

(46) コンクリート充填鋼管 (CFT) を用いた桁橋 (CFT ガーダー橋) に関する提案と基礎的検討

A proposal and basic study of a girder bridge with concrete-filled steel tube (CFT) flanges

山本龍哉*, 江上武史**, 橋本靖智***, 大西悦郎****, 矢木誠一郎*****, 大南亮一*****

Tatsuya Yamamoto, Takeshi Egami, Yasusato Hashimoto, Etsuro Ohnishi, Seiichiro Yagi, Ryoichi Ohminami

*工修 川崎重工業(株) (〒675-0155 兵庫県加古郡播磨町新島 8)
**工修 川崎重工業(株) (〒675-0155 兵庫県加古郡播磨町新島 8)
***工修 川崎重工業(株) (〒675-0155 兵庫県加古郡播磨町新島 8)
**** 川崎重工業(株) (〒675-0155 兵庫県加古郡播磨町新島 8)
*****工修 川崎重工業(株) (〒673-8666 兵庫県明石市川崎町 1-1)
*****工博 川崎重工業(株) (〒673-8666 兵庫県明石市川崎町 1-1)

The concrete-filled steel tube (CFT) is a type of structural composite member with superior structural properties. We propose a type of bridge in which CFT is used for compressive flanges. CFT girder bridge is structurally simple, economical and can be applied to the long-span locations.

This paper presents the design of two types of CFT girder bridges which have the steel deck plate and the PC slab respectively and compares them to other types of bridges.

Furthermore, several solid behaviors of a long-span CFT girder bridge are examined by FEM analysis, and a basic study for composite properties by diaphragms between the steel tube and filled concrete is reported in this paper.

Key Words: CFT, CFT girder bridge, composite property

1. はじめに

コンクリート充填鋼管 (CFT) は、鋼単独あるいはコンクリート単独で設計された部材に比べ剛性の向上、コンファインド効果によるコンクリートの圧縮耐力の増加、鋼の局部座屈強度の増加等が期待できる優れた性能を有する構造部材である。CFT ガーダー橋はこのような強度特性に優れた CFT 部材を圧縮フランジに用いることで、構造的に簡素で経済的かつ、長スパンにも対応できる橋梁形式である。

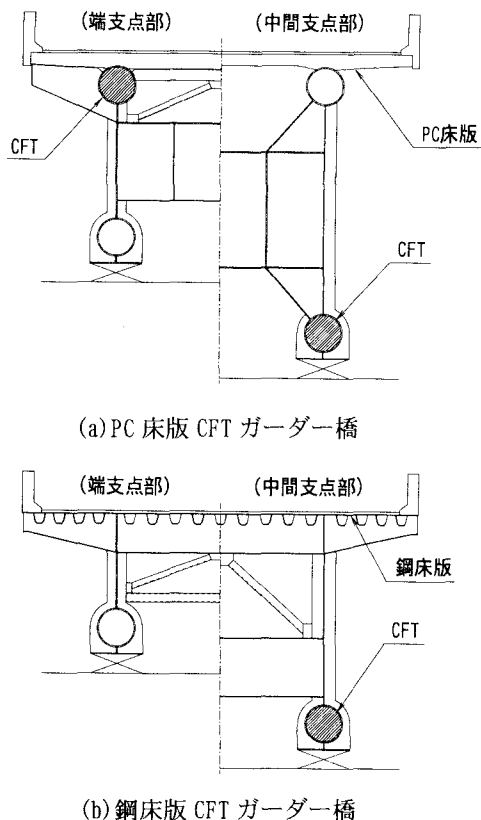
本論文では、スパン 100m クラスの橋梁を対象に CFT ガーダー橋の試設計を行い、その設計法について言及するとともに、従来の橋梁形式との比較を行った。

さらに、鋼床版 2 主桁 CFT ガーダー橋を対象として、横荷重や鉛直偏載荷重に対する立体挙動について、立体有限要素解析により検証を行った。また、CFT の鋼管とコンクリートの一体化に及ぼすダイヤフラムの影響に関する解析的検討を行った結果を併せて報告する。

