

軸力および曲げを受けるコンクリート充填二重管柱の相関強度に関する考察

Strength Interaction of Concrete Filled Double Skin Composite Stub Columns Subjected to Axial Force and Bending

杉浦邦征*, 大島義信**, 小野紘一***

Kunitomo SUGIURA, Yoshinobu OSHIMA, Koichi ONO

- * Ph.D., 京都大学大学院助教授, 工学研究科都市環境工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
** 博士(工学), 京都大学大学院助手, 工学研究科都市環境工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
*** Ph.D., 舞鶴工業高等専門学校校長, (〒625-8511 京都府舞鶴市宇白屋 234 番地)

Studied herein is the strength interaction curves for steel tube embedded concrete members subjected to axial force and bending moment, which have become the standard of high-rise piers in the construction of highways recently. Particular emphasis is placed on the optimum arrangement of steel tubes in strength. The exact strength for composite section is obtained by the fiber method and its strength interaction curve is compared each other. The interaction curve by strength superposition suggests the larger distance of steel elements far from the centroid of the composite cross section; however, it is shown that it depends on the strength ratio of steel sections and RC sections. It is also validated that the outer steel tube element is very effective to improve the structural performance by the confinement to the filled concrete.

Key Words: コンクリート充填管構造, 合成断面, 相関強度, 曲げモーメント, 軸圧縮

Concrete Filled tube member, Composite section, Interaction Strength, Bending moment, Compression

1. 概要

周知のように我が国の財政の悪化にともない、昨今の橋梁建設においては、工費等の縮減が強く求められ、合理的構造の実現に向けて積極的な取組みが実施されている。また、熟練技術者の不足にともない、その架設および維持管理において省力化が一層強く求められ、結果的に、橋梁のライフサイクルコスト (LCC) の重視から、設計から製作、架設、維持管理に至る総費用の低減が求められ、省力化・合理化は、益々重要な課題として位置付けられている。このような状況下、第二東名・名神高速道路および日本列島を横断する高速道路網の整備が、精力的に進められているが、これらの道路建設は、これまでの海岸線に平行した平野部での建設から、施工上厳しい内陸深く、山間部での建設にシフトし、道路線形を維持するために地形上高橋脚が採用されることとなった。このような高橋脚の耐震安全性とともに安全で工期短縮による経済的な施工等に関する技術開発が求められ、複合構造による高性能化に重点を置いた橋梁、すなわち、上下部一体化橋梁、異種桁結合橋梁に

代表されるような鋼・コンクリート複合構造を採用して、合理化・省力化が積極的に進められている¹⁾²⁾。

新しい複合構造橋脚の開発動向の一例としては、日本道路公団によって試験施工されてきた(i)鋼管・コンクリート複合構造橋脚ならびにハイブリッド・スリップフォーム工法に代表されるその施工方法、(ii)鋼製エレメント・コンクリート複合構造橋脚および(iii)プレキャスト型枠を用いた RC 中空橋脚柱等が挙げられるが、その中でも急速施工、安全施工ならびに耐震安全性を十分確保した「鋼管・コンクリート複合構造橋脚」が、日本道路公団の高橋脚の標準とされるに至った³⁾。特に、本構造は、鉄骨・鉄筋コンクリート構造に分類され、帯鉄筋のかわりに PC 鋼より線を連続らせん巻き立てをした複合構造橋脚であり、鋼管を先行して立て込み、それを足場として柱断面コンクリートの施工型枠を移動させ、急速施工を可能とし、PC 鋼より線巻き立てによるじん性向上、柱上下部端での縞付き鋼管による付着特性の向上等の新しい試みを取り入れられた新構造として注目されている。

一般に、複合構造の剛性評価は、鉄骨・鉄筋等の鋼材と

コンクリートとの間には完全付着を仮定し、平面保持の仮定が成り立つとした RC 方式に基づいての算定法が不可欠であるが、強度評価に関しては、RC 方式に加えて、簡略評価法として建築構造設計で多用されている累加方式による評価も可能である⁴⁾。したがって、複合断面において、RC 断面および鋼断面の強度の累加性に基づいて最適断面を検討すると、曲げ耐力改善には、鋼要素を断面図心からより遠く配置するのが望ましいことが推察される⁵⁾。しかし、中空鋼管を断面内に配置する場合は、外縁のコンクリート要素も取り除くこととなり、鋼断面の面積比が小さく、RC 断面の耐力が支配的である場合は、曲げ耐力の低下が予想される。そこで、著者らは、中空断面化による重量低減および充填コンクリートの拘束効果を期待した曲げ耐力の改善を視野に入れ、コンクリート部分充填 2 重管構造の圧縮耐力特性を実験的に検討し、その有効性を示してきた⁶⁾

本論文では、鋼管・コンクリート複合構造形式の橋脚を対象として、その曲げモーメント-曲率関係に着目し、鋼-コンクリート複合断面形状の力学的特性に及ぼす影響を明らかにするとともに、鋼管・鉄筋等の鋼材の断面内での合理的な配置法、側方拘束の有無の効果、コンクリート充填二重管構造および外管の役割について検証した。

