

# 維持管理性に配慮した鋼箱桁中間ダイアフラム 開口形状の標準化に向けた検討

赤松伸祐<sup>1</sup>・青木康素<sup>2</sup>・杉山裕樹<sup>3</sup>

<sup>1</sup> (一財)阪神高速道路技術センター調査研究部調査研究第二課

<sup>2</sup> 技術部技術推進室

<sup>3</sup> 建設・更新事業本部神戸建設所設計課

## 要約

維持管理性に配慮した鋼箱桁中間ダイアフラムの開口形状については、個別の構造条件において検討が進められてきたが、標準化に向けた検討は行われていない。そこで本検討では、ダイアフラムに求められる要件を整理した上で必要と考えられる照査項目を抽出し、連続合成細幅箱桁橋を対象としたケーススタディを行った。

キーワード: 中間ダイアフラム, 開口形状, 維持管理

## 1. はじめに

鋼箱桁の中間ダイアフラムの設計については、道路橋示方書に具体的な手法が示されておらず、「鋼道路橋設計便覧(昭和55年8月)」<sup>1)</sup>(以下、「S55設計便覧」という)に示されている方法が一般的な設計手引きとなっている。S55設計便覧では、直線橋を対象とした検討<sup>2)</sup>から中間ダイアフラムの必要間隔と必要剛度が与えられており、その後も曲線桁等への適用や中間ダイアフラムの設計合理化に向けた検討<sup>3)~6)</sup>が行われているが、基準等には反映されていない。

一方で、近年、維持管理性の重要性が高まっており、鋼箱橋においては、点検等の作業時に箱桁内を頻繁に通過する必要があるため、ダイアフラムに設けられている開口の拡大が求められている。これに対し、阪神高速道路では、個別の構造条件において、FEM解析による性能評価を行った上で、ダイアフラムの開口を拡大している<sup>7,8)</sup>が、標準化に向けた整理はされていない。

中間ダイアフラムは、橋が耐荷性能を発揮するための前提として要件が定められているが、その要件を検証するために必要な照査項目が明確ではない。そのため、拡大開口を有する中間ダイアフラムの設計手法を標準化するためには、要件を満足するために必要と考えられる照査項目を列挙した上で、設計上クリティカルとなる項目を抽出する必要がある。

そこで、ここでは、拡大開口を有する中間ダイアフラムの設計手法の標準化に向けて、平成29年

11月に改定された道路橋示方書・同解説<sup>9)</sup>(以下、「H29道示」という)において、中間ダイアフラムに求められる要件を確認した上で、各要件を検証するために必要と考えられる照査項目を列挙する。また、照査項目のうち、桁およびダイアフラム断面の設計でこれまでに抽出してきた代表的な応答に着目し、連続合成細幅箱桁橋において中間ダイアフラムの開口形状を変化させて、列挙した項目が照査の必要があるかどうか試行的に検討した。

## 2. 設計手法の標準化に向けた検討手順

拡大開口を有する中間ダイアフラム開口の設計手法の標準化に向けた検討手順を以下に示す。

- 1) ダイアフラムに求められる要件の確認: H29道示における橋の性能、要求性能を照査法方を確認した上で、ダイアフラムに求められる要件を確認する。
- 2) 要件を満たすために照査してきた項目の整理: S55設計便覧に示されている一般的な設計手法によって照査されている項目を整理する。
- 3) 要件を検証するための照査項目の列挙: 中間ダイアフラムに求められる要件に対応する現象を具体化し、その照査項目を列挙する。
- 4) モデル橋を対象としたケーススタディ: モデル橋を対象としたケーススタディにより、開口形状が桁およびダイアフラム断面の設計でこれまでに照査してきた代表的な応答に及ぼす影響を分析する。

### 3. 中間ダイアフラムに求められる要件

橋の性能は、H29道示 I 共通編の“用語の定義”に規定されており、「橋の耐荷性能や耐久性能、その他使用目的との整合性を満足するために必要な性能から構成される一連の性能」としている。また、図-1に示すように、耐久性能は、耐荷性能の前提と位置付けられている。

