

ダムゲートの耐荷力特性評価

1. 概要

1.1 ダムゲート耐荷力検討の流れ

設置年代が古いダムゲートは、現行のダム・堰技術基準（案）の腹板補剛設計規定を満たさない補剛材等が設置されている場合がある。

耐震性能照査する場合、現行基準を満たさない補剛材を有する鋼部材の局部座屈応力度の算定式がないことから、暫定的に補剛材を考慮しない局部座屈応力度の算定式を用いている。

耐震性能照査の結果、ダムゲート部材の局部座屈応力度が大きく低下し、現時点では所要の耐震性能を確保できず、今後の検討課題となっている。

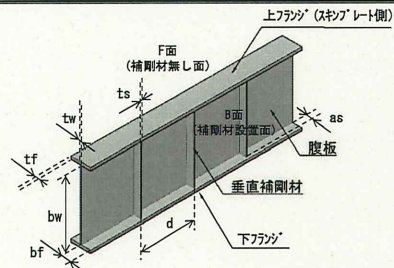
実際には、現行基準を満たさないものの、設置されている補剛材は一定の補剛効果を発揮していると考えられる。大規模地震に対するダムゲートの耐震性能照査では、このような基準を満たさない構造部材を有するダムゲートについても、その耐荷力特性を考慮して耐震性能を評価することが重要である。

ダムゲート横主桁の補剛材設計規定の満足の有無に着目した載荷実験及び非弾性有限変位解析による再現解析を行った（＝単調載荷による検討）。また、実際のダムゲート横主桁に対して、非弾性有限変位解析を適用し、耐荷力の検討を行った。この結果、腹板の座屈に伴う耐力低下は見られなかった。

⇒ この検討結果をもとに2018（平成30）年7月12日に打合せを実施。

地震時の繰返し載荷でも、同等の耐震性能が確保されていることを確認する必要がある。

今回は、これまで実施した載荷実験の再現モデルと実際のダムゲート横主桁を対象に繰返し載荷解析を実施した（＝繰返し載荷による検討）。



項目	規定値
垂直補剛材間隔(d)	$d \leq 10 \cdot tw / \sqrt{S/A}$
垂直補剛材の幅(as)	$as \leq bw / 30 + 50$
垂直補剛材の板厚(ts)	$ts \leq as / 13$
垂直補剛材の剛度(Iv)	$Iv \geq bw \times tw^3 \times rv / 11$

S：腹板に作用するせん断力(N)
 A：腹板の総断面積(mm²)
 bw：腹板幅(mm)、tw：腹板厚(mm)、
 rv：垂直補剛材の必要剛比=8×(bw/d)²

図 1.1 座屈補剛規定(I桁)

1.2 単調載荷による検討についての打合せ結果

ダムゲートの耐荷力検討に係る前回の打合せは2018（平成30）年7月12日に行われており、その際の打合せ結果は以下のとおりである。

2. ダムゲートの耐荷力検討

- ・現行基準に満たない補剛材を有するダムゲートの耐荷力評価を目的として実施した載荷実験、実験の再現解析、実ダムゲート横主桁の解析結果について説明した。
- ・今回実験と解析でフランジが降伏するより小さい荷重で腹板が座屈したこともふまえて、繰返し載荷に対する横主桁の耐荷力特性については引き続き検討する必要がある。

1.3 繰返し載荷による検討

これまでに実施した載荷実験の再現モデルと実際のダムゲート横主桁を対象に、繰返し載荷解析を実施した。繰返し載荷方法については、地震時の単調載荷及び繰返し載荷時のダムゲート横主桁に対する記載内容を既存文献から確認し、繰返し載荷方法の根拠とした。

2. 単調荷荷による検討

2.1 載荷実験と再現解析

2.1.1 対象構造物の条件整理

(1) 垂直補剛材の機能と実験の着目点

本実験では基準を満足しない補剛材を有する横主桁の耐荷力の評価を目的として、垂直補剛材の諸元が腹板のせん断座屈とこれに伴う主桁の耐力に及ぼす影響に着目した載荷試験を実施した。

(2) 着目する基準不適合項目

既存ダムゲートの基準不適合の事例を以下に示す。■ダムは補剛材の板厚が基準値に対して不足している例、■ダムは補剛材の剛度が基準値に対して不足している例、■ダムは間隔が基準値に対して不足している例である。ここで垂直補剛材の板厚は軸力による自由突出板の局部座屈強度、剛度は腹板の耐荷力の確保を目的としている。本検討では、垂直補剛材が桁の耐荷力に与える影響を検証することを目的とし、「剛度」が重要と考え、断面2次モーメントが不足している■ダムの補剛材剛度を参考に供試体の諸元を決定した。

表 2.1 既設ダムの垂直補剛材諸元

ダム	項目	単位	寸法値	基準値	判定	比率
■ダム	間隔	mm	970.0	1176.8 以下	OK	
	板厚	mm	9.0	11.5 以上	OUT	
	幅	mm	150.0	90.0 以上	OK	78%
	断面2次モーメント	mm ⁴	10,125,000	973,700 以上	OK	
■ダム	間隔	mm	—	—	—	
	板厚	mm	12.0	5.4 以上	OK	
	幅	mm	70.5	87.1 以下	OK	
	断面2次モーメント	mm ⁴	1,401,611	1,856,410	OUT	76%
■ダム	間隔	mm	1480.0	1327.1 以下	OUT	
	板厚	mm	10.0	9.62 以上	OK	
	幅	mm	125.0	110 以上	OK	
	断面2次モーメント	mm ⁴	6,838,307	3,346,066	OK	

2.1.2 供試体の製作

(1) 供試体の製作ケース

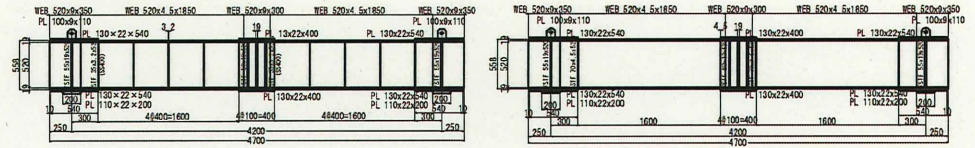
本実験は前述のとおり『補剛材の剛度』に着目した。また極端な状態として、補剛材がない場合に相当する『補剛材間隔』が広い場合も含めた下記の3ケースの供試体を製作した。

表 2.2 供試体の製作ケース

	概要
Case1: 補剛材基準不足 (剛度不足)	補剛材剛度が必要剛度より低い供試体 ⇒必要剛度の75%程度とする。
Case2: 補剛材無し (間隔が過大)	補剛材間隔が基準を大きく超える供試体 ⇒ $d/bw \approx 3$ 程度とする
Case3: 補剛材基準適合	補剛材に関する現行規定を全て満足する供試体

(2) 実験供試体

実験供試体を以下に示す。



(1) Case1: 補剛材基準不足 (剛度不足)

(2) Case2: 補剛材無し (間隔が過大)

(3) Case3: 補剛材基準適合

図 2.1 実験供試体

2.1.3 載荷実験

(1) 実験概要

目的: 垂直補剛材が I 桁の耐荷力に与える影響の検証

場所: 国立研究開発法人 土木研究所

日時: 2016 (平成 28) 年 12 月 27 日 (火)・・・Case3: 補剛材基準適合

2017 (平成 29) 年 1 月 17 日 (火)・・・Case2: 補剛材無し (間隔が過大)

2017 (平成 29) 年 1 月 20 日 (金)・・・Case1: 補剛材基準不足 (剛度不足)

(2) 載荷方法

垂直補剛材の役割は腹板のせん断座屈の補剛であることを踏まえ、曲げ応力度とせん断応力度の両方が作用する状態での垂直補剛材の影響に着目するため、載荷方法は支間中央部への集中荷重とした。これにより右図に示すように、載荷位置の両側のテストパネルには曲げモーメントとせん断力の両方が作用する。

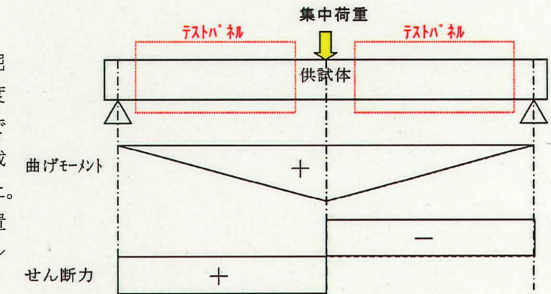


図 2.2 載荷方法

(3) 供試体の破壊形状

実験後の各供試体の補剛材配置面における破壊形状を表 2.3～表 2.5 に示す。各供試体で腹板の座屈形状が異なる結果となった。ただし、上フランジに塑性ヒンジが発生する位置は、Case1、3 は同様であり、Case2 のみ異なる結果となった。

表 2.3 供試体形状 (Case1: 補剛材基準不足(剛度不足))



表 2.4 供試体形状 (Case2: 補剛材無し(間隔が過大))



表 2.5 供試体形状 (Case3: 補剛材基準適合)



(4) P-δ 曲線

各供試体の P-δ 曲線を比較した結果を下記に示す。

- ・ 載荷開始から 300kN までは 3 ケースとも同様の挙動を示した。
- ・ Case3: 補剛材基準適合は 500kN 付近で降伏を迎えた後も荷重が増加し、最大耐荷力は 600kN 程度となった。
- ・ Case1: 補剛材基準不足 (剛度不足) は Case3 と同様の挙動を示した。
- ・ Case2: 補剛材無し (間隔が過大) は 500kN 付近で挙動が変化し、そのまま荷重が低下する結果となった (最大耐荷力: 500kN)。

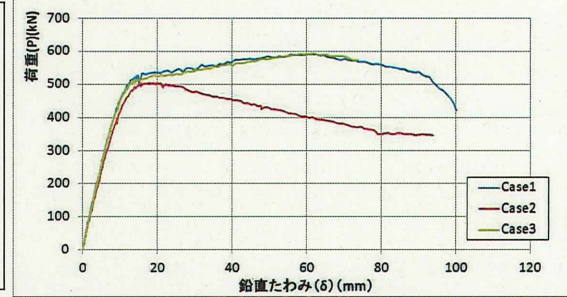
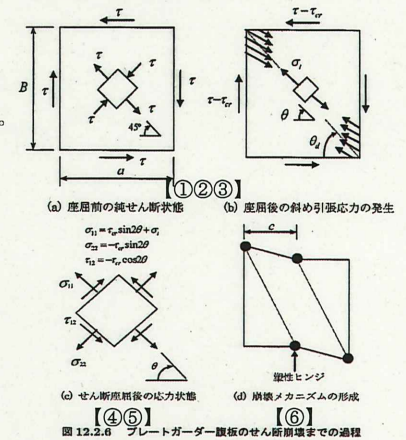
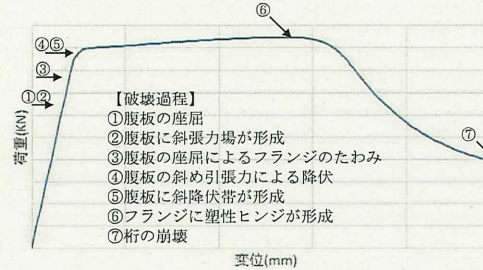


図 2.3 P-δ 曲線

2.1.4 実験結果の整理

(1) 破壊過程の想定

座屈設計ガイドライン(2005)より、I 桁にせん断力が作用した場合の破壊過程は図 2.4 のようになると想定される。また、各供試体の破壊過程を整理した。



①腹板の座屈	②腹板に斜張力場が形成	③腹板の座屈によるフランジのたわみ
④腹板の斜め引張力による降伏 ⑤腹板に斜降伏帯が形成	⑥フランジに塑性ヒンジが形成	⑦桁の崩壊

図 2.4 破壊過程のイメージ

(2) 再現解析の条件

以下に再現解析の基本条件を示す。

表 2.6 解析基本条件

項目	内容		備考
解析ソフト	ABAQUS		
解析方法	非弾性有限変位解析		
使用要素	非線形シェル要素		
応力ひずみ関係	バイリニア型 (第2勾配 E0/100, E0:初期弾性係数)		
硬化則	移動硬化則		
降伏条件	フォンミーゼスの条件		
制御方法	変位制御		
初期不整	計測で得られた腹板の初期たわみのみを考慮		
材質	SS400-3.2mm	降伏応力度 (試験値): 329N/mm ²	
	SM400A-4.5mm	降伏応力度 (試験値): 314N/mm ²	
	SM400A-19	降伏応力度 (試験値): 274N/mm ²	
	初期弾性係数	E0=2.0×10 ⁸ kN/m ²	
板厚	SS400-3.2mm	実際の板厚 3.1mm を適用	
	SM400A-4.5mm	実際の板厚 4.4mm を適用	
	SM400A-19	実際の板厚 19.2mm を適用	
境界条件	支点部	可動、固定	
	横倒れ防止装置	鉛直ローラー (上下フランジに設定)	
メッシュ分割	腹板: 30 分割 フランジ、補剛材: 腹板と同程度の分割		

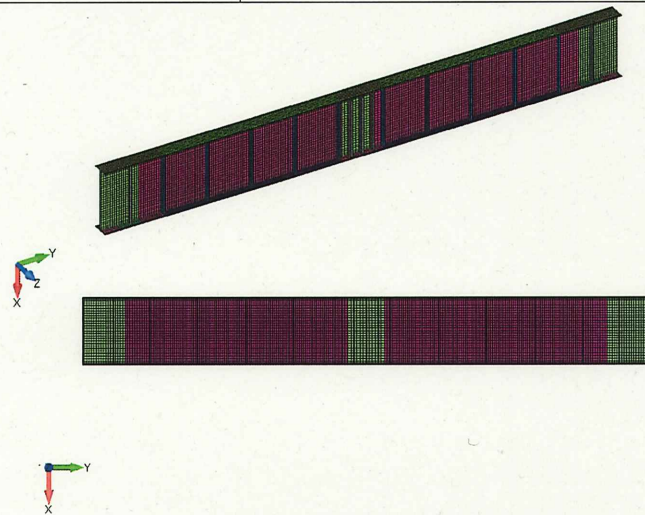


図 2.5 Case3 モデル図 (補剛材基準適合)

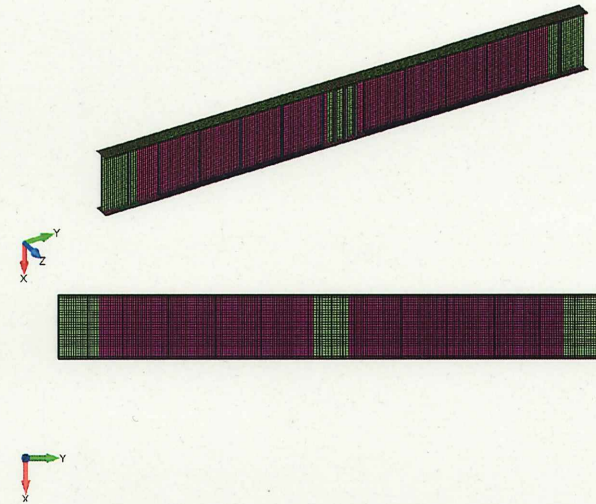


図 2.6 Case1 モデル図 (補剛材基準不足(剛度不足))

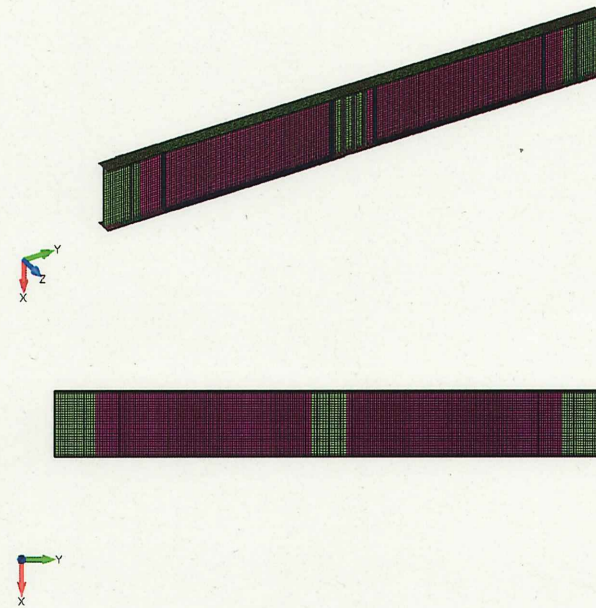


図 2.7 Case2 モデル図 (補剛材無し(間隔が過大))

(3) 再現解析のまとめ

Case ごとに実験結果と併せて整理した。

表 2.7 Case ごとの比較 (Case3 : 補剛材基準適合)


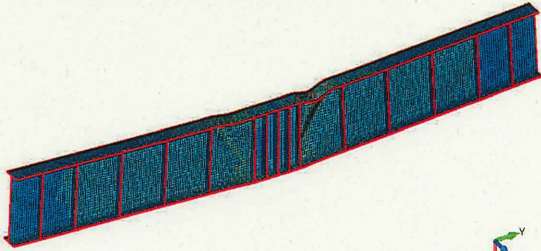
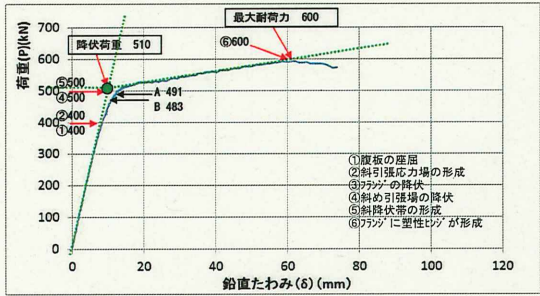
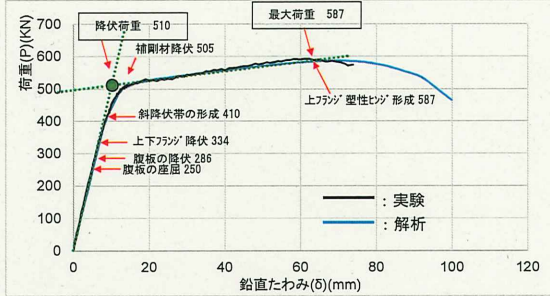
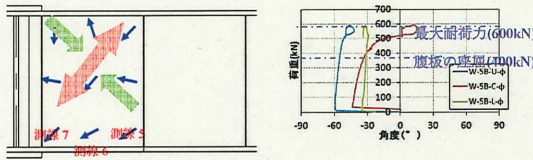
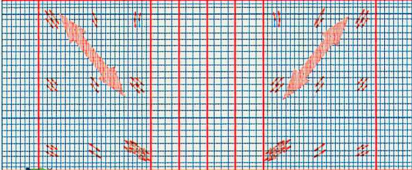
	実験結果	解析結果
<p>供試体 (載荷重実験後)</p>		
<p>P-δ 曲線</p>		
<p>腹板内の 最大主ひずみの 方向</p>	<p>1 パネル内でせん断座屈が発生</p>  <p>図 2.8 最大耐力時の方向 図 2.9 最大主ひずみの方向 (測線 5)</p>	<p>1 パネル内でせん断座屈が発生</p>  <p>図 2.10 最大耐力時の最大主ひずみの方向</p>
<p>最大耐力力</p>	<p>600kN (上フランジが 1 パネル内で塑性ヒンジを形成)</p>	<p>587kN (上フランジが 1 パネル内で塑性ヒンジを形成)</p>
<p>まとめ</p>	<p>①降伏荷重は 510kN で、腹板の斜め引張力による降伏に支配されている。 ②最大耐力力は 600kN で、フランジの塑性ヒンジの形成に支配されている。 ③降伏荷重後に斜張力場と後座屈荷重により桁の曲げ性能が発揮されている。</p>	<p>①降伏荷重は 510kN で、腹板の斜め引張力による降伏に支配されている。 ②最大耐力力は 587kN で、フランジの塑性ヒンジの形成に支配されている。 ③降伏荷重後に斜張力場と後座屈荷重により桁の曲げ性能が発揮されている。 ④実験と降伏荷重はほぼ同じである。 ⑤解析では最も厳しい要素で評価しているため、各イベントの発生荷重が実験に比べて小さい。</p>

表 2.8 Case ごとの比較 (Case1: 補剛材基準不足(剛度不足))