2. 一定軸力下における曲げ耐力の算定法

まず軸力と曲げモーメントを受ける断面の強度算定法として、詳細法である RC 方式（ファイバー法）による強度評価手法の概要を以下に簡潔に示す。

- ① 図-1 に示すような任意形状の断面に対して、平面保持の仮定を適用し、断面内のひずみ分布および応力分布を式(1)で定義する。なお、本研究では、鉄筋、鉄骨およびコンクリートに対しては、道路橋示方書⁷⁾で採用されている図-2 に示すような応力-ひずみ関係を用いた（ σ_s ：鋼要素の応力、 σ_{sy} ：降伏応力、 ϵ_s ：鋼要素のひずみ、 ϵ_{sy} ：降伏ひずみ、 ϵ_{su} ：鋼要素の破断ひずみ、 σ_c ：コンクリートの応力、 σ_{cc} ：横拘束筋で拘束されたコンクリートの強度、 σ_{ck} ：コンクリートの設計基準強度、 ϵ_c ：コンクリートのひずみ、 ϵ_{cc} ：コンクリートが圧縮最大応力に達する時のひずみ、 ϵ_{cu} ：横拘束筋で拘束されたコンクリートの終局ひずみ、 ϵ_{co} ：横拘束筋のないコンクリートが最初に圧縮最大応力に達する時のひずみ）。
- ② ①で与えられる断面内の任意点における応力を式(2)に示すように断面積分することで図心軸に作用する断面力の軸方向力 P および曲げモーメント M を算定する。
- ③ 軸力一定下での曲げモーメント-曲率曲線を求めるため、任意の曲率に対して図心軸上の平均ひずみを仮定し、軸力が所定の値となるよう平均ひずみを反復計算により求める。

$$\epsilon_i = \epsilon_0 + \phi \cdot z_i \quad (1a)$$

$$\sigma_i = f(\epsilon_i) \quad (1b)$$

$$P = \sum_i \sigma_i \Delta A_i \quad (2a)$$

$$M = \sum_i \sigma_i \cdot z_i \cdot \Delta A_i \quad (2b)$$

ここで、 z_i 、 ϵ_i 、 σ_i 、 $f(\epsilon)$ 、 ϵ_0 、および ϕ は、それぞれ断面内任意点の図心軸からの距離、その点におけるひずみ、その応力、ひずみ-応力関数（図-2 を参照）、断面の図心点における平均軸ひずみ、および曲げ曲率である。特に、本手法では、断面構成材料に対して多様な応力-ひずみ関係（コンクリートの拘束効果の有無、限界ひずみ、最大強度、弾性係数等を設定）に対応可能であり、引張クラック発生曲げモーメント、鉄筋降伏曲げモーメント、最大

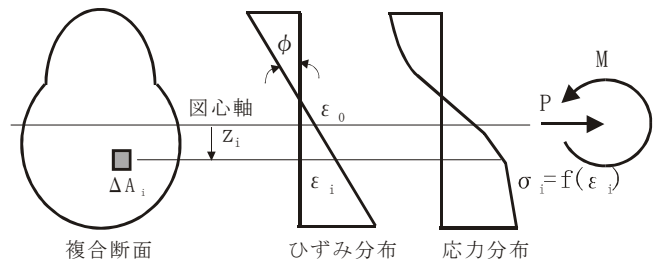
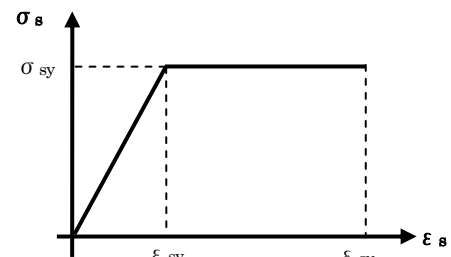
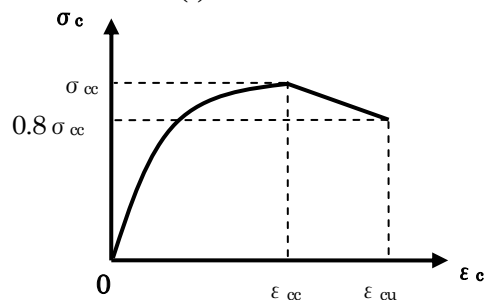


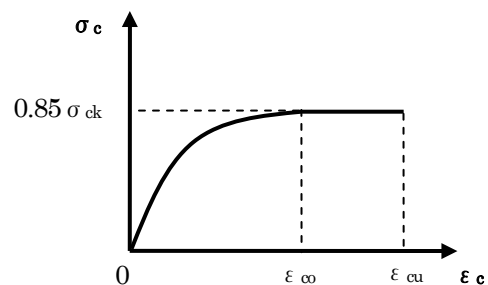
図-1 RC 方式（ファイバー法）による断面力の算定



(a) 鉄骨／鉄筋



(b) コンクリート（拘束効果あり）



(c) コンクリート（拘束効果なし）

図-2 断面構成材料の応力-ひずみ関係

曲げモーメントならびに終局時の曲げモーメントと曲率等を詳細に求めることが可能である。しかし、断面積分の精度は、断面の離散化・分割数に依存し、鉄骨使用時には、その等価鉄筋断面への換算に手間を要する欠点がある。なお、コンクリート標準示方書などでは、反復計算により逐次曲げモーメントー曲率曲線を求めることに代わり、終局時の曲げモーメントおよび曲率のみを算定する目的で、終局時における断面内のコンクリートの非線形な応力分布を等価矩形応力ブロックに近似し、簡易に強度の安全側の評価が行える方法⁹⁾が採用されているが、曲げモーメントー曲率関係の比較も行うため、本研究では詳細な断面挙動解析を実施することとした。

