

## 鋼二主箱桁橋への CFT 補剛材の適用に関する数値解析的研究

### NUMERICAL STUDY ON APPLICATION OF CFT STIFFENERS TO STEEL TWIN BOX GIRDER BRIDGES

構造及びコンクリート工学分野 下津隆介

Structural and Concrete Engineering Ryusuke SHIMOTSU

鋼二主箱桁橋の支点上の補剛材には経済性、施工性、維持管理性について改善すべき点が認められる。本研究では支点上補剛材の代替として CFT 部材に着目した。しかし、CFT 部材を支点上補剛材に適用する設計法は存在しない。そのため、本研究では 3 次元数値解析により、従来の補剛材と CFT 補剛材を比較し、それぞれの補剛材の応力性状を明らかにした。数値解析で得られた知見をもとに今後 CFT 部材を補剛材として適用する際に検討すべき事項を明らかにした。

Diaphragm's stiffeners in steel box girder bridges have some aspects to be improved in terms of economy, workability and maintainability. Instead of them, therefore, CFT stiffeners are proposed here in. However, there is no design method for applying the CFT stiffener. In this study, the conventional stiffeners are compared with the CFT stiffener by three-dimensional numerical analysis and their stress properties of each stiffener are examined. Based on the numerical analysis, things to be considered when applying the CFT stiffener are discussed.

#### 1. 研究背景と目的

鋼箱桁橋の支承部上では反力によるダイアフラムの座屈を防ぐために厚板材で構成された複数の補剛材が配置されている。この補剛材は、道路橋示方書<sup>1)</sup>に基づき許容応力度設計により、設計されている。この時、設計荷重としては常時は死荷重と活荷重、一方、非常時は死荷重と地震時水平力による曲げモーメントを考えている。地震時水平力(橋軸方向作用)作用時の支承上端に作用する曲げモーメントを主桁へ円滑に伝えるため地震時補強リブを設けている(図-1.1)。このような複雑な補剛材配置のため溶接箇所が多く施工性が低い。また狭隘な構造になっているため雨水やごみの堆積による鋼材腐食などの問題を抱えている。また阪神淡路大震災以降、橋の支承は免震のためにゴム支承を使用しており、支持面積が大きい。そのため補剛材の断面が大きくなり、鋼重が大きくなり経済性を高め、改善すべき点が認められる。本研究では施工性、維持管理性および経済性の向上を目指し、従来の複数の厚板要素に代えて、CFT(Concrete Filled Steel Tube:コンクリート充填鋼管)部材を補剛材に適用する。CFT 補剛材は既設の橋梁を補修するために用いるのではなく主に新設の橋梁の支承部に対して用いることを想定している。

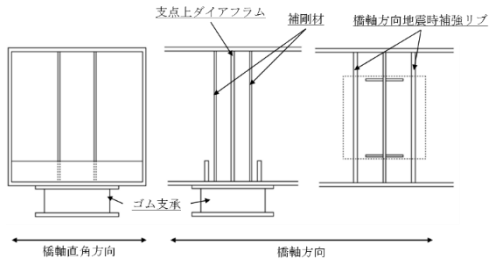
CFT 部材とは鋼管の内部にコンクリートを充填した

合成部材であり、鋼とコンクリートの合成作用により、耐荷力と変形性能に優れている<sup>2)</sup>。

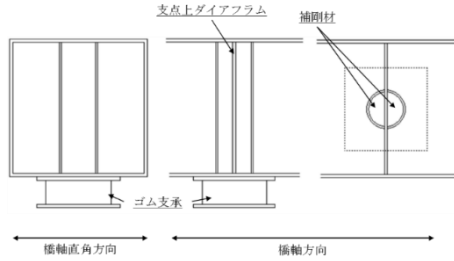
図-1.1、図-1.2 より CFT 補剛材にすることで支承部の補剛構造が単純化されている。また鋼重や、溶接箇所の減少といった経済性、ひいては施工性の向上、さらに構造の単純化による維持管理性の向上も期待できる。本研究ではコンクリート充填鋼管構造設計施工指針<sup>2)</sup>に基づき、CFT 部材を支点上ダイアフラムの補剛材としての使用を想定して試設計を行なった。試設計において CFT 補剛材の有用性が明らかになったため、CFT 補剛材を導入するためにより詳細な検討をする。3 次元有限要素解析ソフト DIANA<sup>3)</sup>を用いて支承部近傍をモデル化し、設計荷重を作用させ、そのときの応力性状を把握することを目的とする。鉛直方向応力に加え、Mises 応力を用いることで三次元的に応力集中などの性状を把握する。