橋の耐荷性能を照査するにあたって、橋全体をシステムとして捉えて橋の限界状態を評価する方法に標準的な考え方は確立されていない。そのため、図-2に示すように、部材等の限界状態で橋の限界状態を代表させる構成となっている。

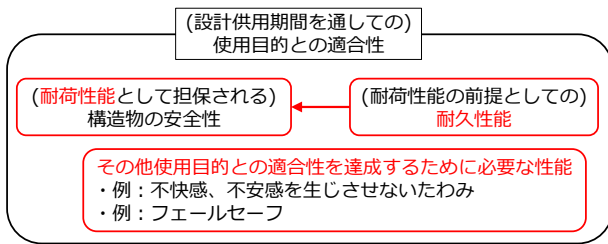


図-1 H29道示に規定される橋の性能の定義

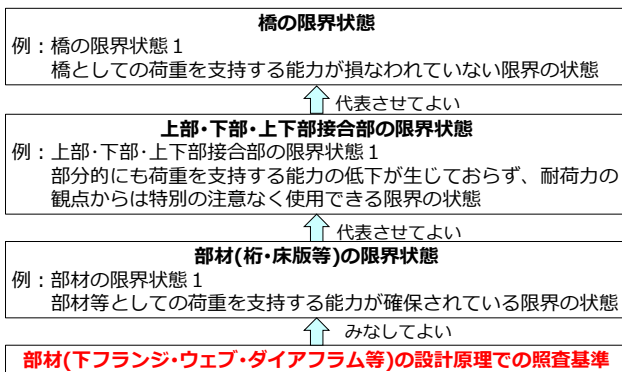


図-2 橋の限界状態と部材の限界状態(耐荷性能)の関係

#### (1) 耐荷性能

鋼桁は、荷重の増加に対して、フランジや腹板の降伏や座屈、鋼桁の横倒れ座屈等により、可逆性を失ったのちに、桁の著しい変形が生じたり、最大強度に達することから、鋼桁が可逆性を有する限界の状態を鋼桁の限界状態1、荷重を支持する能力が大きく低下するような変形又は鋼桁の最大強度点を鋼桁の限界状態3と捉えている。この鋼桁の限界状態1を超えないとみなす前提として、13.9に“ダイアフラム等による補剛”が規定されており、「箱型断面の鋼桁の設計にあたっては、ダイアフラム等の補剛により断面形状が保持できる構造とするとともに、集中力の作用点では力の伝達が確実となるようにする。」とされている。ただし、具体的な設計設計法については、解説文においてS55設計便覧を参考としている。

#### (2) 耐久性能

耐久性能に係る鋼橋の主たる損傷形態は、鋼部

材の腐食と疲労、鉄筋コンクリート床版の損傷及び支承や伸縮装置の破損となっている。そのため、H29道示において、鋼部材の耐久性能については、「経年的な劣化として、少なくとも鋼材の腐食及び疲労は考慮しなければならない。」とされている。

また、耐久性能は、耐荷性能の前提条件であり、橋の設計供用期間中の更新を前提としない鋼部材の設計耐久期間は橋の設計供用期間(100年)とされている。

### 4. 要件を満たすために照査してきた項目

前述のように、鋼箱桁橋の中間ダイアフラムについては、従前より道示には具体的な設計手法が示されておらず、S55設計便覧に示されている手法で一般的な設計が行われてきている。

S55設計便覧において、ダイアフラムの効果は、①断面形状を保持する、②剛性を増大させ、応力を減少させる、③局部集中荷重を円滑に桁に伝える、でとあり、特に①に着目して、式(1)及び式(2)により、必要間隔と必要剛度の照査式を与えている。

$$\left. \begin{aligned} L_D &\leq 6 \quad (L_u \leq 50) \\ L_D &\leq 0.14L_u - 1 \quad (L_u \geq 50) \end{aligned} \right\} (1)$$

ただし、 $L_D \leq 20$

$L_D$ : ダイアフラムの間隔(m)

$L_u$ : 等分布荷重に対する等価支間長(m)

$$K \geq 20 \frac{EI_{DW}}{L_D^3} \quad (2)$$

$K$ : ダイアフラムの剛性(kNm)

$L_D$ : ダイアフラムの必要間隔(m)

