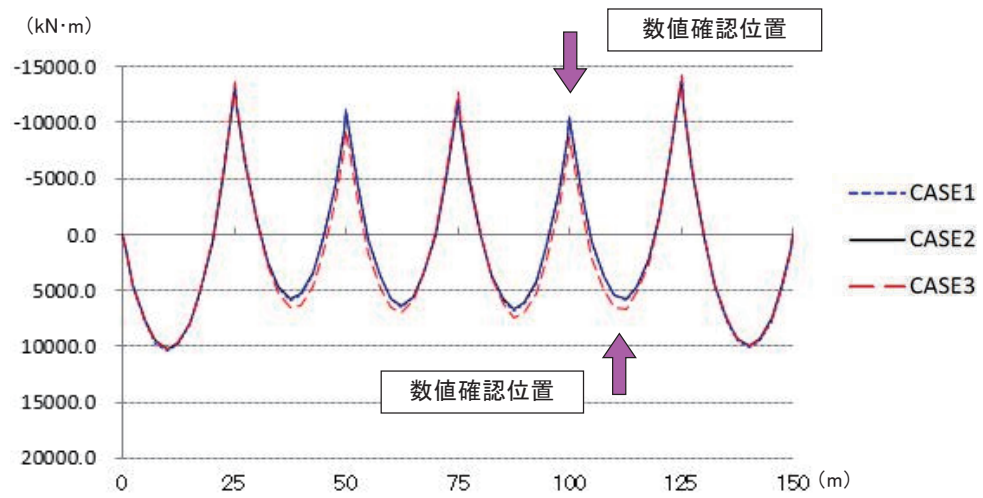


図 7.3.11 設計荷重時Mmin 曲げモーメント

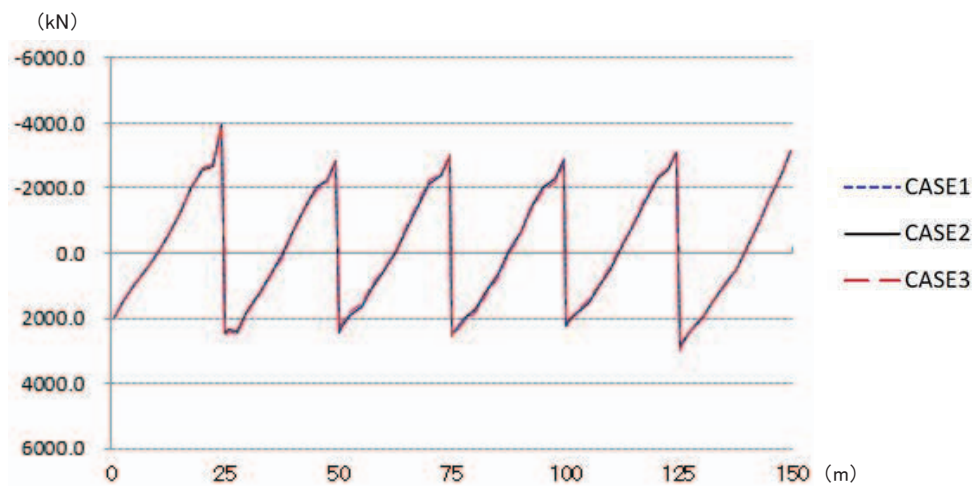


図 7.3.12 設計荷重時Mmin せん断力

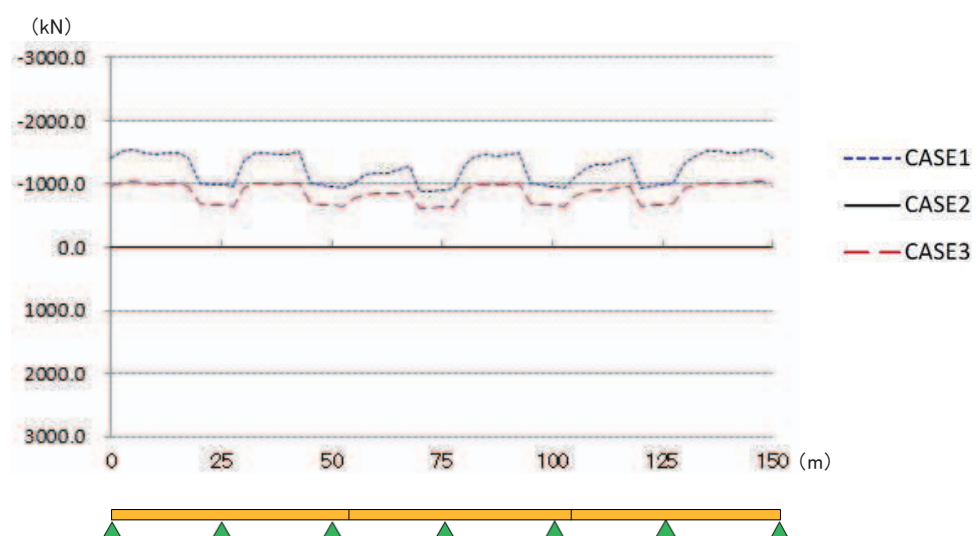


図 7.3.13 設計荷重時Mmin 軸力

○断面力の数値確認

■支間中央部

支間中央部（第5径間）の断面力比較を表 7.3.5 に示す

表 7.3.5 支間中央部の断面力比較

曲げモーメント（第5径間支間中央）		（単位:kN・m）		
		CASE1	CASE2	CASE3
全死荷重時	断面力M	7480.197	7532.678	8302.785
	CASE1との比率	1.00	1.01	1.11
活荷重時max	断面力M	11917.947	11970.428	12740.534
	CASE1との比率	1.00	1.00	1.07
活荷重時min	断面力M	5796.399	5848.880	6618.987
	CASE1との比率	1.00	1.01	1.14