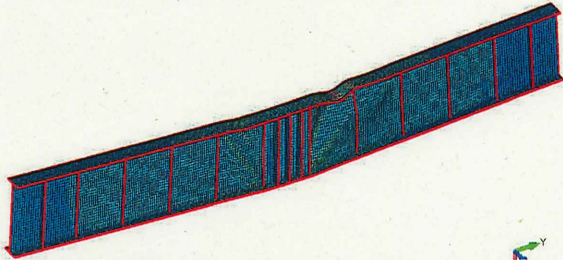
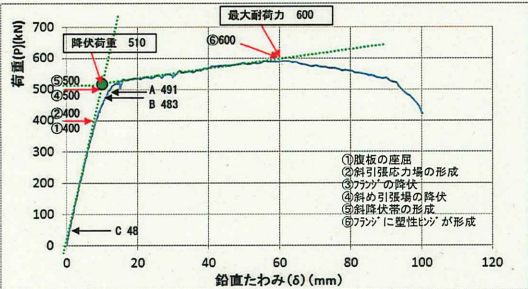
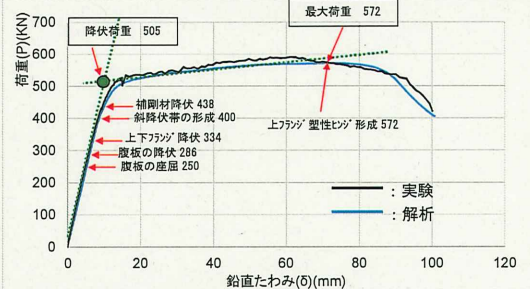
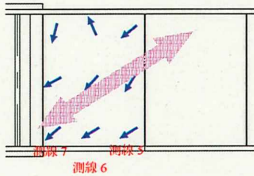
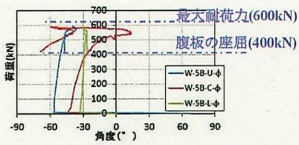
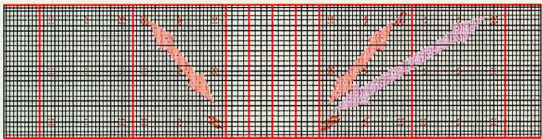
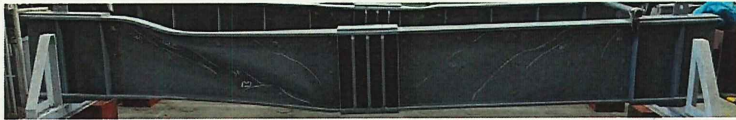
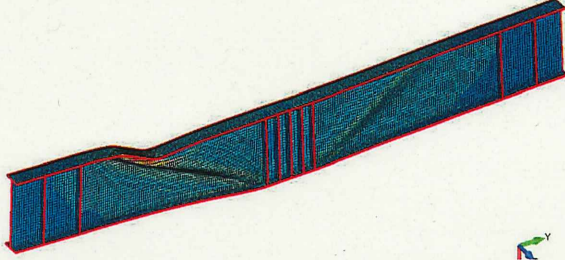
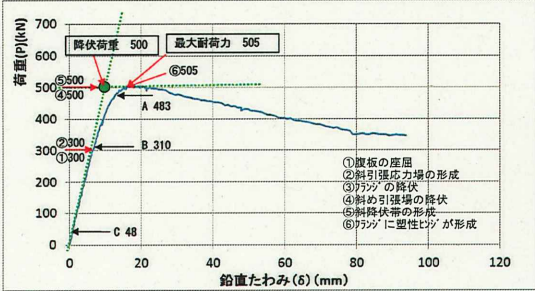
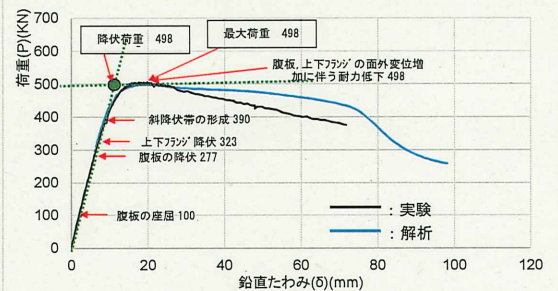
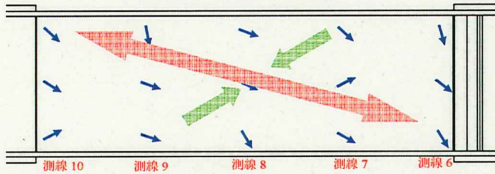
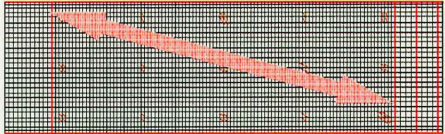
	実験結果	解析結果
<p>供試体 (載荷重実験後)</p>		
<p>P-δ 曲線</p>		
<p>腹板内の 最大主ひずみの 方向</p>	<p>1 パネルと 2 パネル間でせん断座屈が発生</p>   <p>図 2.11 最大耐力時の方向 図 2.12 最大主ひずみの方向 (測線 5)</p>	<p>1 パネルと 2 パネル間でせん断座屈が発生</p>  <p>図 2.13 最大耐力時の最大主ひずみの方向</p>
<p>最大耐力</p>	<p>600kN (上フランジが 1 パネル内で塑性ヒンジを形成)</p>	<p>572kN (上フランジが 1 パネル内で塑性ヒンジを形成)</p>
<p>まとめ</p>	<p>①降伏荷重、最大耐力、曲げ性能は Case3 と同じ挙動である。 ②補剛材が降伏し、最初に 1 パネルの斜降伏帯が発生し、最後に 2 パネルを跨ぐ斜降伏帯が発生したが、最大耐力および曲げ性能には影響しなかった。</p>	<p>①降伏荷重、最大耐力、曲げ性能は Case3 と同じ挙動である。 ②補剛材が降伏し、最初に 1 パネルの斜降伏帯が発生し、最後に 2 パネルを跨ぐ斜降伏帯が発生したが、最大耐力および曲げ性能には影響しなかった。 ③降伏荷重は実験に比べやや低い。 ④解析では、最も厳しい要素で評価しているため、各イベントの発生荷重が実験に比べて小さい。 ⑤ 2 パネル間に腹板の座屈が生じている。</p>

表 2.9 Case ごとの比較 (Case2: 補剛材無し (間隔が過大))

	実験結果	解析結果
<p>供試体 (载荷重実験後)</p>		
<p>P-δ 曲線</p>	 <p>①腹板の座屈 ②斜引張応力場の形成 ③フランジの降伏 ④斜め引張場の降伏 ⑤斜降伏帯の形成 ⑥「アング」に塑性ヒンジが形成</p>	 <p>— : 実験 — : 解析</p>
<p>腹板内の 最大主ひずみの 方向</p>	<p>腹板全体でせん断座屈が発生</p>  <p>図 2.14 最大耐力力時の方向</p>	<p>腹板全体でせん断座屈が発生</p>  <p>図 2.15 最大耐力力時の最大主ひずみの方向</p>
<p>最大耐力力</p>	<p>505kN (上フランジが全体パネルで塑性ヒンジを形成)</p>	<p>498kN (上フランジが全体パネルで塑性ヒンジを形成)</p>
<p>まとめ</p>	<p>①降伏荷重は 500kN であるが、最大耐力力は 505kN と低く、曲げ性能も耐力力低下の傾向を示した。 ②補剛材が無いために腹板は 300kN で座屈したが、桁が崩壊する連成破壊は生じなかった。</p>	<p>①降伏荷重は 498kN であるが、最大耐力力も 498kN と低く、曲げ性能も耐力力低下の傾向を示した。 ②補剛材が無いために腹板は 100kN で座屈したが、桁が崩壊する連成破壊は生じなかった。 ③降伏荷重や最大荷重はほぼ実験と同等である。変形も実験と同様に左右非対称になっている。 ④解析では、最も厳しい要素で評価しているため、各イベントの発生荷重が実験に比べて小さい。</p>

2.2 ダムゲートの耐荷力解析

2.2.1 目的

現行基準に満たない補剛材を有するダムゲート部材（プレートガーダ構造）に対して、三次元シェルモデルを用いた非弾性有限変位解析により耐震性能照査に用いる限界状態特性を評価したものである。

2.2.2 ダムゲート諸元

以下に解析の対象とするダムゲート（以下、「モデルダムゲート」という）の諸元を示す。

表 2.10 モデルダムゲート諸元

項目	内容	摘要
ゲート形式	高圧ローラーゲート (キャタピラゲート)	
規模(寸法)	純径間 3.620m×有効高 3.780m×2 門	
ゲート敷高	EL.238.737m	
常時満水位	EL.277.000m	
設計水深	H=41.373m (ゲート中心)	常時満水位(EL.282.000m)-ゲート中心 (EL.240.627m)
基礎標高	EL.202.000m	
ゲート総重量	25.0tf	扉体 24.0 tf ローラー部 1.0 tf

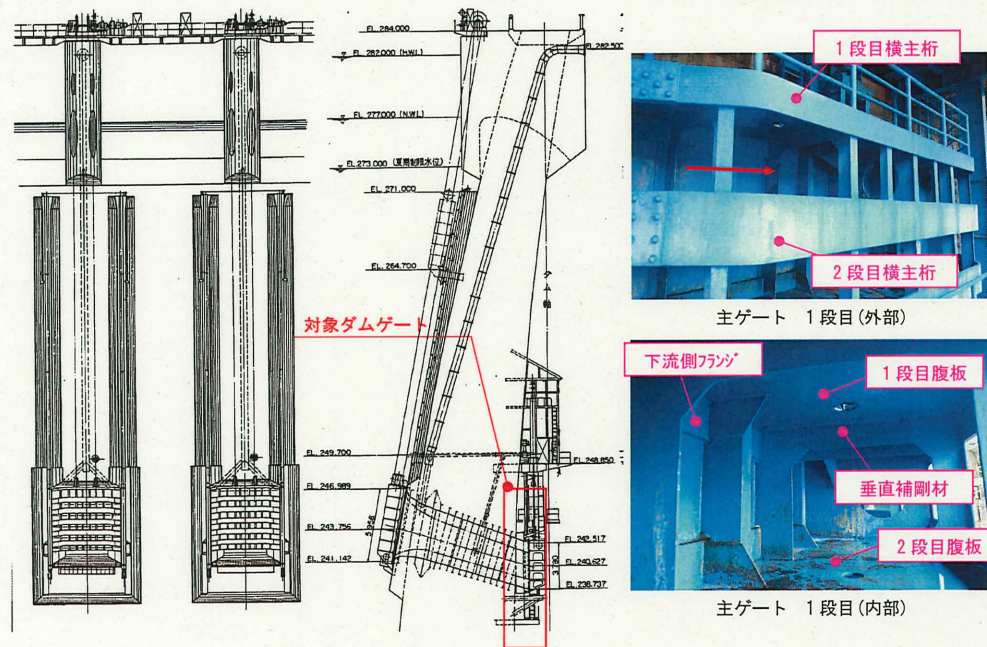


図 2.16 モデルダムゲートの構造

2.2.3 対象構造物の条件整理

(1) 構造寸法

横主桁の構造、構成部材の板厚を示す。

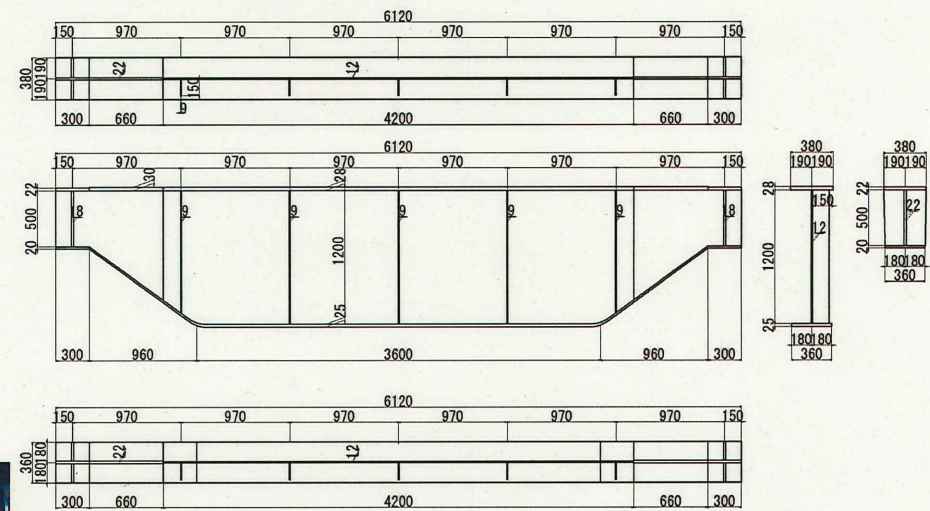


図 2.17 横主桁の寸法

表 2.11 構成部材の板厚

部材	部材	板厚
上流側フランジ	中央	28mm
	腹板高変更部	30mm
	端部	22mm
腹板	中央	12mm
	端部	22mm
下流側フランジ	中央	25mm
	端部	20mm
垂直補剛材	中央	9mm
	端部	18mm
スキンプレート		15mm

(2) 材質

ダムゲートの横主桁の鋼材の材質を示す。

表 2.12 鋼材の材質

部材	材質	降伏応力度 [N/mm ²]	
ゲート横主桁構成部材	腹板	SS400	235
	上下フランジ	SS400	235
	垂直補剛材	SS400	235
	スキンプレート	SS400	235

2.2.4 既往ダムゲート横主桁の耐震性能照査

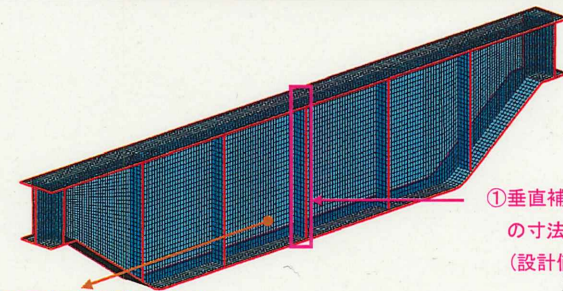
既往ダムゲート横主桁の耐震性能照査結果を示す。

表 2.13 高圧ローラーゲート耐震性能照査結果①

青連寺ダム 対象地震		名張断層帯の地震 (ハイブリッド法)			
入力地震動	最大加速度 最大動水圧	トレンチ ゲート敷	cm/s ² kN/m ²	1279 432	
ローラーゲート					
塑性化照査					
		合成応力	降伏応力度	塑性率	許容値
		MN/m ²	MN/m ²		判定
横主桁	横主桁	158.2	235.0		OK
	横主桁(上端)	129.2	235.0		OK
	横主桁(下端)	147.8	235.0		OK
縦桁	中間縦桁	206.4	235.0		OK
	端部縦桁	67.1	235.0		OK
	垂直補助板	380.9	235.0	1.81	2.0 OK
	スキッププレート	263.8	235.0	1.13	2.0 OK
全体座屈					
限界座屈照査					
		部材応答値	強軸 (Y)	判定	弱軸 (Z)
		MN/m ²	MN/m ²		MN/m ²
縦桁	垂直補助板1_下流側	59.4	235.0	OK	201.5 OK
	垂直補助板2_下流側	52.3	235.0	OK	201.5 OK
	垂直補助板3_下流側	36.5	235.0	OK	201.5 OK
	垂直補助板4_下流側	52.3	235.0	OK	201.5 OK
	垂直補助板5_下流側	59.4	235.0	OK	201.5 OK
	中間縦桁(下流)1	15.8	226.5	OK	226.5 OK
	中間縦桁(下流)2	15.8	226.5	OK	226.5 OK
横倒れ座屈照査					
		部材応答値	横倒れ座屈 応力度	判定	
		MN/m ²	MN/m ²		
縦桁	垂直補助板1_下流側	59.4	222.6	OK	
	垂直補助板2_下流側	52.3	222.6	OK	
	垂直補助板3_下流側	36.5	222.6	OK	
	垂直補助板4_下流側	52.3	222.6	OK	
	垂直補助板5_下流側	59.4	222.6	OK	
	中間縦桁(下流)1	15.8	220.5	OK	
	中間縦桁(下流)2	15.8	220.5	OK	
安定性照査					
		座屈安定性	局部座屈		
縦桁	垂直補助板1_下流側	0.3208	0.3074	<1 OK	
	垂直補助板2_下流側	0.2506	0.2501	<1 OK	
	垂直補助板3_下流側	0.1447	0.1533	<1 OK	
	垂直補助板4_下流側	0.2506	0.2501	<1 OK	
	垂直補助板5_下流側	0.3208	0.3074	<1 OK	
	中間縦桁(下流)1	0.0877	0.0830	<1 OK	
	中間縦桁(下流)2	0.0877	0.0830	<1 OK	

表 2.14 高圧ローラーゲート耐震性能照査結果②

局部座屈照査		設計板厚	必要板厚	判定	対象	条件	
寸法照査結果		mm	mm				
横桁	横主桁 最上段	9.0	17.1	NG	ウェブ	補剛材見込まず	
	横主桁	12.0	17.1	NG	ウェブ	補剛材見込まず	
	横主桁 最下端	12.0	17.1	NG	ウェブ	補剛材見込まず	
垂直補助板	上流側	9.0	19.4	NG	フランジ2		
	下流側	9.0	11.6	NG	フランジ2		
補剛材照査		設計値	必要値				
横桁	間隔	970.0	1176.8以下	OK		単位:mm	
	板厚	9.0	11.5以上	NG		単位:mm	
	幅	150.0	90.0以上	OK		単位:mm	
	断面二次モーメント	2531250	973700以上	OK		単位:mm ⁴	
応力照査結果		応答値	許容値	判定	対象	摘要	
		N/mm ²	N/mm ²				
横桁	横主桁 最上段	100.4	20.8	NG	ウェブ	補剛材見込まず	
	横主桁	83.4	37.1	NG	ウェブ	補剛材見込まず	
	横主桁 最下端	89.3	37.1	NG	ウェブ	補剛材見込まず	
垂直補助板	上流側	162.3	51.6	NG	フランジ2		
	下流側	59.4	143.4	OK	フランジ2		
固定部照査		応力度	降伏応力度	判定	応力	材質	
		N/mm ²	N/mm ²				
キャピラロー	ローラ	10.0	17.8	OK	支圧応力	SNC2	
	フレーム	A,B断面	137.5	235.0	OK	曲げ応力	SS400
		C断面	95.6	235.0	OK	合成応力	SS400
アンカー部	PC鋼棒	79.4	135.0	OK	せん断応力	SS400	
		461.6	1078.0	OK	引張応力	30φ3種	
		7.1	28.1	OK	支圧応力	コンクリート	
緊張端支圧	コンクリート引抜	5.0	18.0	OK	支圧応力	コンクリート	
		0.2	2.1	OK	せん断応力	コンクリート	
耐震性能の判定		塑性化の照査において、垂直補助板及びスキッププレートで発生応力が降伏応力度を超えるが、塑性率は2以下となった。局部座屈照査において、横主桁で補剛材が基準を満たさず、横主桁と垂直補助板で必要部材寸法に不足しており、応力照査においても許容値を超える結果となった。全体座屈照査、固定部照査においては発生応力は許容値以下となった。					



- ①垂直補剛材の板厚が局部座屈の寸法照査を満足しない (設計値 9mm < 必要値 11.5mm)
- ②垂直補剛材が必要値を満足しないため、垂直補剛材を見込まず、腹板の板厚が局部座屈の寸法照査を満足しない (設計値 12mm < 必要値 17.1mm)
- ③腹板が局部座屈の寸法照査を満足しないため、局部座屈応力照査を行ったが、満足しない。ここで、許容値には、両縁支持板としての局部座屈応力度を使用。 (設計値 83.4N/mm² > 許容値 37.1N/mm²)

図 2.18 モデルダムゲート部材の構造

2.2.5 解析条件

(1) 解析条件一覧

解析条件の一覧表を以下に示す。

表 2.15 解析条件一覧

項目	内容	備考
解析ソフト	ABAQUS	
解析方法	非弾性有限変位解析	
使用要素	非線形シェル要素	
応力ひずみ関係	バイリニア型 (第2勾配 E0/100, E0:初期弾性係数)	
硬化則	移動硬化則	
降伏条件	フォンミーゼスの条件	
制御方法	分布荷重	弧長増分制御
初期不整		座屈固有値解析により算定
材質	SS400-3.2mm	降伏応力度 (試験値): 235N/mm ²
	初期弾性係数	E0=2.0×10 ⁸ kN/m ²
境界条件	支点部	可動、固定
	上フランジ端部	鉛直ローラーを基本とする
メッシュ分割		腹板: 30分割以上
		フランジ、補剛材: 腹板と同程度のメッシュサイズ

(2) モデル図

モデル図を以下に示す。

初期不整には、初期たわみを考慮させた。実際の構造を対象とした場合、初期たわみは不明なものがほとんどである。初期たわみが未知の場合の設定方法には、線形座屈解析により得られた1次の座屈モードを用いる手法とした。なお、たわみ量は最大値を H/250 (H: ウェブ高, mm) として設定した。

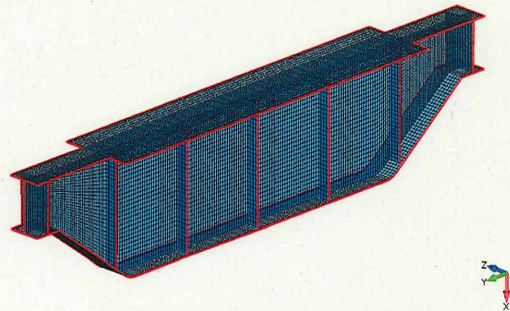


図 2.19 ダムゲート横主桁のモデル図

2.2.6 解析ケース

解析ケースは、ケース1 (基準適合)、ケース2 (板厚不足)、ケース3 (剛度不足 0.7) とした。ここで板厚と剛度の不足割合は水資源機構が管理するゲートの最大値相当である。

載荷荷重は水圧と動水圧と同じ分布荷重として、変位制御で段階載荷した。

表 2.16 解析条件一覧

解析ケース	解析モデル	解析方法	載荷方法	垂直補剛材		
				基準適合	基準不適合	
				板厚不足	剛度不足	
ケース1	横主桁+スキムプレート+垂直補剛材	非弾性有限変位解析	分布荷重	○		
ケース2	横主桁+スキムプレート+垂直補剛材	非弾性有限変位解析	分布荷重		○	
ケース3	横主桁+スキムプレート+垂直補剛材	非弾性有限変位解析	分布荷重			○

表 2.17 垂直補剛材の寸法

	基準適合	基準不適合	
		板厚不足	剛度不足
板厚 (mm)	12	9	8
幅 (mm)	150	150	85
備考	基準を満足する	厚さが満足しない	剛度が満足しない (剛度比: 0.7)