$I_{DW}$ : 箱桁の断面変形に対するずり定数(m<sup>6</sup>)

$E$ : 鋼のヤング係数(kN/m<sup>2</sup>)

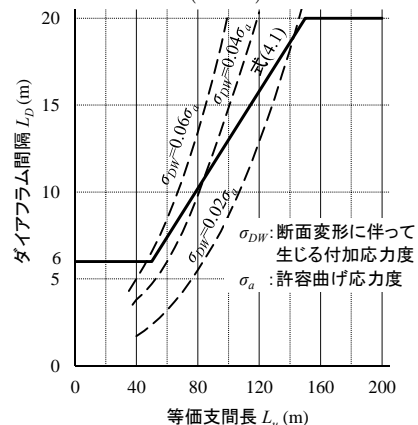


図-3 ダイアフラムの間隔

この照査式は、剛なダイアフラムをある程度密に配置すれば箱桁のラーメンの剛性の影響がほとんどなくなり、ダイアフラムの面内剛性を考慮すれば十分であるとして提案されたBEAMアナロジーを適用し、鋼床版単室箱桁に偏心活荷重を載荷させた場合の断面変形に伴うずり応力(主桁フランジ

に作用する二次応力)に着目して規定されている。

具体的には、幅員方向に1/2の活荷重を偏載させたときに生じるずり応力が許容応力度の2～6%程度になるように設定された式である。ずり応力が最大となる載荷状態と活荷重応力が最大となる載荷状態は異なるが、支間長が長くなると死荷重応力の割合が大きくなるため、図-3に示すように、支間長が大きいところではずり応力度を許容応力度の2%程度とし、支間長が短いところではずり応力度を許容応力度の6%程度としている<sup>1)</sup>。また、局部荷重を円滑に桁へ伝達するために、横桁及びブラケット取り付け部には中間ダイアフラムの設置を義務付けている<sup>1)</sup>。

鋼部材の耐久性能について、S55便覧において照査は規定されていない。

## 5. 要件を検証するためのアプローチ手法

3章に整理したダイアフラムに求められる要件を具体化し、各要件に対応する現象とその現象に対して必要と考えられる照査項目を抽出した。

耐荷性能に関して、S55設計便覧では、箱断面の変形によるずり応力が主桁フランジ応力に影響を及ぼさないように必要間隔と必要剛度が規定されており、ずり応力を付加した主桁フランジの降伏・座屈を照査してきたといえる。箱断面形状を保持するためにはダイアフラム自体の剛度を照査する必要があるが、この照査によって設計された中間ダイアフラムを有する鋼桁が耐荷性能上問題となっていないことから、結果的に必要剛度を満足してきたと考えられる。ここでは表-1に示すように、中間ダイアフラムに求められる要件に対して、ダイアフラムの面内座屈・面外変形、主桁フ

ランジおよびウェブの降伏・座屈が生じないようにする必要がありと考えて照査項目を抽出した。

耐久性能に関して、S55設計便覧では照査が規定されていないが、耐荷力を減少させないためには、表-2に示すように、少なくとも鋼材の疲労損傷を防ぐ必要があると考えて照査項目を抽出した。主桁系溶接部の疲労に対しては、ダイアフラム剛度の変化に伴う付加応力を考慮した主桁の一次応力に対する溶接部の疲労照査が必要であると考えた。また、ダイアフラムの疲労に対しては、切欠き形状に起因する応力集中部、縦リブ交差部の溶接部およびダイアフラム補剛材取付け部の疲労を照査項目として抽出した。

## 6. モデル橋を対象としたケーススタディ

### (1) 対象橋梁と検討構造

検討対象橋梁を図-4に示す。検討対象橋梁は、阪神高速で作成中である標準図のモデル橋とした。橋長は約180m、幅員は27.25mの3径間連続合成細幅箱桁橋の直橋である。床版形式は厚さ130mmの超高強度繊維補強コンクリート床版であり、2.5m間隔で配置された横リブを床版支間とする構造である。また、主桁本数は3本であり、主桁断面はウェブ高2.5m、フランジ幅1.5mである。

