

鋼箱桁橋支点部補剛材への CFT 構造の適用に関する解析的研究

ANALYTICAL STUDY ON APPLICATION OF CFT STRUCTURE TO STIFFENER AT STEEL BOX GIRDER SUPPORT

構造及びコンクリート工学分野 牧野修幸
Structural and Concrete Engineering Naoyuki MAKINO

鋼箱桁橋の支点部補剛材には経済性、施工性、維持管理性について改善すべき点が認められる。そこで、本研究では支点部補剛材の代替として CFT 構造に着目し、数値解析により、従来の支点部補剛材と CFT 構造からなる 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。さらに CFT 構造の高さに着目しパラメトリック解析を実施し、得られた知見をもとに今後 CFT 構造を支点部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。

Stiffener on the support of the steel box girder bridge has some points to be improved regarding economic efficiency, workability and maintainability. Instead of them, therefore, CFT stiffeners are proposed here in. In this study, the conventional stiffeners are compared with the CFT stiffener by numerical analysis and their stress properties of each stiffener are examined. In addition, parametric analysis is carried out focusing on the height of the CFT structure. Based on the numerical analysis, things to be considered when applying the CFT stiffener as stiffener on the support are discussed.

1. 研究背景・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(図 1-1)。この補剛材は、道路橋示方書¹⁾に基づき許容応力度設計により、設計されている。この時、地震時水平力(橋軸方向)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。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、改善すべき点がある。また阪神淡路大震災以降、支承がこれまでの鋼製支承から、免震のためにゴム支承となり、支持面積が大きくなっている。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に関しても、改善すべき点が認められる。本研究では、上記のような施工性、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からなる補剛材に代えて、CFT(Concrete Filled Steel Tube:コンクリート充填鋼管)構造を補剛材に適用する。CFT 構造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。補剛材に CFT を適用することで支承部の構造が単純化され、鋼重や、溶接箇所の減少といった経

済性、施工性の向上、さらに維持管理性の向上も期待できる。既往研究ではコンクリート充填鋼管構造設計施工指針²⁾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い、3次元有限要素解析ソフト DIANA³⁾を用いて支点部近傍をモデル化し、死活荷重を作用させ、常時に対する CFT 構造の補剛材としての有用性を明らかにした。

本研究では、地震時に着目して、数値解析を実施し、地震時に対する CFT 構造の補剛材としての有用性を確認する。数値解析は現行の鋼製補剛材と CFT 構造を用いた CFT 補剛材の両方に関して実施する。さらに、CFT の高さに着目し、数パターンの高さでパラメトリック解析を実施することにより、最適な補剛材長を見

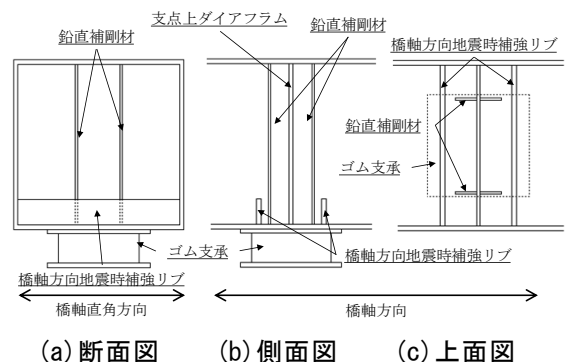


図 1-1 鋼製補剛材

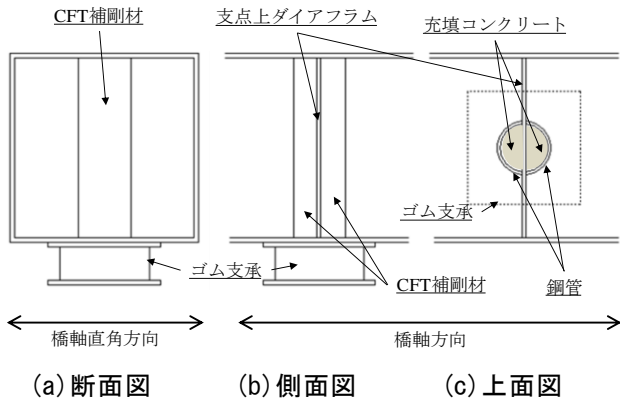


図 1-2 CFT 補剛材

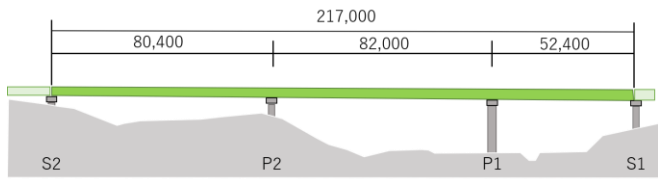


図 2-1 対象橋梁(単位 : mm)