#### 2. 研究対象

本研究で対象とする構造物は図-2.1 に示すような一般的な二主桁の狭小箱桁橋である。図-2.1 の P12B 橋脚上部の支点部に着目し、数値解析モデルを作成した。桁の断面は図-2.2 のように桁高 2700mm、



(a)断面図 (b)側面図 (c)上面図  
図-1.1 従来の補剛材



(a)断面図 (b)側面図 (c)上面図  
図-1.2 CFT 補剛材

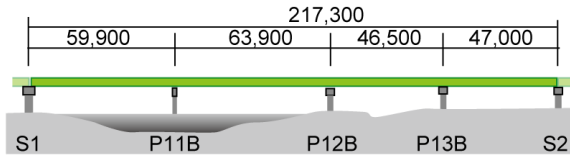


図-2.1 対象橋梁側面図 (単位:mm)

ウェブ間隔 1200mm で下フランジ下部にはウェブの全幅にソールプレートが配置されている。これを対象に常時の設計荷重 (鉛直方向力: 6010kN), 非常時の設計荷重 (鉛直方向力: 4071.9kN 地震時水平力: 1823.5kN) を作用させた数値解析モデルを作成する。

### 3. 常時の解析

ダイアフラムと補剛材に死荷重と活荷重からなる設計荷重を作用させたモデルについて数値解析を行う。

#### 3.1 解析モデル

解析モデルは図-3.1のように桁の長さの異なる  $L=8400\text{mm}$  と  $L=17860\text{mm}$  の2種類のモデルをそれぞれ従来の補剛材を有するモデルと CFT 補剛材を有するモデルの計4ケースのモデルを作成した。CFT 補剛材は許容応力度設計により断面を決定した。常時の作用は死荷重と活荷重を足した鉛直荷重である。これを再現するために、図-3.1の赤い矢印のように強制変位を、青い矢印のように反力を生じるような境界条件とした。桁の長さの決定方法を以下に述べる。 $L=8400\text{mm}$ のモデルは支点部の柱としての挙動を把握するために桁高 (2650mm) の約3倍の桁の長さとした。 $L=17860\text{mm}$ のモデルは設計最大負曲げモーメント時に支点反力が最大になるようにモデルの長さを設定した。

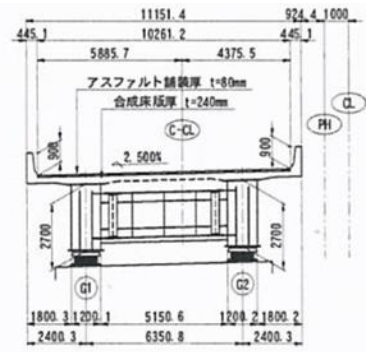
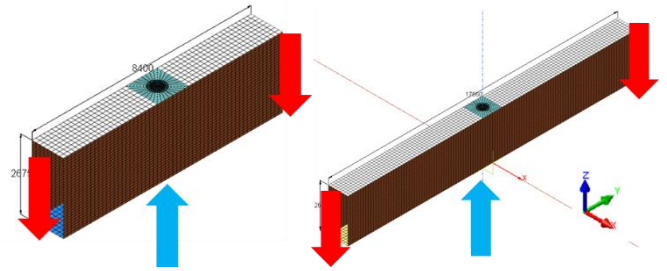


図-2.2 P12B 支点部での上部工断面図



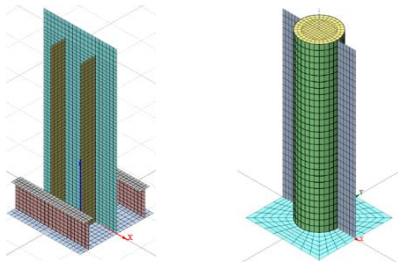
(a) $L=8400\text{mm}$  (b) $L=17860\text{mm}$