3. 矩形断面に対する算定結果および考察

3.1 対象とする断面形状

鋼管・コンクリート複合構造橋脚断面としては、日本道路公団の「鋼管・コンクリート複合構造橋脚の設計マニュアル³⁾」に基づき図-3に示す対象断面を設定した(鋼管を3×2=6本設置、A-1断面)⁵⁾。なお、材料特性は、表-1に示す通りで、記載のない諸数値に関しては道路橋示方書にしたがい決定した。また、PC鋼より線の帯鉄筋換算は、文献3にしたがった。断面分割は、高さ方向に1000とした。

比較断面として、鋼管位置(断面図心から鋼管中心までの距離をy)を、500, 1000, 1250(標準), 1500(mm)と変え

表-1 断面構成材料の強度

コンクリート	$\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$
主鉄筋	SD345 ($\sigma_y=345\text{N/mm}^2$)
PC鋼より線	SWPR7B 1S15.2 ($\sigma_y=1570\text{N/mm}^2$)
鋼管	SKK490 ($\sigma_y=315\text{N/mm}^2$)

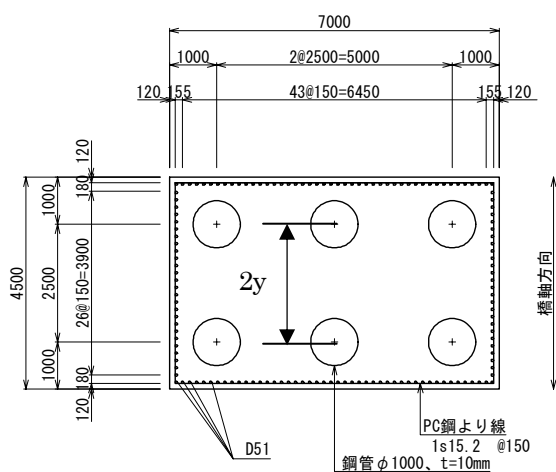
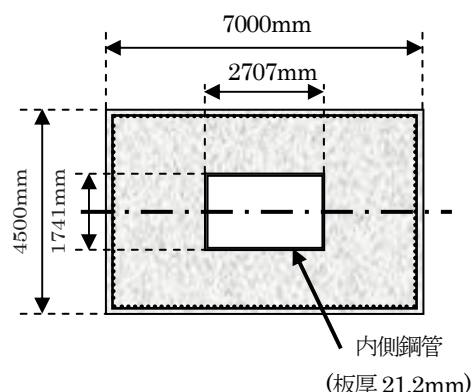
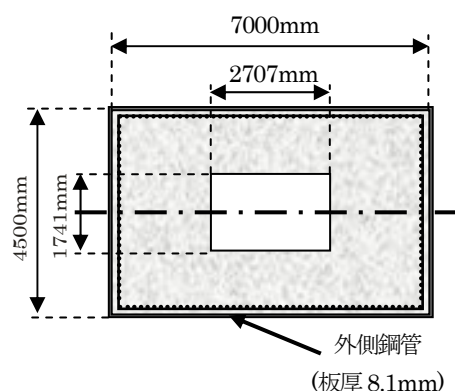


図-3 基本断面形状(矩形断面, 寸法単位 mm)

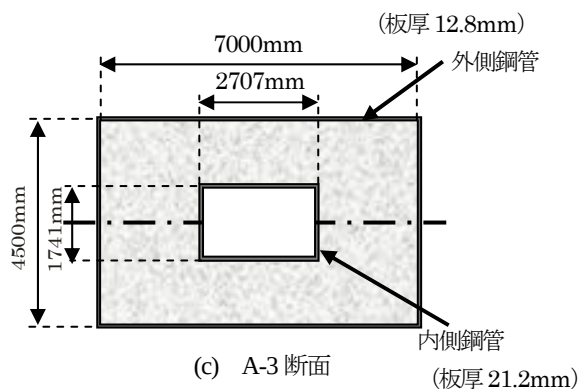
た。それぞれ、A-1-1断面、A-1-2断面、A-1-3断面、A-1-4断面と呼ぶ。中空断面として、図-4(a)を比較断面(A-2-1断面)とした。ここで、内側鋼管の板厚21.2mmは、A-1断面における6本の円形鋼管の全断面積と単一の内側矩形鋼管の断面積を等しくし、それぞれの中空部分の断面積も同じとした。すなわち、断面を構成する材料の面積は、すべて同じとしている。さらに、比較のため、内側鋼管と同じ断面積を有する単一の外側鋼管(板厚8.1mm)に置き換えた場合を、A-2-2断面とした(図-4(b)参照)。ここでは、外側鋼管を強度断面と考える。なお、外側鋼管に拘束効果のみを期待できるとしたA-2-3断面、強度および拘束効果を期待できるとしたA-2-4断面も対象とした。最後に、A-2-1断面において、軸方向鉄筋を取り除き、単一の外側鋼管に置き換えた断面をA-3断面とした(図-4(c)参照)。ここでは、軸方向鉄筋の全断面積およびコンクリート断面の外側寸法を