表 2-1 設計作用荷重

死荷重(kN)	13466.4
L1地震時(kN*m)	725.5
L2地震時(kN*m)	3539.1

表 3-1 鋼材寸法

		鋼種	板厚[mm]
ダイアフラム		SM490Y	30
web			30
フランジ	上		43
	下	44	

表 3-2 補剛材寸法

鋼製補剛材(SM490Y)				
	板厚[mm]	高さ[mm]	幅[mm]	長さ[mm]
鉛直補剛材	32	2600	320	-
地震時補強リブ	フランジ	16	-	300
	ウェブ	22	500	-

CFT補剛材					
鋼管(STK490)		充填コンクリート			径厚比
鋼管径[mm]	管厚[mm]	高さ[mm]	直径[mm]	高さ[mm]	
1000	10	2900	980	2900	100.0
弾性係数(他鋼材共通)			圧縮強度	引張強度	弾性係数
2.00E+05			40	2.69	3.10E+04 N/mm ²

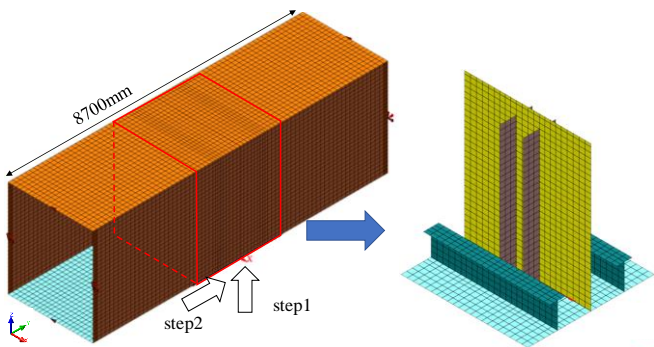


図 3-1 解析モデル(鋼製補剛材)

出していく。図 1-2 に補剛材に CFT 構造を適用した際の配置図を示す。鋼製補剛材の配置図(図 1-1)と比較して、支点部内の部材が少なくなり、構造の単純化が期待できる。

2. 対象橋梁

図 2-1 に本研究で対象とする橋梁の側面図を示す。対象橋梁は、フランジ幅が 2500mm の一般的な箱桁橋であり、中間支点の P2 を対象支点部とし数値解析を実施する。表 2-1 に対象支点部である P2 の設計作用荷重を示す。

3. 数値解析

数値解析は、現行の鋼製補剛材と補剛材に CFT 構造

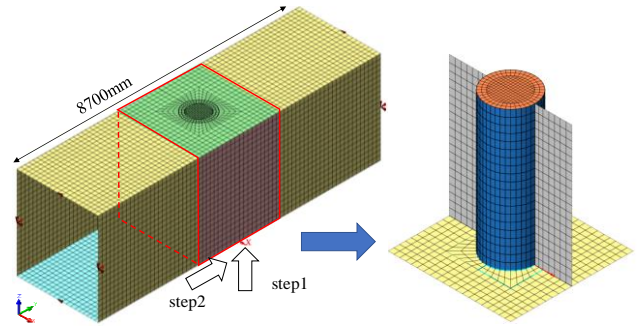
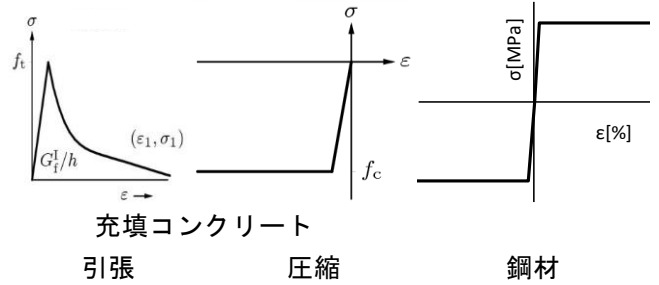