検討対象とするダイアフラム開口形状は、以下の通りとした。

#### a) 標準的な開口形状(図-5(a))

標準的な開口の形状は、高さ1300mm×幅500mmであり、下フランジから開口下端までの立ち上がり高さは500mmである。

#### b) 維持管理に配慮した拡大開口形状(図-5(b))

拡大開口形状の形状は、補修時における箱内へ

表-1 鋼桁の耐荷性能の観点からダイアフラムに求められる要件と照査項目(案)

中間ダイアフラムに求められる要件	対象とする現象	照査項目(案)
断面形状を保持することによって、フランジやウェブの降伏や座屈による桁の著しい変形を防ぐ	ダイアフラムの面内座屈	ダイアフラムの最大せん断応力度 ダイアフラム補剛材の垂直応力度 ダイアフラム開口フレット部のミーゼス応力
	ダイアフラムの面外座屈	主桁ウェブ間のずれ量 ダイアフラムの板曲げ応力度
	主桁フランジの降伏・座屈	ずり応力を付加したフランジ応力度
	主桁ウェブの降伏・座屈	ウェブのせん断応力度 ウェブの合成応力度
集中力作用点での力の伝達を確実にする	ダイアフラムの配置	横桁及びブラケット位置との整合性
	ダイアフラムの座屈	ダイアフラムと補剛材の垂直応力度

表-2 鋼部材の耐荷性能の観点からダイアフラムに求められる要件と照査項目(案)

中間ダイアフラムに求められる要件	対象とする現象	照査項目(案)
鋼材の疲労によって、ダイアフラムの耐荷力を減少させない	主桁系溶接部の疲労	ダイアフラム剛度の変化に伴う付加応力を考慮した主桁の一次応力に対する溶接部の疲労照査
	ダイアフラムの疲労	切欠き形状に起因する応力集中部の疲労照査 縦リブ交差部の溶接部の疲労照査 ダイアフラム補剛材取付け部の溶接部の疲労照査
鋼材の腐食によって、ダイアフラムの耐荷力を減少させない	—	箱断面内に配置される部材であるため、照査不要

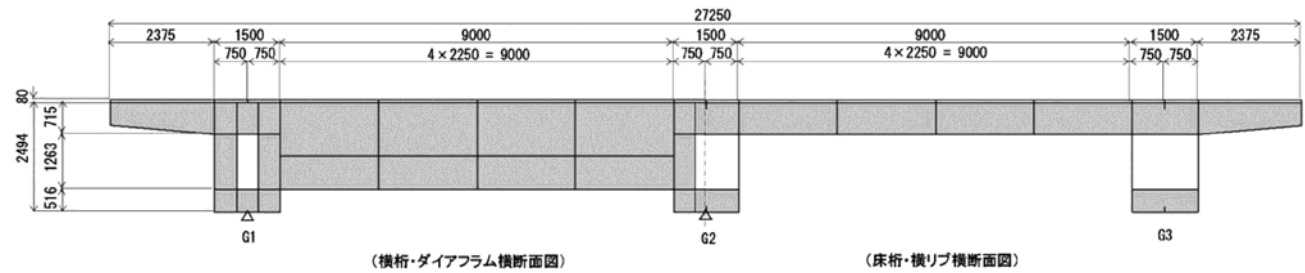
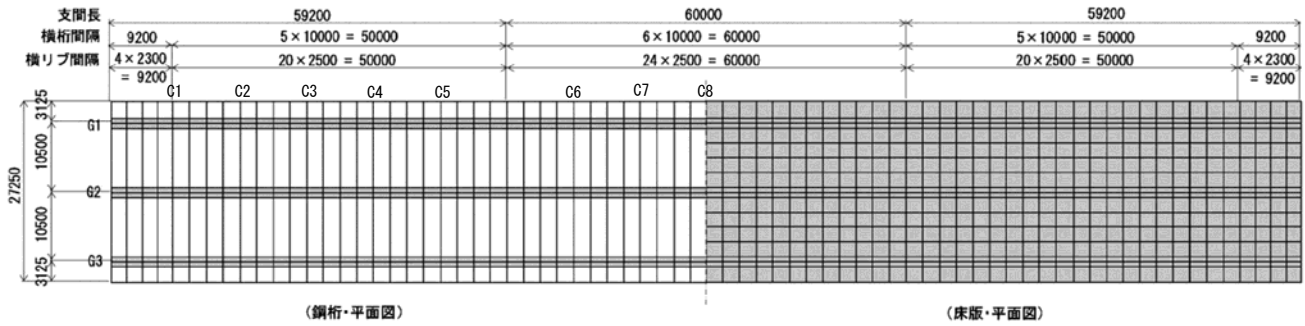
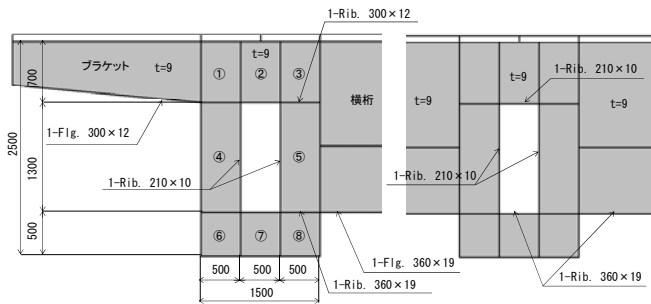
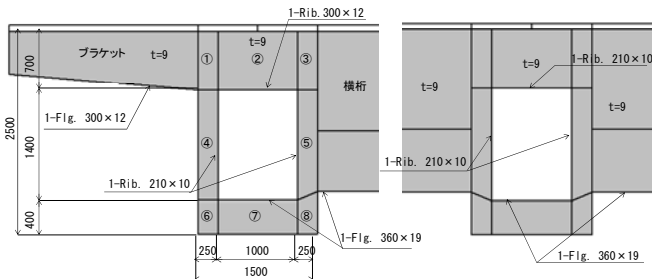