(a) A-2-1断面



(b) A-2-2断面



(c) A-3断面

図-4 比較した断面形状

あわせた結果、外側鋼管の板厚は、12.8mm となった。ここで、A-3 断面は、二重管断面である。なお、外側鋼管に強度のみを期待する場合、コンクリートの拘束効果のみを期待する場合、両方を期待する場合をそれぞれ A-3-1 断面、A-3-2 断面、A-3-3 断面とした。

なお、横拘束筋で拘束されたコンクリートの強度 (σ_{cc}) の算定にあたり、横拘束筋の体積比 ρ_s が必要となるが、横拘束筋の降伏強度を考慮した以下の式を用いた。

$$\rho_s = 4 \frac{[A_h \cdot (\sigma_{sh} / \sigma_{pcy})]}{s \cdot d} \quad (3)$$

ここに、 A_h ：横拘束筋の断面積(138.7mm²)、 s ：横拘束筋の間隔 (150mm)、 d ：横拘束筋の有効長 (6760mm)、 σ_{sh} ：鉄筋の降伏強度 (345N/mm²)、 σ_{pcy} ：高強度より線の降伏強度 (1570N/mm²) である。基本断面の ρ_s は、0.00249 である。

3.2 矩形断面に対する考察

図-5 に鋼管位置の違いによる相関強度曲線の比較結果を示す。図からわかるように、若干ではあるが、鋼管を断面図心位置からより遠くに配置することで、高軸力側での曲げ耐力の低減が見られる。なお、累加強度による評価から、鋼要素は断面図心からより遠く配置することが望ましいとされるが、曲げにおいては、圧縮力を分担するコンクリート断面の図心が、中立軸より遠く位置することも重要であり、中空鋼管を断面図心位置に集中させ、断面性能の改善が図れることが分かった。しかし、一般に、実設計では、合成断面での軸圧縮レベルが、最大曲げ耐力が得られる軸圧縮力レベルよりかなり低いレベルに設定されることから(圧縮耐力の 10%程度)、鋼管位置の影響は大きくないと判断される。したがって、施工の観点から、6 本の鋼管配置と、1 本の鋼管配置 (例えば、A-2-1 断面) の優位性を議論すべきと考えられる。

次に、単一鋼管を有する A-2-1 断面を標準に、外・内への配置、拘束効果の影響を比較した結果を示すため、A-2-1 断面、A-2-2 断面、A-2-3 断面、A-2-4 断面に対する相関強度曲

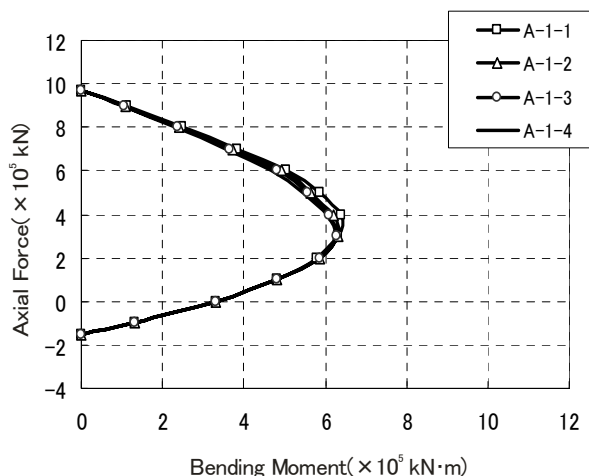


図-5 相関強度の比較 (鋼管配置の影響)

線を図-6 に示す。前述の考察とは逆に、鋼要素を断面図心から離して配置することで (外側鋼管の採用、A-2-1 断面から A-2-2 断面へ変更)、曲げ耐力が大幅に改善されていることがわかる。さらに、コンクリート充填鋼管構造のように外側鋼管が充填コンクリートを拘束する効果が期待できるため、外側に配置した鋼管に同様なコンクリート拘束効果を考慮すれば、さらに曲げ耐力が改善されていることが分かる (A-2-2 断面と A-2-4 断面の比較)。なお、実設計で対