図 3-2 解析モデル(CFT 補剛材)



充填コンクリート

引張

圧縮

鋼材

図 3-3 材料構成則

を用いた CFT 補剛材の 2 モデルで実施し、支点上剛材に CFT 構造を適用した際の挙動を把握する。

3.1. 解析条件

解析モデルを図 3-1 と図 3-2 に示す。モデルの構築に関して、鋼管やダイアフラムなどの鋼材は局面シェル要素により作成し、充填コンクリートはソリッド要素により作成した。ウェブとフランジの長さに関しては、CFT 補剛材の柱としての性能を見るために、ウェブの高さの 3 倍の 8700mm としてモデルを作成した。図 3-3 に材料構成則³⁾を示す。充填コンクリートの引張側には Hordijk, 圧縮側には、圧縮強度到達後であっても、荷重が落ちないように構成則を設定した。鋼材は完全弾塑性モデルを使用した。ウェブの両端 1 メッシュは弾性係数、板厚を共に 100 倍程度にし、剛部材とした。また、下フランジ下の支承のモデル化に関しては、支承高を有するソリッド要素により作成した。支承の材料構成則は弾性とした。表 3-1 と表 3-2 にモデルの寸法を示す。モデルの寸法に関しては、充填コンクリートと鋼管、さらにダイアフラムの軸剛性(EA)

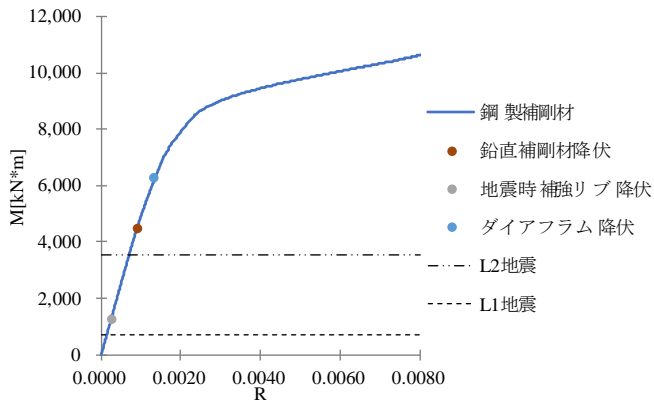


図 3-4 解析結果(鋼製補剛材)

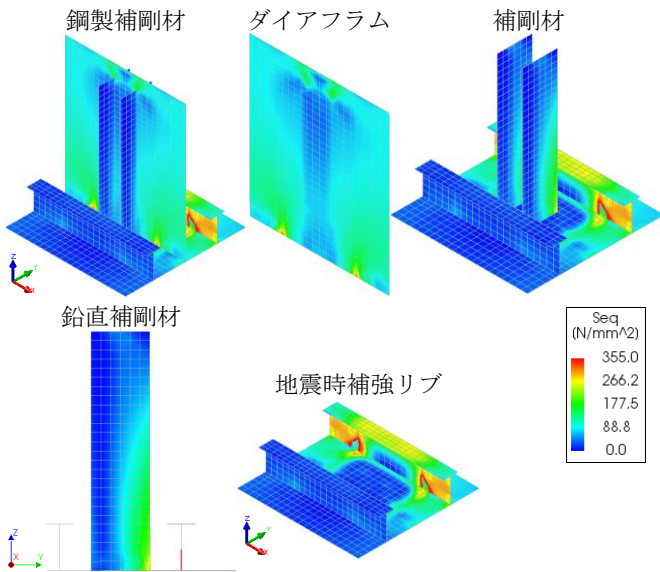


図 3-5 解析結果(Mises 応力)

を用い、支点部の設計荷重(表 2-1)を作用させた時に、各部材に生じる応力を算出し、その応力値が各部材の許容値内に収まるように寸法を設計した。

境界条件に関しては、両端のウェブの中央節点をピン固定し、上下フランジの両端の中央節点の x 方向の並進を拘束することにより与えた。荷重条件に関しては、支承下の全節点に、まず step1 で死荷重を軸力として載荷し、その後、step2 で同節点に水平方向の強制変位を載荷することにより与えた。