せん断力（第5径間支間中央）		（単位:kN）		
		CASE1	CASE2	CASE3
全死荷重時	断面力S	-116.736	-116.929	-199.516
	CASE1との比率	1.00	1.00	1.71
活荷重時max	断面力S	-120.672	-120.865	-203.452
	CASE1との比率	1.00	1.00	1.69
活荷重時min	断面力S	-259.785	-259.978	-342.565
	CASE1との比率	1.00	1.00	1.32

軸力（第5径間支間中央）		（単位:kN）		
		CASE1	CASE2	CASE3
全死荷重時	断面力N	0.000	-1304.225	-911.603
	CASE2との比率	-	1.00	0.70
活荷重時max	断面力N	0.000	-1304.225	-911.603
	CASE2との比率	-	1.00	0.70
活荷重時min	断面力N	0.000	-1304.225	-911.603
	CASE2との比率	-	1.00	0.70

■中間支点部

中間支点部（P4 支点）の断面力比較を表 7.3.6 に示す

表 7.3.6 中間支点部の断面力比較

曲げモーメント（P4 支点着目）		（単位：kN・m）		
		CASE1	CASE2	CASE3
全死荷重時	断面力M	-6407.809	-6536.557	-4685.794
	CASE1との比率	1.00	1.02	0.73
活荷重時max	断面力M	-5177.187	-5305.935	-3455.172
	CASE1との比率	1.00	1.02	0.67
活荷重時min	断面力M	-10352.228	-10480.976	-8630.213
	CASE1との比率	1.00	1.01	0.83

せん断力（P4 支点着目）		（単位：kN）		
		CASE1	CASE2	CASE3
全死荷重時	断面力S	2451.890	2448.255	2367.266
	CASE1との比率	1.00	1.00	0.97
活荷重時max	断面力S	3574.152	3570.516	3489.527
	CASE1との比率	1.00	1.00	0.98
活荷重時min	断面力S	2238.798	2235.162	2154.173
	CASE1との比率	1.00	1.00	0.96

軸力（P4 支点着目）		（単位：kN）		
		CASE1	CASE2	CASE3
全死荷重時	断面力N	0.000	-964.348	-661.941
	CASE2との比率	-	1.00	0.69
活荷重時max	断面力N	0.000	-964.348	-661.941
	CASE2との比率	-	1.00	0.69
活荷重時min	断面力N	0.000	-964.348	-661.941
	CASE2との比率	-	1.00	0.69