図-4 検討対象橋梁



(a) 標準的な開口形状(ケース 1)



(b) 維持管理に配慮した拡大開口形状(ケース 2)  
図-5 中間ダイアフラムの開口形状

の機材搬入等の作業性を考慮し、高さ1400mm×幅1000mmとした。また、下フランジから開口下端までの立ち上がり高さは、箱内移動時の負担軽減のために400mmとした。

## (2) 照査項目

表-1及び表-2に示した照査項目(案)の設計での照査の必要性を検討するため、本稿ではまずこれまでの設計で抽出してきた代表的な項目に着目して応答を抽出した。

具体的には、フランジの降伏・座屈に対する照査項目として抽出したフランジに付加されるずり応力度と、ダイアフラムの面内座屈に対する照査として抽出した3つの照査項目(ダイアフラムの最

大せん断応力度・ダイアフラム補剛材の垂直応力度・ダイアフラム開口フィレット部のミーゼス応力)について、ケース1とケース2の応答値を抽出して比較を行った。

## (3) 検討モデル

フランジに付加されるずり応力度、ダイアフラムのせん断応力度およびダイアフラム補剛材の垂直応力度については、一定せん断流パネル要素を用いた全体形立体骨組みモデル<sup>10)</sup>(以下、「せん断パネルモデル」という)を用いた。また、ダイアフラム開口フィレット部の応力は、せん断パネルモデルで把握できないため、着目部位を抽出した上で、FEモデルを用いた。

## (4) 主桁フランジの降伏・座屈に対する照査

主桁フランジの降伏・座屈に対する照査として、箱断面の変形に伴ってフランジに付加される応力度を抽出した。荷重の荷重状態は、図-6に示すように、橋体のねじり荷重が最大となるように、各径間の橋梁中心線から片側にB活荷重を偏心荷重した。

G2桁における橋軸方向のずり応力分布図を図-7に示す。上フランジは床版により拘束される影響でずり応力が小さいため、下フランジのずり応力に着目した。応力分布図からは、ケース1とケース2の顕著な違いは確認できない。

また、どちらのケースにおいても、ずり応力度が最大15N/mm<sup>2</sup>程度発生しているが、主桁のねじりモーメントが最大となるような活荷重の荷重状態は、主桁の曲げモーメントが最大になる荷重ケースと異なるため、主桁の断面設計には影響を及ぼさないと考えられる。