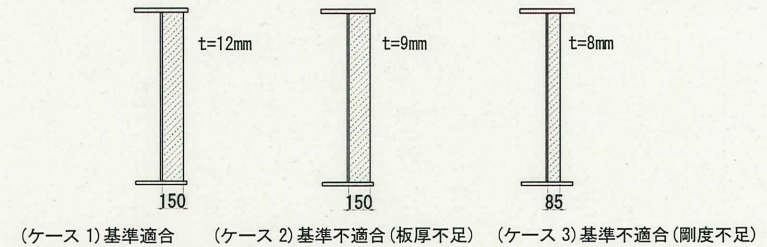


図 2.20 各ケースの垂直補剛材の寸法

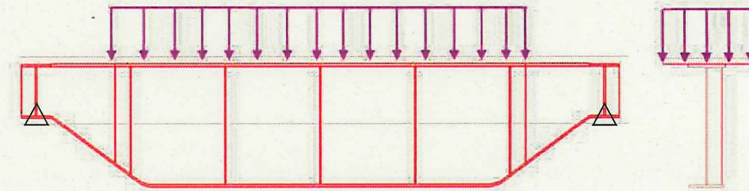
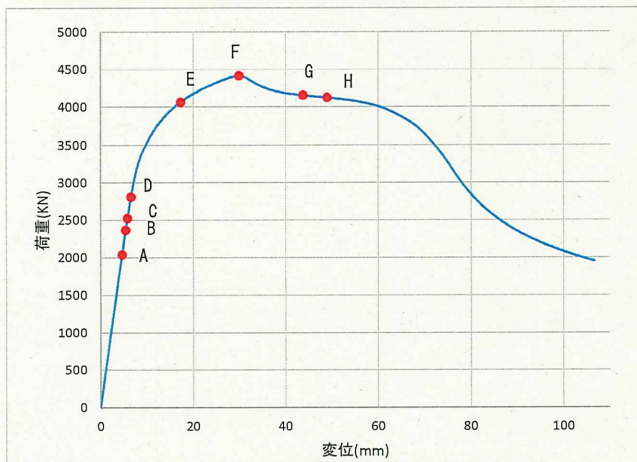


図 2.21 荷重の載荷方法 (分布荷重)

2.2.7 破壊メカニズムのまとめ

(1) ケース1：基準適合一分布荷重-スキムプレート有り



【破壊のメカニズム】

- A：垂直補剛材上端部が降伏。
- B：腹板が降伏。
- C：下フランジが降伏。
- D：腹板が座屈し始める。
- E：斜張力場の降伏、斜降伏帯の形成。
- F：フランジに塑性ヒンジが形成(最大耐力)。
- G：腹板の面外変形が増加。
- H：垂直補剛材中央部が座屈し、2パネル目の腹板が座屈し始める。

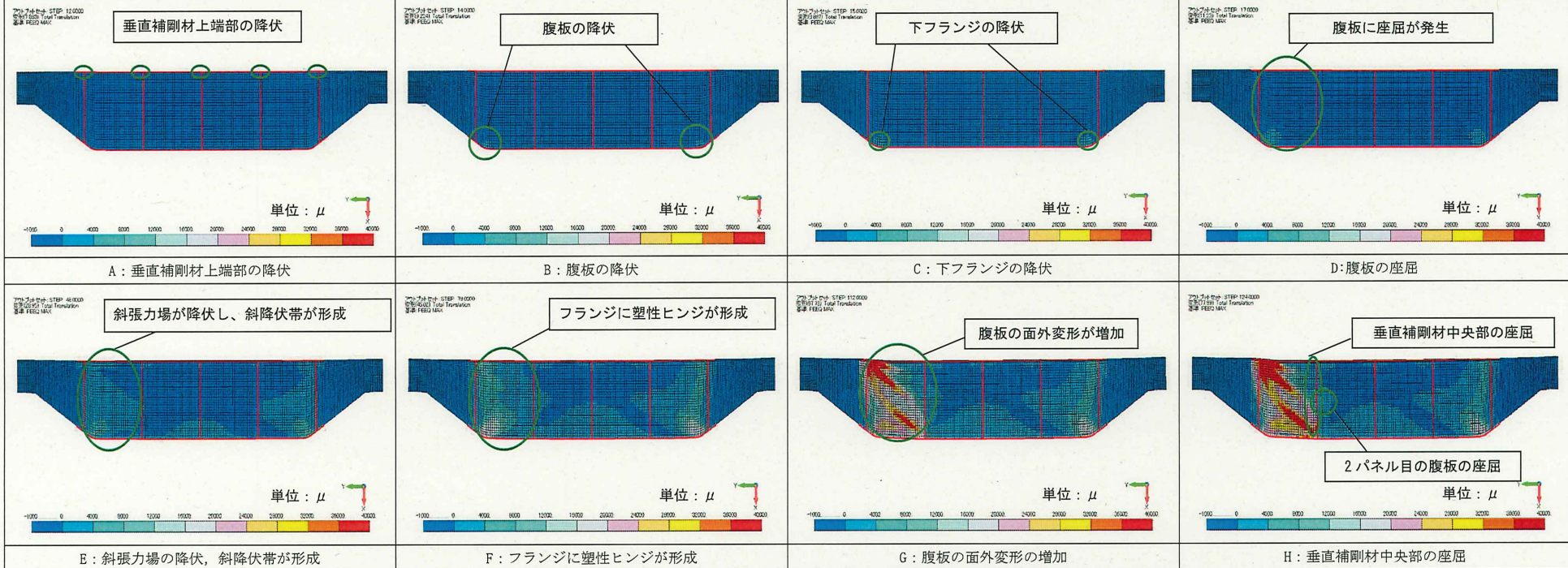
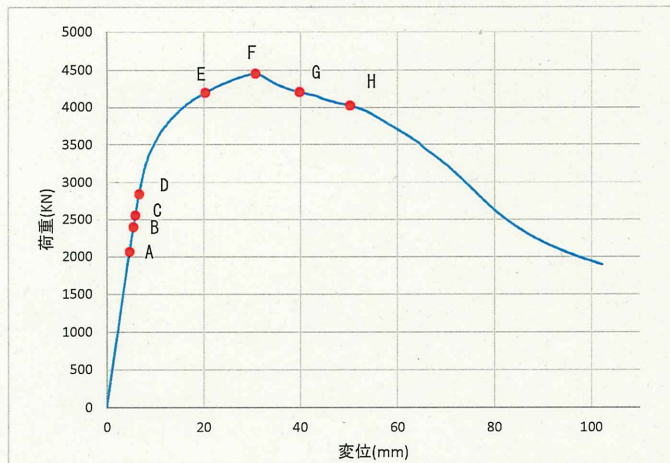


図 2.22 破壊メカニズム(ケース1：基準適合一分布荷重-スキムプレート有り)

(2) ケース 2 : 基準不適合 (板厚不足) - 分布載荷 - スキンプレート有り



【破壊のメカニズム】

- A : 垂直補剛材上端部が降伏。
- B : 腹板が降伏。
- C : 下フランジが降伏。
- D : 腹板が座屈しはじめる。
- E : 斜張力場の降伏、斜降伏帯の形成。
- F : フランジに塑性ヒンジが形成 (最大耐力)。
- G : 腹板の面外変形が増加、垂直補剛材中央部の座屈。
- H : 腹板と垂直補剛材中央部の座屈が進展。

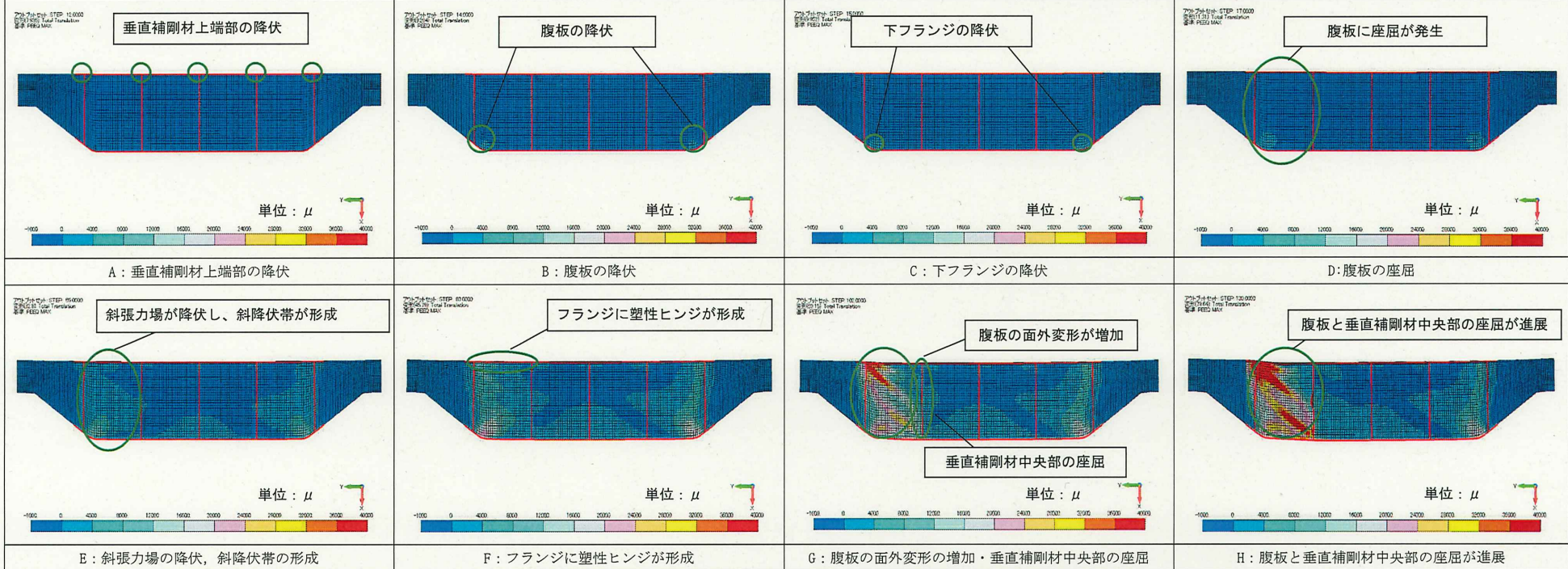
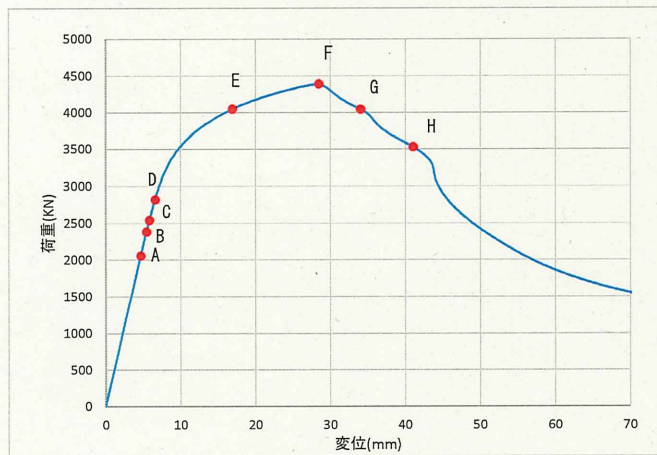


図 2.23 破壊メカニズム (ケース 2 : 基準不適合 (板厚不足) - 分布載荷 - スキンプレート有り)

(3) ケース 3 : 基準不適合(剛度不足) - 分布載荷 - スキンプレート有り



【破壊のメカニズム】

- A : 垂直補剛材上端部が降伏。
- B : 腹板が降伏。
- C : 下フランジが降伏。
- D : 腹板が座屈しはじめる。
- E : 斜張力場の降伏、斜降伏帯の形成。
- F : フランジに塑性ヒンジが形成(最大耐力)。
- G : 腹板の面外変形が増加・垂直補剛材中央部が座屈。
- H : 腹板と垂直補剛材中央部の座屈が進展。

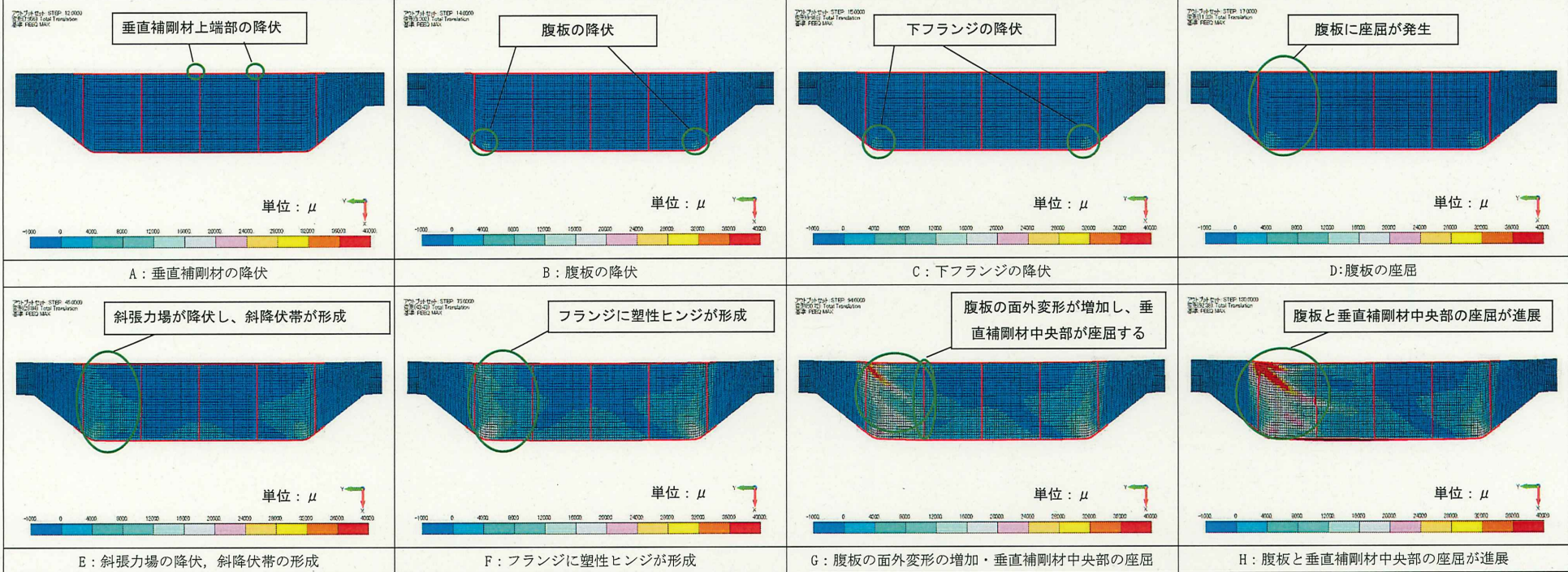
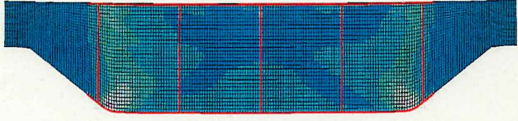
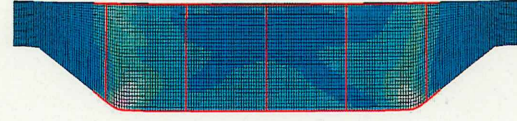
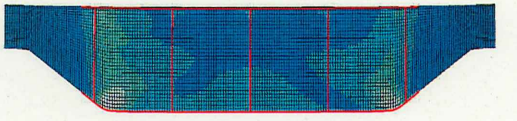
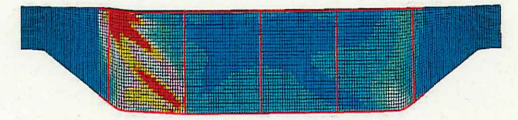
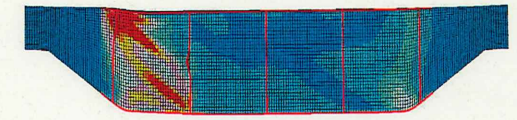
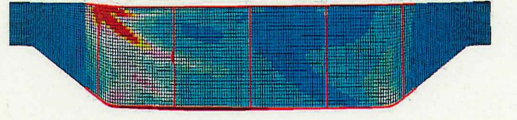
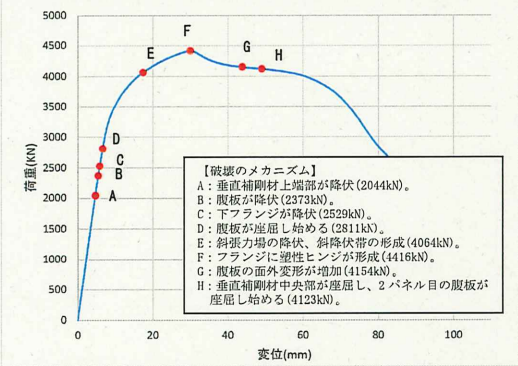
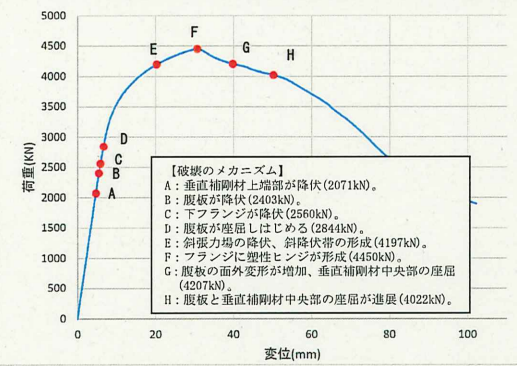
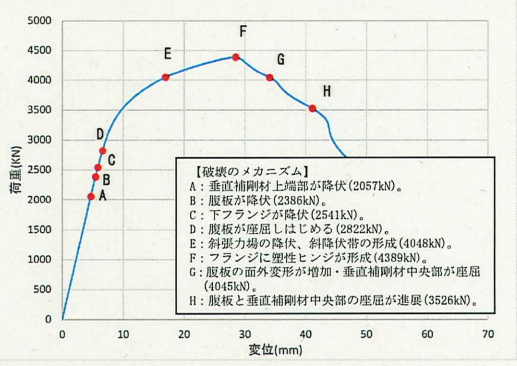


図 2.24 破壊メカニズム(ケース 3 : 基準不適合(剛度不足) - 分布載荷 - スキンプレート有り)

(4) 破壊メカニズムの整理

各ケースの解析結果を以下に整理した。

	ケース 1: 基準適合	ケース 2: 基準不適合(板厚不足)	ケース 3: 基準不適合(剛度不足)
最大荷重時			
最終破壊形状			
P-δ 関係	 <p>【破壊のメカニズム】 A: 垂直補剛材上端部が降伏(2044kN)。 B: 腹板が降伏(2373kN)。 C: 下フランジが降伏(2529kN)。 D: 腹板が座屈し始める(2811kN)。 E: 斜張力場の降伏、斜降伏帯の形成(4064kN)。 F: フランジに塑性ヒンジが形成(4416kN)。 G: 腹板の面外変形が増加(4154kN)。 H: 垂直補剛材中央部が座屈し、2パネル目の腹板が座屈し始める(4123kN)。</p>	 <p>【破壊のメカニズム】 A: 垂直補剛材上端部が降伏(2071kN)。 B: 腹板が降伏(2403kN)。 C: 下フランジが降伏(2560kN)。 D: 腹板が座屈しはじめる(2844kN)。 E: 斜張力場の降伏、斜降伏帯の形成(4197kN)。 F: フランジに塑性ヒンジが形成(4450kN)。 G: 腹板の面外変形が増加、垂直補剛材中央部の座屈(4207kN)。 H: 腹板と垂直補剛材中央部の座屈が進展(4022kN)。</p>	 <p>【破壊のメカニズム】 A: 垂直補剛材上端部が降伏(2057kN)。 B: 腹板が降伏(2386kN)。 C: 下フランジが降伏(2541kN)。 D: 腹板が座屈しはじめる(2822kN)。 E: 斜張力場の降伏、斜降伏帯の形成(4048kN)。 F: フランジに塑性ヒンジが形成(4389kN)。 G: 腹板の面外変形が増加、垂直補剛材中央部が座屈(4045kN)。 H: 腹板と垂直補剛材中央部の座屈が進展(3526kN)。</p>
最大耐荷力	4416kN (上フランジに塑性ヒンジが形成)	4450kN (上フランジに塑性ヒンジが形成)	4389kN (上フランジに塑性ヒンジが形成)
まとめ	<ul style="list-style-type: none"> 最大荷重は 4416kN で、フランジの塑性ヒンジの形成に支配される。 垂直補剛材中央部の座屈は、最大荷重以降に発生する。 最大荷重以降の荷重の低下は小さい。 	<ul style="list-style-type: none"> 最大荷重は 4450kN で、フランジの塑性ヒンジの形成に支配される。 垂直補剛材中央部の座屈は、最大荷重以降に発生する。 最大荷重以降の荷重の低下は小さい。 	<ul style="list-style-type: none"> 最大荷重は 4389kN で、フランジの塑性ヒンジの形成に支配される。 垂直補剛材中央部の座屈は、最大荷重以降に発生する。 最大荷重以降の荷重の低下は大きい。

※「ケース 1: 基準適合の最大耐荷力」が「ケース 2: 基準不適合(板厚不足)」よりも小さいのは、局部的に座屈が発生しているが最終的な破壊は座屈破壊でなく、フランジの塑性ヒンジ形成に伴うじん性破壊が発生したためと考えている。

図 2.25 破壊メカニズムの整理

3. 繰返し载荷による検討概要

3.1 概要

①目的

垂直補剛材が現行の補剛材規定を満足しないローラーゲートの横主桁に対して、载荷実験及び有限変位解析を踏まえて、腹板の局部座屈による耐力低下の影響に配慮した許容値の再設定を行う。

②これまでの経緯

単調载荷の場合は、フランジの降伏荷重より前に腹板の局部座屈が発生するものの、降伏後も腹板の引張場の形成により最大荷重（フランジの塑性ヒンジ形成）までは急激な耐力低下が発生せずに安定した性能を確保できていることを実験と解析の結果より確認している。

⇒腹板の局部座屈の影響に配慮した曲げ圧縮応力度の許容値を降伏応力度で再評価可能と考えられる。

③課題

しかし、上記は単調载荷での実験と解析の結果より確認できていることであり、地震時の繰返し荷重に対しても単調载荷と同様に、最大荷重までは急激な耐力低下が発生せずに安定した性能を確保できるかは定かではない。

