

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

Strength Interaction Curve of Steel-Concrete Composite Stub Columns Subjected to Axial Force and Bending

杉浦邦征*, 白波瀬充**, 中嶋裕和***, 佐々木敦****, 栗田章光*****

Kunitomo SUGIURA, Mitsuru SHIRAHASE, Hirokazu NAKASHIMA, Atsushi SASAKI, Akimitsu KURITA

- * Ph.D., 京都大学大学院助教授, 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)
 ** (株) ウェスコ大阪支社技術部構造設計課 (〒540-0021 大阪市中央区大手通 2-2-13)
 *** (株) 修成建設コンサルタント構造部構造二課 (〒553-0002 大阪市福島区鷺洲 2 丁目 5 番 15 号)
 **** 京都大学大学院修士課程, 工学研究科土木システム工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)
 ***** 工博, 大阪工業大学教授, 工学部土木工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)

Studied herein is the superposition of 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 accuracy of strength superposition of each strength of steel tube section and RC section obtained independently often used in the design of building structures for simplicity. The exact strength for composite section is also obtained by the fiber method and it is compared to the simply superposed interaction curve. It is concluded that the interaction curve by strength superposition is in good agreement with the exact interaction curve from practical point of view and this procedure can be used for the seek of an optimum arrangement of steel tubes in strength.

Key Words: 鋼管・コンクリート複合構造, 合成断面, 累加強度, 相関曲線

Steel tube embedded concrete member, Composite section, Superposition of strength, Interaction curve

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り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本州等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、合成断面の高性能化に重点を置いた橋梁、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た合理化・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鋼より線を用い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、柱上下部端での編付き鋼管による付着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⁾。

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、断面相関強度に対する累加方式の強度評価法の適用性を検証するとともに、その曲げモーメント-曲率関係に着目し、複合構造橋脚の力学的特性の優劣性を明らかにすることを目的とした。さらに、鋼管・鉄筋等の鋼材の断面内での合理的な配置法の基本的考え方についても別途検討を加えた。また、建築物の標準的な鉄骨・鉄筋コンクリート柱 (SRC 柱) に対する強度評価も行い、断面寸法の違いによる累加強度の適用性の相対比較も行った。

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) および簡略評価法の累加方式による強度評価の各手法の概要を以下に簡潔に示す。

2.1 RC 方式 (ファイバー法) による強度評価

RC 方式による断面強度評価は、以下の手順で行われる。

- 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⁵⁾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 (図中の記号は、参考文献を参照いただきたい)。
- 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。

$$\varepsilon_i = \varepsilon_0 + \phi \cdot z_i \quad (1a)$$

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

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

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

ここで、 z_i 、 ε_i 、 σ_i 、 $f(\varepsilon)$ 、 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。一方、反復計算により逐次曲げモーメント-曲率曲線を求めることに代わり、コンクリート標準示方書などでは、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が採用されている⁶⁾。

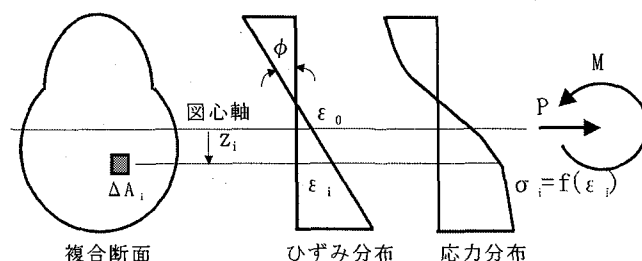


図-1 RC 方式 (ファイバー法) による断面力の算定

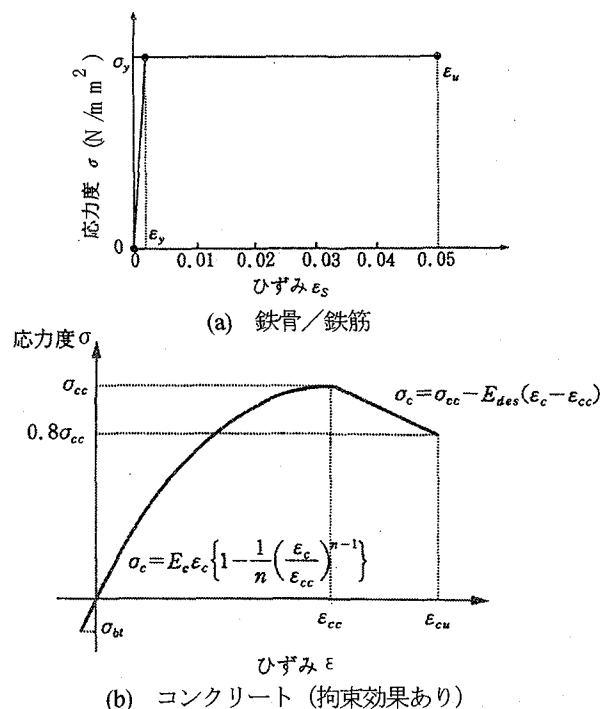


図-2 断面構成材料の応力-ひずみ関係

2.2 累加方式による強度評価

累加方式による断面強度評価は、RC 断面と鋼断面の強度をそれぞれ独立して求め、それらの単純重ね合わせ (単純累加、一般化累加の 2 種類がある) によって強度を算定