2. CFT ガーダー橋の概要

CFT ガーダー橋は主桁の圧縮フランジにコンクリート充填鋼管を用いた橋梁形式であり、床版の形式により断面は図-1 に示す形状となる。PC 床版を用いる場合には床版とは非合成とし、上下フランジが鋼管構造となる。また、鋼床版を用いる場合には下フランジにのみ鋼管を用い、中間支点付近の下フランジ圧縮箇所がコンクリートを充填した CFT 構造となる。フランジに CFT (あるいは鋼管) を用いることにより、通常の鉄桁構造に比べ主桁の断面性能の向上が期待でき、長支間化が可能となるとともに、風荷重や地震荷重といった横荷重に対する抵抗力、あるいは横倒れ座屈強度が増加する等の利点が挙げられる。

また製作コストの面からみても、後述するように 100m を超える支間長に対して、鋼床版箱桁橋やトラス橋といった他形式の橋梁に比べて、部材、材片数を低減することができ、経済性に優れた橋梁形式である。



図－１ CFT ガーダー橋断面図

3. CFT ガーダー橋の主桁設計要領

前述したように、CFT ガーダー橋に関してはその床版形式に応じて２種類の形式が考えられるが、両者とも設計の基本的な考え方は大きく変わらないため、ここでは鋼床版 CFT ガーダー橋について主桁の設計要領を示す。

(1) 鋼床版 CFT ガーダー橋の主桁設計要領

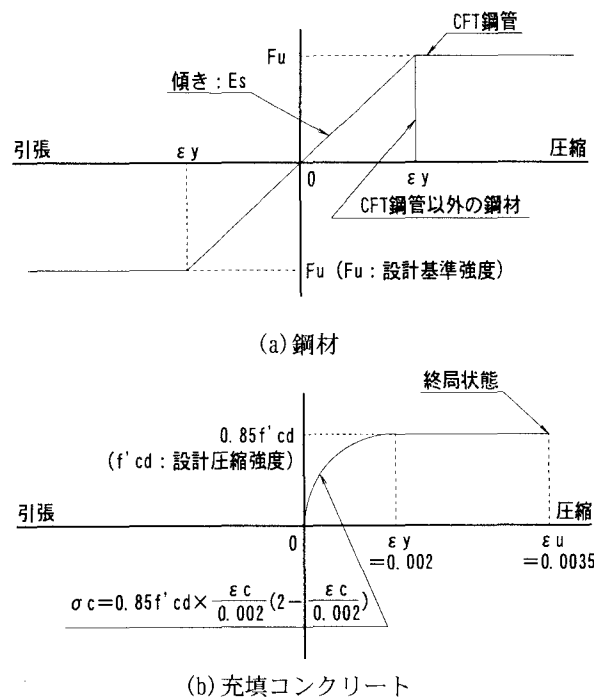
主桁の設計においては、従来の許容応力度設計法では CFT の優れた強度特性を十分に発揮できないため、限界状態設計法を用いることとする。さらに、主桁断面の構成部材のうち、CFT 部材及び引張部材については部材降伏後も強度を維持すると考え、終局限界状態における主桁断面の応力は、鋼及びコンクリート部材各々について、図－２に示す応力－ひずみ性状を呈するものとして算出する。この際、CFT 部材については、全塑性状態に至るまで局部座屈が生じないように設計するものとする。すなわち文献¹⁾に基づいて、式(3.1)により求められる鋼管の径厚比パラメータ $Rt \leq 0.119$ となるように鋼管の最小厚を決定する。

$$Rt = 1.65 \times (F/E_s) \times (r/t) \quad (3.1)$$

ここに、 F : 鋼材の材料強度の規格値
 E_s : 鋼材のヤング計数
 r : 鋼管の半径
 t : 鋼管の板厚

また、ひずみの制約に関しては、引張部材（腹板の引張領域を含む）及び CFT 部材の鋼部分についてはひずみ制限を設けないこととするが、充填コンクリートの圧縮ひずみは $\epsilon = 0.0035$ を制限値とする（図－２参照）。