図-3.1 解析モデル外形

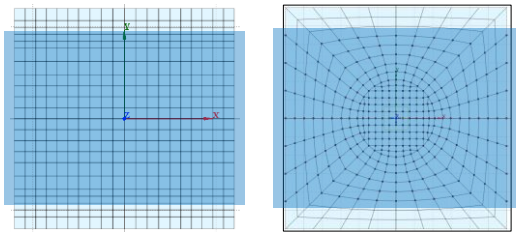
表-3.1 部材寸法

	板厚[mm]	長さ[mm]	幅[mm]
上フランジ	24	(8400or17860)	1200
下フランジ	26	(8400or17860)	1200
ウェブ	17	2650	(8400or17860)
ダイアフラム	19	2650	1200

解析モデルのダイアフラム、補剛材の配置は図-3.2のようになっている。従来の補剛材と CFT 補剛材の数値解析モデルにおいて上フランジ、下フランジ、ウェブ、ダイアフラムの寸法は共通であり、表-3.1にその寸法を示す。従来の補剛材の垂直補剛材、橋軸方向地震時補強リブ、CFT 補剛材の寸法はそれぞれ表-3.2、表-3.3の通りである。各部材に初期不整は考慮していない。その理由は、従来の補剛材において板厚と幅の関係から座屈が起こらないような部材を用いている。同様に CFT 柱にも幅厚比制限 ( $D/t=109$ ) が設けられており、座屈しないような断面を用いている。続いて数値解析モデルの荷重条件、境界条件について以下に述べる。荷重は桁の両端に鉛直下方の強制変位を与えた ( $z$  軸方向)。境界条件は下フランジ中央部 (図-3.3) の青で示した部分の節点で  $z$  軸並進拘束し、中心節点は固定とした。解析モデルの要素は鋼材、鋼管は曲面シェル要素でそれぞれ SM490Y, STK490 の材料を使用する。コンクリートはソリッド要素で圧縮強度  $40 [\text{N}/\text{mm}^2]$  とした。充填コンクリートの構成則は引張には HORDYK, 圧縮には THORENFELDT を用いている。鋼材は完全弾塑性体とし、Von-Mises の降伏条件を用いている。



(a)従来の補剛材 (b)CFT 補剛材  
図-3.2 支点部近傍の部材配置



(a)従来の補剛材 (b)CFT 補剛材  
図-3.3 解析モデル境界条件

表-3.2 従来の補剛材寸法

		板厚[mm]	高さ[mm]	幅[mm]
鉛直補剛材		22	2400	239.5
橋軸方向地震 時補強リブ	フランジ	14	1200	150
	ウェブ	17	400	1200

表-3.3 CFT 補剛材寸法

鋼管			
鋼管径[mm]	管厚[mm]	高さ[mm]	径厚比
700	8	2650	87.5
充填コンクリート			
直径[mm]	高さ[mm]		
692	2650		

### 3.2 解析結果

#### 1) 鉛直反力-鉛直方向変位関係

モデル全体の鉛直力に対する挙動を比較する。全てのモデルにおいて反力が 6010kN（常時の作用=死荷重+活荷重）に達する時、グラフは線形であり、十分に安全であると考えられる。図-3.4 の●は最大荷重近傍を表している。

#### 2) 鉛直方向応力

常時の照査項目である鉛直方向応力度について結果をまとめる。ここで示している図は全て鉛直反力-鉛直方向変位関係で反力が 6010kN のときのものを用い、常時の性状を把握する。常時荷重（6010kN）が作用したときのダイアフラムの鉛直方向応力コンター図を図-3.5~3.6 に示す。図-3.5 の赤線は鋼管の位置、図-3.6 の赤線は補剛材の位置をそれぞれ示している。図-3.5、3.6 より CFT 補剛材を有するモデルでは大半の部分が -35.5[N/mm<sup>2</sup>]となっており従来の補剛材を有するモデルでは -50[N/mm<sup>2</sup>]が大半の部分を占めている。これは SM490Y の許容圧縮応力度 210[N/mm<sup>2</sup>]よりも小さい値