④本検討の実施事項

③の課題に対し、本検討では既往の繰返し実験における繰返し载荷方法を参考に、解析的検討を行った。ここで、ローラーゲートの横主桁の腹板の曲げ圧縮応力度に対する許容値は降伏応力度を上限とすることを考えているため、繰返し荷重の影響は降伏応力度までに着目することとした。

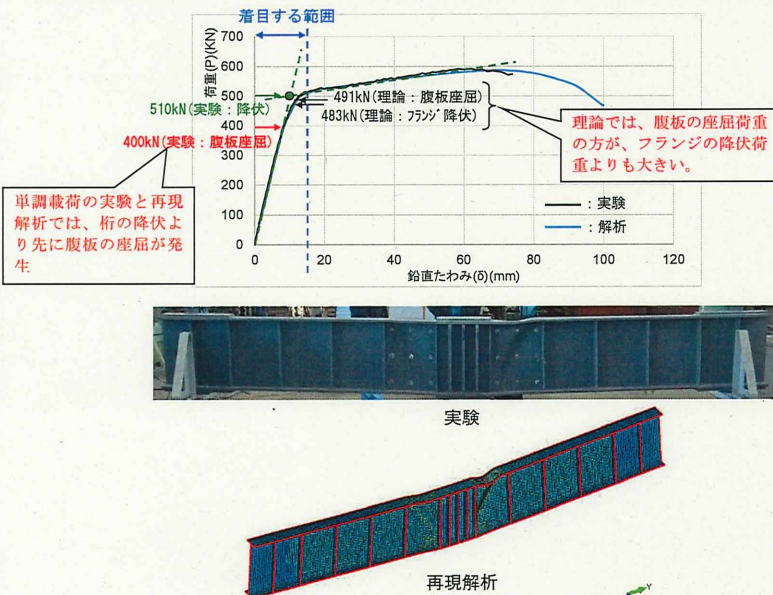


図 3.1 P-δ 関係と最終変形図(鋼 I 桁-基準適合ケース-単調载荷)

3.2 繰返し载荷方法の設定

既往文献¹では、ラジアルゲートの脚柱を対象とした载荷実験を行っている。ラジアルゲートは常時に水圧が作用しており、地震時には片振幅となることが多い。このため、同実験においては、载荷⇒除荷⇒载荷を行っており、片振幅の 1 方向载荷を実施している。载荷⇒除荷⇒载荷のサイクルや振幅の大きさの詳細な記載はないが、実験結果の荷重-変位関係から、1 サイクルで降伏時、最大荷重時及び最大耐力以降で数回実施されているものと考えられる。また、除荷後の载荷により、除荷直前の値まで荷重-変位 (P-δ) の関係が戻ることが確認されている。このため、片振幅の場合は両振幅と異なり、最大耐力以降も単調载荷と繰返し载荷で耐力の低下勾配は変わらないものと推測される。

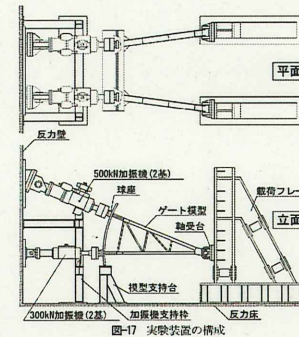


図-17 実験装置の構成

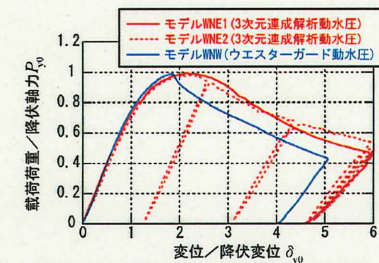


図-23 上段脚柱の荷重-変位関係 (右岸側)

本検討において、対象とするローラーゲートの横主桁においても、常時水圧を受けている状態から地震時の繰返し荷重を受けるため、地震時の载荷状況は片振幅载荷に近い状況となるものと考えられる。

なお、前述で紹介した鋼 I 桁の耐力実験でも、最大荷重時に変位計を盛り替えるために一度除荷し、その後再载荷を行っている。除荷時の荷重と変位については計測結果が残っていないが、再载荷後は除荷前の最大荷重と同じ荷重値まで達している。すなわち、片振幅で繰返しても、単調载荷と同じ結果となることを確認している。

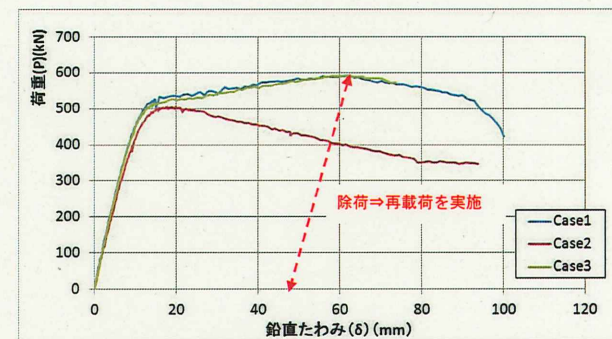


図 3.2 P-δ 関係

¹ 斎藤潔、山本広祐：ラジアルゲートの損傷過程と耐力力特性に関する実験的検討、土木学会第 64 回年次学術講演集、I-275、pp.549-550.2009.9.

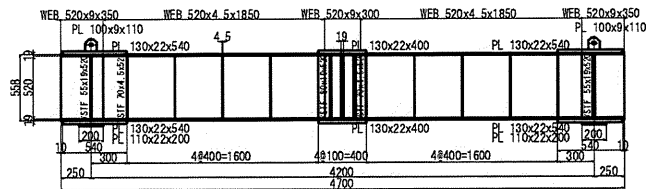
3.3 鋼 I 桁の耐力評価

3.3.1 概要

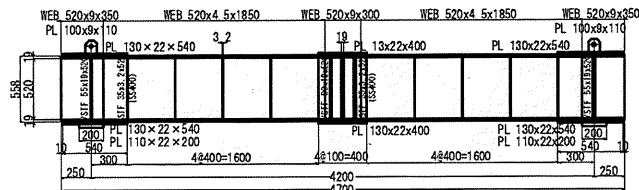
載荷実験で供試体として用いた鋼 I 桁の解析モデル（3次元シェルモデル）について、3次元非弾性有限変位解析により、載荷・除荷・再載荷を考慮した片振幅の繰返し載荷による耐力解析を行った。片振幅としたのは、常時の水圧の作用により、荷重が反転しないためである。解析対象は表 3.1 に示す 2 モデルとした。なお、繰返し載荷 1 ケースあたり、4 段階程度以上の鉛直変位に対して実施するものとした。

表 3.1 鋼 I 桁の解析ケース

解析モデル	載荷方法	載荷荷重
垂直補剛材の規定を満足する鋼 I 桁	集中荷重	繰返し載荷 1 ケース
垂直補剛材の剛度が規定を満足しない鋼 I 桁	集中荷重	繰返し載荷 1 ケース



(1) 垂直補剛材の規定を満足する鋼 I 桁



(2) 垂直補剛材の剛度が規定を満足しない鋼 I 桁

図 3.3 解析対象

表 3.2 再現解析条件

項目	内容	
解析ソフト	ABAQUS	
解析方法	非弾性有限変位解析	
使用要素	非線形シェル要素	
応力ひずみ関係	フィッティング後の特性	
硬化則	等方硬化則	
降伏条件	フォンミーゼスの条件	
制御方法	変位制御	
初期不整	計測で得られた腹板の初期たわみのみを考慮	
材質	SS400-3.2mm	降伏応力度 (計測値) : 329N/mm ²
	SM400A-4.5mm	降伏応力度 (計測値) : 314N/mm ²
	SM400A-19mm	降伏応力度 (計測値) : 274N/mm ²
	初期弾性係数	E0=2.0×10 ⁸ kN/m ²
板厚	SS400-3.2mm	実際の板厚 3.1mm を適用
	SM400A-4.5mm	実際の板厚 4.4mm を適用
	SM400A-19mm	実際の板厚 19.2mm を適用
境界条件	支点部	可動、固定
	横倒れ防止装置	鉛直ローラー (上下フランジに設定)
メッシュ分割	腹板 : 30 分割程度、フランジ、補剛材 : 腹板と同程度の分割	

制御方法は、本検討では、単調 1 点載荷であること及び、荷重の低下を確認するため、変位制御を適用することとした。載荷試験と同様、支間中央位置に強制変位を作用させた。

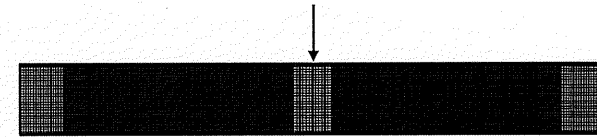


図 3.4 載荷方法

解析モデルを以下に示す。

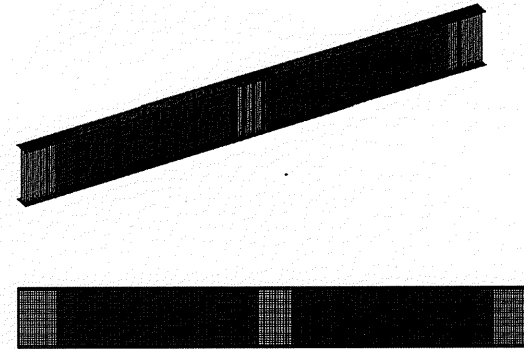


図 3.5 垂直補剛材の規定を満足する鋼 I 桁の解析モデル

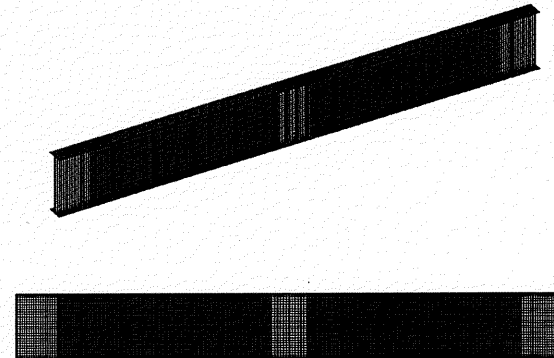


図 3.6 垂直補剛材の剛度の規定を満足しない鋼 I 桁の解析モデル

3.3.2 垂直補剛材の規定を満足する鋼 I 桁

(1) 荷重方法

繰返し荷重は下記の 8 点の変位において荷重⇒除荷⇒荷重を行った。

ここで、変位 18mm、70mm、90mm においては、3 回繰返し荷重を行い、その他の変位については、1 回繰返し荷重を行った。

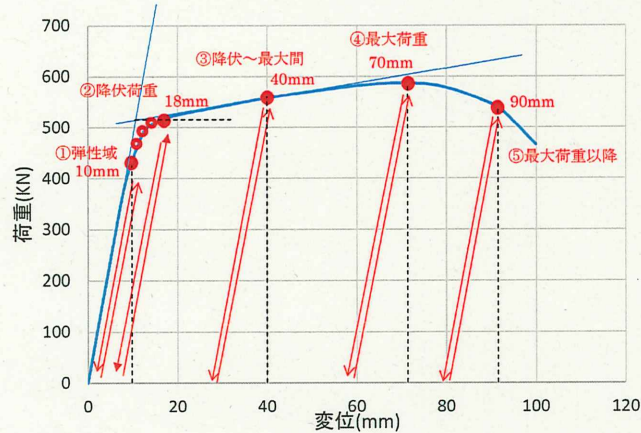


図 3.7 繰返し荷重方法

(2) P- δ 関係

P- δ 関係を以下に示す。また鉛直変位が 10mm の時と最大荷重時の相当塑性ひずみコンター図を示す。単調荷重も繰返し荷重も P- δ 関係はほとんど同じであることが確認された。

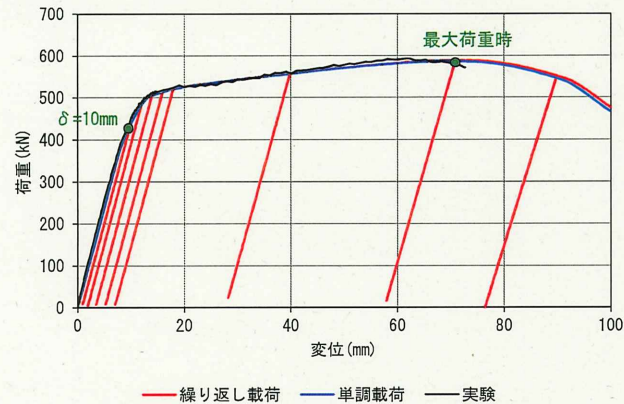


図 3.8 P- δ 関係(比較)

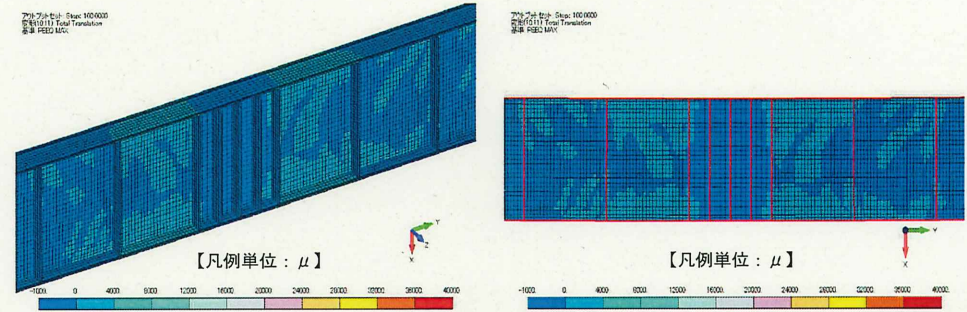


図 3.9 変位 10mm

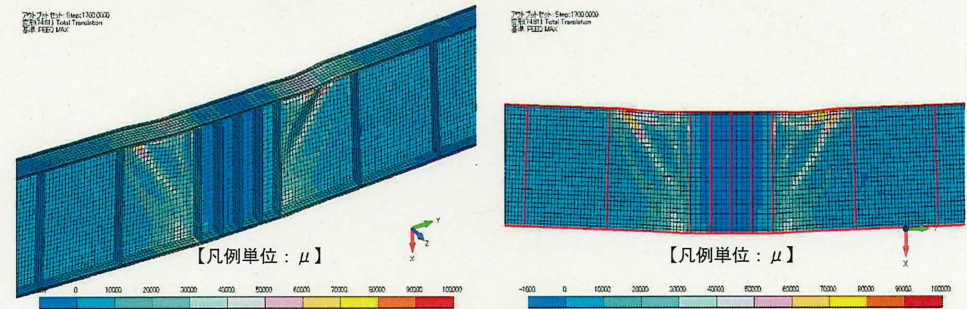


図 3.10 最大荷重時

(3) 腹板の座屈

以下に荷重荷重と腹板の面外変形の関係を示す。単調荷重における腹板の座屈は図 3.11 における腹板の面外変形が線形ではなくなる点(250kN)であった。腹板の最終ステップの面外変位コンター図より、面外変形が紙面の前後に大きい A 点と B 点の 2 点を示している。また、最初の繰返し変位時における単調荷重と繰返し荷重(3 回繰返し後)の腹板の面外変位コンター図を示す。図 3.12 より、単調荷重と繰返し荷重で曲線が変わらないこと、図 3.13 より同じ変位分布であることが確認できる。このため、腹板の面外方向の座屈についても単調荷重と繰返し荷重で変わらないことが確認された。

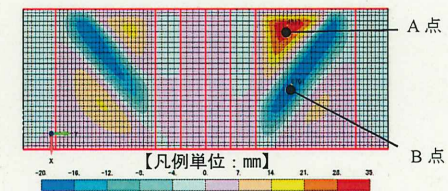


図 3.11 抽出位置(腹板の最終面外変位コンター図)

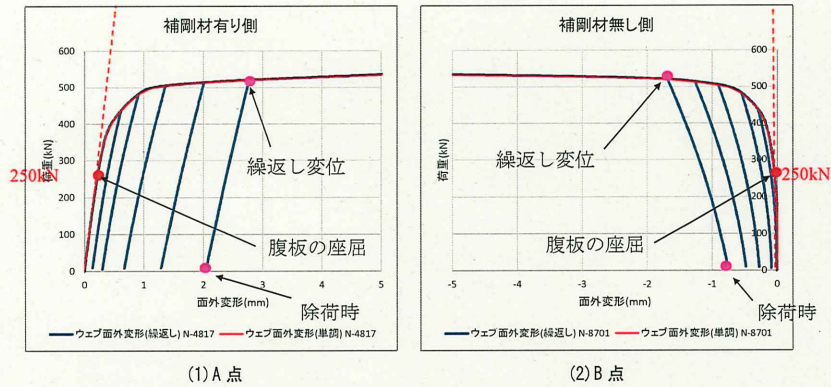


図 3.12 載荷荷重と腹板の面外変形の関係

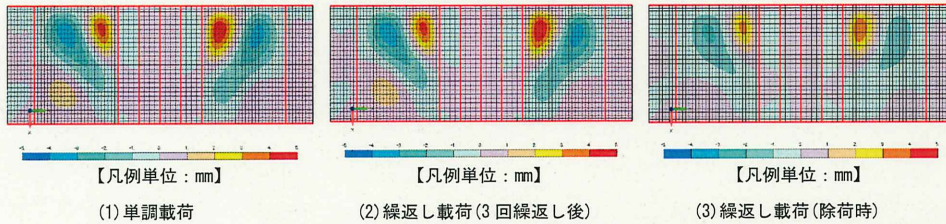


図 3.13 面外変形コンター図

(4) 降伏点

繰返し載荷を行うことで、特に降伏付近において、荷重が低下しないことを確認しておく必要があった。このため、P- δ 関係における変位の急増点付近（荷重 300~600 kN、変位 5~21mm）において、数点で繰返し載荷を実施した。以下に P- δ 関係における変位の急増点付近の拡大図を示す。下図に示すように、単調載荷と繰返し載荷はほぼ重なっており、繰返しの影響を受けないことが確認できた。

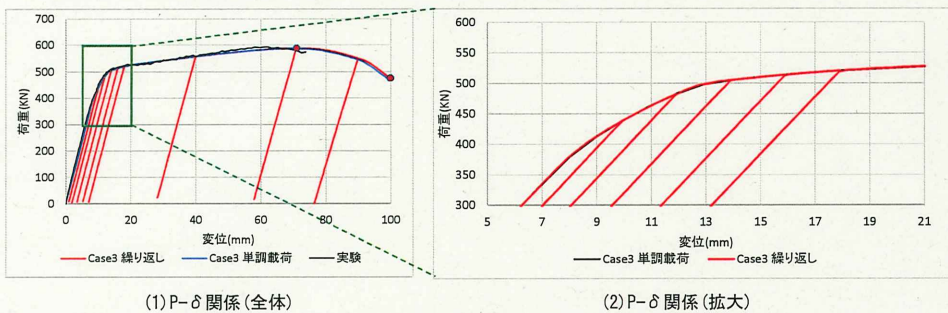


図 3.14 降伏点付近の P- δ 関係

(5) 腹板の面外変形の増加

以下に荷重 505~557kN の腹板の面外方向の変形図を示す。図 3.16 より、荷重が大きくなるに従い、腹板の面外変形が大きくなっており、単調載荷及び繰返し載荷でほぼ同様であることが確認できる。また、面外変形が前後（A 点、B 点）に卓越した 2 点における荷重と面外方向の関係を図 3.17 に示す。同図より、単調載荷も繰返し載荷も、510kN で腹板の面外方向の変形が急増していることが分かる。

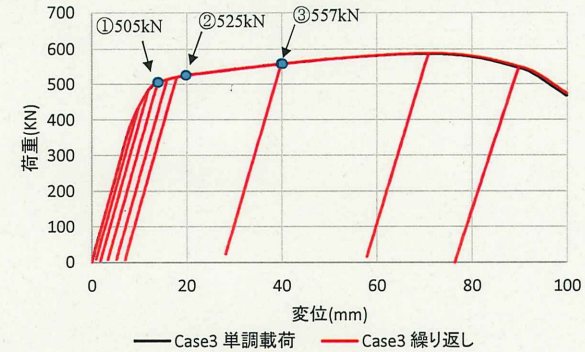


図 3.15 P- δ 関係 (着目点)

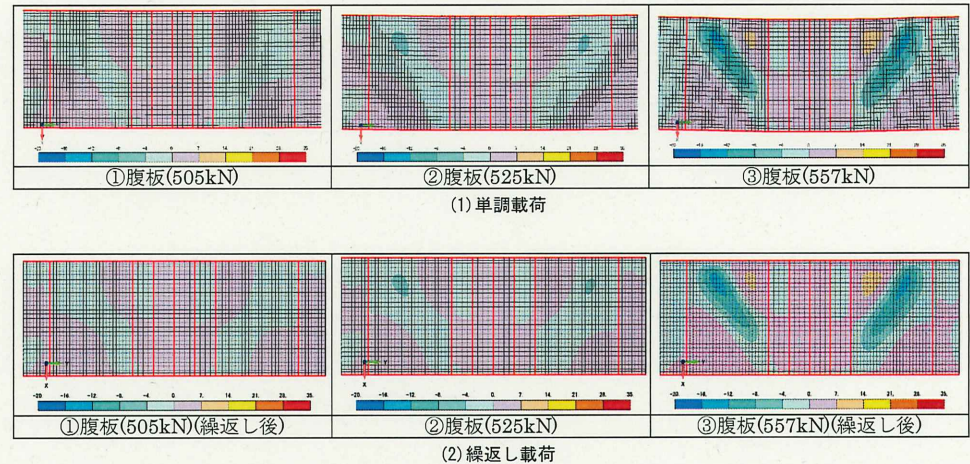


図 3.16 腹板の面外変形コンター図 (荷重 505~557kN)