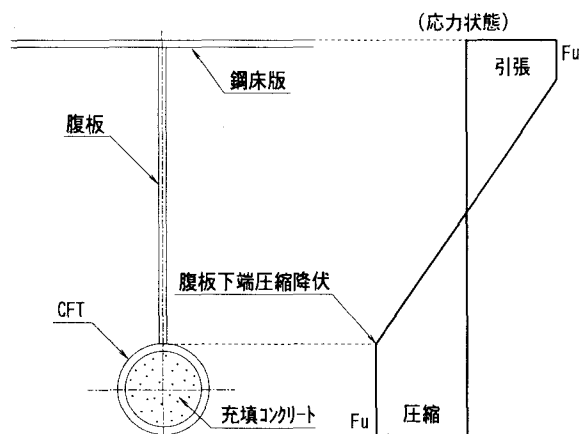
さらに、使用限界状態に対しては、活荷重たわみの照査を行うとともに、常時における作用断面力に対し、弾性理論により求められる応力度が主桁各部材の降伏応力度を超えないことを確認する。



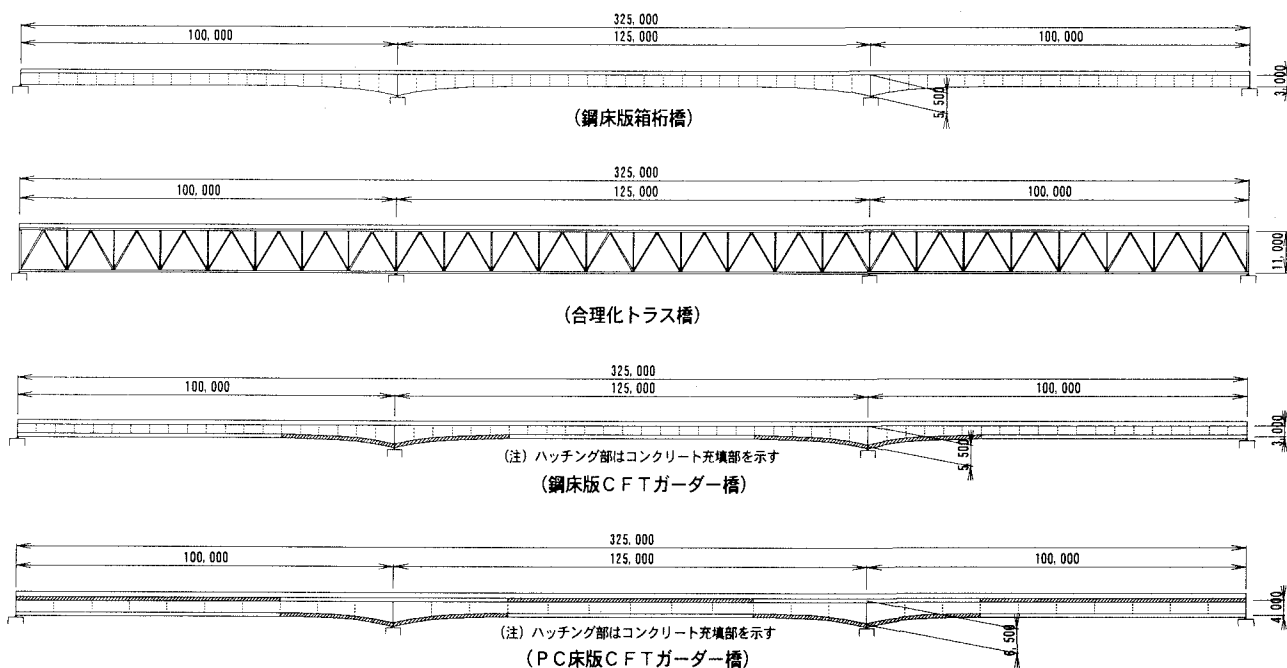
図－２ 各部材の応力ひずみ曲線

(2) 鋼床版 CFT ガーダー橋の終局限界状態

設計における鋼床版 CFT ガーダー橋の終局限界状態は、下フランジ鋼管（CFT）が全塑性状態に達した後、腹板の下縁が圧縮降伏ひずみに達する状態と仮定する。これは、腹板については通常のノンコンパクト断面設計を適用し、部材降伏後の強度が保証されないためである。終局限界状態における応力状態を図－３に示す。



図－３ 終局限界状態における応力状態



図－４ 比較橋梁側面図

４．概略比較設計

橋長：100m+125m+100m＝325m、総幅員：10.5m の3径間連続桁を想定した概略比較設計を行った。比較の対象は鋼床版箱桁橋、合理化トラス橋、鋼床版 CFT ガーダー橋及びPC床版 CFT ガーダー橋の4案である。なお、鋼床版箱桁橋については概略設計を行い、合理化トラス橋については文献²⁾を参照した。

各々の比較橋梁の側面図を図－４に示す。

(１) 概略比較設計結果

各々の橋梁形式における鋼重、死荷重及び桁高等の比較を表－１に示す。なお、死荷重については鋼重に加えて壁高欄（片側 0.75tf/m×2）、舗装（t＝75mm）、床版コンクリート・ハンチ（コンクリート床版の場合のみ）、充填コンクリート（CFT ガーダー橋のみ）の重量を含めた概略値である。

表－１ 橋梁形式案の比較

	鋼床版 箱桁橋	合理化 トラス橋	鋼床版 CFT ガーダー	PC床版 CFT ガーダー