2) 曲げ応力度比較

■断面上縁応力度

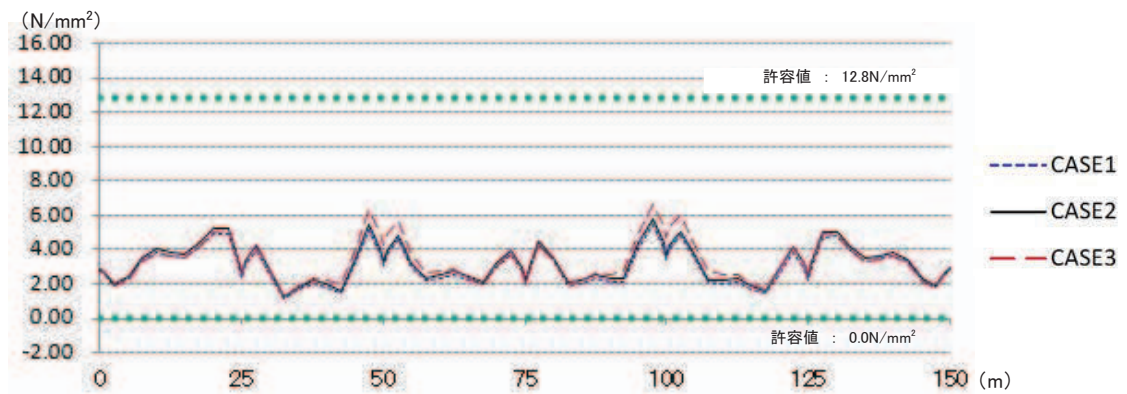


図 7.3.14 死荷重時 上縁側合成応力度

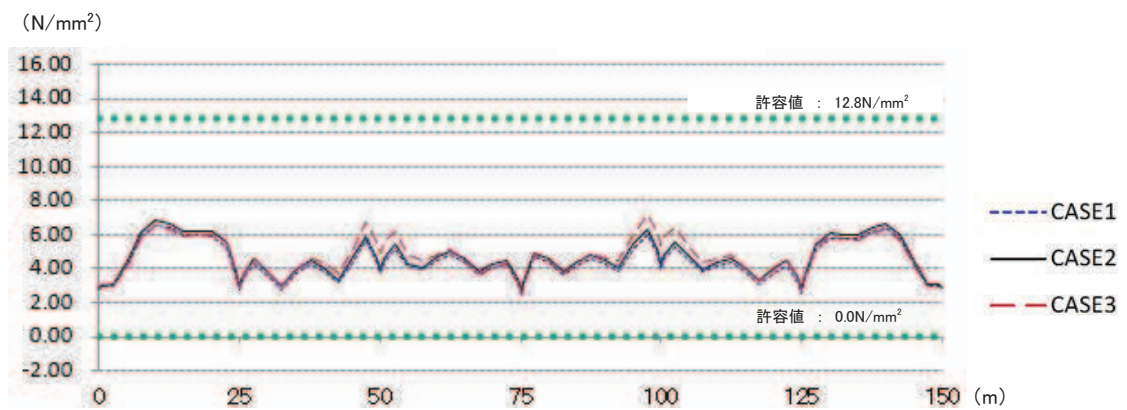


図 7.3.15 設計荷重時Mmax 上縁側合成応力度

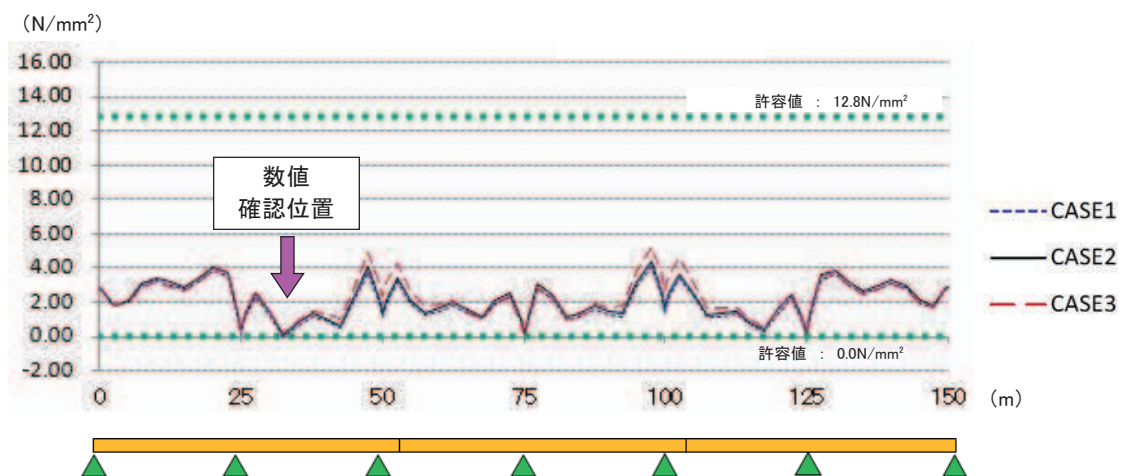


図 7.3.16 設計荷重時Mmin 上縁側合成応力度

■断面下縁応力度

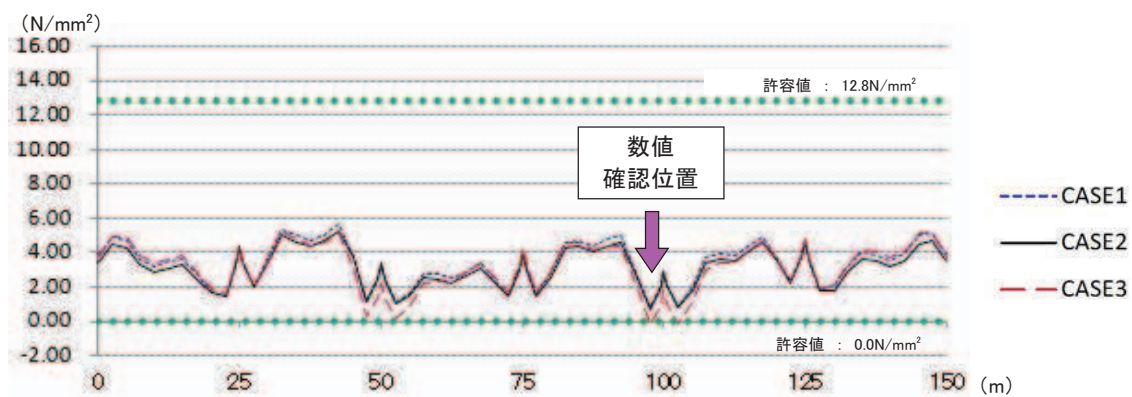


図 7.3.17 死荷重時 下縁側合成応力度

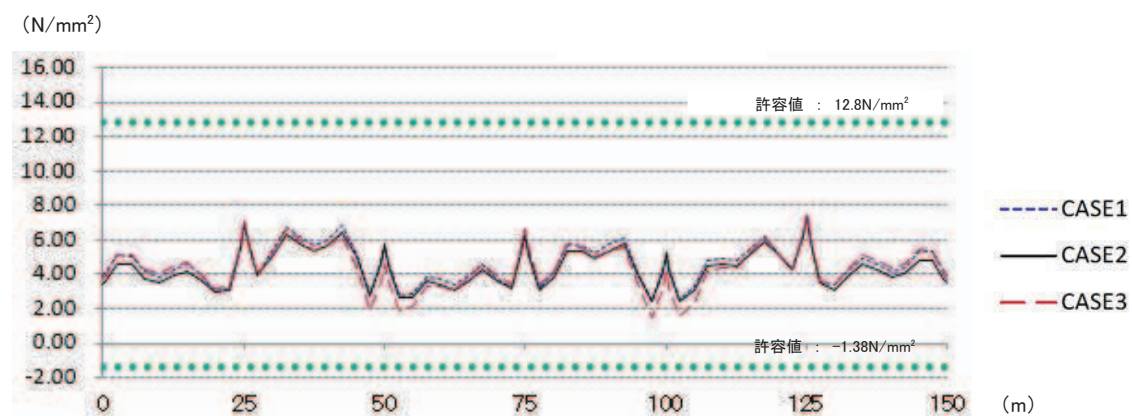


図 7.3.18 設計荷重時Mmax 下縁側合成応力度

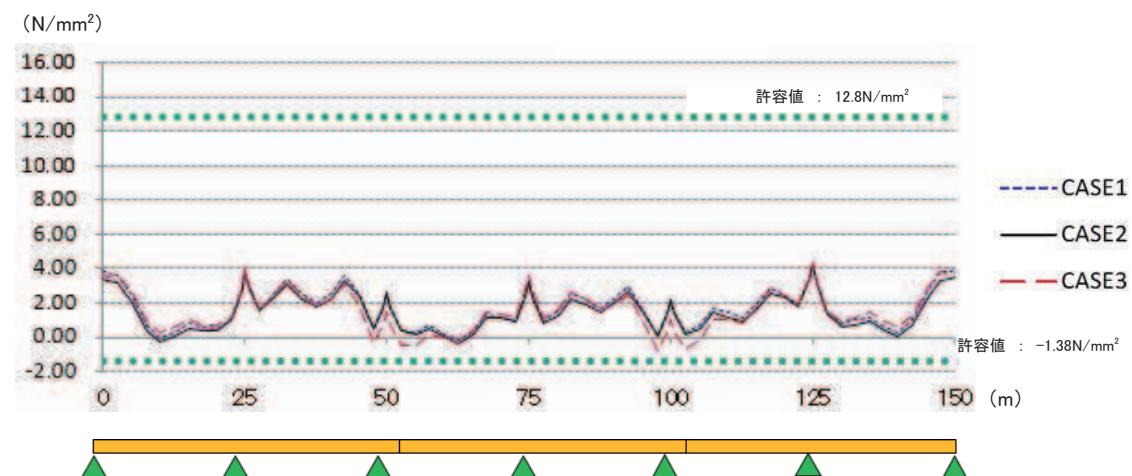


図 7.3.19 設計荷重時Mmin 下縁側合成応力度

○合成応力度の数値確認

合成応力度が最もクリティカルであった下記箇所の比較を表 7.3.7 に示す。

表 7.3.7 合成応力度の比較

上縁 (L=32.5m)		(単位: N/mm ²)			
		CASE1	CASE2	CASE3	制限値
全死荷重時	応力度	1.29	1.11	1.29	死荷重時) $0.00 < \sigma_{ca} < 12.80$ 設計荷重時) $0.00 < \sigma_{ca} < 12.80$
	CASE1との差		-0.18	0.00	
活荷重時max	応力度	3.01	2.80	2.98	