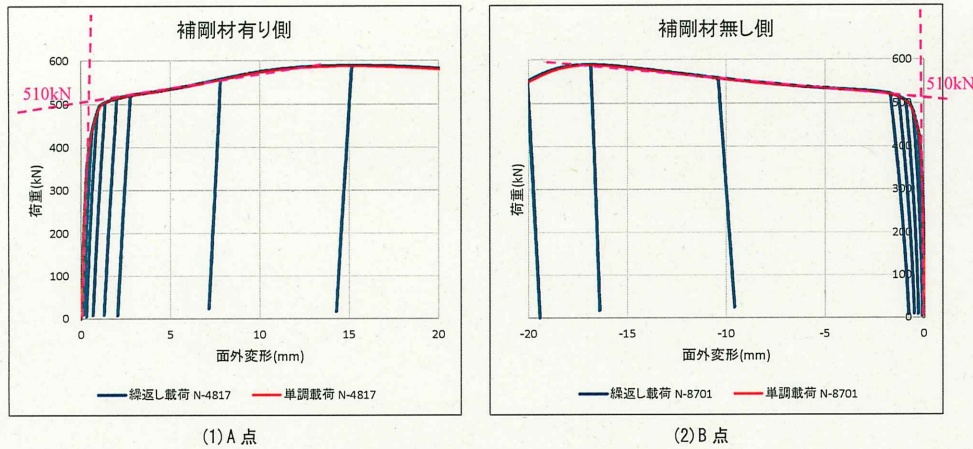


図 3.17 載荷荷重と腹板の面外変形の関係

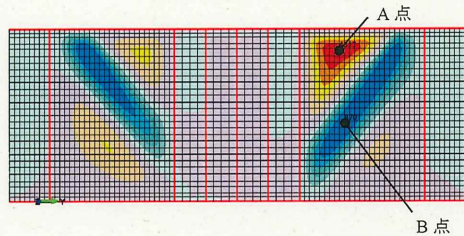


図 3.18 抽出位置(腹板の面外変形コンター図)

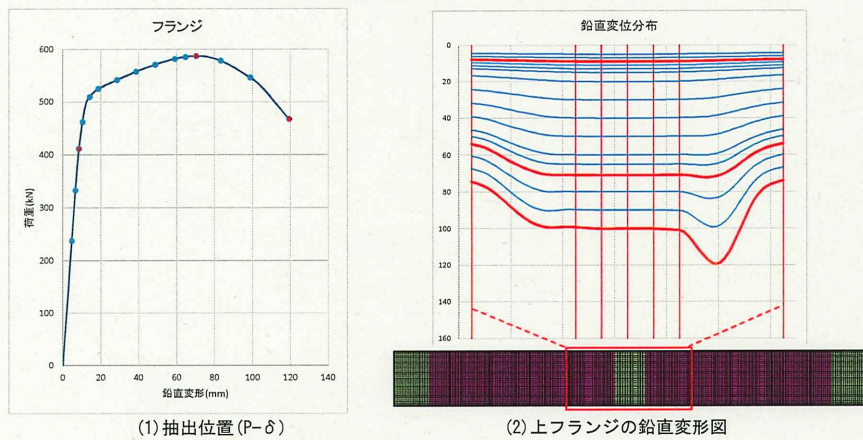


図 3.19 単調載荷

(6) 上フランジの鉛直変位の増加

図 3.19 にステップ毎の鉛直変位分布図を示す。ここで、抽出位置における赤点は、それぞれ弾性点、最大荷重点、最終点を示しており、上フランジの鉛直変形図の赤太線と同じステップを示している。

同図より、最大荷重後において、鉛直変位が増大しており、フランジの塑性ヒンジ形成が最大荷重の決定要因となっていることが分かる。また、単調載荷と繰返し載荷で変位分布が同じであることを確認した。

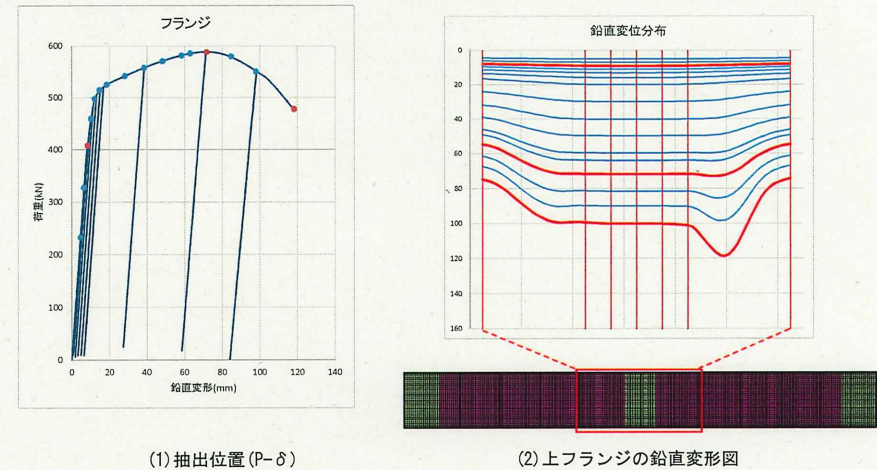


図 3.20 繰返し載荷

(7) まとめ

この検討により、以下の事項が確認できた。

- ①【鋼 I 桁の曲げ性能】鋼 I 桁の曲げ性能について、繰返し載荷荷重時においても、急激な荷重低下を起こさない。
 - ⇒ (2) P- δ 関係
 - ⇒ (3) 腹板の座屈
 - ⇒ (5) 腹板の面外変形の増加
- ②【鋼 I 桁の曲げ降伏荷重】繰返し載荷時の鋼 I 桁の曲げ降伏荷重が、単調載荷実験や単調載荷解析と大きく変わらない。
 - ⇒ (4) 降伏点
- ③【鋼 I 桁の最大耐力】鋼 I 桁の最大耐力が、単調載荷実験や単調載荷解析と大きく変わらない。
 - ⇒ (6) 上フランジの鉛直分布の増加

3.3.3 垂直補剛材の剛度が規定を満足しない鋼I桁

(1) 荷重方法

繰返し荷重は下記の8点の変位において荷重⇒除荷⇒荷重を行った。

ここで、変位17mm、72mm、90mmにおいては、3回繰返し荷重を行い、その他の変位については、1回繰返し荷重を行った。

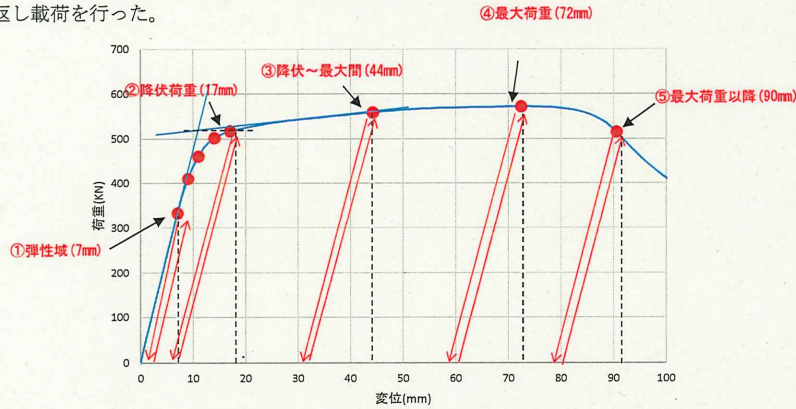


図 3.21 繰返し荷重方法

(2) P- δ 関係

P- δ 関係を以下に示す。また、鉛直変位が12mmの時と最大荷重時の相当塑性ひずみコンター図を示す。単調荷重も繰返し荷重も P- δ 関係はほとんど同じであることが確認された。

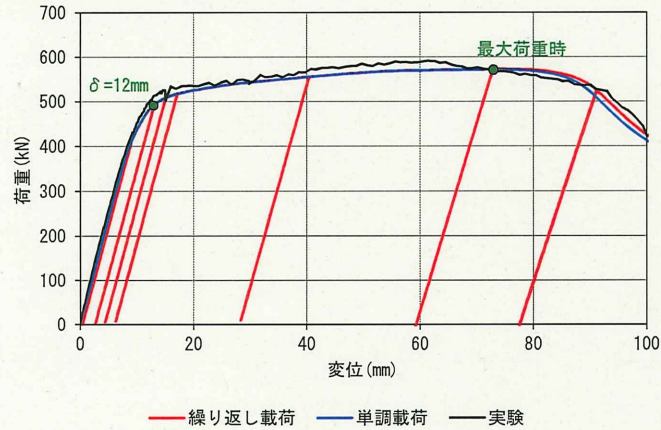


図 3.22 P- δ 関係 (比較)

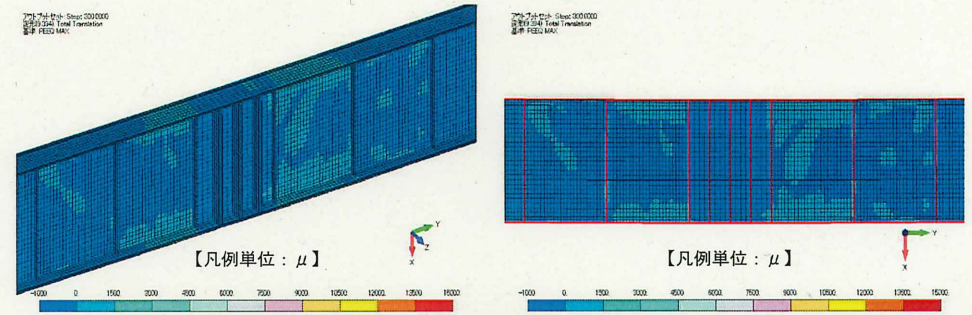


図 3.23 変位 12mm

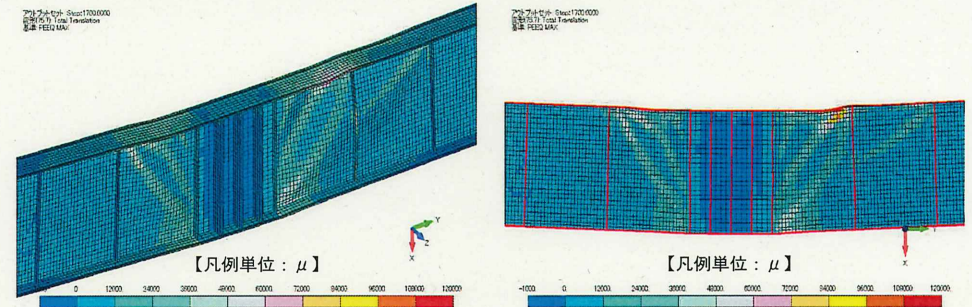


図 3.24 最大荷重時

(3) 腹板の座屈

以下に荷重荷重と腹板の面外変形の関係を示す。単調荷重における腹板の座屈は図 3.25 における腹板の面外変形が線形ではなくなる点(A点における250kN)であった。腹板の最終ステップの面外変位コンター図より、面外変形が紙面の前後(A点、B点)で大きい位置及び垂直補剛材の位置(C点)の3点を示している。また、最初の繰返し変位時における単調荷重と繰返し荷重(8回繰返しした後)の腹板の面外変位コンター図を示す。図 3.26 より、単調荷重と繰返し荷重で、曲線が変わらないこと、図 3.27 より同じ変位分布であることが確認できる。このため、腹板の面外方向の座屈についても単調荷重と繰返し荷重で変わらないことが確認された。

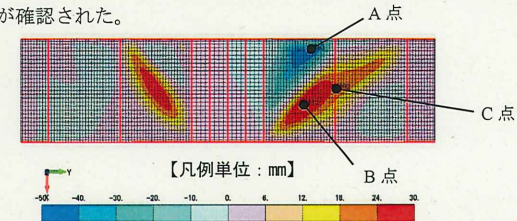


図 3.25 抽出位置 (腹板の最終面外変位コンター図)

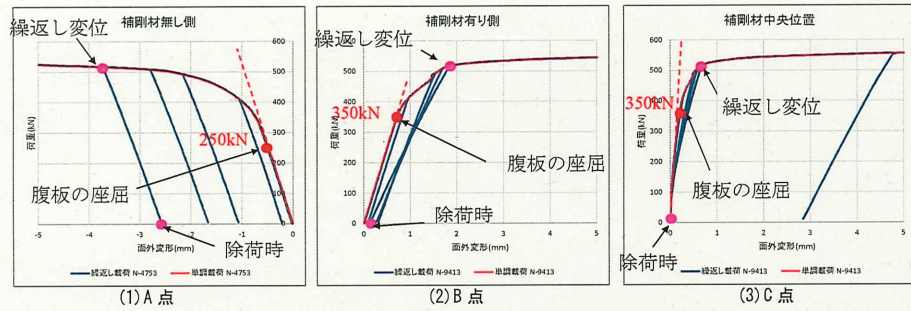


図 3.26 載荷荷重と腹板の面外変形の関係

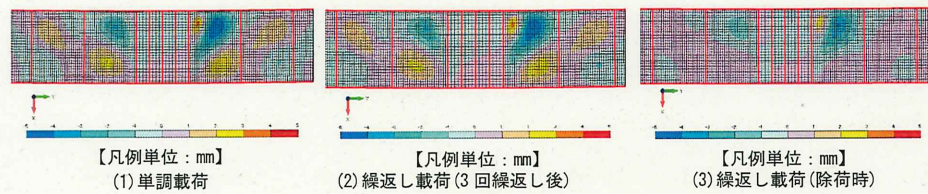


図 3.27 面外変形コンター図

(4) 降伏点

繰返し載荷を行うことで、特に降伏付近において、荷重が低下しないことを確認しておく必要があった。このため、P- δ 関係における変位の急増点付近 (荷重 300~600 kN、変位 5~21mm) において、数点で繰返し載荷を実施した。以下に P- δ 関係における変位の急増点付近の拡大図を示す。

以下の図に示すように、単調載荷と繰返し載荷はほぼ重なっており、繰返しの影響を受けないことが確認できた。

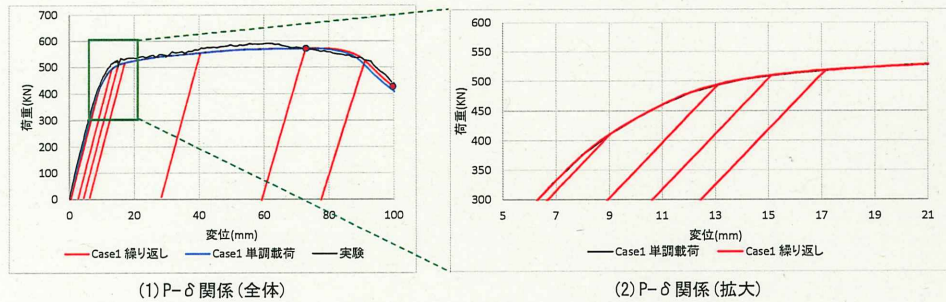


図 3.28 降伏点付近の P- δ 関係

(5) 腹板の面外変形の増加

以下に荷重 555~572kN の腹板の面外方向の変形図を示す。同図より、荷重が大きくなるに従い、腹板の面外変形が大きくなっており、単調載荷及び繰返し載荷でほぼ同様であることが確認できる。また、図 3.31 に面外変形が前後に卓越した 2 点 (A 点、B 点) 及び垂直補剛材位置 (C 点) における荷重と面外方向の関係を示す。同図より、単調載荷及び繰返し載荷ともに 520kN で腹板の面外方向の変形が急増していることが分かる。また、垂直補剛材位置の中央の腹板の面外変形は、520kN で急増していることが分かる。

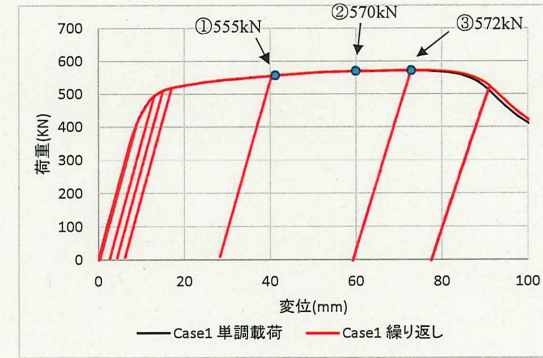
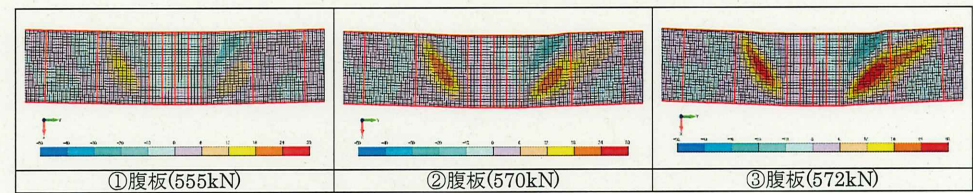
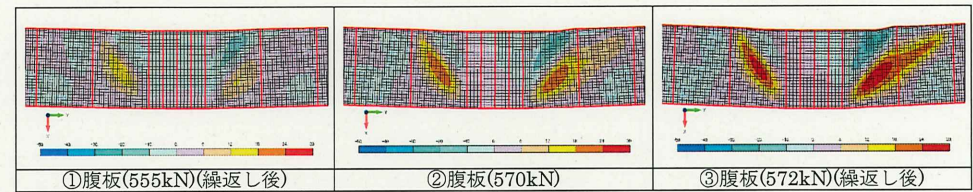


図 3.29 P- δ 関係 (着目点)

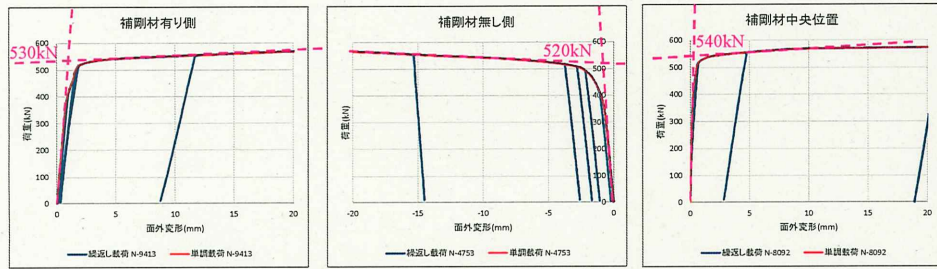


(1) 単調載荷



(2) 繰返し載荷

図 3.30 腹板の面外変形コンター図 (荷重 555~572kN)



(1) A点 (2) B点 (3) C点

図 3.31 載荷荷重と腹板の面外変形の関係

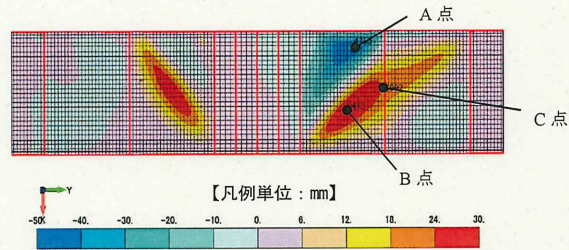
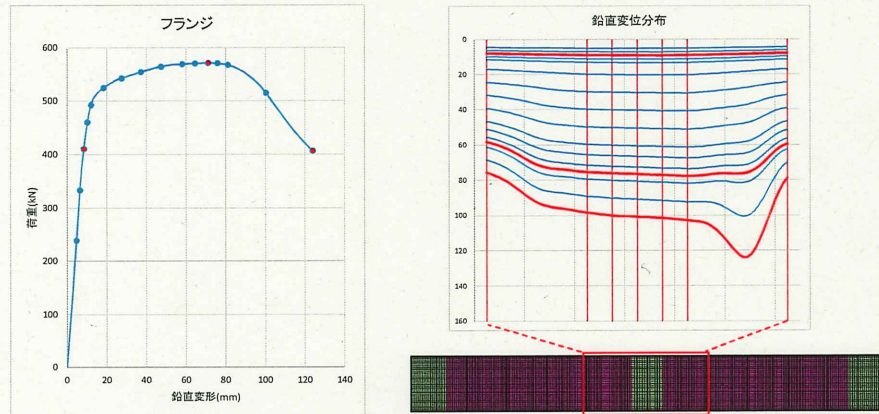


図 3.32 抽出位置(腹板の面外変形コンター図)



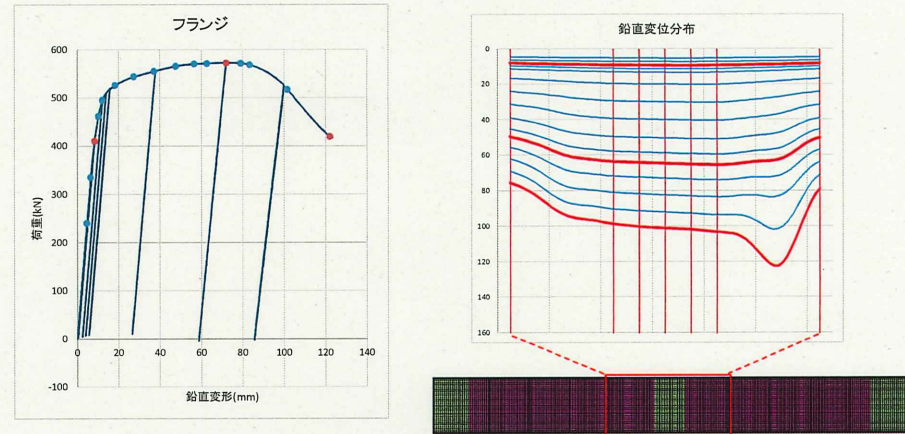
(1) 抽出位置 (P- δ) (2) 上フランジの鉛直変形図

図 3.33 単調載荷

(6) 上フランジの鉛直変位の増加

図 3.33 にステップ毎の鉛直変位分布図を示す。ここで、抽出位置における赤点は、それぞれ弾性点、最大荷重点、最終点を示しており、上フランジの鉛直変形図の赤太線と同じステップを示している。