3.2. 解析結果

解析結果は、図 3-4 のように横軸に補剛材の相対変位(δ)を補剛材長(H)で除した回転角(R)を、縦軸に下フランジに作用する曲げモーメント(M)を取ったグラフにより評価する。グラフ内には各部材が降伏強度または圧縮強度に到達した点もプロットし、降伏する順番と、曲げモーメントレベルについて見ていく。また、図 3-5 と 3-6 のように応力分布図による評価も実施する。応力分布図は L2 地震時相当のモーメントが作用した時について見ていく。鋼製補剛材の各部材の応力分布に関しては、Mises 応力と直応力により評価する。

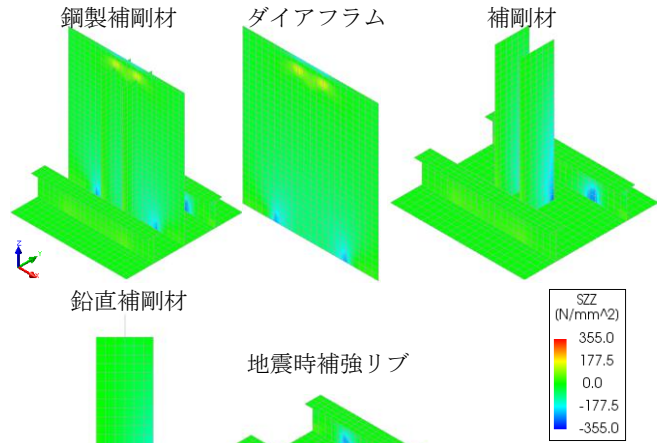


図 3-6 解析結果(直応力)

CFT 補剛材のモデルに関しては、ダイアフラムと鋼管に関しては Mises 応力により評価し、充填コンクリートに関しては、直応力により評価することとする。

3.2.1. 鋼製補剛材

まず、グラフに関して図 3-4 を見ると、L1 地震時相当の曲げモーメントが作用した後に地震時補強リブが初めに降伏し、鉛直補剛材とダイアフラムは L2 地震時相当の曲げモーメントが作用した時でも降伏しなかった。ダイアフラムが降伏した後は、回転角が大きくなっていることから、ダイアフラムの塑性変形が進行していると考えられる。

次に、各部材の Mises 応力分布に関して図 3-5 を見ると、ダイアフラムには鉛直補剛材上部から応力が作用していたが降伏強度と比較すると余裕のある値であった。次に、鉛直補剛材に関しては、下部に曲げの影響により応力が作用していたが、こちらも降伏強度と比較すると余裕のある値であった。最後に地震時補強リブに関しては、曲げ圧縮側では広い範囲で降伏していたが、曲げ引張側は全く降伏しておらず、降伏強度と比較して余裕のある結果であった。今回の解析では +y 方向に水平方向力を載荷したため、+y 側にあたる曲げ圧縮側の部材は広い範囲で降伏し、エネルギー吸収をして、-y 側にあたる曲げ引張側では全く降伏しないという結果となった。これは、荷重条件として step1 の軸力に加えて、step2 で水平方向に加力していることが影響していると考えられる。

次に、各部材の直応力分布に関して、図 3-6 を見ると、ダイアフラムには鉛直補剛材の上部に引張応力、鉛直補剛材の下部には圧縮応力、地震時補強リブには曲げ圧縮側にのみ応力が作用していた。

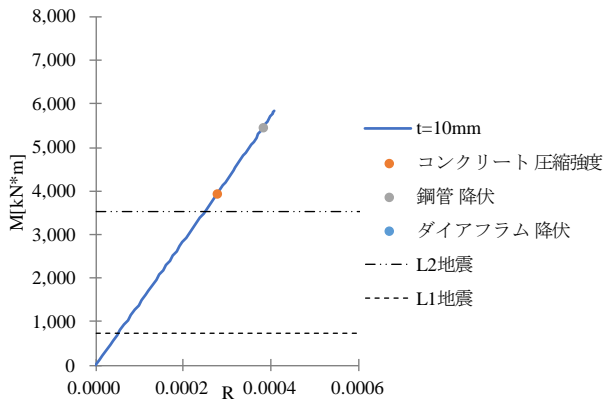


図 3-7 解析結果(CFT 補剛材)