	CASE1との差		-0.21	-0.03	
活荷重時min	応力度	0.11	-0.05	0.14	
	CASE1との差		-0.16	0.03	

下縁 (L=97.5m)		(単位: N/mm ²)			
		CASE1	CASE2	CASE3	制限値
全死荷重時	応力度	0.76	0.72	-0.19	死荷重時) $0.00 < \sigma_{ca} < 12.80$ 設計荷重時) $-1.38 < \sigma_{ca} < 12.80$
	CASE1との差		-0.04	-0.95	
活荷重時max	応力度	2.46	2.39	1.49	
	CASE1との差		-0.07	-0.97	
活荷重時min	応力度	0.09	0.06	-0.84	
	CASE1との差		-0.03	-0.93	

※着色箇所は制限値を満足しないことを示す。

3) P C 鋼材応力度

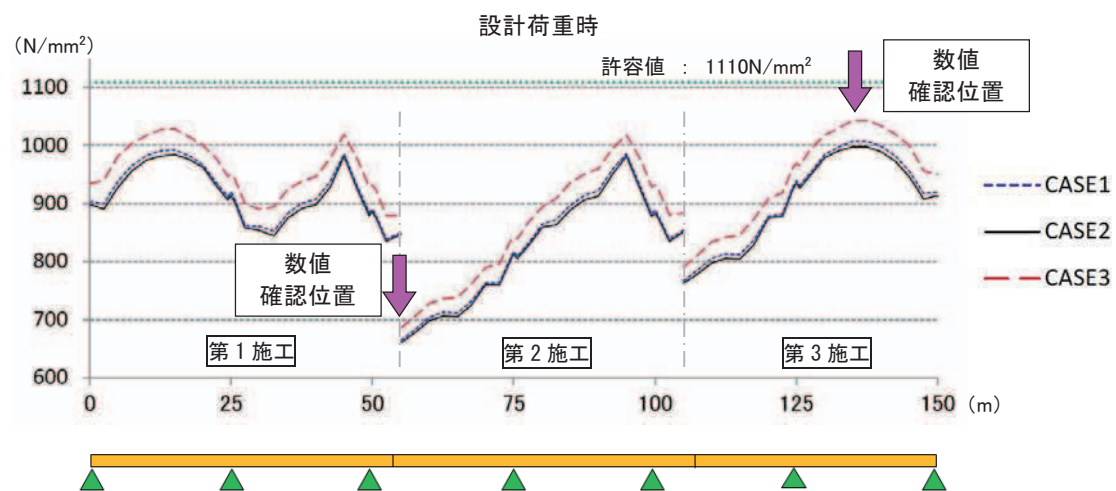


図 7.3.20 P C 鋼材応力度

○鋼材応力度の数値確認

P C 鋼材応力度が最もクリティカルであった下記箇所の比較を表 7.3.8 に示す。

表 7.3.8 P C 鋼材応力度の比較

		(単位: N/mm ²)			
		CASE1	CASE2	CASE3	制限値
P2分割目地部	応力度	660.86	664.66	685.87	$\sigma_{pa} < 1110.0$
	CASE1との比率		1.01	1.04	
第6径間 支間中央付近	応力度	998.19	1006.85	1044.25	
	CASE1との比率		1.01	1.05	