鋼重	1650t	1250t	1500t	1300t
死荷重	2700t	5100t	2900t	6300t
材片数	最も多い	多い	少ない	最も少ない
桁高	端 支点	11.0m 上下弦材 中心間隔	3.0m	4.0m
	中間 支点		5.5m	6.5m

（注記）CFT ガーダー橋の桁高は、フランジ鋼管の中心間距離である（鋼床版の場合は腹板上縁～下フランジ鋼管中心）。

(２) 考察

鋼重は合理化トラス橋が最も軽い、上部工製作コストに関しては部材、材片数の少ないPC床版 CFT ガーダー橋が最も有利である。また、鋼床版箱桁橋と鋼床版 CFT ガーダー橋を比較した場合、鋼床版 CFT ガーダー橋の方が鋼重が軽く、製作コストも低い。さらに、鋼床版を用いた2案は、RC床版を用いた2案に比べて死荷重が軽く、耐震性及び下部工の設計においては有利といえる。以上より下部工も含めた橋梁全体の施工費を考えた場合、上部工死荷重の増加がそれほど下部工の工事費に影響を与えない場合にはPC床版 CFT ガーダー橋が、また、下部工の工事費のウェイトが大きく上部工の死荷重の増加が大幅に橋梁全体の工事費の増加につながる場合には鋼床版 CFT ガーダー橋がそれぞれ最も経済的な橋梁形式となることがわかる。

また、桁高については、鋼床版箱桁橋を基準とした場合、PC床版 CFT ガーダー橋は若干高くなるが、鋼床版 CFT ガーダー橋はほぼ同等となる。

５．鋼床版 CFT ガーダー橋の立体挙動

本稿で提案した橋梁形式は2主桁形式であり、活荷重の偏載荷及び地震荷重等の荷重条件に対しては、横桁を含めた橋桁全体としての立体挙動が問題となる。さらに、支間長 L と幅員 B の比 L/B が大きく、全体横倒れ座屈に対しても注意が必要である。CFT は曲げ及びねじり剛性が大きく、このような問題に対して耐力の向上に寄与することが予想されるが、ここでは鋼床版 CFT ガーダー