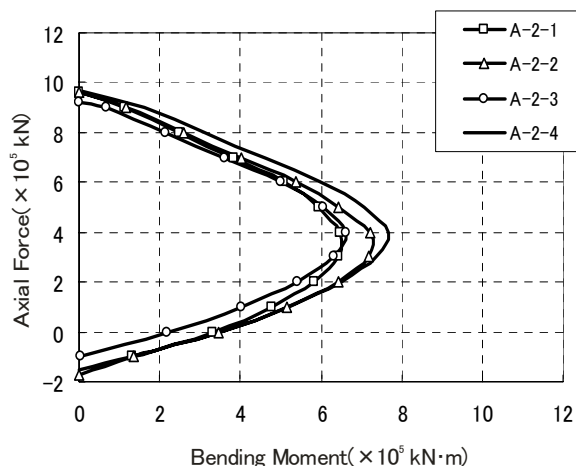


図-6 単一鋼管 (外・内) の配置の影響

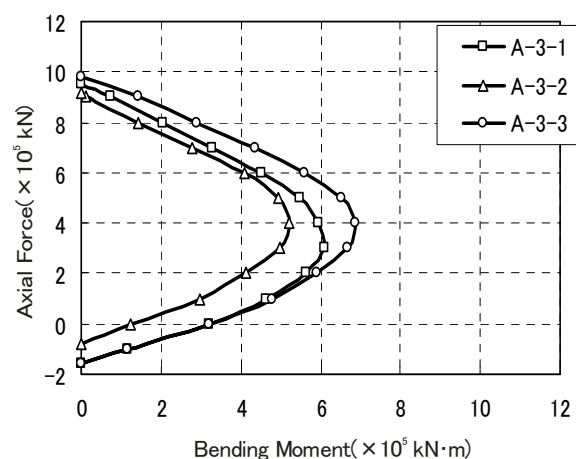


図-7 二重管構造における拘束効果の影響

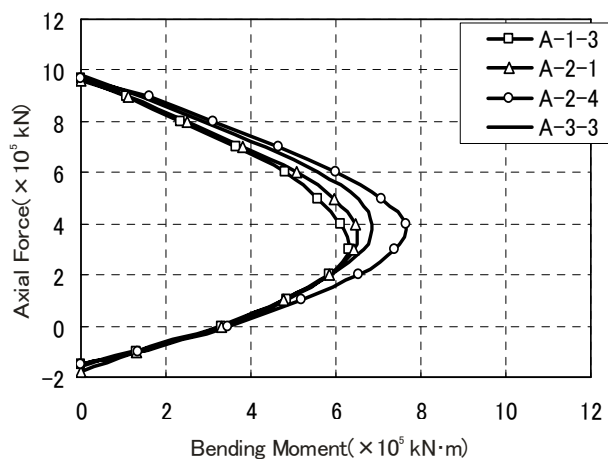


図-8 断面性能比較

象となる軸圧縮レベルにおいても、有意な差が認められる。

ところで、このような大断面に用いられる主鉄筋は、一般に、D51（直径 51mm）であり、鉄筋工の作業は、人手では困難で、重機等が不可欠であり、鉄筋継ぎも機械接合が採用されるなど、施工性は極めて低い。したがって、このような鉄筋工を取り除いた A-3-1 断面は、鋼部材の施工を機械化することを前提に、またコンクリート打設時の型枠を兼ねることから非常に有効と考えられる。図-7 に、主鉄筋の断面を外側鋼管に置き換えた場合の外側鋼管の効果を検証するために、A-3-1 断面、A-3-2 断面、A-3-3 断面の相関曲線を比較した（ただし、内側鋼管は単一の場合のみを対象とする）。外側鋼管に充填コンクリートの拘束効果を考慮すれば、曲げ耐力を大幅に改善できることが分かる。特に、高軸力の場合においては、拘束効果による充填コンクリートの強度向上による曲げ耐力の改善効果は大きいと判断できる。

最後に、標準断面（A-1-3 断面）、単一の内側鋼管（A-2-1 断面）、単一の外側鋼管（A-2-4 断面、拘束効果を考慮）、二重管構造（A-3-3 断面、拘束効果を考慮）をあらためて比較した結果を図-8 に示す。断面図心から遠く離して鋼材を有効に配置する A-2-4 断面の性能の高さが伺える。しかし、内側鋼管が存在しないため、充填コンクリートの拘束効果が十分期待できるのか、終局時において剥落しないかなどが懸念される。一般の中空 RC 断面の場合は、主鉄筋は、コンクリート部材表面近傍（内側および外側）に配置され、それらを取り囲むように帯鉄筋が配置され、コンクリートの早期の剥落を防止している。したがって、A-3-3 断面が、実用上も効率的な断面設計であると考えられる。ただし、大断面の鋼部材の施工性については、鋼板から断面へ、もしくは部材への現地での組立て方法などを詳細に検証する必要がある。

図-9 には、本論文で検討した代表的な断面の曲げモーメント-曲率曲線を比較した。なお、軸圧縮力は、最大軸圧縮耐力の 30% のケースをまとめて示す。図から、A-2-4 断面の曲げ耐力、A-3-2 断面の変形能の高さが伺える。ただし、実験などにより検証する必要がある。