4) 斜引張応力度

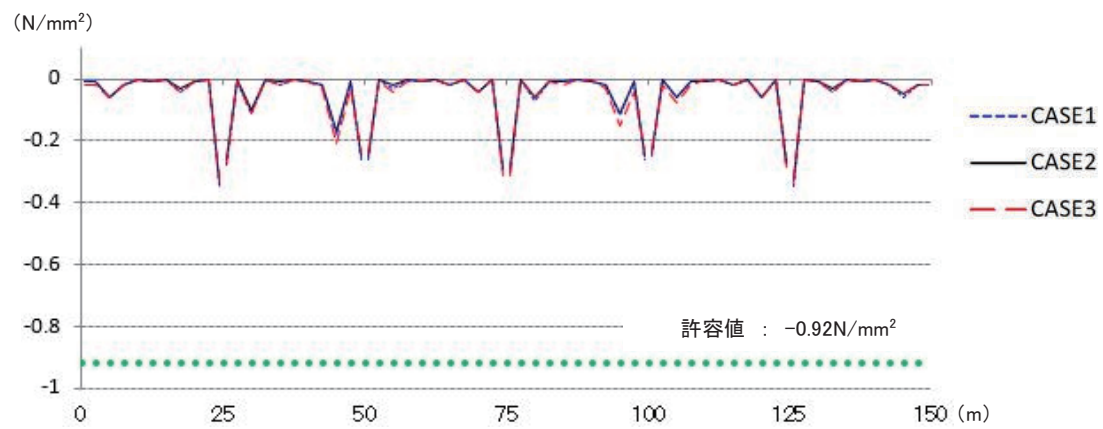


図 7.3.21 死荷重時の斜引張応力度

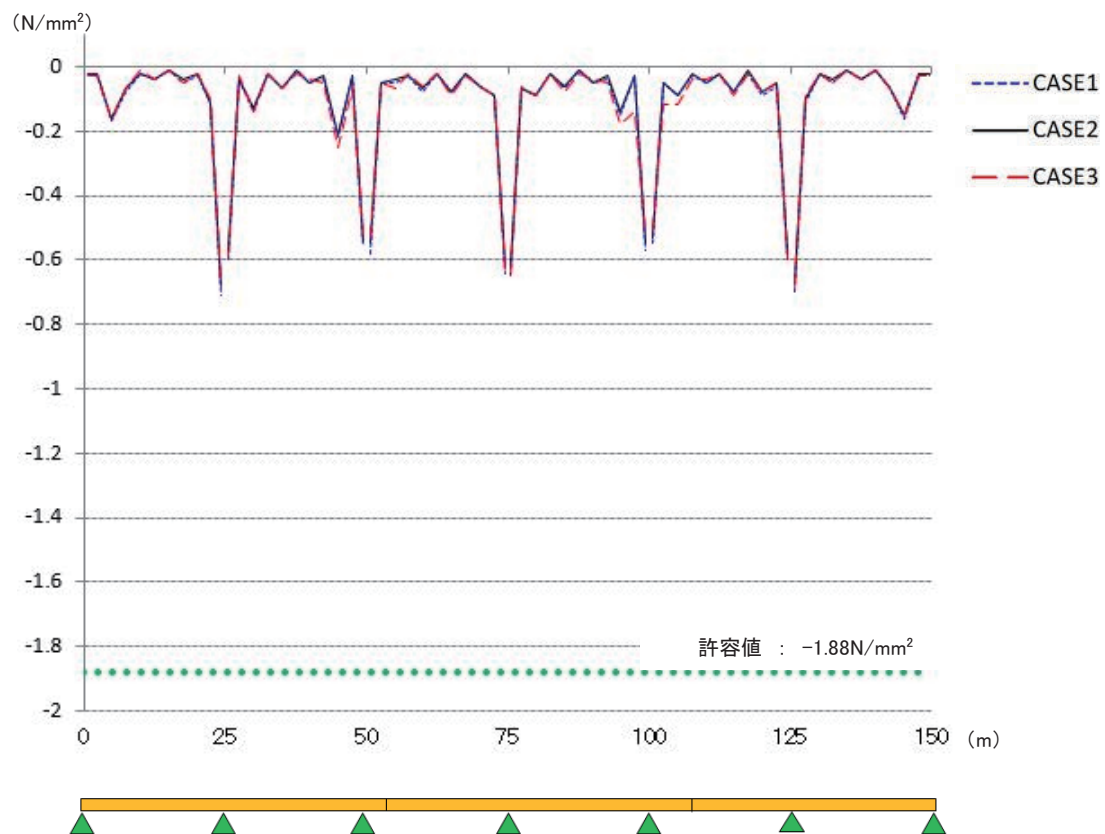


図 7.3.22 設計荷重時の斜引張応力度

5) たわみ比較

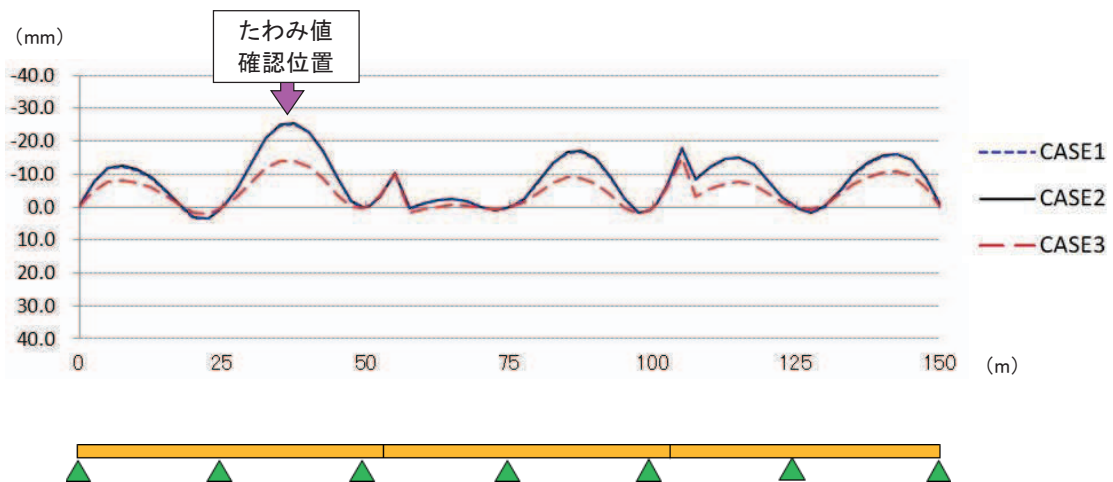


図 7.3.23 たわみの比較

○たわみ値の数値確認（第 2 径間中央付近 L=37.5m）

たわみが最も大きくなる箇所での比較を表 7.3.9 に示す。

表 7.3.9 たわみの比較

	たわみ量 (mm)	差	比率	備考
CASE 1	-25.3	-	1.000	基本ケース
CASE 2	-25.2	-0.1	0.996	実橋レベルの配置鉄筋
CASE 3	-13.8	-11.5	0.545	実橋レベルの配置鉄筋+実測クリープ