一橋を対象として、立体 FEM 解析によりその立体挙動について検証した。

(1) FEM モデル

①メッシュ分割

図-1(b)に示した鋼床版 CFT ガーター橋について FEM 解析用にモデル化した。下フランジの鋼管は板要素で正八角柱の形にモデル化し、CFT について充填コンクリートをソリッド要素として鋼管の中に挿入した。メッシュ分割図を図-5に示す。なお、横構については省略の可能性について検討するため、設置しないこととした。

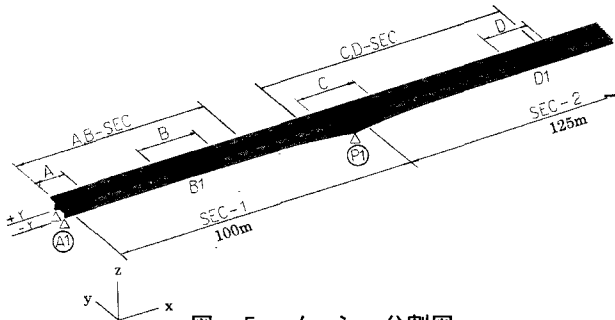


図-5 メッシュ分割図

②支点条件

支持条件は鉛直方向及び橋軸直角方向の移動については全支点拘束した。橋軸方向移動は P1 のみを拘束し、他の支点はフリーとした。

③荷重条件

荷重は死荷重及び活荷重・地震荷重を考えた。

I) 死荷重

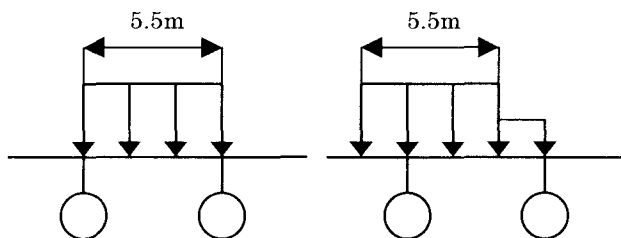
死荷重は 4. で示した概略設計での算出値を使用する。

II) 活荷重

断面方向に 2 パターン、橋軸方向に 3 パターン考え、それぞれ組み合わせて全 6 ケースとした。

i) 断面方向

断面方向の荷重は図-6に示すように中央載荷と偏載荷に分けられる。中央載荷は床版の曲げ変形によって主桁が回転し、その結果下フランジに面外曲げが発生するパターンである。



(a) 中央載荷

(b) 偏載荷

図-6 活荷重載荷 (断面方向)

ii) 橋軸方向

橋軸方向については、応力着目点として側径間中央、中央径間中央、中間支点(P1)上の 3 ケ所を考え、影響線

載荷によって各箇所の曲げモーメントが最大になるような荷重状態を想定した。

それぞれのパターンの組合せを表-2に示す。

表-2 活荷重の組合せ

パターン名	断面方向	着目部分
L1-1	中央載荷	側径間中央
L1-2		中央径間中央
L1-3		中間支点(P1)上
L2-1	偏載荷	側径間中央
L2-2		中央径間中央
L2-3		中間支点(P1)上