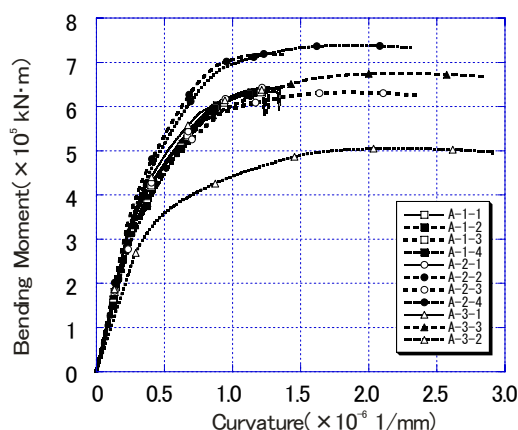


図-9 曲げモーメント-曲率曲線における比較結果

4. 円形断面に対する算定結果および考察

4.1 対象とする断面形状

日本道路公団で採用されてきた鋼管・コンクリート複合構造橋脚断面としては、矩形断面が一般的である。ここでは、断面形状の比較をするため図-10 に示すような鋼管を 6 本、円周方向に等ピッチで配置した円形断面、B-1 断面を取り上げ、矩形断面と同様な手順で相関強度の比較を行った。なお、材料特性は、表-1 に示す通りで、記載のない諸数値に関しては道路橋示方書にしたがい決定した。

ここで比較断面として、鋼管位置（断面図心から鋼管中心までの距離を y ）を、1000, 1500, 2200, 2500(mm)と変えた断面形状を取り上げた。それぞれ、B-1-1 断面、B-1-2 断面、B-1-3 断面、B-1-4 断面と呼ぶ。中空断面として、図-11(a) を比較断面（B-2-1 断面）とした。ここで、内側鋼管の板厚 24.5mm は、B-1 断面における 6 本の円形鋼管の全断面積と単一の内側円形鋼管の断面積を等しくし、それぞれの中空部分の断面積も同じとした。すなわち、断面を構成する材料の面積は、すべて同じとしている。さらに、内側円形鋼管と同じ断面積を有する単一の外側鋼管（板厚 9.3mm）に置き換えた場合を、B-2-2 断面とした（図-11(b)参照）。ここでは、外側鋼管を強度断面と考える。なお、外側鋼管に拘束効果のみを期待できるとした B-2-3 断面、強度および拘束効果を期待できるとした B-2-4 断面も対象とした。最後に、B-2-1 断面において、軸方向鉄筋を取り除き、単一の外側円形鋼管（板厚 14.7mm）に置き換えた断面を B-3 断面とした（図-11(c)参照）。ここでは、軸方向鉄筋の全断面積およびコンクリート断面の外側寸法をあわせた結果、外側鋼管の板厚は、14.7mm となった。なお、B-3 断面は、A-3 と同様に二重管断面である。また、外側鋼管に強度のみを期待する場合、コンクリートの拘束効果のみを期待する場合、両方を期待する場合をそれぞれ B-3-1 断面、B-3-2 断面、B-3-3 断面とした。

4.2 円形断面に対する考察

矩形断面に対する考察と同様に、鋼管配置の影響、単一鋼管の配置の効果、外側鋼管の拘束効果の影響、断面性能比較をそれぞれ、図-12、図-13、図-14、図-15 に示す。

これらの比較結果から、円形断面においても、①鋼管は、断面図心に集めて配置する（図-12 より B-1-1 断面の相関強度が大きい）、②外側鋼管の配置が望ましい（図-13 より B-1-1 断面より B-2-2 断面の方が相関強度が大きい）、③外側鋼管に充填コンクリート拘束効果を考慮することで、性能改善が大幅に可能であることが分かる（図-15 の B-2-4 断面、B-3-3 断面の相関強度が大きい）。ただし、矩形断面の性能差（図-8）と円形断面の性能差（図-15）を比較して明らかに、矩形断面に比べて円形断面では、外側鋼管による充填コンクリートへの拘束効果が顕著に現れることから、特に、外側鋼管の軸方向分担にともなう組合せ応力下での塑性化による拘束効果の低下には十分な配慮が必要である。

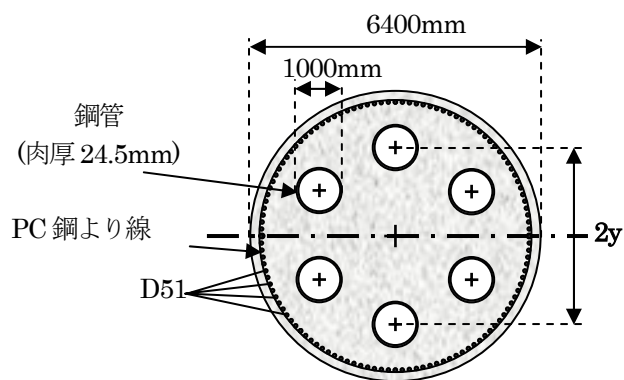


図-10 基本断面形状 (円形断面, 寸法単位 mm)