※『差』はCASE1と各CASEの差の値を示す。

※『比率』は各CASEをCASE1で除した値を示す。

6) 水平変位

A 1 を固定とした場合の A 2 での移動量の比較を表 7.3.10 に示す。

表 7.3.10 水平変位の比較

桁端伸縮移動量比較：A2支点(A1固定の場合)

(単位:mm)

	プレストレス 弾性分	乾燥収縮	プレストレス クリープ分	鉄筋拘束	合計
CASE1	-8.258	-19.688	-50.961	0.000	-78.907
CASE2	-8.262	-19.688	-51.212	0.804	-78.358
CASE3	-8.262	-19.688	-14.762	0.496	-42.216

※右向きを正とする。

7.3.3 解析結果

(1) 断面力について

- ・ 鉄筋拘束力を考慮することで新たに引張方向の軸力が生じ、クリープ係数が大きいほど軸力も大きくなった。
- ・ 鉄筋拘束の有無で比較した CASE1 と CASE2 では、鉄筋拘束力を考慮すると曲げモーメントとせん断力は僅かに増加する結果であったが、その変動率は、支間中央部で 1%以下である。

(2) 有効プレストレスについて

- ・ クリープ・乾燥収縮による P C 鋼材応力度の減少量の計算において鉄筋拘束の影響を考慮すると、プレストレスの損失は小さくなり有効プレストレスが増加する。そのため、鉄筋拘束力の影響により、鋼材応力度は 1%程度大きくなる。
- ・ 鉄筋拘束の影響により P C 鋼材応力度は、全長にわたり大きくなる傾向となる。

(3) 曲げ応力度について

- ・ 鉄筋拘束を考慮した場合、引張方向の軸力が作用するため、コンクリートの曲げ応力度は上縁・下縁とも圧縮応力度は低下し、中間支点付近の主桁上縁の応力度は 0.2N/mm^2 程度引張側に作用し許容値を満足しない断面が発生した。
- ・ 鉄筋拘束を考慮した CASE2 では、分割施工の打継目のある中間支点のケーブル曲下げ部付近の主桁下縁の応力度が、 0.1N/mm^2 程度引張側に大きくなった。クリープ係数を $1/2$ とした CASE3 では、さらに 1.0N/mm^2 程度引張側に大きくなった。本ケースでは、下縁側の引張応力度が最も厳しい断面では、鉄筋拘束の影響は比較的小さく、クリープ係数の影響の方が大きい結果であった。

(4) 斜引張応力度について

- ・ 中空床版橋においては、曲げ応力度の変動と比較して、斜引張応力度の変動は小さく、CASE1～CASE3 において大差無いレベルである。

(5) 鉛直変位について

- ・ 鉄筋拘束の影響による鉛直変位の差は、 0.1mm 程度と僅かであった。
- ・ クリープの値を $1/2$ にした場合、鉛直変位の変化が大きく、 -25.3mm から -13.8mm になった。
- ・ 鉄筋拘束力を考慮してもしなくても鉛直変位の差はほとんど無い。

(6) 水平変位について

- ・ 鉄筋拘束の影響に水平変位の差は、1.0mm 以下と僅かであった。
- ・ CASE2 と CASE3 を比較した場合、クリープの値を 1/2 にした場合、水平変位は -78mm から -42mm になった。
- ・ 鉄筋拘束力を考慮してもしなくても鉛直変位の差はほとんど無い。

7.3.4 鉄筋換算断面の影響について

7.3.2 では、軸方向鉄筋を考慮することによって生じる鉄筋拘束力の影響について感度解析を行った。

ここでは 7.3.2 とは別に、軸方向鉄筋をヤング係数比を用いてコンクリート換算して断面諸元に考慮することによって生じる発生応力度の影響を確認する。なお、換算後の断面を「鉄筋換算断面」と称している。

(1) 断面諸元の比較

鉄筋換算を考慮しない CASE1 と、鉄筋換算を考慮した CASE2 とで断面諸元の比較を行った（表 7.3.11 参照）。なお、配置鉄筋は、7.3.2 で行った感度解析と同様に図 7.3.3 および表 7.3.2 の配置とした。

また、通常の連続構造の中空床版橋では、橋軸方向に太径の鉄筋を密に配置することは少ないが、ラーメン構造で耐震設計を行う場合、太径鉄筋が配置されるケースも考えられる。そこで、CASE0 として、中間支点付近の上縁鉄筋と支間中央付近の下縁鉄筋を D25 にした検討も行った。支間中央と中間支点部の断面諸元の比較を表 7.3.11 に示す。

表 7.3.11 断面諸元の比較

支間中央（第5径間支間中央）

	断面積 $A(m^2)$	断面二次 $I(m^4)$	上縁-図心 $y_u(cm)$	下縁-図心 $y_l(cm)$	PC鋼材偏心量 $e_p(cm)$	鉄筋偏心量 $e_s(cm)$	断面係数(上) $W_u(m^3)$	断面係数(下) $W_l(m^3)$
CASE1 鉄筋なし	6.51670	1.08350	55.69	-64.31	-44.81	-	1.94555	-1.68483
CASE2 鉄筋換算	6.59557	1.10796	55.90	-64.10	-44.60	-17.60	1.98190	-1.72859
比率 (CASE2/CASE1)	1.012	1.023	1.004	0.997	0.995	-	1.019	1.026
CASE0 D25換算	6.74216	1.15752	57.19	-62.81	-43.31	-43.03	2.02412	-1.84279
比率 (CASE0/CASE1)	1.035	1.068	1.027	0.977	0.967	-	1.040	1.094