III) 地震荷重

地震荷重は震度法レベルを考え、設計水平震度 $kh=0.3$ とした。

(2) 解析結果

解析結果の一例として、地震荷重載荷時の変形図を図-7に、応力図を図-8に示す。

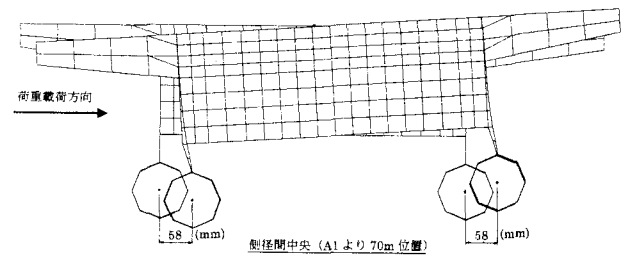
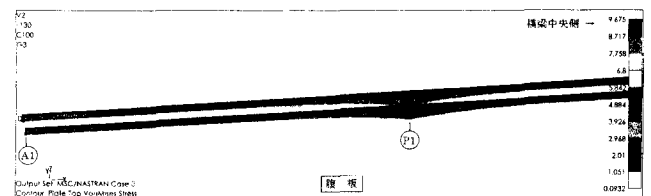
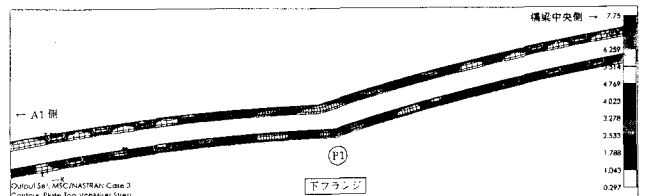


図-7 変形図 (地震時、断面方向)



(a) ウェブ



(b) 下フランジ

図-8 応力図 (地震時)

(3) 各解析結果の比較と考察

①活荷重による下フランジ応力

各ケースの着目点の下フランジ応力値 (von-Mises) を表-3に示す。なお、主載荷側とは偏載荷をした場合の主載荷側のフランジを示す。

表－3 各ケースの下フランジの応力値

(単位は kg/mm²)

荷重名 (ケース名)	着目点	下フランジ応力値	
		主載荷側	従載荷側
L1-1	側径間中央	7.7	7.7
L1-2	中央径間中央	6.9	6.9
L1-3	P1 支点上	2.8	2.8
L2-1	側径間中央	11.2	7.9
L2-2	中央径間中央	10.9	6.6
L2-3	P1 支点上	6.9	1.9

中央載荷の場合、主桁がハの字に変形し、下フランジの応力は水平方向の付加曲げモーメントにより増加することが考えられるが、解析結果によると、応力の最大値を与える活荷重載荷ケースは偏載荷のケースであった。従って、適当な間隔で横桁を配置すれば、中央載荷による付加曲げモーメントについては大きな問題とはならないと考えられる。

②地震荷重載荷時の挙動

地震荷重載荷時の下フランジ応力及び横桁応力を表－4に示す。

表－4 地震荷重による応力 (Von-Mises)

表示位置	応力 (kgf/mm ²)	
	下フランジ	横桁
A1	0.0	10.6
B1	4.0	0.0
P1	6.8	18.9
D1	2.1	0.0
E1	7.8	2.5

なお、E1 は下フランジが CFT から鋼管に変わる境目の位置である。

下フランジ鋼管の応力は中間支点部でやや大きな値となったが、十分設計可能なレベルであり、横構を省略できる可能性があることがわかった。また、E1 点で大きな応力が発生しているのは、下フランジの断面急変（充填コンクリートが途切れることによる）による応力集中が原因と考えられ、断面変化点を断面力の小さい箇所に配置する等の設計上の配慮が必要である。

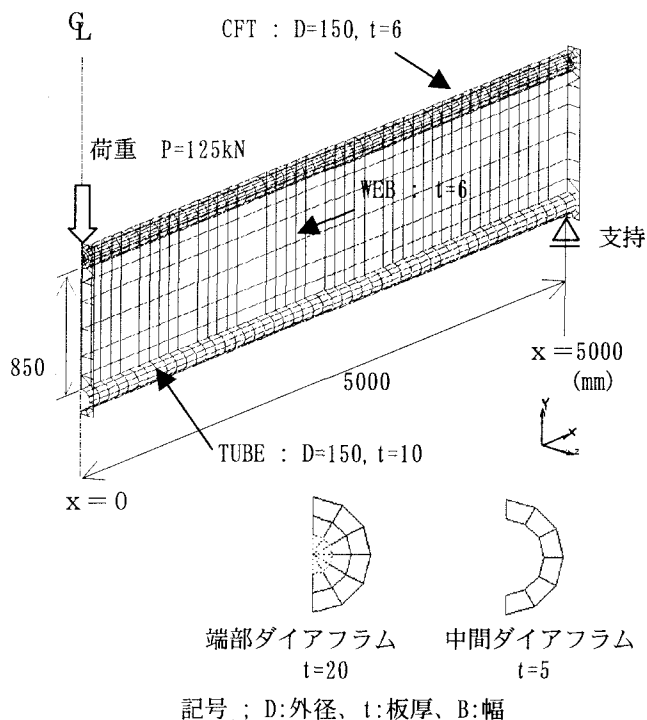
横桁については、支点上横桁の応力が大きく、中間横桁についてはほとんど応力が発生しなかった。このことから、横構を省略した場合、地震時の水平力は、主として鋼床版から支点上横桁を介して支点部に伝達されることがわかる。