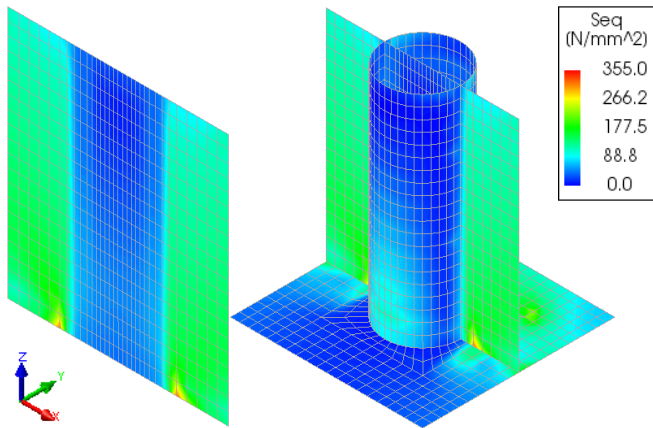


図 3-8 ダイアフラム Mises 応力

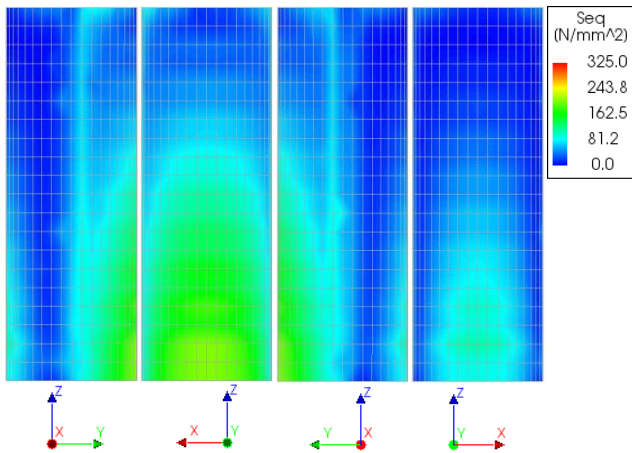


図 3-9 鋼管 Mises 応力

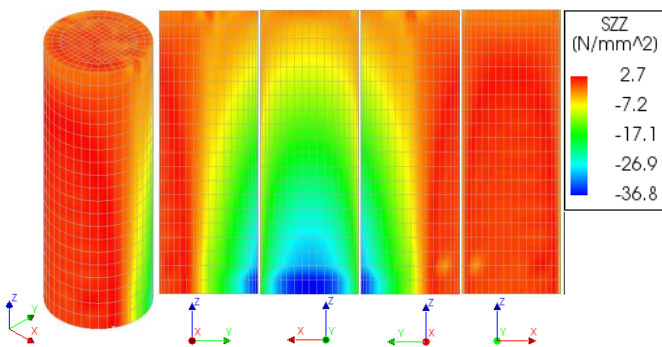


図 3-10 充填コンクリート直応力分布

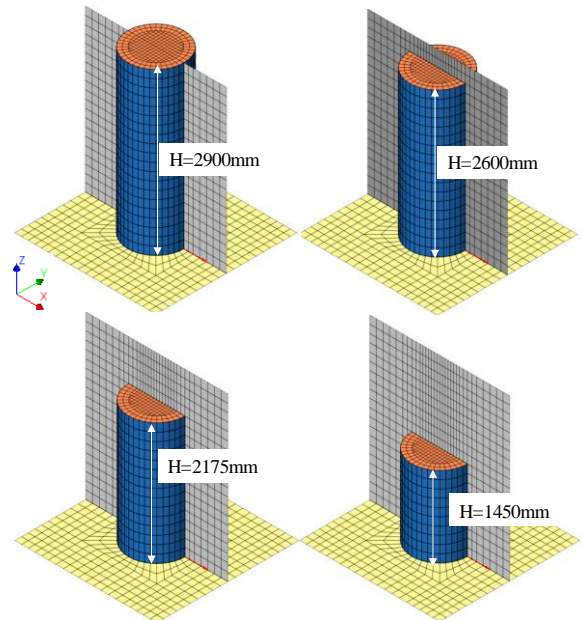


図 4-1 解析モデル(パラメトリック)

3. 2. 2. CFT 補剛材

まず、グラフに関して図 3-7 を見ると、L2 地震時相当のモーメントが作用した時でも充填コンクリート、鋼管、ダイアフラムの各部材が材料強度に到達することは無かった。鋼製補剛材とは異なり、ダイアフラムは鋼管が降伏した後も降伏しなかった。