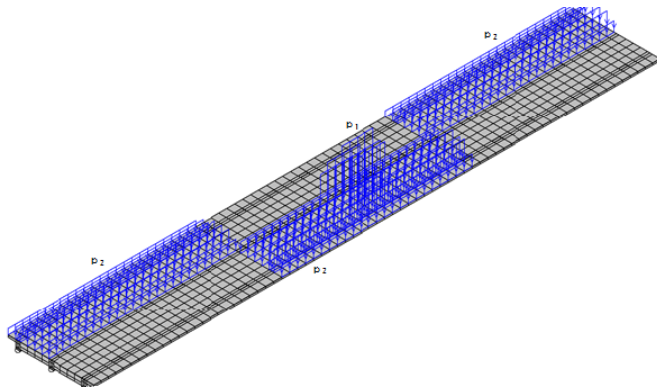
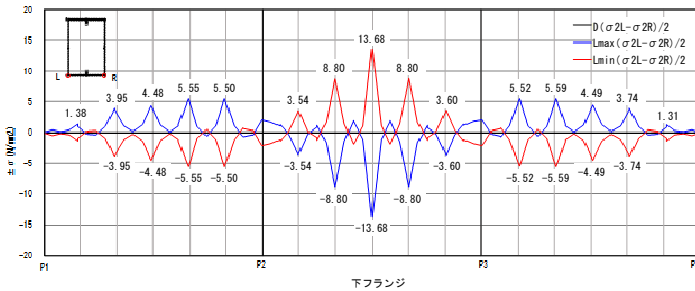
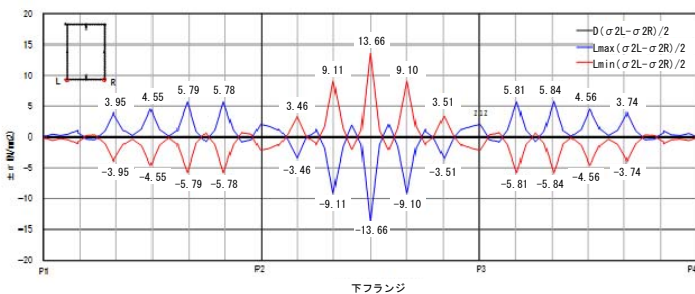


図-6 B活荷重の載荷状態



(a) 標準開口形状(ケース1)



(b) 拡大開口形状(ケース2)

図-7 G2桁下フランジのずり応力分布図

(5) ダイアフラムの面内座屈に対する照査

a) ダイアフラムの最大せん断応力度

ケース1およびケース2のダイアフラムの最大せん断応力を表-3に示す。ダイアフラムの最大せん断応力は、ほぼ全てのパネルにおいてケース1よりケース2のほうが大きくなる傾向があり、その増加量は最大で15N/mm<sup>2</sup>程度であった。今回の対象は直橋かつ道示の最小板厚規定に市場性を考慮した厚み(t=9mm)であったため、板厚には影響を及ぼさなかったが、増加率では2倍を超えるパネルも見られており、拡大開口を適用する場合には照査が必要な項目と考えられる。

b) ダイアフラム補剛材の垂直応力度

ダイアフラム補剛材の垂直応力度を表-4に示す。垂直補剛材の応力度は増加しており、その増加量は最大で50N/mm<sup>2</sup>程度であった。増加率は1.5倍程度であり、拡大開口を適用する場合には照査が必要と考えられる。水平補剛材については、発生応力度に差はほとんど見られなかった。

c) フィレット部の応力に及ぼす影響

ダイアフラム開口フィレット部の応力状態については、ずり変形による応力度が大きいG1桁C3ダイアフラムを抽出してFEM解析により、影響を分

表-3 ダイアフラムの最大せん断応力度

部位		板厚 t(mm)	最大せん断応力度 τ(N/mm <sup>2</sup> )		
桁	パネル		ケース1	ケース2	ケース2 /ケース1
G1桁 第2 径間 支間 中央 C8	①	9	18.8	24.4	1.29
	②		38.1	30.2	0.79
	③		15.4	22.4	1.45
	④		27.5	36.8	1.34
	⑤		31.1	43.8	1.41
	⑥		16.1	38.9	2.42
	⑦		25.5	25.8	1.01
	⑧		22.8	38.3	1.68