6. 鋼管と充填コンクリートの一体化に及ぼすダイヤフラムの影響

ここでは、ダイヤフラムの間隔をパラメーターにして有限要素解析を実施し、鋼管と充填コンクリートの一体化に及ぼすダイヤフラムの効果について検討した。

(1) 解析モデルおよび解析結果

図－9に解析モデルを示す。鋼部材は Shell 要素、充填コンクリートには Solid 要素を使用した。表－5に鋼部材および充填コンクリートの材料物性値を示す。さらに、表－6に解析ケースを示す。CASE1～CASE4 については鋼管と充填コンクリートの摩擦を考慮した接触解析を実施した。CASE5 は両材料を完全に一体化させた理想的なケースであり、その他のケースとの比較の基準となるものである。



図－9 解析モデル

表－5 材料物性値

	鋼	コンクリート
ヤング率 (GPa)	205.8	35
ポアソン比	0.3	0.2
鋼とコンクリートの摩擦係数	0.5	

表－6 解析ケース

	鋼管と充填コンクリートの合成条件
CASE1	ダイヤフラム無し (接触解析)
CASE2	端部ダイヤフラムのみ設置 (接触解析)
CASE3	端部ダイヤフラム及び中間ダイヤフラム (x=2500) を設置 (接触解析)
CASE4	端部ダイヤフラム及び中間ダイヤフラム (1000mm ピッチ) を設置 (接触解析)
CASE5	鋼管と充填コンクリートを完全に一体化 (界面の節点を共有)

また、図－10に CFT 断面における応力の着目点を示す。解析結果については、図－11及び図－12に各解析ケースにおける CFT の充填コンクリートならびに鋼管の橋軸方向直応力分布を示す。また、表－7に各解析ケースに

における載荷点の鉛直変位を示す。

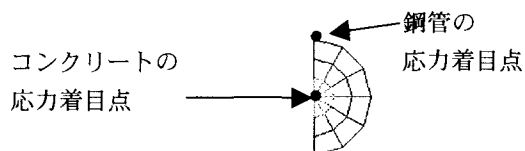


図-10 CFT断面における応力着目点

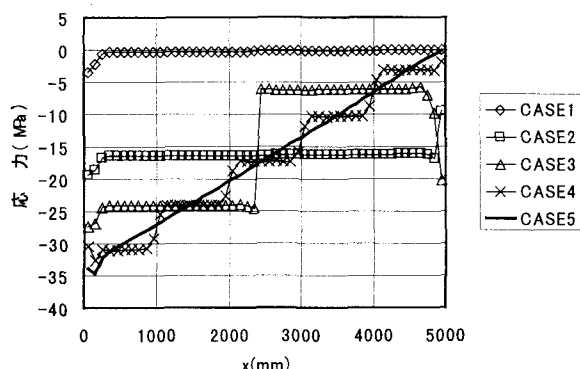


図-11 コンクリートの応力分布図
(橋軸方向直応力成分)