同図より、最大荷重後において、鉛直変位が増大しており、フランジの塑性ヒンジ形成が最大荷重の決定要因となっていることが分かる。また、単調載荷と繰返し載荷で変位分布が同じであることを確認した。



(1) 抽出位置 (P- δ) (2) 上フランジの鉛直変形図

図 3.34 繰返し載荷

(7) まとめ

この検討により、以下の事項が確認できた。

- ①【鋼 I 桁の曲げ性能】鋼 I 桁の曲げ性能について、繰返し載荷荷重時においても、急激な荷重低下を起こさない。
 - ⇒ (2) P- δ 関係
 - ⇒ (3) 腹板の座屈
 - ⇒ (5) 腹板の面外変形の増加
- ②【鋼 I 桁の曲げ降伏荷重】繰返し載荷時の鋼 I 桁の曲げ降伏荷重が、単調載荷実験や単調載荷解析と大きく変わらない。
 - ⇒ (4) 降伏点
- ③【鋼 I 桁の最大耐力】鋼 I 桁の最大耐力が、単調載荷実験や単調載荷解析と大きく変わらない。
 - ⇒ (6) 上フランジの鉛直分布の増加

3.4 ローラーゲート横主桁の耐力評価

3.4.1 概要

単調載荷解析で用いたローラーゲート横主桁モデル（3次元シェルモデル）について、3次元非弾性有限変位解析による載荷・除荷・再載荷を考慮した繰返し載荷による耐力解析を行った。解析対象は表 3.3 に示す3モデルとした。なお、繰返し載荷1ケースあたり、4段階程度以上の鉛直変位に対して実施するものとした。

表 3.3 ローラーゲート横主桁の解析ケース

解析モデル	載荷方法	載荷荷重
垂直補剛材の規定を満足する横主桁	等分布荷重	繰返し載荷1ケース
垂直補剛材の板厚が規定を満足しない横主桁 (耐震性能照査対象ゲートの横主桁)	等分布荷重	繰返し載荷1ケース
垂直補剛材の剛度が規定を満足しない横主桁	等分布荷重	繰返し載荷1ケース

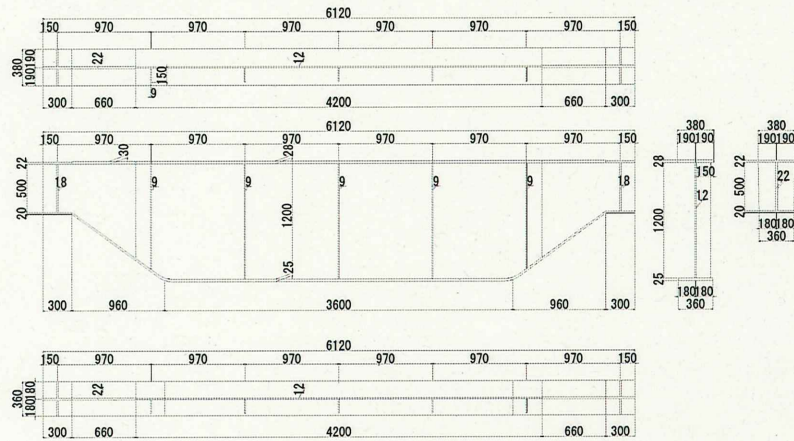


図 3.35 解析対象

表 3.4 解析条件一覧

項目	内容	備考
解析ソフト	ABAQUS	
解析方法	非弾性有限変位解析	
使用要素	非線形シェル要素	
応力ひずみ関係	バイリニア型（第2勾配 E0/100, E0：初期弾性係数）	
硬化則	移動硬化則	
降伏条件	フォンミーゼスの条件	
制御方法	分布荷重	弧長増分制御
初期不整		座屈固有値解析により算定
材質	SS400	降伏応力度（公称値）：235N/mm ²
	初期弾性係数	E0=2.0×10 ⁵ kN/m ²
境界条件	支点部	可動、固定
	上フランジ端部	鉛直ローラーを基本とする
メッシュ分割	腹板	30分割以上
	フランジ、補剛材	腹板と同程度のメッシュサイズ

制御方法は、本検討では分布載荷であること及び、荷重の低下を確認するため、弧長増分制御を適用することとした。載荷はスキンプレートの範囲に等分布荷重を作用させた。

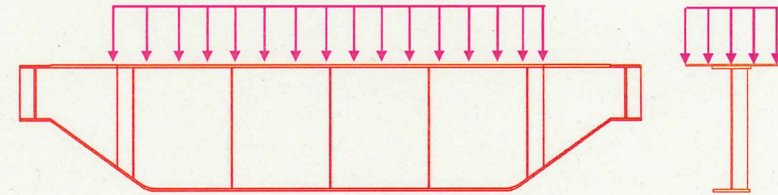


図 3.36 載荷方法

解析モデルを以下に示す。

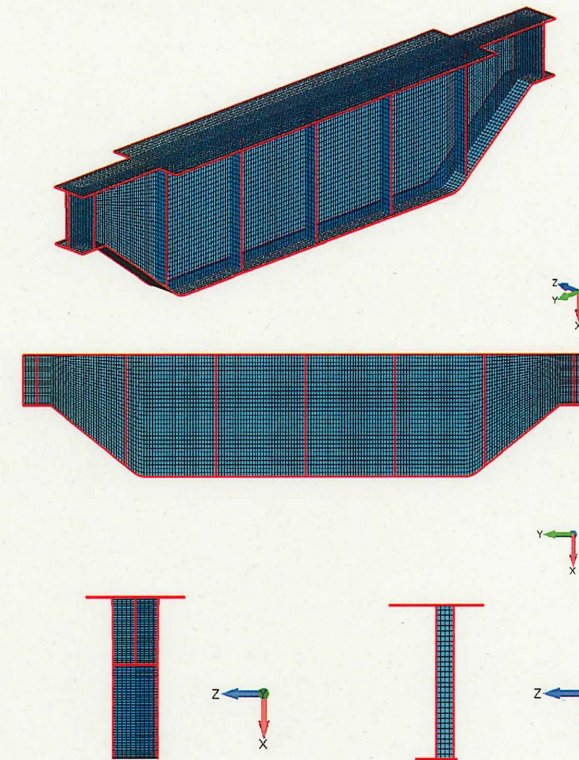


図 3.37 モデル図

3.4.2 垂直補剛材の規定を満足するローラーゲート横主桁

(1) 繰返し位置

繰返し載荷は下記の8点の変位において載荷⇒除荷⇒載荷を行った。

ここで、変位15mm、30mm、73mmにおいては、3回繰返し載荷を行い、その他の変位については、1回繰返し載荷を行った。

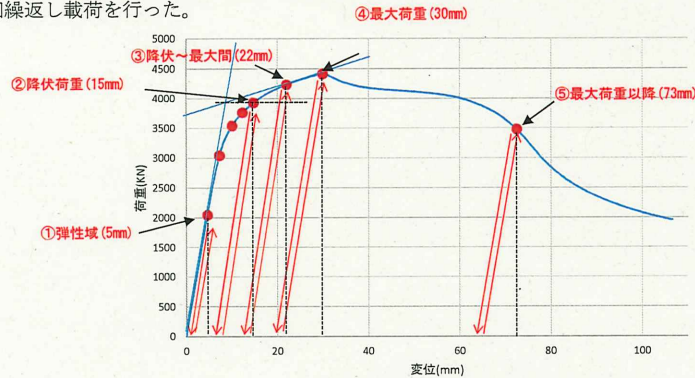
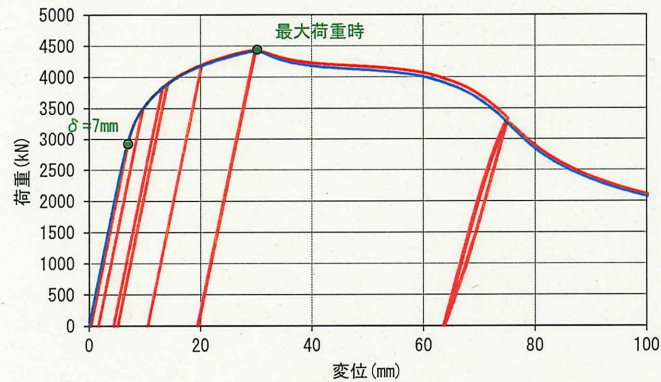


図 3.38 繰返し載荷方法

(2) P- δ 関係

P- δ 関係を以下に示す。また、鉛直変位が7mmの時と最大荷重時の相当塑性ひずみコンター図を示す。

単調載荷も繰返し載荷も P- δ 関係はほとんど同じであることが確認された。



— 繰返し載荷 — 単調載荷

図 3.39 P- δ 関係(比較)

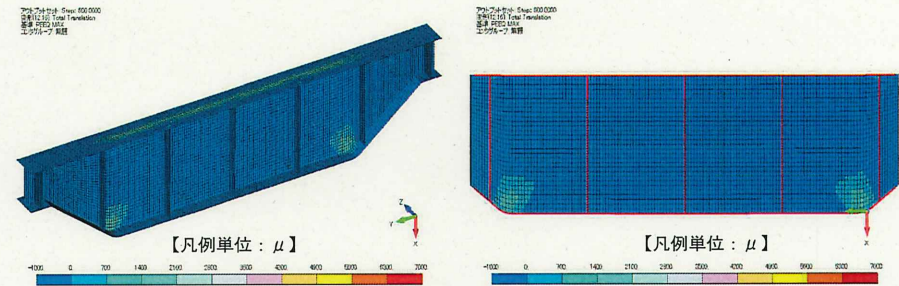


図 3.40 変位 7mm

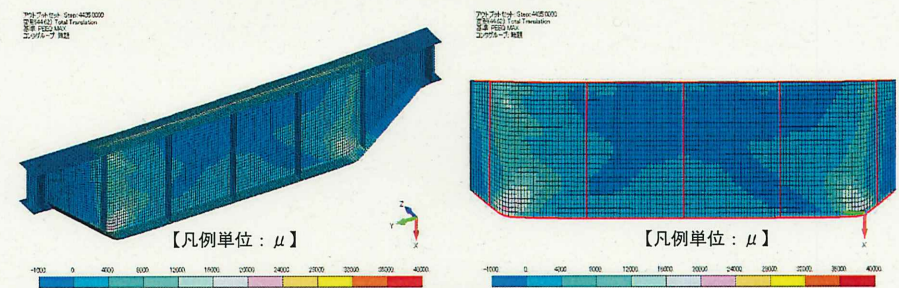


図 3.41 最大荷重時

(3) 腹板の座屈

以下に載荷荷重と腹板の面外変形の関係を示す。単調載荷における腹板の座屈は図 3.42 における腹板の面外変形が線形ではなくなる点(2800kN)であった。腹板の最終ステップの面外変位コンター図より、面外変形が紙面の前後に大きい2点(A点、B点)を示している。また、最初の繰返し変位時における単調載荷と繰返し載荷(3回繰返しした後)の腹板の面外変位コンター図を示す。図 3.43 より、単調載荷と繰返し載荷で曲線が変わらないこと、図 3.44 より同じ変位分布であることが確認できる。このため、腹板の面外方向の座屈についても単調載荷と繰返し載荷で変わらないことが確認された。

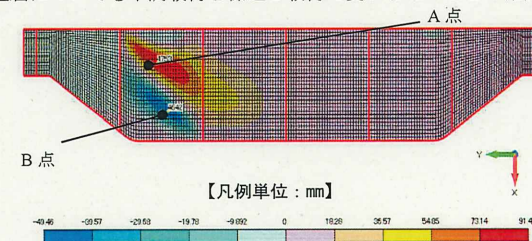


図 3.42 抽出位置(腹板の最終面外変位コンター図)

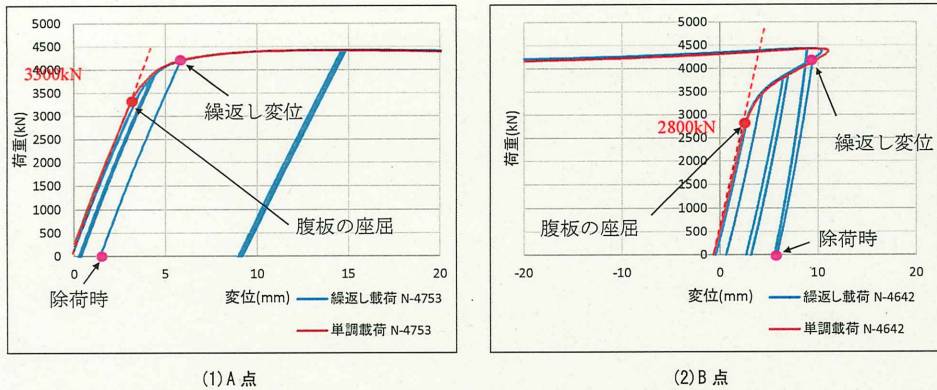
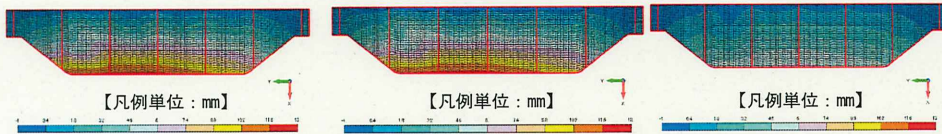


図 3.43 載荷荷重と腹板の面外変形の関係



(1) 単調載荷 (2) 繰返し載荷 (3 回繰返し後) (3) 繰返し載荷 (除荷時)

図 3.44 面外変形コンター図

(4) 降伏点

繰返し載荷を行うことで、特に降伏付近において、荷重が低下しないことを確認しておく必要があった。このため、P- δ 関係における変位の急増点付近 (荷重 2000~4000kN、変位 5~15mm) において、数点で繰返し載荷を実施した。以下に P- δ 関係における変位の急増点付近の拡大図を示す。

以下の図に示すように、単調載荷と繰返し載荷はほぼ重なっており、繰返しの影響を受けないことが確認できた。

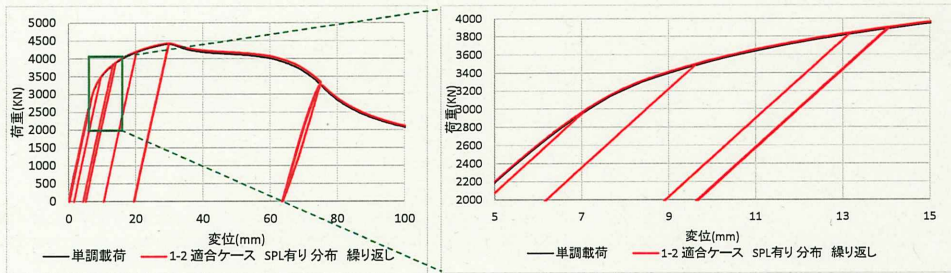


図 3.45 降伏点付近の P- δ 関係

(5) 腹板の面外変形の増加

以下に荷重 2999~4200kN の腹板の面外方向の変形図を示す。同図より、荷重が大きくなるに従い、腹板の面外変形が大きくなっており、単調載荷及び繰返し載荷でほぼ同様であることが確認できる。また、図 3.48 に面外変形が前後に卓越した 2 点(A 点、B 点)における荷重と面外方向の関係を示す。同図より、単調載荷も繰返し載荷も、3500kN で腹板の面外方向の変形が急増していることが分かる。

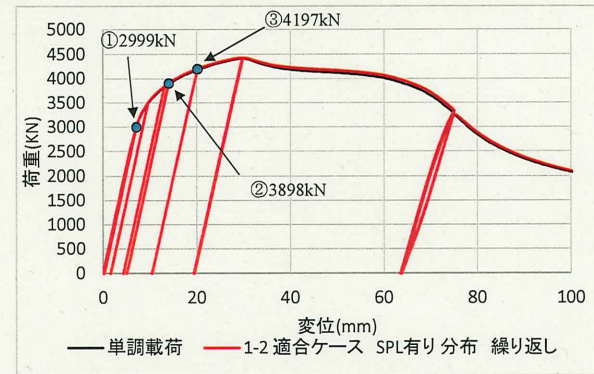
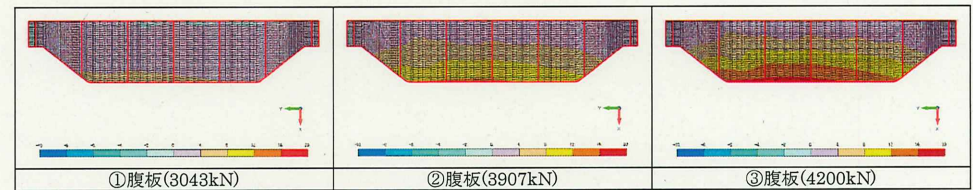
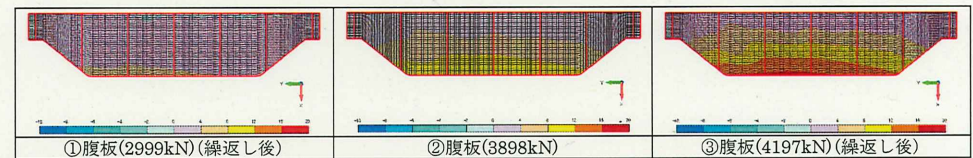


図 3.46 P- δ 関係 (着目点)

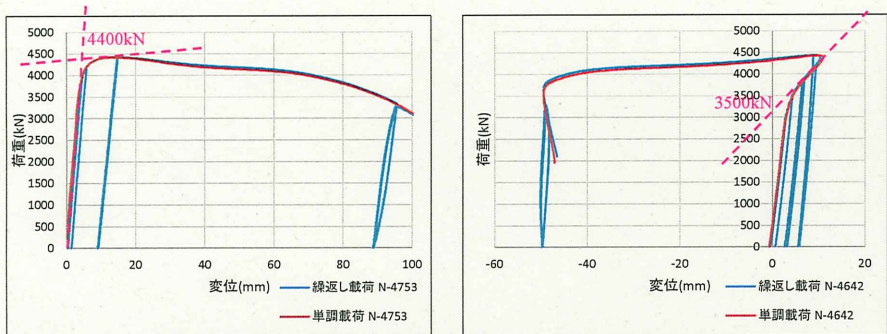


(1) 単調載荷



(2) 繰返し載荷

図 3.47 腹板の面外変形コンター図 (荷重 2999~4200kN)



(1) A点 (2) B点

図 3.48 載荷荷重と腹板の面外変形の関係

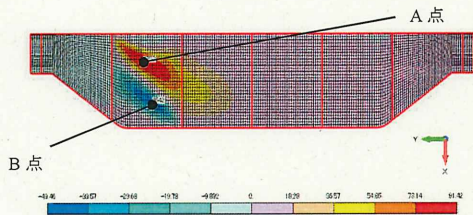
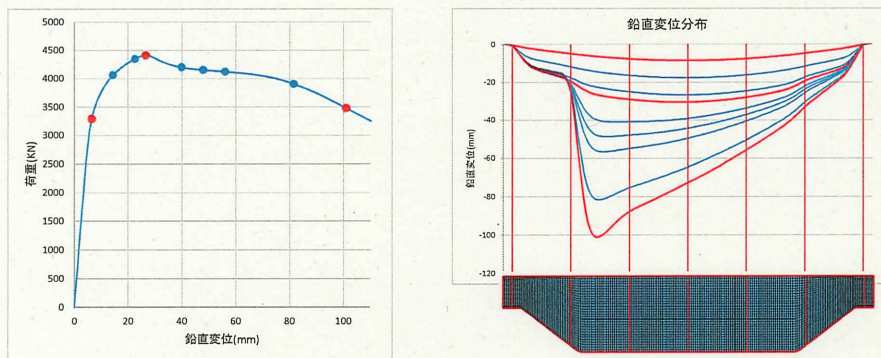


図 3.49 抽出位置(腹板の面外変形コンター図)



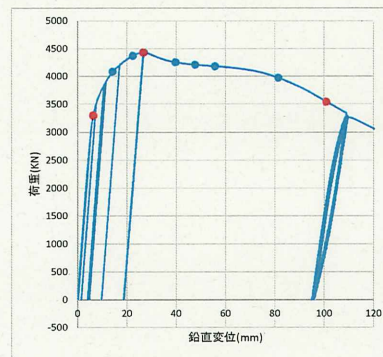
(1) 抽出位置(P-δ) (2) 上フランジの鉛直変形図

図 3.50 単調載荷

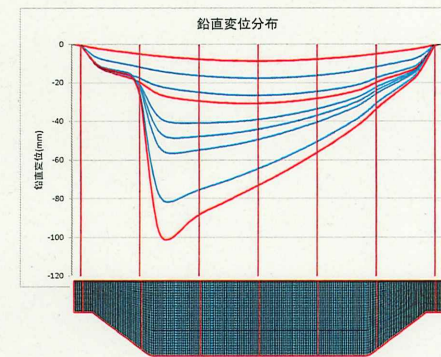
(6) 上フランジの鉛直変位の増加

図 3.50 にステップ毎の鉛直変位分布図を示す。ここで、抽出位置における赤点は、それぞれ弾性点、最大荷重点、最終点を示しており、上フランジの鉛直変形図の赤太線と同じステップを示している。

同図より、最大荷重後において、鉛直変位が増大しており、フランジの塑性ヒンジ形成が最大荷重の決定要因となっていることが分かる。また、単調載荷と繰返し載荷で変位分布が同じであることを確認した。



(1) 抽出位置(P-δ)