する手法で、建築構造設計の分野で適用されている。終局強度に対する単純累加強度は、塑性解析における下界定理に基づき、応力（断面力）空間上での強度の下限を保証する。一方、一般化累加強度は下界定理だけでなく、運動学的な条件（上界定理）をも満足し、崩壊機構をも明示することが出来ることが示されている⁷⁾。すなわち、以下の考えにより変形の適合条件も満足した累加強度の妥当性が示される。

- ① 各構成要素に対して断面力の降伏（終局強度）曲面を求め、降伏曲面を塑性ポテンシャルと考える。
- ② 上記①に対して、関連流れ則を適用して、塑性ひずみ増分（変形増分）が一致する各構成要素の断面力を累加する。

例えば、一般化応力として軸力と曲げモーメントの断面力のみを考慮した SRC 柱を例として、その軸力－曲げモーメント（N-M）相関曲線に基づき、一般化累加強度を算定する手順を図-3 に示す。一般化累加強度理論による終局強度は、個々の構成要素の負担する軸力 N と曲げモーメント M のベクトルの和が最大となる組み合わせの時に発揮され、一つの構成要素の相関曲線を他の要素の相関曲線の外周に沿って移動させたときの曲線群の包絡線が全断面（SRC）の N-M 相関強度に相当する。したがって、RC 断面（C）の相関曲線の原点を鋼断面（S）の相関曲線に沿って移動させた場合の包絡線を求めることによって一般化累加強度が算出される。また、同様に鋼断面の相関曲線を RC 断面の相関曲線に沿って移動させたときの包絡線によっても評価することが可能である。

ただし、弾性剛性の評価を行うことができず、使用性限界照査の対象となる変形量の評価には適用できない等の欠点を有する。さらに、鋼断面と RC 断面のそれぞれの図心位置が大きくずれていないことが必要条件ともされている。

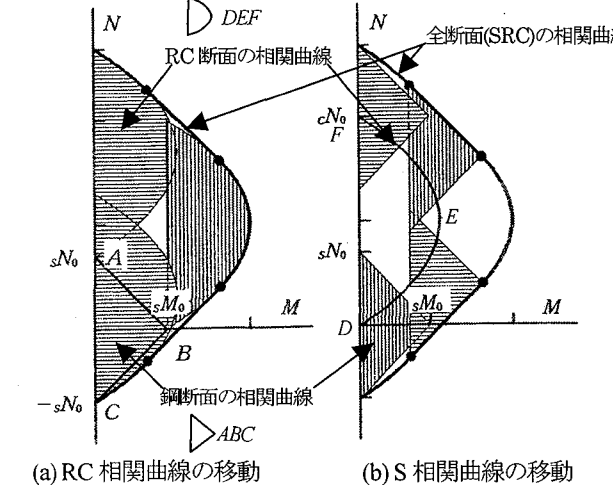


図-3 一般化累加強度の求め方の概略

3. 算定結果および考察

3.1 建築物 SRC 柱（算定例(1)）

はじめに、日本建築学会の鉄筋・鉄骨コンクリート構造

計算基準⁸⁾で例題として取り挙げられている図-4 に示す H 形鋼を埋め込んだ SRC 柱断面に対して検討を行う。なお、材料特性は、表-1 に示す通りである。表中に記載の無い弾性係数などの値は、道路橋示方書にしたがった。なお、断面高さ方向に 1000 分割した。

RC 方式および累加方式による軸力－曲げモーメント強度相関曲線の比較結果を図-5 に示す。なお、図中には、鋼断面（H 形鋼）ならびに RC 断面（コンクリート＋鉄筋）のみの強度相関曲線も比較のために示した。最大曲げモーメントが得られる領域において累加方式による相関曲線は、RC 方式によるそれを上回る結果となり、強度を高く評価する傾向が確認される。特に、RC 断面と鋼断面のそれぞれの強度に顕著な差が無いことから（RC 断面の強度が若干大きい）、累加方式の強度評価においては、相対的に累加誤差が導入され易い。ただし、最大累加誤差も約 3% であり、実務上、適用には支障はないと考えられる。