である。

鋼管の鉛直方向応力コンター図を図-3.7 に示す。図-3.7 より L=8400mm, L=17860mm のモデルともに、大半の部分の圧縮応力が 35.5[N/mm<sup>2</sup>]程度となっている。これは鋼管の許容圧縮応力度 216.7[N/mm<sup>2</sup>]よりも小さい値である。充填コンクリートについては図-3.8 より大半の部分の圧縮応力が 8[N/mm<sup>2</sup>]以下となっている。これはコンクリートの許容圧縮応力度 13.3[N/mm<sup>2</sup>]よりも小さい値である。また、従来の補剛材では L=8400mm, L=17860mm のモデルともに大半の部分の圧縮応力が 30[N/mm<sup>2</sup>]程度となっている。これは SM490Y の許容圧縮応力度 210[N/mm<sup>2</sup>]よりも小さい値である。

以上のことから CFT 補剛材と従来の補剛材の各モデルにおいて常時荷重作用時に各部材が許容応力度以下となっていることから CFT 補剛材は従来の補剛材に替えて適用可能である。

#### 3) 荷重の分担率

支点反力を部材ごとにどの程度分担しているかを調べるために部材毎の荷重分担率を算出した。モデル高さ 1/2 の位置の要素の鉛直方向応力に断面積を掛けて、軸力を算出した。部材毎の軸力を全体の軸力で割ることで各部材の荷重分担率を算出した。図-3.10 より荷重の合計値は作用荷重 6010kN のほぼ 1/2 となっている。従来の補剛材では補剛材の分担率は 20%程度、ダイアフラムの分担率が 15%程度となっている。CFT 補剛材では CFT 部材の分担率は 30%程度、ダイアフラムの分担率が 10%程度となっている。

#### 4) 補剛材の Mises 応力、最小主応力

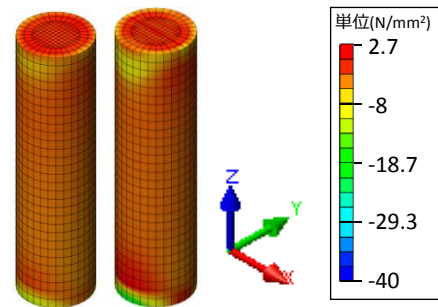
設計における支点上補剛材は両端固定の柱として設計されているが実際は軸方向力のみではなく桁曲げによる影響が考えられる。そのため Mises 応力を用いて、従来の厚板補剛材、CFT 補剛材の鋼管、ダイアフラムのそれぞれの部材が作用荷重時に降伏している箇所の存在、応力集中の有無について確認する。

図-3.11 より L=8400mm, L=17860mm のモデルともに大半の部分の応力が 88.8[N/mm<sup>2</sup>]以下となっており、部材として安全である。L=17860mm のモデルでは補剛材下部に応力集中が見られる。これは、支点反力による圧縮応力に加え下フランジの曲げによる橋軸方向圧縮応力の影響が大きいからであると考えられる。

CFT 補剛材を有するモデルについては図-3.12 より L=8400mm, L=17860mm のモデルともに鋼管、ダイアフラムの応力は降伏点に対して十分に小さい値である。図-3.12(b)を図-3.11(b)と比較すると鋼管は円形のため応力集中しにくいことが分かる。

続いて充填コンクリートの最小主応力からコンクリートの圧縮応力の性状を確認する。図-3.13(a)より

L=8400mm, L=17860mm ともに大半の部分の最小種応力が-10[N/mm<sup>2</sup>]以下となっている. L=17860mm のモデル (図-3.13(b)) では従来の補剛材と同様に下部に応力集中している. このことからコンクリート下部はコンクリート自体が圧壊するような応力ではないが, 構造的に脆弱部となる可能性がある. そのためコンクリートの充填性や鋼管と下フランジの溶接など施工品質で特に配慮することが必要である.