(2) 上フランジの鉛直変形図

図 3.51 繰返し載荷

(7) まとめ

この検討により、以下の事項が確認できた。

- ①【ゲート横主桁の曲げ性能】ゲート横主桁の曲げ性能について、繰返し載荷荷重時においても、急激な荷重低下を起こさない。
 - ⇒ (2) P-δ 関係
 - ⇒ (3) 腹板の座屈
 - ⇒ (5) 腹板の面外変形の増加
- ②【ゲート横主桁の曲げ降伏荷重】繰返し載荷時のゲート横主桁の曲げ降伏荷重が、単調載荷実験や単調載荷解析と大きく変わらない。
 - ⇒ (4) 降伏点
- ③【ゲート横主桁の最大耐力】ゲート横主桁の最大耐力が、単調載荷実験や単調載荷解析と大きく変わらない。
 - ⇒ (6) 上フランジの鉛直分布の増加

3.4.3 垂直補剛材の板厚が規定を満足しない横主桁

(1) 繰返し位置

繰返し載荷は下記の 8 点の変位において載荷⇒除荷⇒載荷を行った。

ここで、変位 13mm、30mm、66mm においては、3 回繰返し載荷を行い、その他の変位については、1 回繰返し載荷を行った。

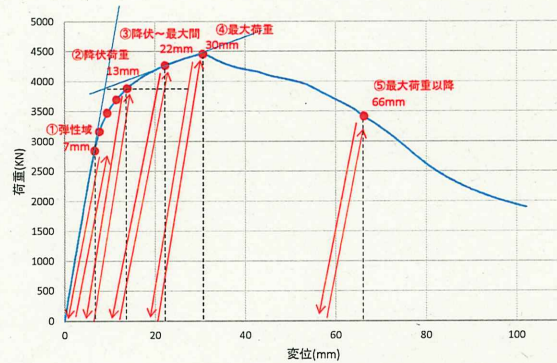


図 3.52 繰返し載荷方法

(2) P- δ 関係

P- δ 関係を以下に示す。また、鉛直変位が 7mm の時と最大荷重時の相当塑性ひずみコンター図を示す。

単調載荷も繰返し載荷も P- δ 関係はほとんど同じであることが確認された。

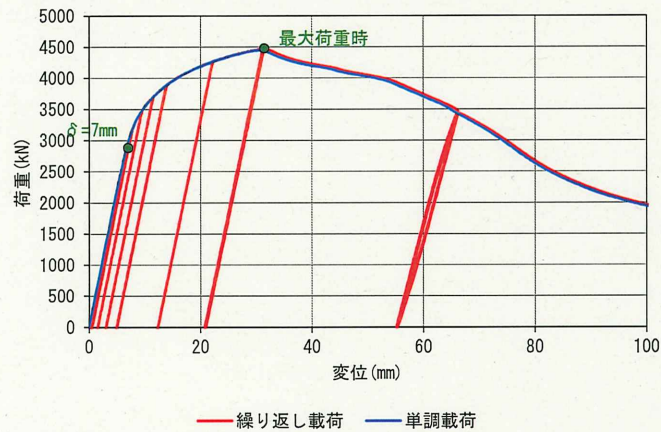


図 3.53 P- δ 関係 (比較)

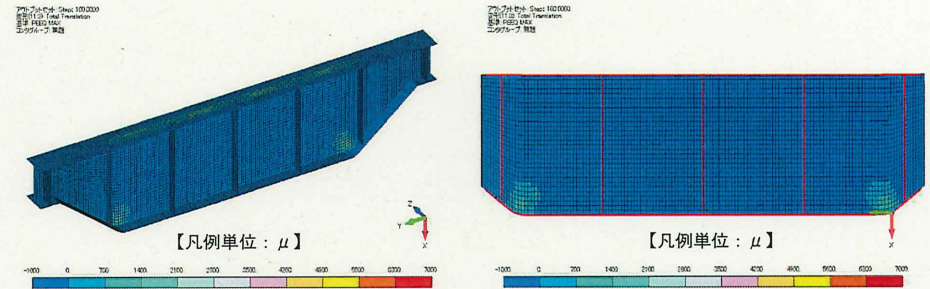


図 3.54 変位 7mm

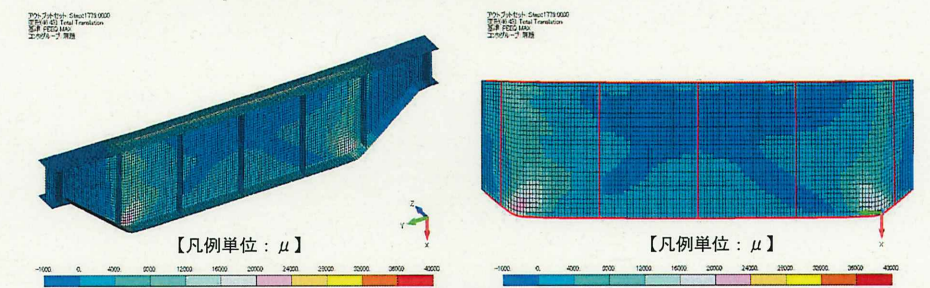


図 3.55 最大荷重時

(3) 腹板の座屈

以下に載荷荷重と腹板の面外変形の関係を示す。単調載荷における腹板の座屈は図 3.56 における腹板の面外変形が線形ではなくなる点(2800kN)であった。腹板の最終ステップの面外変位コンター図より、面外変形が紙面の前後に大きい 2 点(A 点、B 点)を示している。また、最初の繰返し変位時における単調載荷と繰返し載荷(3 回繰返しした後)の腹板の面外変位コンター図を示す。図 3.57 より、単調載荷と繰返し載荷で、曲線が変わらないこと、図 3.58 より同じ変位分布であることが確認できる。このため、腹板の面外方向の座屈についても単調載荷と繰返し載荷で変わらないことが確認された。

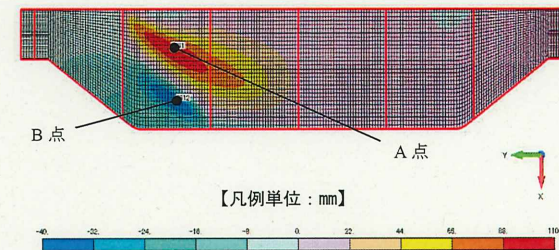
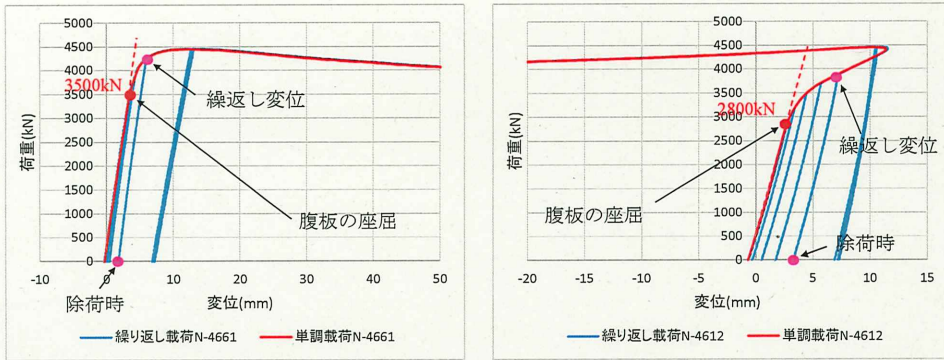


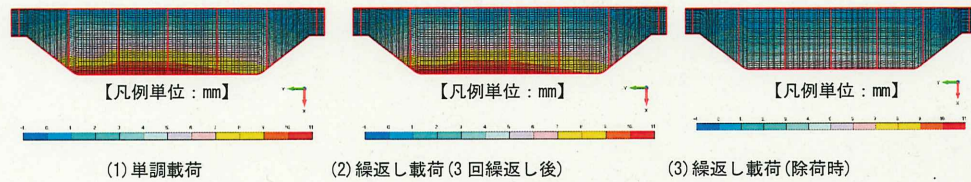
図 3.56 抽出位置 (腹板の最終面外変位コンター図)



(1) A点

(2) B点

図 3.57 载荷荷重と腹板の面外変形の関係



(1) 単調载荷

(2) 繰返し载荷 (3回繰返し後)

(3) 繰返し载荷 (除荷時)

図 3.58 面外変形コンター図

(4) 降伏点

繰返し载荷を行うことで、特に降伏付近において、荷重が低下しないことを確認しておく必要があった。このため、P- δ 関係における変位の急増点付近 (荷重 2000~4000kN、変位 3~15mm) において、数点で繰返し载荷を実施した。以下に P- δ 関係における変位の急増点付近の拡大図を示す。

以下の図に示すように、単調载荷と繰返し载荷はほぼ重なっており、繰返しの影響を受けないことが確認できた。

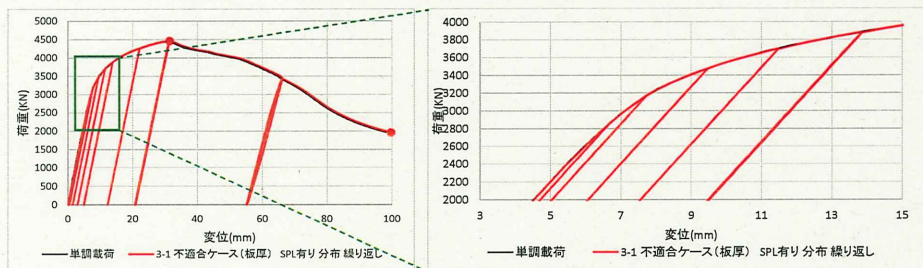


図 3.59 降伏点付近の P- δ 関係

(5) 腹板の面外変形の増加

以下に荷重 3161~4264kN の腹板の面外方向の変形図を示す。同図より、荷重が大きくなるに従い、腹板の面外変形が大きくなっており、単調载荷及び繰返し载荷でほぼ同様であることが確認できる。また、図 3.62 に面外変形が前後に卓越した 2 点(A 点、B 点)における荷重と面外方向の関係を示す。同図より、単調载荷も繰返し载荷も、3300kN で腹板の面外方向の変形が急増していることが分かる。

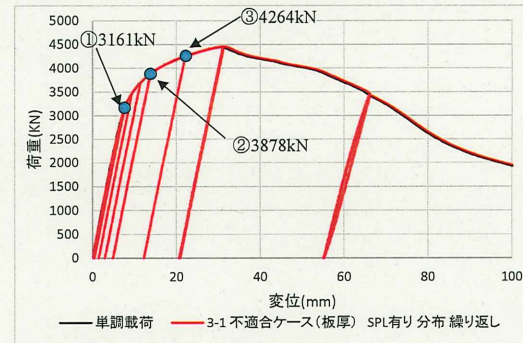
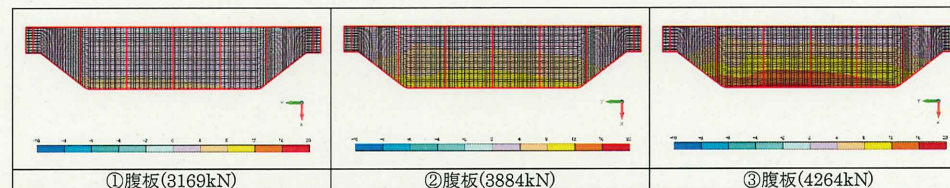
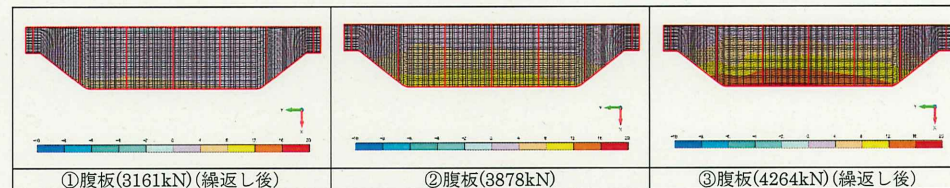


図 3.60 P- δ 関係 (着目点)

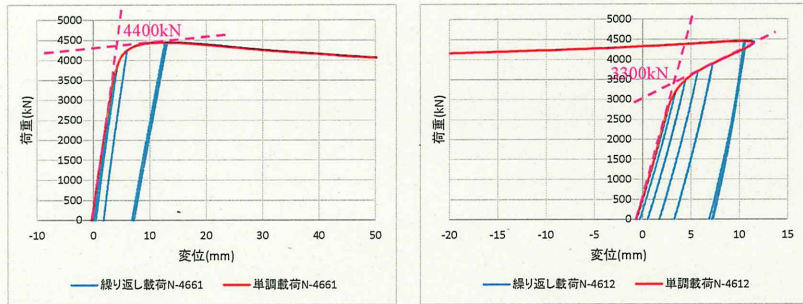


(1) 単調载荷



(2) 繰返し载荷

図 3.61 腹板の面外変形コンター図 (荷重 3161~4264kN)



(1) A点 (2) B点

図 3.62 载荷荷重と腹板の面外変形の関係

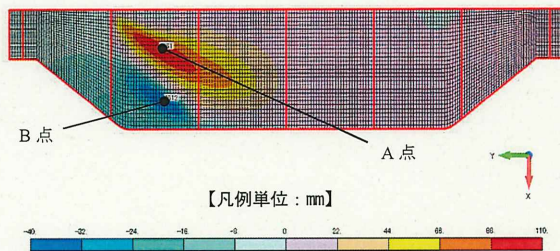
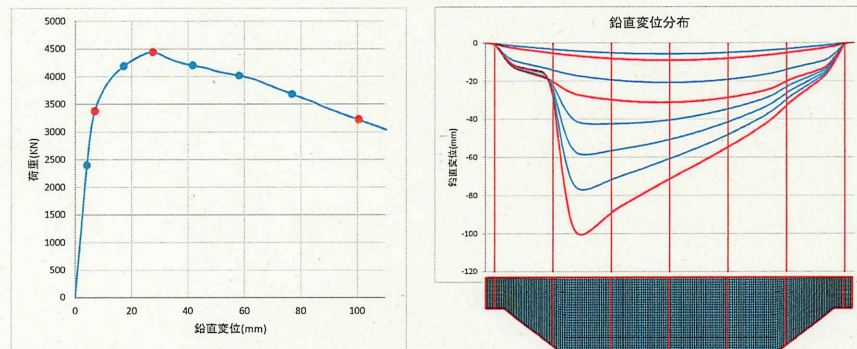


図 3.63 抽出位置(腹板の面外変形コンター図)



(1) 抽出位置(P-δ)

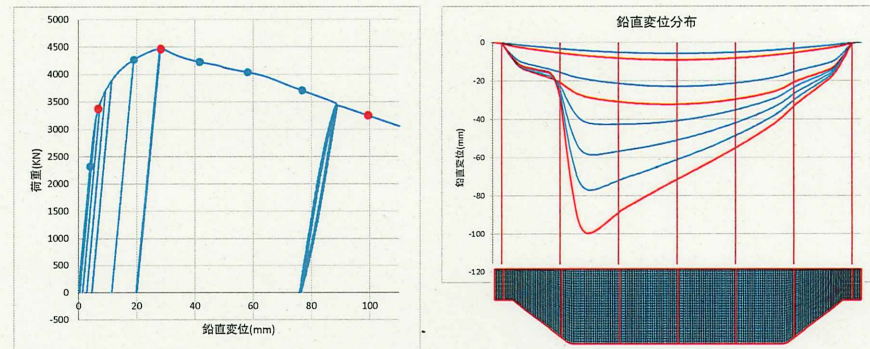
(2) 上フランジの鉛直変形図

図 3.64 単調載荷

(6) 上フランジの鉛直変位の増加

図 3.64 にステップごとの鉛直変位分布図を示す。ここで、抽出位置における赤点は、それぞれ弾性点、最大荷重点、最終点を示しており、上フランジの鉛直変形図の赤太線と同じステップを示している。

同図より、最大荷重後において、鉛直変位が増大しており、フランジの塑性ヒンジ形成が最大荷重の決定要因となっていることが分かる。また、単調載荷と繰返し載荷で変位分布が同じであることを確認した。



(1) 抽出位置(P-δ)

(2) 上フランジの鉛直変形図

図 3.65 繰返し載荷

(7) まとめ

この検討により、以下の事項が確認できた。

- ①【ゲート横主桁の曲げ性能】ゲート横主桁の曲げ性能について、繰返し載荷荷重時においても、急激な荷重低下を起こさない。
 - ⇒ (2) P-δ 関係
 - ⇒ (3) 腹板の座屈
 - ⇒ (5) 腹板の面外変形の増加
- ②【ゲート横主桁の曲げ降伏荷重】繰返し載荷時のゲート横主桁の曲げ降伏荷重が、単調載荷実験や単調載荷解析と大きく変わらない。
 - ⇒ (4) 降伏点
- ③【ゲート横主桁の最大耐力】ゲート横主桁の最大耐力が、単調載荷実験や単調載荷解析と大きく変わらない。
 - ⇒ (6) 上フランジの鉛直分布の増加

3.4.4 垂直補剛材の剛度が規定を満足しない横主桁

(1) 繰返し位置

繰返し載荷は下記の 8 点の変位において載荷⇒除荷⇒載荷を行った。

ここで、変位 13mm、30mm、66mm においては、3 回繰返し載荷を行い、その他の変位については、1 回繰返し載荷を行った。

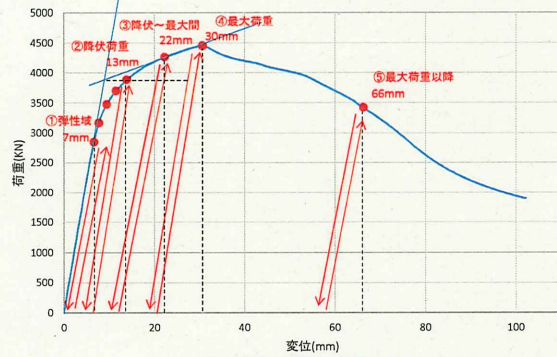


図 3.66 繰返し載荷方法

(2) P- δ 関係

P- δ 関係を以下に示す。また、鉛直変位が 7mm の時と最大荷重時の相当塑性ひずみ図コンター図を示す。単調載荷も繰返し載荷も P- δ 関係はほとんど同じであることが確認された。

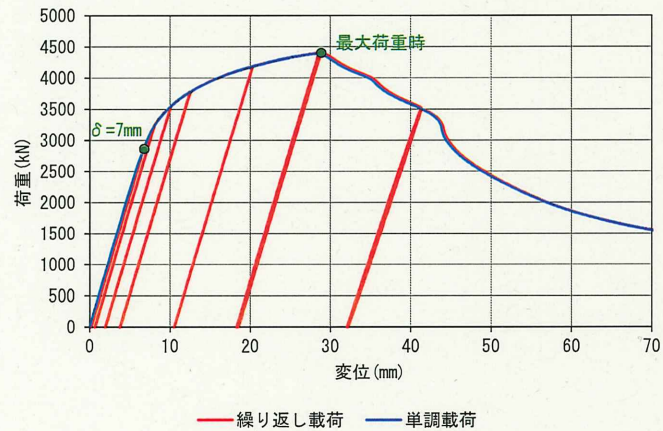


図 3.67 P- δ 関係(比較)

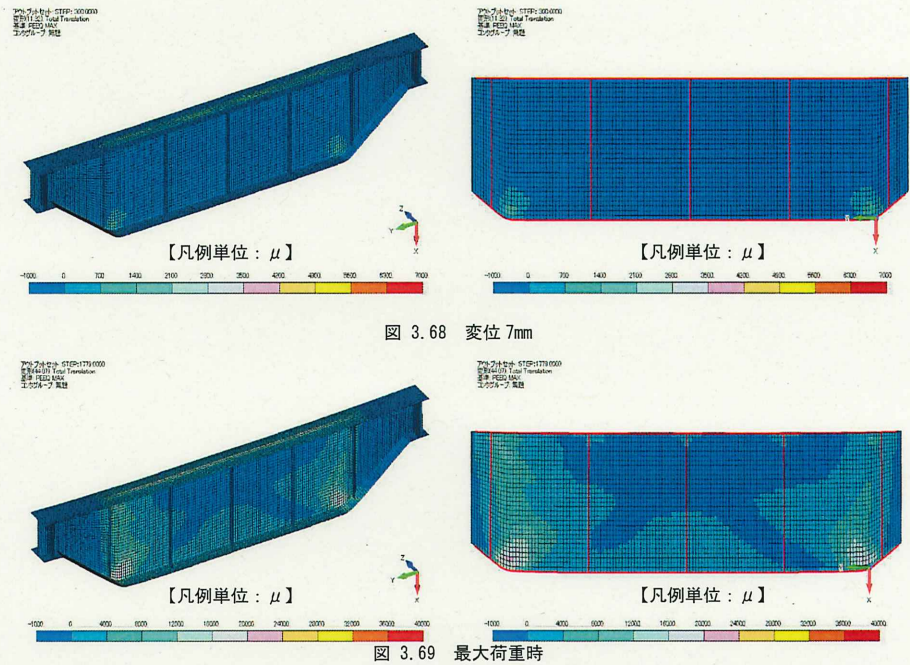


図 3.68 変位 7mm

図 3.69 最大荷重時

(3) 腹板の座屈

以下に載荷荷重と腹板の面外変形の関係を示す。単調載荷における腹板の座屈は図 3.70 における腹板の面外変形が線形ではなくなる点(2800kN)であった。腹板の最終ステップの面外変位コンター図より、面外変形が紙面の前後に大きい 2 点(A 点、B 点)を示している。また、図 3.72 に最初の繰返し変位時における単調載荷と繰返し載荷(3 回繰返しした後)の腹板の面外変位コンター図を示す。図 3.71 より、単調載荷と繰返し載荷で曲線が変わらないこと、図 3.72 より同じ変位分布であることが確認できる。このため、腹板の面外方向の座屈についても単調載荷と繰返し載荷で変わらないことが確認された。