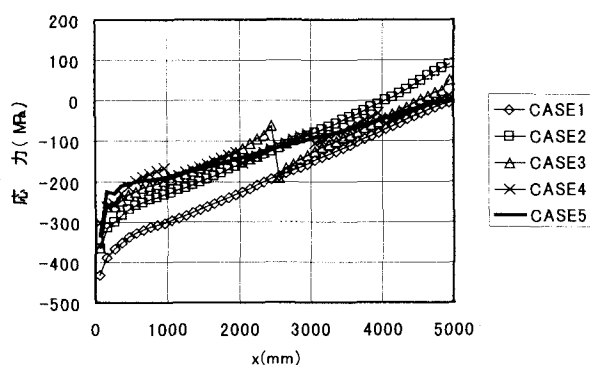


図-12 CFT鋼管の応力分布図
(橋軸方向直応力成分)

表-7 $x=0$ の断面における鉛直方向変位(mm)

	鉛直変位	CASE5 との比
CASE1	26.4	1.29
CASE2	22.0	1.07
CASE3	21.5	1.05
CASE4	20.7	1.01
CASE5	20.5	—

(2) 考察

図-11 より CASE5 における充填コンクリートの応力分布は、鋼管との界面におけるせん断応力の伝達があるため、曲げモーメント分布に沿った分布となっている。それに対し、CASE2、CASE3 および CASE4 はダイヤフラム間でほぼ一定な応力分布となっている。このことより、CASE2、CASE3、および CASE4 は界面におけるせん断応力の伝達がほとんど無いことが分かる。これは、充填コンクリートより鋼部材の方がポアソン比が大きいため、CFT に軸圧縮力が作用すると鋼管と充填コンクリートが肌離れを起こすためである。ダイヤフラムを配置した場合の充填コンクリートの応力はダイヤフラム間で CASE5 の応力をほぼ平均化した値となっている。

また、CASE1 は摩擦による応力伝達がほとんど無かったため、充填コンクリートと鋼部材とが重ね梁として挙動し、充填コンクリートの着目点（中心点近傍）における応力はほとんど 0 であった。すなわち、充填コンクリートは曲げモーメントに対して桁の圧縮フランジとして有効に機能していないことがわかる。

鋼管及びコンクリートの応力分布はダイヤフラム枚数の多い順（CASE4、3、2、1）に、両材料が理想的に一体化している CASE5 の応力分布に近づいている。

さらに表-7 より、CASE4 は CASE5 とほとんど同じ鉛直変位であり、CASE4 では充填コンクリートが剛性に十分寄与していると考えられる。

7. おわりに

CFT ガーダー橋に関して、構造の提案及び基礎的な検討を行った。本論文で示した CFT ガーダー橋の主桁設計法の妥当性については、縮尺模型による耐力試験により確認を行う予定である。

また、FEM による全体解析では CFT ガーダー橋の立体挙動について検証したが、併せて座屈解析により全体横倒れ座屈について検証する予定である。

さらに、ダイヤフラムを密に配置することにより、CFT の鋼とコンクリートが一体となって挙動することが確認できた。今後はさらに合理的なずれ止め方法について、検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物、1997
- 2) 日本橋梁建設協会：新しい鋼橋の誕生（公共工事のコスト縮減を目指して）資料編、1998.
- 3) 山本、大西、江上：CFT ガーダー橋に関する基礎的検討—フランジにコンクリート充填鋼管（CFT）を用いた橋梁（CFT ガーダー橋）の提案—、第 54 回土木学会年次学術講演会講演概要集、1999.

- 4) 矢木、大南、江上、大西：CFT ガーダー橋に関する基礎的検討—鋼管と充填コンクリートの一体化に及ぼすダイヤフラム配置の影響に関する数値解析的検討—、第 54 回土木学会年次学術講演会講演概要集、1999.
- 5) 本田、橋本、大西、磯江、江上、山本：CFT ガーダー橋に関する基礎的検討—支間 150m の 2 主桁 CFT ガーダー橋が横荷重を受けたときの挙動—、第 54 回土木学会年次学術講演会講演概要集、1999.