中間支点（P4支点着目）

	断面積 $A(m^2)$	断面二次 $I(m^4)$	上縁-図心 $y_u(cm)$	下縁-図心 $y_l(cm)$	PC鋼材偏心量 $e_p(cm)$	鉄筋偏心量 $e_s(cm)$	断面係数(上) $W_u(m^3)$	断面係数(下) $W_l(m^3)$
CASE1 鉄筋なし	6.51670	1.07443	54.58	-65.42	32.08	-	1.96846	-1.64242
CASE2 鉄筋換算	6.57097	1.09041	54.58	-65.42	32.08	-0.33	1.99764	-1.66691
比率 (CASE2/CASE1)	1.008	1.015	1.000	1.000	1.000	-	1.015	1.015
CASE0 D25換算	6.65995	1.11156	53.93	-66.07	31.43	29.71	2.06116	-1.68238
比率 (CASE0/CASE1)	1.022	1.035	0.988	1.010	0.980	-	1.047	1.024

【比較結果】

- ・ CASE1 と CASE2 で断面積(A)を比較した場合、鉄筋換算によって断面積が 1%程度増加する結果となった。また、D25 を配置した CASE0 では 3%程度増加する結果となる。
- ・ CASE1 と CASE2 で P C 鋼材偏心量 (e_p) を比較した場合、CASE2 は支間中央断面で 2mm 程度偏心量が小さくなった。また、CASE0 では 15mm 小さくなった。
- ・ 中間支点断面の P C 鋼材偏心量は、CASE1 と CASE2 では同じ値となり差が生じない結果となった。また、CASE0 では 6.5mm 小さくなった。
- ・ CASE1 と CASE2 で断面係数 (W_u 、 W_l) を比較した場合、鉄筋換算によって断面係数が 2～3%増加する結果となった。また、CASE0 では 2～9%増加する結果となる。

(2) 応力度の比較

(1)で算出した CASE1 と CASE2、そして CASE0 の断面諸元を用いて曲げ応力度の比較を行った。さらに、7.3.2 で算出した鉄筋拘束力を考慮した断面力を用いて曲げ応力度を比較した。比較結果を表 7.3.12 に示す。

表 7.3.12 曲げ応力度の比較

(単位 : N/mm²)

支間中央 (第5径間支間中央)		各荷重毎の応力度										全死荷重時の合成応力度			
		主桁自重		橋面荷重		有効プレ		プレ二次		鉄筋拘束力		拘束無視		拘束考慮	
		①		②		③		④		⑤		①+②+③+④		Σ①~⑤	
		上縁	下縁	上縁	下縁	上縁	下縁	上縁	下縁	上縁	下縁	上縁	下縁	上縁	下縁
CASE1	鉄筋なし	3.86	-4.62	0.80	-0.92	-2.06	10.64	1.06	-1.27	-	-	3.66	3.83	3.66	3.83
CASE2	鉄筋換算	3.75	-4.43	0.78	-0.90	-1.94	10.34	1.01	-1.20	-0.15	-0.32	3.60	3.81	3.45	3.49
差 (CASE2-CASE1)		-0.11	0.19	-0.02	0.02	0.12	-0.30	-0.05	0.07	-0.15	-0.32	-0.06	-0.02	-0.21	-0.34
CASE0	D25換算	3.63	-4.03	0.76	-0.84	-1.66	9.52	0.92	-1.01	0.03	-1.16	3.65	3.64	3.68	2.48
差 (CASE0-CASE1)		-0.23	0.59	-0.04	0.08	0.40	-1.12	-0.14	0.26	0.03	-1.16	-0.01	-0.19	0.02	-1.35

制限値 $0 < \sigma_{ca} < 12.80$

(単位 : N/mm²)

中間支点 (P4 支点着目)		各荷重毎の応力度										全死荷重時の合成応力度			
		主桁自重		橋面荷重		有効プレ		プレ二次		鉄筋拘束力		拘束無視		拘束考慮	
		①		②		③		④		⑤		①+②+③+④		Σ①~⑤	
		上縁	下縁	上縁	下縁	上縁	下縁	上縁	下縁	上縁	下縁	上縁	下縁	上縁	下縁
CASE1	鉄筋なし	-5.55	6.46	-1.15	1.38	7.03	-0.63	2.13	-2.48	-	-	2.46	4.73	2.46	4.73
CASE2	鉄筋換算	-5.43	6.31	-1.14	1.36	6.96	-0.62	2.05	-2.39	-0.25	-0.03	2.44	4.66	2.19	4.63
差 (CASE2-CASE1)		0.12	-0.15	0.01	-0.02	-0.07	0.01	-0.08	0.09	-0.25	-0.03	-0.02	-0.07	-0.27	-0.10
CASE0	D25換算	-5.16	6.22	-1.10	1.35	6.75	-0.57	1.83	-2.21	-1.04	0.55	2.32	4.79	1.28	5.34
差 (CASE0-CASE1)		0.39	-0.24	0.05	-0.03	-0.28	0.06	-0.30	0.27	-1.04	0.55	-0.14	0.06	-1.18	0.61

制限値 $0 < \sigma_{ca} < 12.80$

【比較結果】

- ・鉄筋拘束力を無視したケース（緑着色）の場合、鉄筋換算断面を用いた CASE2 の合成応力度は、CASE1 よりも支間中央の下縁および中間支点の上縁で 0.02N/mm^2 小さい値となった。また、CASE0 では $0.1 \sim 0.2\text{ N/mm}^2$ 小さい値となった。
- ・鉄筋拘束力を考慮したケース（赤着色）の場合、鉄筋換算断面を用いた CASE2 の合成応力度は、CASE1 よりも支間中央の下縁および中間支点の上縁で約 0.3N/mm^2 程度小さい値となった。また、CASE0 では $1.2 \sim 1.4\text{ N/mm}^2$ 小さい値となった。