次に、ダイアフラムの Mises 応力分布に関して、図 3-8 を見ると、CFT が存在している範囲は、L2 地震時であっても降伏強度の 1/3 以下の応力しか作用していなかった。CFT が存在しない範囲でも作用する応力は降伏強度の半分以下となっており、地震時であっても、ダイアフラムに対する CFT の補剛効果が見られた。

次に、鋼管の Mises 応力分布に関して、図 3-9 を見ると、曲げの影響により下部に応力が作用しているが、降伏強度と比較すると、余裕のある結果となっていた。

最後に、充填コンクリートの直応力分布に関して図 3-10 を見ると、鋼管と同様に、下部に曲げの影響により圧縮応力が大きく作用していたが、こちらも圧縮強度には到達していなかった。

4. パラメトリック解析

一般的な箱桁橋での解析結果より、支点部の補剛材を CFT 構造とすることで補剛効果が得られることが分かった。そこで、上フランジに設置されている部材や、コンクリート充填時の施工性等を考慮して CFT の高さを変化させて解析を行うことにより、補剛材として最適な CFT の高さについて検討していく。

4. 1. 解析条件

4 パターンの CFT の高さについて検討する。図 4-1 に解析モデルを示す。まず 1 パターン目はダイアフラ

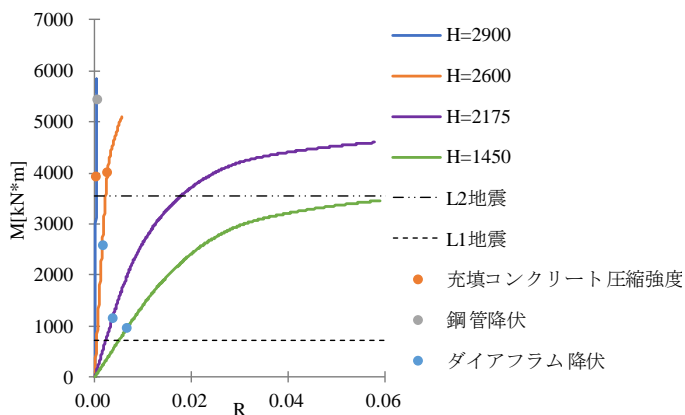


図 4-2 解析結果

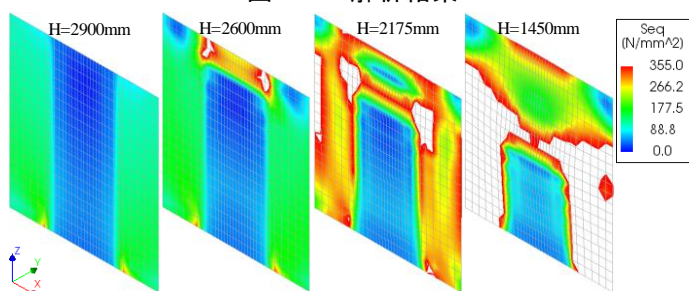


図 4-3 ダイアフラム Mises 応力

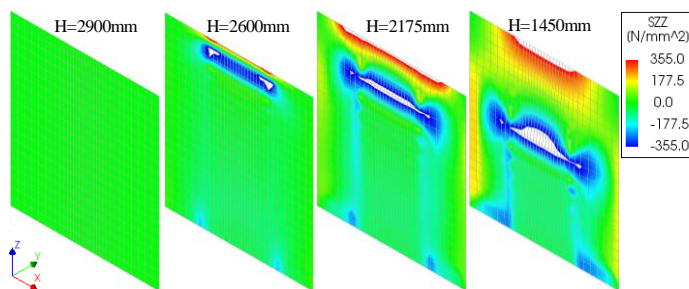


図 4-4 ダイアフラム直応力

ムと同じ高さのモデル(H=2900mm)で、これには既に実施した結果を使用する。次に2パターン目は、現行の鋼製補剛材の鉛直補剛材と同様の高さ(H=2600mm)、3パターン目は、ダイアフラムの3/4の高さ(H=2175mm)、4パターン目は、ダイアフラムの半分の高さ(H=1450mm)である。解析モデルについては、図3-2に示したものと同様に作成し、使用材料や材料定数、材料構成則も図3-3と表3-1に示したものを使用する。境界条件と荷重条件に関しても同様である。また、充填コンクリートと鋼管の界面に関しては、鋼管内にコンクリートを充填した後、鋼管上部に蓋をして、充填コンクリートを3軸圧縮状態にすることを想定しているため、ここでは充填コンクリートと鋼管の界面でのすべりによる抜け出しは考慮せず、界面は同様に剛結としてモデルを構築した。