表-4 ダイアフラム補剛材の垂直応力度

部位			断面 (mm)	垂直応力度 σ(N/mm <sup>2</sup> )		
部材	桁	節点		ケース1	ケース2	ケース2 /ケース1
垂直 補剛材	G1	C1	210× 10	-48.3	-67.2	1.39
		C2		-59.5	-88.8	1.49
		C3		-64.5	-97.6	1.51
		C4		-62.8	-94.1	1.50
		C5		-56.4	-81.4	1.44
		C6		-57.2	-82.6	1.44
		C7		-61.9	-94.1	1.52
		C8		-66.9	-102.1	1.53
上側 水平 補剛材	G1	C1	300× 12	-43.7	-40.5	0.93
		C2		-46.0	-42.3	0.92
		C3		-46.3	-42.4	0.92
		C4		-45.7	-41.7	0.91
		C5		-45.9	-42.6	0.93
		C6		-43.7	-44.3	1.01
		C7		-46.4	-42.4	0.91
		C8		-46.4	-42.3	0.91
下側 水平 補剛材	G1	C1	360× 19	22.0	17.7	0.80
		C2		37.5	31.7	0.85
		C3		40.4	36.1	0.89
		C4		38.6	34.1	0.88
		C5		34.4	30.3	0.88
		C6		35.1	30.8	0.88
		C7		39.0	34.5	0.88
		C8		42.0	37.0	0.88

析した。FEM解析は、汎用有限要素解析プログラムFEMAP with NX Nastranを用いた弾性解析とした。モデル化の範囲は、図-8に示すように対象ダイアフラム前後の1格点を対象とし、コンクリート床版はソリッド要素、鋼部材はシェル要素でモデル化

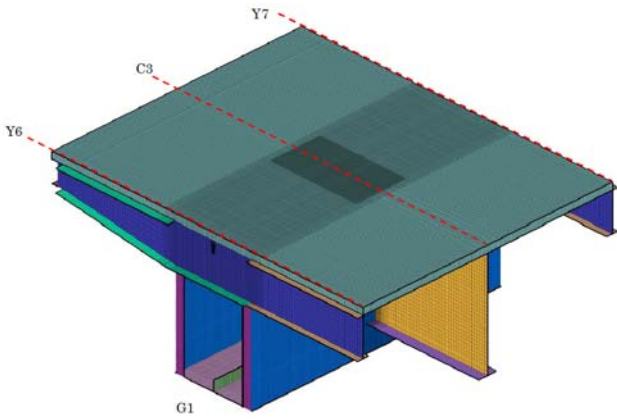


図-8 解析モデル図

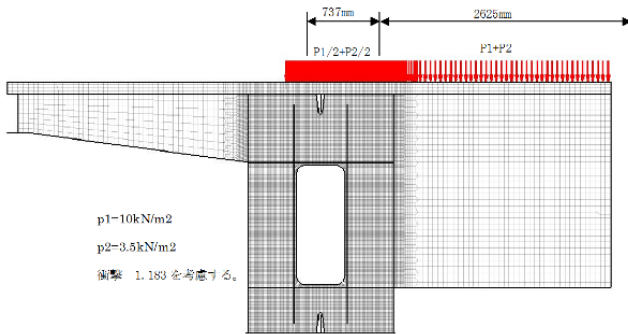


図-9 活荷重の载荷状態

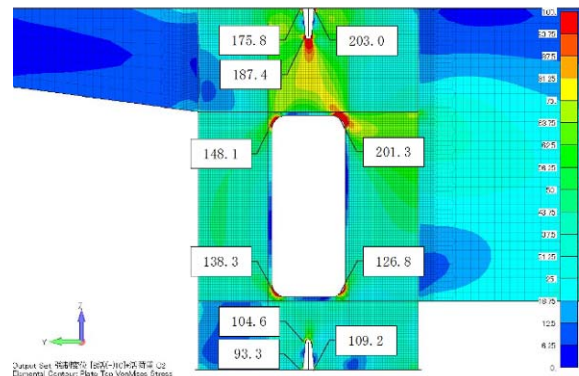
した。活荷重は、図-9に示すように、せん断パネルモデルによって算出した箱断面の最大ずり変形を再現する载荷状態を特定して载荷させた。