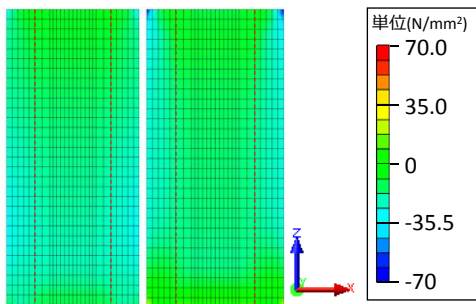


(a)L=8400mm (b)L=17860mm

図-3.8 CFT 補剛材モデル  
充填コンクリート鉛直方向応力

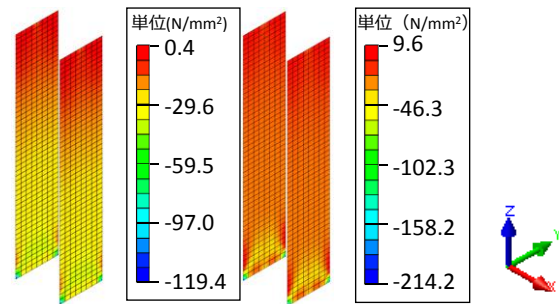
#### 4. 非常時の解析

補剛材に死荷重と地震時水平力による曲げモーメントを作用させたモデルについて数値解析を行う.



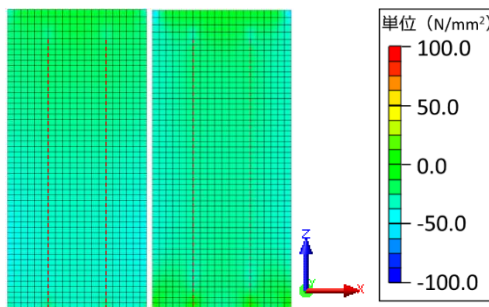
(a)L=8400mm (b)L=17860mm

図-3.5 CFT 補剛材モデルダイアフラム鉛直方向応力



(a)L=8400mm (b)L=17860mm

図-3.9 従来の補剛材モデル補剛材鉛直方向応力



(a)L=8400mm (b)L=17860mm

図-3.6 従来の補剛材モデル  
ダイアフラム鉛直方向応力

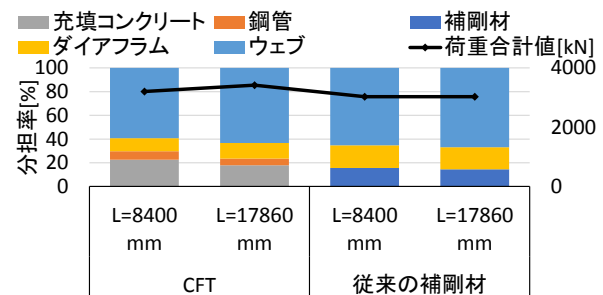
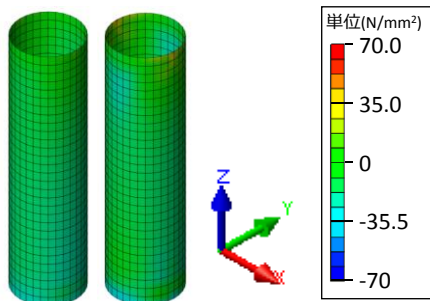
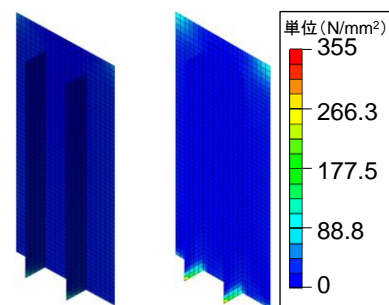