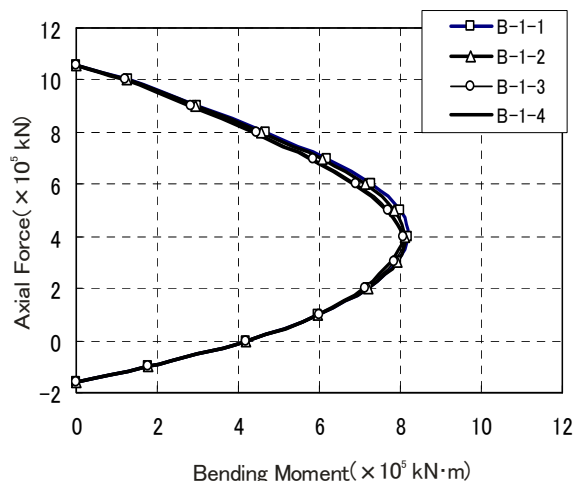


図-12 相関強度の比較 (鋼管配置の影響)

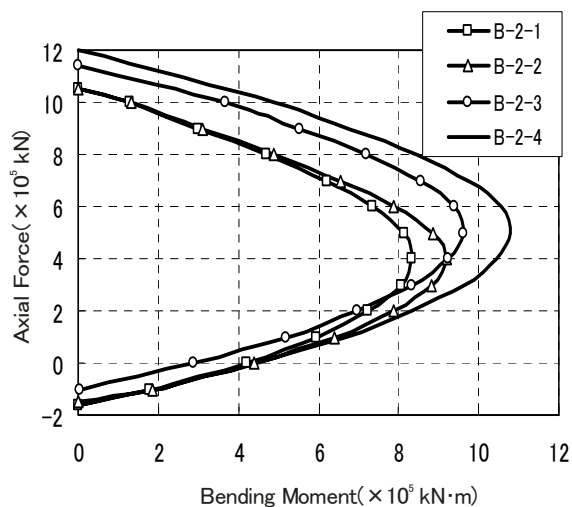
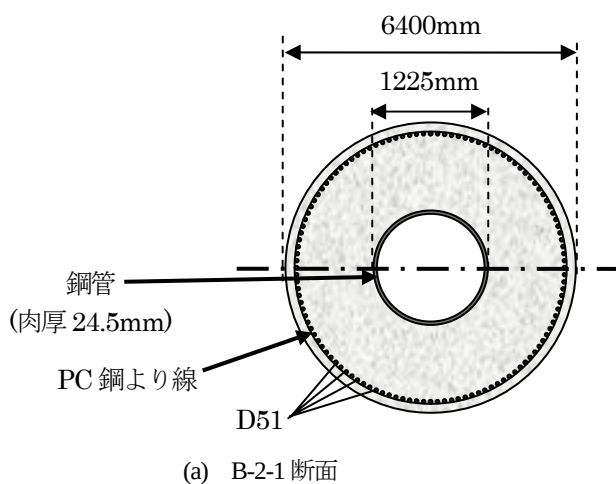


図-13 単一鋼管 (外・内) の配置の影響

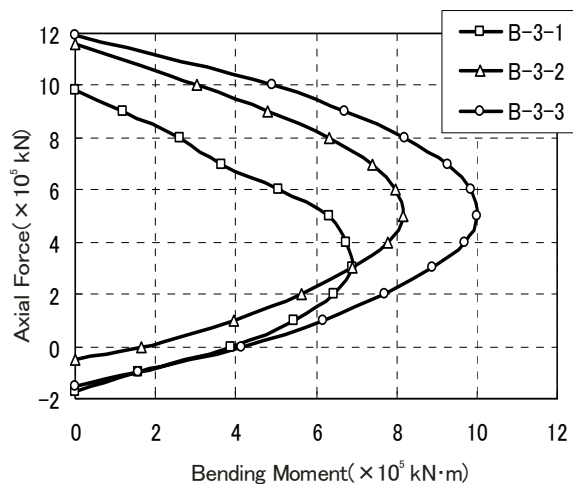
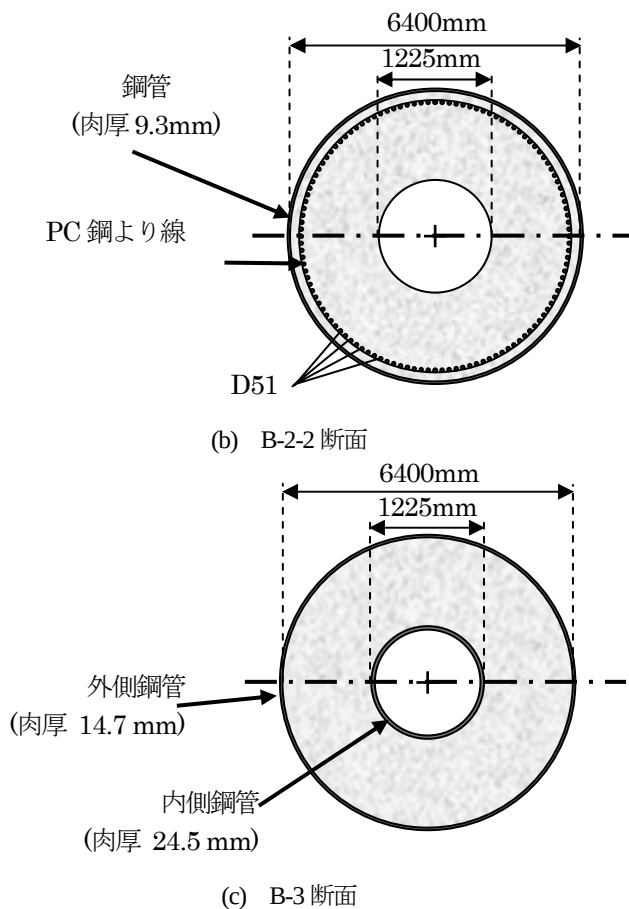