4.2. 解析結果

解析結果は、3章と同様に図4-2のように横軸に回転角(R)を取り、縦軸に下フランジに作用する曲げモー

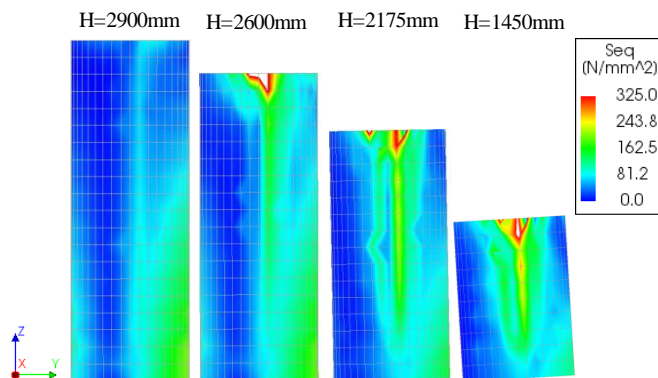


図 4-5 鋼管 Mises 応力

メント(M)取ったグラフと図4-3～図4-7のように応力分布図により評価する。応力分布図に関しても3章と同様に、L2地震時相当の曲げモーメントが作用した時点で評価する。ダイアフラムと鋼管に関しては、Mises 応力と直応力により評価し、充填コンクリートに関しては直応力により評価する。

まず、グラフに関して、図4-2を見ると、CFTの高さを下げたモデルでは、ダイアフラムが最も初めに降伏し、鋼管に関してはどのモデルでも降伏しないという結果となった。充填コンクリートに関して、CFTが現行の鋼製補剛材よりも低いモデルでは、圧縮強度に到達しないという結果となった。ダイアフラムが降伏する曲げモーメントに関しても、CFTの高さを下げるほど低くなるのが分かる。また、回転角(R)に関しても、CFTの高さを下げるほど、ダイアフラムの降伏箇所からの塑性変形の影響で、回転角(R)が大きくなると分かった。

次に、ダイアフラムの応力分布に関して、まず Mises 応力について、図4-3を見ると、CFTが存在する範囲では応力値は降伏強度の1/3程度と小さい値となっていた。しかし、それ以外の範囲では、CFTの高さが低いモデルになるほどダイアフラムの降伏範囲が広がっているのが分かる。これにはダイアフラムとCFTの間に断面が急変する箇所が存在することが影響していると考えられる。ダイアフラムの早期降伏による、塑性変形でエネルギー吸収が生じ、その結果として補剛材部分に応力が伝達しなかったと考えられる。次に直応力に関して、図4-4を見ると、こちらも Mises 応力分布と同様に、CFTの上部に大きく降伏する箇所が現れるという結果が得られた。降伏範囲に関しては、Mises 応力分布ほど広がっていない。

鋼管の応力分布に関して、まず Mises 応力について図4-5を見ると、CFTの高さを下げると、CFTの上端部とダイアフラムが接合している箇所に大きな応力が作用して降伏する箇所も出てくることが分かった。下部に着目すると、作用している応力が減少し、曲げに