図-3.10 各部材の荷重分担率



(a)L=8400mm (b)L=17860mm

図-3.7 CFT 補剛材モデル鋼管鉛直方向応力



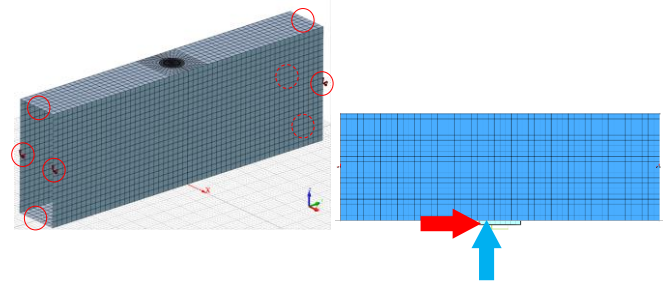
(a)L=8400mm (b)L=17860mm

図-3.11 CFT 補剛材モデル鋼管 Mises 応力



#### 4.1 解析モデル

常時の  $L=8400\text{mm}$  の解析モデルを元に鉛直方向力と水平方向強制変位を載荷できるモデルを作成した。境界条件として上下フランジの端部の橋軸直角方向の並進を拘束、ウェブの端部の中央節点を固定とした (図-4.1)。ウェブの端部から 1 列分の  $150\text{mm}$  の要素を弾性係数  $2.0 \times 10^6 [\text{N}/\text{mm}^2]$ 、板厚  $100\text{mm}$  としている。また荷重載荷のためにソリッド要素を用いて載荷板を作成した。  $1057.86\text{mm}$  四方で板厚  $100\text{mm}$  とし、SM490Y 相当である。鋼とコンクリート界面のインターフェース要素にはクーロン摩擦モデルを使用した。



(a)境界条件 (b)荷重条件  
図-4.1 解析モデルの境界条件, 荷重条件

#### 4.2 解析結果

##### 1) 非常時の Mises 応力

鉛直反力  $4071.9\text{kN}$ 、水平反力  $1823.5\text{kN}$  がモデルに作用したとき (作用荷重時) の降伏箇所の有無と応力集中箇所を確認するために Mises 応力を用いる。視点の定義を図-4.2 に示す。図-4.3 より従来の補剛材では曲げ圧縮側の橋軸方向地震時補強リブに大きな応力が発生している。

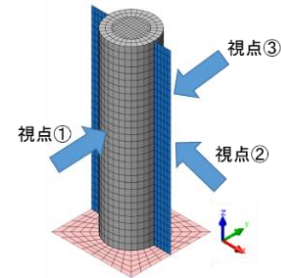
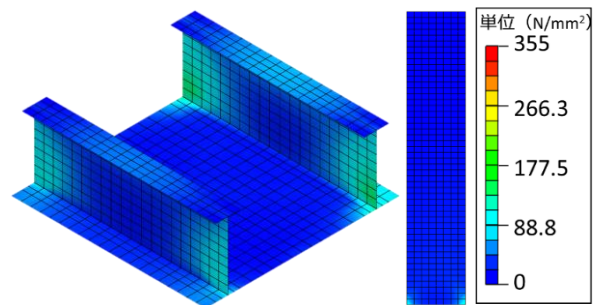
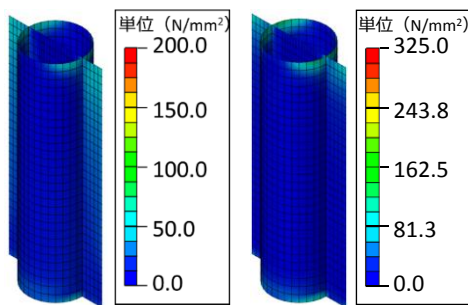


図-4.2 視点の定義

CFT 補剛材の鋼管は図-4.4 より鉛直方向の圧縮側に応力が集中している。図-4.5 も鋼管と同様の傾向が見られた。図-4.6 より従来の補剛材と CFT 補剛材のモデルのダイアフラムの Mises 応力を比較すると従来の補剛材を有するモデルでは応力が発生していないのに対して、CFT 補剛材を有するモデルには応力が発生している。



(a)橋軸方向地震時補強リブ (b)垂直補剛材  
図-4.3 従来の補剛材 Mises 応力



(a) $L=8400\text{mm}$  (b) $L=17860\text{mm}$   
図-3.12 CFT 補剛材モデル鋼管 Mises 応力

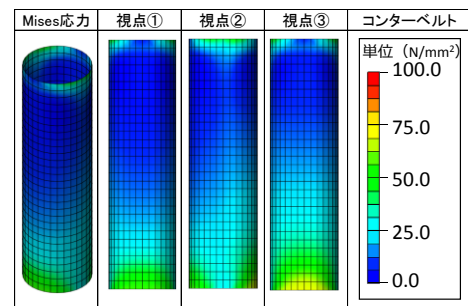
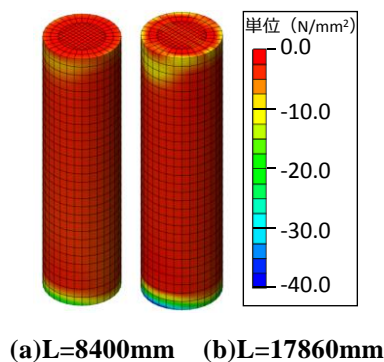