(3) まとめ

1) 鉄筋換算断面の使用について

- ・通常の連続桁で用いられるような鉄筋量(CASE2)では、鉄筋換算断面を用いることで断面積 1%程度、断面係数で 2~3%増加する。また、P C 鋼材偏心量 (e_p) は若干少なくなる。
- ・ラーメン構造やP R C 構造のように太径の鉄筋を配置するような CASE0 では、鉄筋換算断面を用いることで断面積 3%程度、断面係数で最大 9%増加する。また、P C 鋼材偏心量 (e_p) も小さくなる。
- ・鉄筋換算断面を用いて曲げ応力度を比較した結果、曲げ応力度の変化は、 $0.1 \sim 0.2\text{ N/mm}^2$ 程度であり、影響は比較的少ない。

2) 鉄筋拘束力の考慮について

- ・鉄筋拘束力を考慮して曲げ応力度を比較した結果、曲げ応力度の変化は、1.2～1.4 N/mm²程度であり、鉄筋換算断面の影響と比較すると比較的大きいと言える。また、鉄筋拘束力は、無視すると危険側の評価になる傾向である。

7.4 まとめ

鉄筋拘束の有無を考慮し感度解析を行った結果、以下のことが言える。

(1) 断面力について

- ・ 鉄筋拘束力を考慮することで新たに引張方向の軸力が生じ、クリープ係数が大きいほど引張方向の軸力も大きくなる。
- ・ 箱桁橋のように自重が大きいケースでは、主桁の曲げモーメントおよびせん断力は、自重の影響を大きく受けるため、鉄筋拘束力の影響やクリープ係数の違いを考慮しても、死荷重時の断面力差は少なく、これらの影響は相対的に小さいと言える。
- ・ 自重が比較的小さい中空床版橋でも、鉄筋拘束力を考慮することにより曲げモーメント、せん断力が増加する結果であったが、その変動率は、支間中央で1%以下と影響は小さいと言える。

(2) 有効プレストレスについて

- ・ クリープ・乾燥収縮によるプレストレス減少量の計算において鉄筋拘束の影響を考慮すると、プレストレスの損失は小さくなり有効プレストレスが増加する。
- ・ 比較的大径の鉄筋が配置される箱桁橋（最大 D25ctc125）の試設計の結果、有効緊張時の鋼材応力度は、 30N/mm^2 程度大きくなり3%程度変化する。
- ・ 配置鉄筋量の少ない中空床版橋（D13ctc125程度）では、鋼材応力度が 10N/mm^2 程度大きい値となり、1%程度変化する。
- ・ 鉄筋がコンクリートのひずみを拘束する影響が大きい場合は、クリープや乾燥収縮によるコンクリートの軸方向の短縮量が小さくなることから、プレストレスの損失が小さくなり、有効プレストレス時にP C鋼材応力度の制限値を超過する可能性がある。このため、P C鋼材の疲労耐久性を確保するために、P C鋼材に導入する初期緊張力を低減させるなどの対策が必要となる。

(3) 合成応力度について

【鉄筋拘束力の影響について】

- ・ 鉄筋拘束力を考慮することで引張方向の軸力が作用するため、コンクリートの圧縮応力度は上縁・下縁とも小さくなる。
- ・ 箱桁中間支点部のように、主桁断面が大きく、主桁断面積に比べ鉄筋比が小さい断面では、クリープ係数の違いや鉄筋拘束力の考慮の有無の影響は比較的小さい。
- ・ 主桁断面が小さく、比較的铁筋比が大きくなる断面では、クリープ係数の影響よりも、鉄筋拘束力の影響のほうが大きい。
- ・ 配置鉄筋量によって程度は異なるが、鉄筋拘束力を考慮することで、上部構造全体に引張応力度が生じるため、許容値を満たさなくなるケースが生じる。

【鉄筋換算断面の影響について】

- ・ 曲げ応力度の算出時に鉄筋換算断面を用いると、鉄筋を考慮しない場合と比較して、断面諸元が以下のとおり変化する。
 - ①断面積が大きくなる。
 - ②鋼材の偏心量が変化する。
 - ③断面係数が変化する。
- ・ 鉄筋換算断面を用いることで断面諸元が変わると、曲げ応力度も変化する。太径鉄筋を想定したケースでは $0.1 \sim 0.2 \text{ N/mm}^2$ 程度の変化が見られた。

(4) 斜引張応力度について

- ・ 鉄筋拘束力を考慮することで主桁の軸方向圧縮応力度が低下するため、斜引張応力度は増加する傾向となる。
- ・ 試設計における斜引張応力度の変動は、太径の鉄筋が配置される箱桁橋（最大 D25ctc125）では 0.2 N/mm^2 程度、配置鉄筋量の少ない中空床版橋（D13ctc125 程度）では 0.03 N/mm^2 程度であった。

(5) 鉛直変位について

- ・ 鉄筋拘束力を考慮した場合もしない場合も鉛直変位の差はほとんど無い。

(6) 水平変位について

- ・ 鉄筋拘束力を考慮した場合もしない場合も水平変位の差は少ない。
- ・ 3 径間連続ラーメン箱桁橋（橋長 190m）の試設計では、鉄筋拘束を考慮した場合、桁端部の変位量が 3.0mm 程度小さくなった。
- ・ 6 径間連続中空床版橋（橋長 151m）の場合、桁端部の変位量の差は 1.0mm 以下と鉄筋拘束力の影響は僅かであった。

(7) まとめ

【鉄筋拘束力について】

- ・ 近年、耐震設計手法の改定などにより軸方向に多くの鉄筋が配置されるようになってきている。配置鉄筋量により影響の程度は異なるが、鉄筋の拘束力を考慮することにより上部工全体に引張応力度が生じることから、鉄筋の拘束力の影響を適切に評価した設計を行う必要がある。

【鉄筋換算断面について】

- ・ 配置鉄筋量にもよるが鉄筋換算断面を用いることで、抵抗断面の断面諸元に差が生じ、部材の曲げ応力度等に影響が生じる。より精度の高い設計を行うためには、実構造に近い鉄筋配置をモデル化し解析を実施する必要がある。