図-14 二重管構造における拘束効果の影響

図-11 比較した断面形状

そのためには、外側管には 2 方向に強度の異なる材料を用いて、軸力と曲げモーメントによる軸方向応力レベルと充填コンクリートの拘束効果のための円周方向応力レベルが、塑性化に対してそれぞれ異なる応力余裕度を確保するか、これらの組合せ応力による塑性化の影響が小さい材料を用

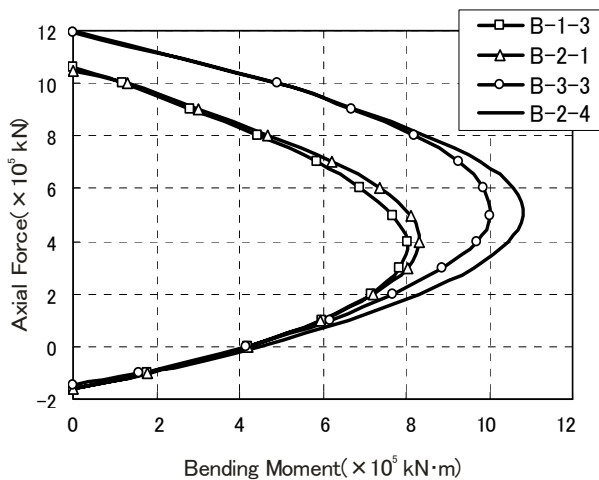


図-15 断面性能比較

いる必要がある。例えば、積層構造により強度異方性を発揮できる繊維強化プラスチック材（FRP 材）などが最適と考えられる。一方、内側管は、剛性・強度の最低レベルを保証するために鋼材料による管構造が望ましい。これらを総合的に判断して、B-3 断面（矩形断面では、A-3 断面）のような二重管構造形式について更なる実験的、解析的検討が望まれる。

5. 結論

本研究では、鋼管・コンクリート複合構造形式の橋脚を対象として、その曲げモーメント・曲率関係に着目し、鋼・コンクリート複合断面形状の力学的特性に及ぼす影響を明らかにするとともに、鋼管・鉄筋等の鋼材の断面内での合理的な配置法、側方拘束の有無の効果、コンクリート充填二重管構造および外管の役割について検証した。これらの比較結果から、矩形断面および円形断面に共通して、①内側鋼管は、断面図心に集中して配置する、②内側鋼管より外側鋼管としての配置が望ましい、③外側鋼管に充填コンクリート拘束効果を考慮することで、性能改善が大幅に可能であることが分かる。さらに、矩形断面と円形断面の性能を比較すると、④外側鋼管による充填コンクリートへの拘束効果は、円形断面で顕著に現れる。

以上のように外側鋼管の充填コンクリートへの拘束効果による性能改善は注目すべきであるが、終局時において外

側鋼管の軸方向応力分担にともなう拘束効果低下を避ける必要がある。そのためには、外側管には軸方向・円周方向の2方向の強度相関が小さい材料、もしくは2方向での応力分担に応じて強度を最適に設計した材料を用いて、軸方向応力分担に係わらず、充填コンクリートの拘束効果を絶えず確保できるようすべきである。一方で、内側管は、現行の鋼管・コンクリート複合構造橋脚の鋼管と同様に先行して立て込み、それを足場として柱断面コンクリートの打設が行えるような施工性にも配慮し、剛性・強度の最低レベルを保証するために鋼材料を用いた鋼管が望ましいと考えられる。今後は、このような二重管構造形式について、実験的実証が望まれる。

【参考文献】

- 1) 小川篤生・寺田典生・安川義行：複合構造橋梁への取り組み，第1回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，土木学会，pp.47-57，1998.8.
- 2) 保坂鐵矢：経済性を追求した鋼鉄道橋の試み，第1回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，土木学会，pp.89-97，1998.8.
- 3) 日本道路公団：鋼管・コンクリート複合構造橋脚設計マニュアル，1998.8.
- 4) 若林實・南宏一・谷資信・平野道勝：合成構造の設計（第2版），彰国社，1995.10.
- 5) 杉浦邦征，白波瀬充，中嶋裕和，佐々木敦，栗田章光：軸力および曲げを受ける鋼・コンクリート合成短柱の相関強度に関する考察，構造工学論文集，土木学会，第48A巻，pp.1289-1296，2002.3.
- 6) 崔 鉉俊・杉浦邦征・大島義信：コンクリート充填二重鋼管柱の圧縮耐力に関する研究，第6回複合構造の活用に関するシンポジウム，土木学会，pp.57-1～57-6，2005.11(CD-ROM).
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅲ. コンクリート橋編，Ⅴ. 耐震設計編，1996.12.
- 8) 吉川弘道：鉄筋コンクリートの解析と設計，丸善，1995.6.

(2006年9月11日受付)