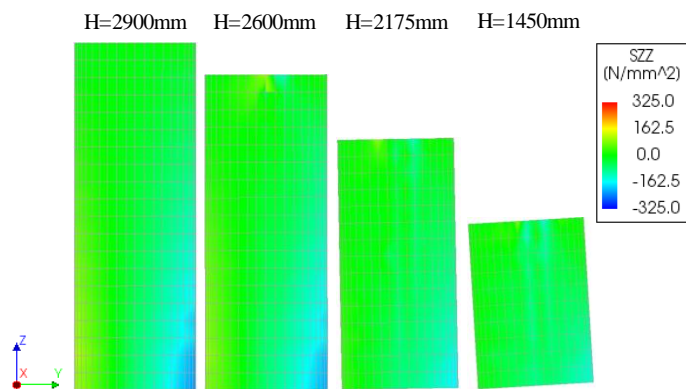


図 4-6 鋼管直応力

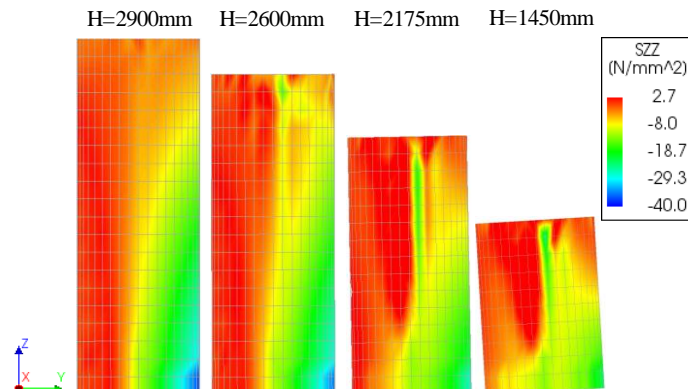


図 4-7 充填コンクリート直応力

よる影響が小さくなっていることが分かった。次に、鋼管の直応力分布について図 4-6 を見ると、Mises 応力の分布図でも見られたように、高さを下げることにより CFT の上端とダイアフラムが接合している部分に応力が作用していたが、直応力レベルではそれほど大きな値は作用していなかった。また、降伏強度と比較すると非常に小さな値であるが、鋼管の引張側と圧縮側に作用する応力が減少し、Mises 応力分布と同様に曲げの影響は、高さを下げるほどに低くなることが分かった。

最後に、充填コンクリートの直応力分布に関して図 4-7 を見ると、こちらも鋼管の応力分布で見られた傾向と同様に、ダイアフラムとの接合部に大きな応力が作用し、それに伴い引張応力が大きく作用していた。充填コンクリート下部の圧縮応力に関しては、鋼管の応力分布でも見られた傾向と同様で、高さを下げると作用する圧縮応力が減少した。

5. まとめ

本研究では、中間支点を対象に鋼箱桁橋の支点部補剛材を現行の厚板要素からなる鋼製補剛材から、CFT 構造に置き換え、支点部内構造の単純化を期待し、検討を行ってきた。以下に得られた知見をまとめる。

CFT 補剛材と鋼製補剛材の比較

- 1) CFT 構造を支点部補剛材に適用した場合、現行の鋼製補剛材と同様に L2 地震時でもダイアフラムが降伏せず、目立った応力集中も生じていなかったため、地震時における CFT 補剛材の補剛効果があると分かった。
- 2) 現行の鋼製補剛材では、鉛直補剛材と地震時補強リブという 2 部材で軸力と水平力受け持ち役割を分けていたが、CFT 補剛材とすることで、1 部材で軸力と水平力を受け持つことが可能となるため、支点部内構造の単純化が可能と分かった。

CFT 補剛材でのパラメトリック解析

- 1) CFT の高さを下げると、ダイアフラムと CFT の間に断面が急変する箇所が現れ、その付近からダイアフラムへ応力が集中し、その結果として主部材のダイアフラムが最も初めに降伏した。
- 2) CFT の高さを下げることにより、ダイアフラムの降伏箇所から生じた塑性変形によるエネルギー吸収で受け持つ結果となり、本来鋼管や充填コンクリートが受け持つ水平力や応力の伝達が見られなかった。
- 3) 現行の鋼製補剛材では、ダイアフラムは最後に降伏しており、地震時補強リブと鉛直補剛材が先に降伏していたため、CFT 補剛材に現行の鋼製補剛材と同様に補剛材(CFT)を先に降伏させ、その後ダイアフラムが降伏するように設計する場合には、CFT の高さはダイアフラムと同じ高さとするのが良いと分かった。
- 4) 一方、L2 地震時までには、ダイアフラムが降伏することを許容する場合であれば、降伏範囲や降伏する曲げモーメントを考慮し、現行の鋼製補剛材と同様の高さ程度ならば適用可能ではないかと考える。その場合は、CFT の上端から上フランジ間に縦リブを設け座屈防止をするとよいと考える。
- 5) それより低くすると、ダイアフラムの降伏範囲の拡大や、降伏曲げモーメントの低下が生じるため、補剛材として適用することは難しいと分かった。

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