FEM解析から得られたVon mises応力分布を図-10に示す。開口周りの応力に着目すると、母材R部に応力集中が見られ、応力集中部の最大値は、全てコーナー部においてケース2がケース1より1.3~1.6倍程度大きくなった。弾性解析のため得られた応力を絶対評価すること、また応力集中部の最大値を評価することは難しいが、ケース2ではフィレット部に降伏点を越える局所的な応力が発生していることや、横桁にまで応力集中の影響が及んでいることを考慮すると、むやみに開口形状を大きくすることは危険であると言える。

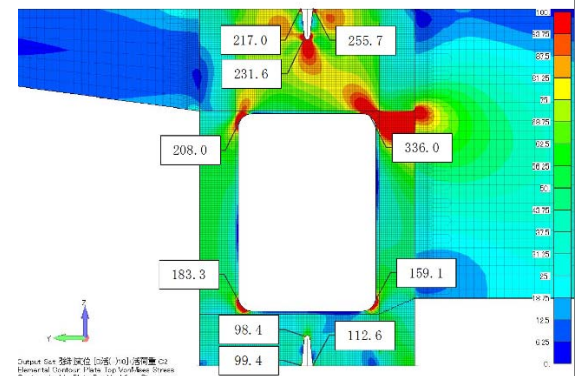
## 7. まとめ

橋の性能、桁の限界状態からダイアフラムに求められる要件と各要件を検証するために必要と考えられる照査項目を抽出した。また、直橋を対象としたケーススタディから、これまで抽出してきた代表的な応答に着目して拡大開口の影響を分析したところ、ダイアフラムの最大せん断力や垂直補剛材の垂直応力度に増加傾向が見られた。また、開口フィレット部に局所的な応力が見られたことから、将来的に設計での照査項目となりえる可能性がある。

今後、今回分析できなかった項目に対して応力性状に及ぼす影響分析を進めるとともに、曲線橋を対象とした同様の検討を実施したい。



(a) 標準開口形状(ケース1)



(b) 拡大開口形状(ケース2)

図-10 Von mises応力図

## 参考文献

- 1) 社団法人日本道路橋会：鋼道路橋設計便覧，昭和55年8月
- 2) 坂井藤一，長井正嗣：鋼箱桁橋の中間ダイアフラム設計法に関する一試案，土木学会論文報告集，No.261，pp.21-34，1977.5
- 3) 坂井藤一，長井正嗣：曲線鋼箱桁橋の中間ダイアフラム設計法に関する一提案，土木学会論文報告集，No.305，pp.11-22，1981.1
- 4) 中井博，村上泰男：ダイアフラムを有する曲線箱桁橋のずり応力の解析と設計への応用，土木学会論文集，No.309，pp.25-39，1981.5
- 5) 小松定夫，長井正嗣：中間ダイアフラムの新しい設計法に関する研究，土木学会論文報告集，No.326，pp.51-62，1982.10
- 6) 田中賢太，酒井修平，若林大，長井正嗣：鋼箱桁の維持管理を考慮した中間ダイアフラムの設計手法に関する検討，鋼構造論文集，第21巻第81号，2014年3月
- 7) 石井博典，篠原聖二，杉山裕樹，金治英貞，金澤宏明，長井正嗣：維持管理作業性に配慮した鋼箱桁ダイアフラム開口形状の設計と解析的検証，鋼構造論文集，第21巻第83号，2014.9
- 8) 杉山裕樹，小林寛，石井博典，長井正嗣：維持管理性に配慮した鋼箱桁中間支点上ダイアフラムの開口形状の検討，第70回年次学術講演会，I-612，2015.9
- 9) 日本道路橋会：道路橋示方書・同解説（I 共通編，II 鋼橋編），丸善，2017.11
- 10) 国土技術政策総合研究所資料：鋼道路橋の合理的な設計解析手法に関する研究—一定せん断流パネルを主体とした鋼道路橋の設計手法—，国総研資料第841号，2015.3