図-4.4 鋼管 Mises 応力



(a) $L=8400\text{mm}$  (b) $L=17860\text{mm}$   
図-3.13 CFT 補剛材モデル  
充填コンクリート最小主応力

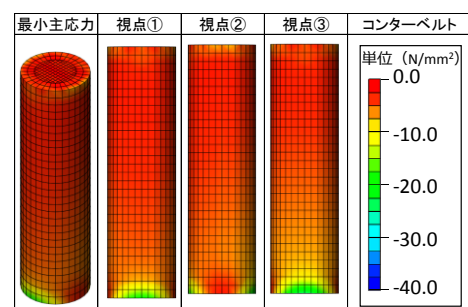
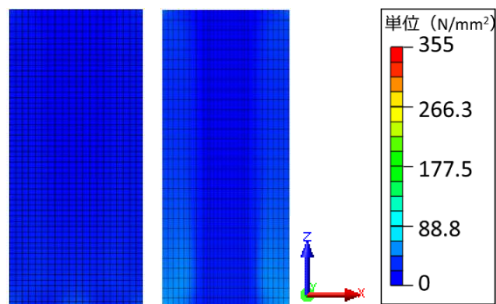


図-4.5 充填コンクリート最小主応力



(a)従来の補剛材 (b)CFT 補剛材

図-4.6 ダイアフラム Mises 応力

## 5. 結論

支点部のダイアフラムと補剛材に桁を付けたモデルで鉛直方向力のみを作用させたモデル（常時）と鉛直方向力と水平力を作用させたモデル（非常時）で数値解析を行い、従来の厚板で構成された補剛材と CFT 補剛材の比較を行なった。常時の作用荷重時において CFT 補剛材を有するモデルではダイアフラム、鋼管、コンクリートにおいて局所的な性状を除き、部材それぞれの大抵の部分の応力が許容応力より小さい応力となっていたため補剛材として常時の性能は満たしている。また、非常時の作用荷重時においても同様にダイアフラム、鋼管、コンクリートにおいてそれぞれの部材が許容応力より小さい応力となっていることが確認できた。以上のことより CFT 補剛材は従来の補剛材に替えて適用することができる。以下に得られた知見を述べる。

### 1) 常時の作用に対する解析について

- ・従来の補剛材、CFT 補剛材を有する両モデルの補剛材、鋼管、ダイアフラムの Mises 応力について、作用荷重時に降伏する箇所はなかった。しかし、従来の補剛材では、鉛直補剛材下部の自由端に顕著な応力の集中が認められた。鋼管が円形のため CFT 補剛材では応力集中しにくい。

- ・充填コンクリート下部に応力集中していた。これは下フランジの圧縮応力の影響であると考えられる。桁曲げの影響が大きい場合はコンクリート下部の応力集中が CFT 部材にどのような影響を与えるのかを考える必要がある。

- ・各部材における荷重の分担率に関して、CFT 補剛材を用いることで、従来の補剛材よりもダイアフラムの分担荷重が小さくなっていた。

### 2) 非常時の作用に対する解析について

- ・従来の補剛材のモデルでは橋軸方向地震時補強リブの Mises 応力では、曲げによる圧縮側に大きい応力が入っていた。

- ・CFT 補剛材を有するモデルでは作用荷重時では鋼管

が降伏せず、充填コンクリートは設計強度に達していない。また、ダイアフラムでも応力を分担している。

### <設計上の留意点>

1) CFT 補剛材の常時の解析結果より、コンクリート下部はコンクリート自体が圧壊するような応力ではないが、構造的に脆弱部となる可能性がある。そのためコンクリートの充填性や鋼管と下フランジの溶接など施工品質で特に配慮することが必要であると考えられる。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書（I 共通編・II 鋼橋編）・同解説，2012.3
- 2) 日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針，2008
- 3) TNO DIANA 社：DIANA マニュアル ver10.1,2016