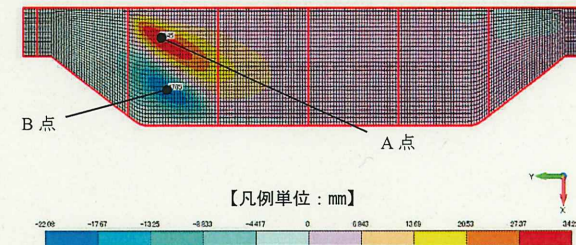
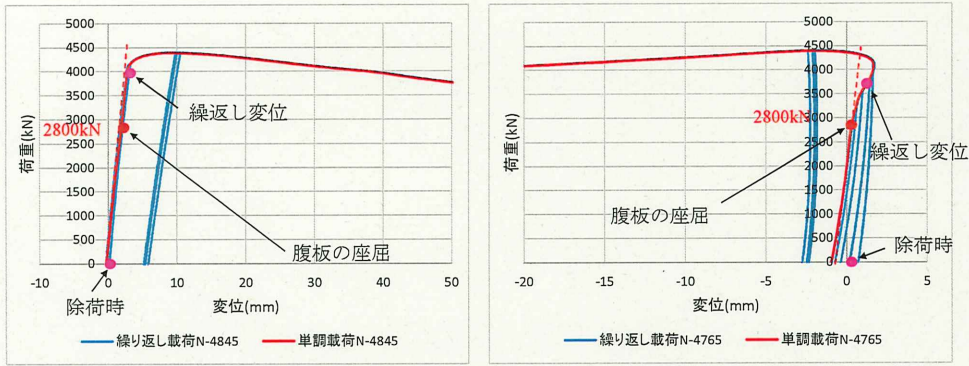


図 3.70 抽出位置(腹板の最終面外変位コンター図)



(1) A点 (2) B点

図 3.71 載荷荷重と腹板の面外変形の関係

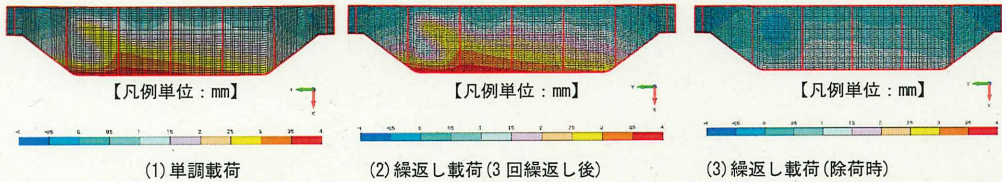


図 3.72 面外変形コンター図

(4) 降伏点

繰返し載荷を行うことで、特に降伏付近において、荷重が低下しないことを確認しておく必要があった。このため、P- δ 関係における変位の急増点付近 (荷重 2000~4000kN、変位 3~15mm) において、数点で繰返し載荷を実施した。以下に P- δ 関係における変位の急増点付近の拡大図を示す。

以下の図に示すように、単調載荷と繰返し載荷はほぼ重なっており、繰返しの影響を受けないことが確認できた。

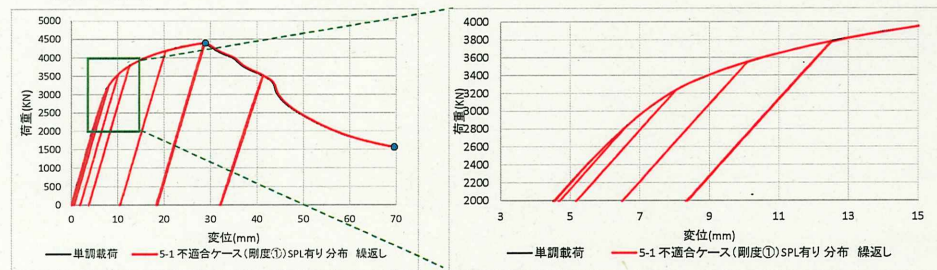


図 3.73 降伏点付近の P- δ 関係

(5) 腹板の面外変形の増加

以下に荷重 2813~3768kN の腹板の面外方向の変形図を示す。同図より、荷重が大きくなるに従い、腹板の面外変形が大きくなっており、単調載荷及び繰返し載荷でほぼ同様であることが確認できる。また、面外変形が前後に卓越した 2 点(A 点、B 点)における荷重と面外方向の関係を示す。同図より、単調載荷も繰返し載荷も、3300kN で腹板の面外方向の変形が急増していることが分かる。

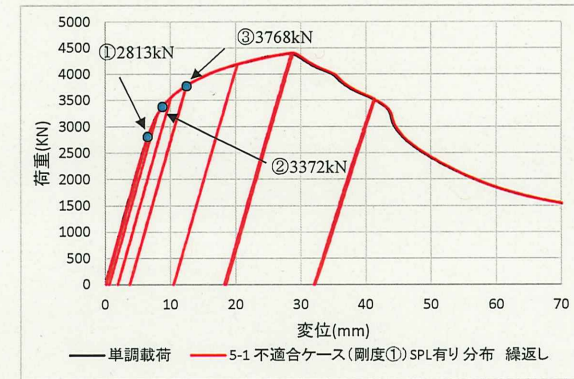


図 3.74 P- δ 関係 (着目点)

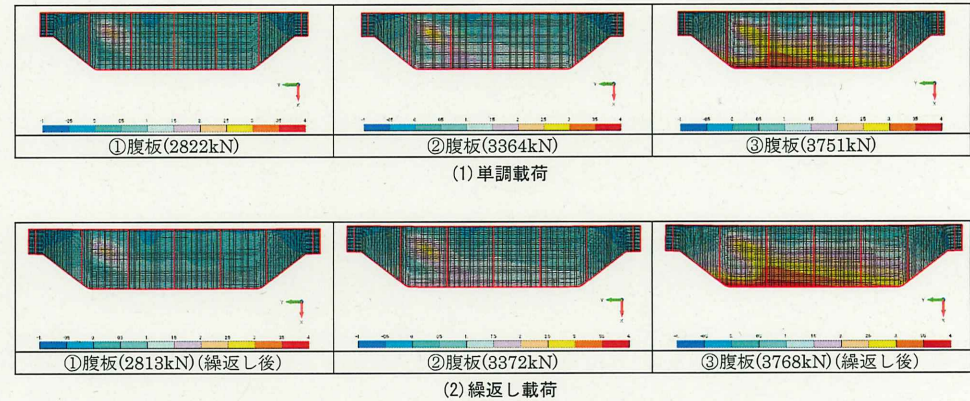


図 3.75 腹板の面外変形コンター図 (荷重 2813~3768kN)

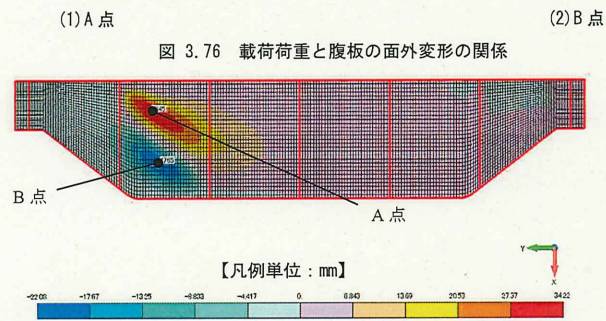
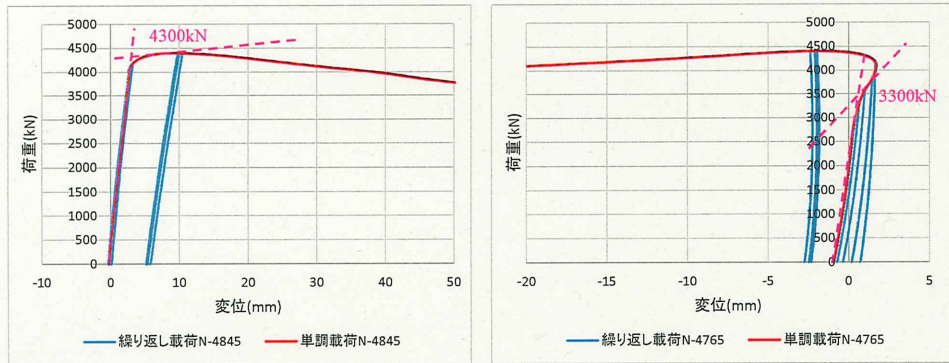
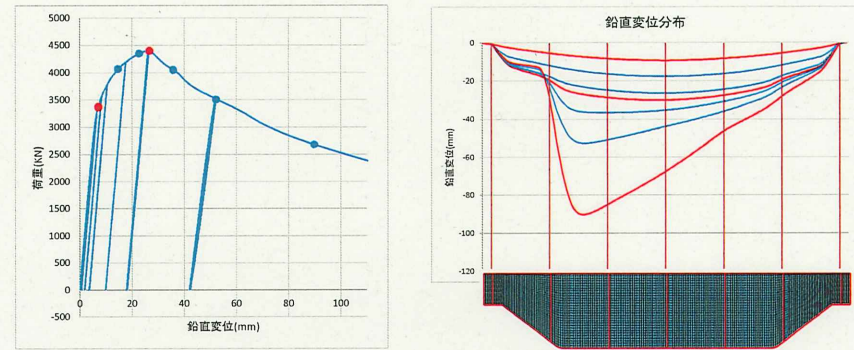


図 3.76 载荷荷重と腹板の面外変形の関係

(6) 上フランジの鉛直変位の増加

図 3.78 にステップ毎の鉛直変位分布図を示す。ここで、抽出位置における赤点は、それぞれ弾性点、最大荷重点、最終点を示しており、上フランジの鉛直変形図の赤太線と同ステップを示している。同図より、最大荷重後において、鉛直変位が増大しており、フランジの塑性ヒンジ形成が最大荷重の決定要因となっていることが分かる。また、単調載荷と繰返し載荷で変位分布が同じであることを確認した。



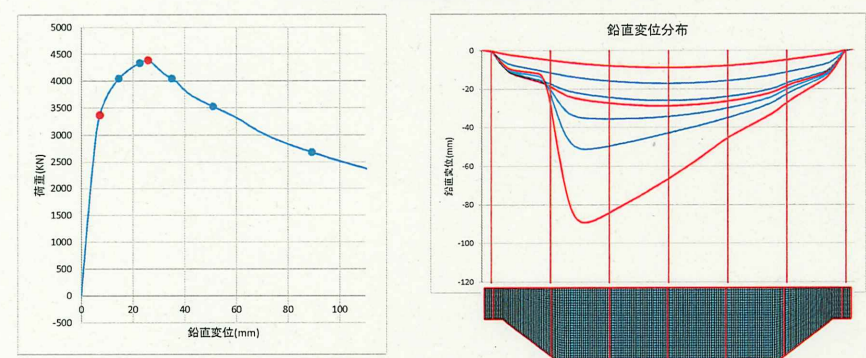
(1) 抽出位置 (P-δ) (2) 上フランジの鉛直変形図

図 3.79 繰返し載荷

(7) まとめ

この検討により、以下の事項が確認できた。

- ①【ゲート横主桁の曲げ性能】ゲート横主桁の曲げ性能について、繰返し載荷荷重時においても、急激な荷重低下を起ささない。
 - ⇒ (2) P-δ 関係
 - ⇒ (3) 腹板の座屈
 - ⇒ (5) 腹板の面外変形の増加
- ②【ゲート横主桁の曲げ降伏荷重】繰返し載荷時のゲート横主桁の曲げ降伏荷重が、単調載荷実験や単調載荷解析と大きく変わらない。
 - ⇒ (4) 降伏点
- ③【ゲート横主桁の最大耐力】ゲート横主桁の最大耐力が、単調載荷実験や単調載荷解析と大きく変わらない。
 - ⇒ (6) 上フランジの鉛直分布の増加



(1) 抽出位置 (P-δ) (2) 上フランジの鉛直変形図

図 3.78 単調載荷

4. まとめ

4.1 非弾性有限変位解析による確認結果

単調載荷解析で用いた鋼 I 桁及びゲート横主桁の解析モデルに対して片振幅の繰返し載荷解析を行い、以下の事項を確認した。

①【曲げ性能】

鋼 I 桁及びゲート横主桁の曲げ性能について、繰返し載荷荷重時においても、急激な荷重低下を起こさないことを確認した。

②【ゲート横主桁の曲げ降伏荷重】

繰返し載荷時の鋼 I 桁及びゲート横主桁の曲げ降伏荷重が、単調載荷実験や単調載荷解析と大きく変わらないことを確認した。

③【ゲート横主桁の最大耐力】

鋼 I 桁及びゲート横主桁の最大耐力が、単調載荷実験や単調載荷解析と大きく変わらないことを確認した。

4.2 本検討を踏まえた耐震性能照査の評価方法

非弾性有限変位解析による検討の結果、着目したローラーゲート（モデルダムゲート）については、垂直補剛材が規定を満足しない横主桁に対しても、規定を満足する横主桁と同等の耐震性能（降伏荷重や最大荷重）を有することを確認した。

このことから、垂直補剛材が規定を満足しない横主桁の腹板については、単調載荷による非弾性有限変位解析で局部座屈による力が生じないことを確認した上で、桁の曲げに対する降伏応力度を許容値として評価することができる。と考える。

このようにモデルダムゲートの桁を評価すると、以下のようになり、現行では OK の判定ではない照査結果が OK となる。

【現行】

H23 ダム距離減衰式：73.7N/mm² > 37.1N/mm²
ハイブリッド法：83.4N/mm² > 37.1N/mm²



【見直し】

H23 ダム距離減衰式：73.7N/mm² < 235N/mm²
ハイブリッド法：83.4N/mm² < 235N/mm²

以下にモデルダムゲートの横主桁の耐震性能照査の再評価の具体的内容を示す。

(1) 腹板の局部座屈に対する許容値の設定

非弾性有限変位解析の結果（単調載荷と繰返し載荷の P-δ 曲線）を以下に示す。いずれのケースもフランジの降伏耐力（理論値）以上の耐力を有することが確認された。降伏荷重に達するまでに、一部要素の塑性化や腹板の座屈が発生するものの、後座屈強度等の影響により、耐力は低下しないことが確認された。

以上を踏まえると、ダムゲートの横主桁は、降伏荷重に達するまでは、線形と同等の挙動を示すため、腹板の局部座屈に対する許容値としては、フランジの降伏耐力以下とすればよいものと考えられ、現段階では、降伏荷重とするのが適当と考えられる。

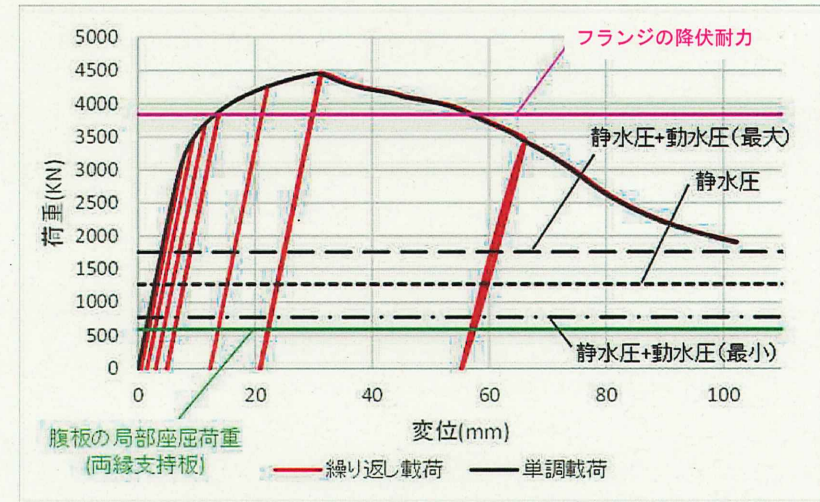


図 4.1 P-δ 曲線

(2) 耐震性能照査の再評価

対象としたダムゲートの横主桁の腹板の局部座屈に対する許容値は σ_y (降伏応力度) とした。すなわち、横主桁の腹板の局部座屈に対する許容値は $\sigma_y = 235 \text{N/mm}^2$ である。

以下に過年度耐震照査の腹板の最大発生応力度、局部座屈に対する許容値、本検討で設定した許容値を示す。

ここに示した過年度耐震照査の腹板の最大発生応力度、局部座屈に対する許容値は、断層帯の地震動（ダム距離減衰式、ハイブリッド法）に対して動的解析により耐震性能照査を実施した結果（【参考】参照）を根拠としたものである。

過年度耐震照査時の腹板の局部座屈に対する許容値は両縁支持板として求めたものであり、現行では許容値は応答値に比べて小さい。これに対して、本検討で FEM 解析により設定した許容値（見直し）は、応答値に対して大きい。

以上の結果、ダムゲートの横主桁の腹板は本検討で設定した許容値を満足するため、所要の耐震性能を有するものと判断した。

表 4.1 ダムゲート横主桁腹板の局部座屈照査

地震動	フランジの応答値	フランジの許容値 (現行)	フランジの許容値 (見直し)	判定
H23 ダム距離減衰式	73.7N/mm ²	37.1N/mm ²	235N/mm ²	OK
ハイブリッド法	83.4N/mm ²	37.1N/mm ²	235N/mm ²	OK

高圧ローラゲートの概要

照査対象となる青蓮寺ダムの高圧ローラゲートの諸元を、表-1.1 に示す。

また、青蓮寺ダムの高圧ローラゲートの概要図を、図-1.1～図-1.4 に示す。

表-1.1 青蓮寺ダム 高圧ローラゲートの諸元

項目	内容	摘要
ゲート形式	圧着式キャタピラゲート	
規模(寸法)	純径間 3.620m × 有効高 3.780m × 2 門	
ゲート敷高	EL.238.737m	
常時満水位	EL.277.000m	
設計水深	H=41.373m(ゲート中心)	常時満水位 - ゲート中心
基礎標高	EL.202.000m	
ゲート総重量	25.0tf	扉体 24.0 tf ローラ部 1.0 tf

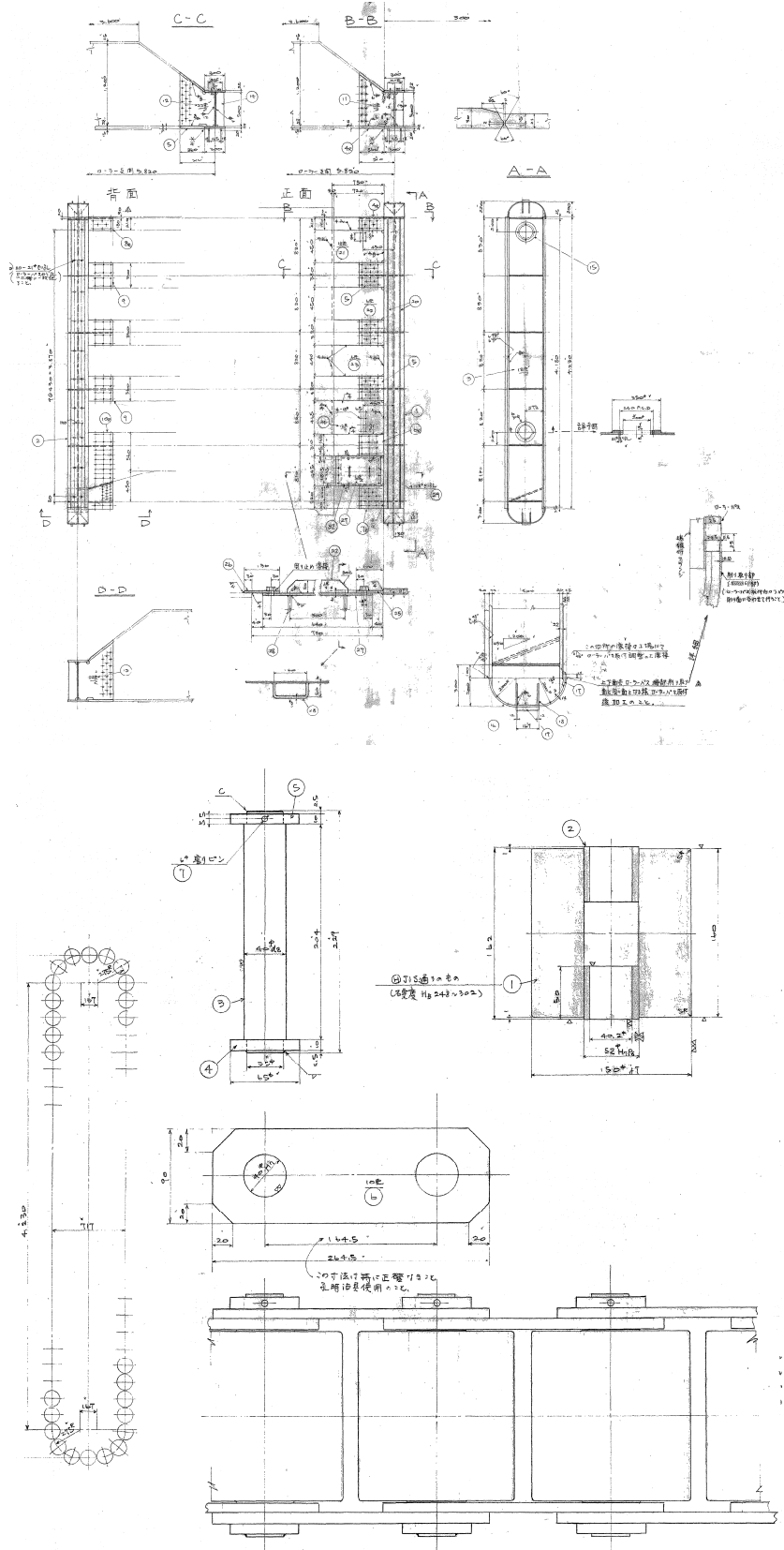


図-1.4 青蓮寺ダム 高圧ローラゲート トレンローラ (キャタピラローラ)