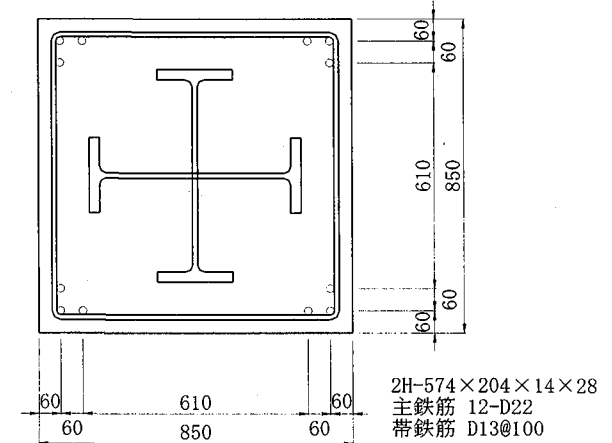


図-4 建築物 SRC 柱の断面形状（寸法単位：mm）

表-1 断面構成材料の強度

コンクリート	$\sigma_a=21\text{N/mm}^2$
鉄筋	SD345 ($\sigma_y=345\text{N/mm}^2$)
H 形鋼	SM490/H574×204×14×28 ($\sigma_y=315\text{N/mm}^2$)

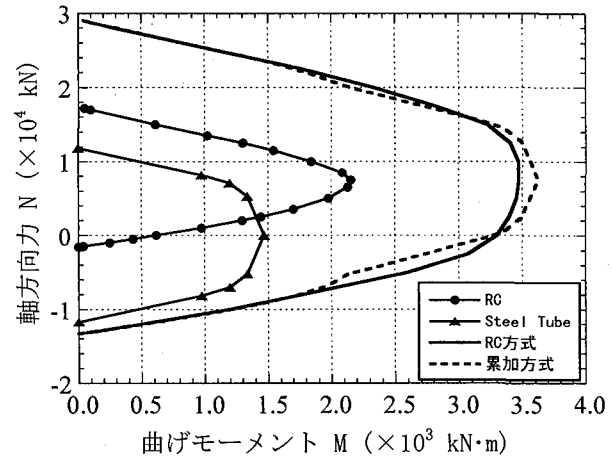


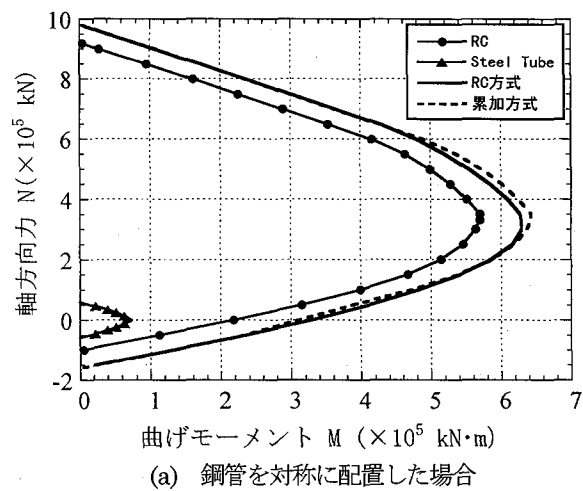
図-5 N-M 強度相関曲線の比較結果（算定例(1)）

3.2 鋼管・コンクリート複合構造橋脚（算定例(2)）

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-6(a)に示す対象断面を設定した（鋼管を3×2=6本設置）。なお、断面非対称性の影響を検討するため、図-6(b)に示すように鋼管を非対称に配置した断面（鋼管を3+1=4本配置）についても比較のため検討に加えた。なお、材料特性は、表-2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、算定例（1）と同様に高さ方向に1000とした。

RC方式と累加方式によって求めた断面強度相関曲線（N-M相関曲線）の比較結果を図-7に示す。鋼管を対称に配置した断面に対しては、両者の差異は非常に小さく、累加方式による強度評価の適用には何ら問題は無いものと考えられる。ここでは、RC断面の強度に比して、鋼断面の強度が小さく、累加方式による強度評価時に導入される累加誤差が全断面の強度に対して相対的に小さくなるためと考えられる。一方、鋼管を非対称配置とした場合の断面強度の比較結果では、両者の差異の絶対量は相対的に小さくなっているものの、誤差が生じる領域が、相関曲線の全体にわたっていることが分かる。これは、鋼管の対称配置の場合に比して、鋼断面の強度がさらに小さくなることと累加誤差の最大量を小さくし、鋼断面とRC断面の図心位置の違いが全体的に累加誤差を生じさせているものと考えられる。したがって、建築SRC柱断面に比して、表-3に

表-2 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 ($\sigma_y=315\text{N/mm}^2$)



示すように断面内に配置される鋼材量が比較的小さい鋼管・コンクリート複合構造橋脚断面に対する累加方式による強度評価の適用には、実用上問題は無いと結論付けられる。さらに、鋼管の断面内への最適配置に関しては、強度の累加性がこのように保証されることを踏まえ、構造細目にしたいが鋼断面（鋼管）のみに対して強度が最大となる

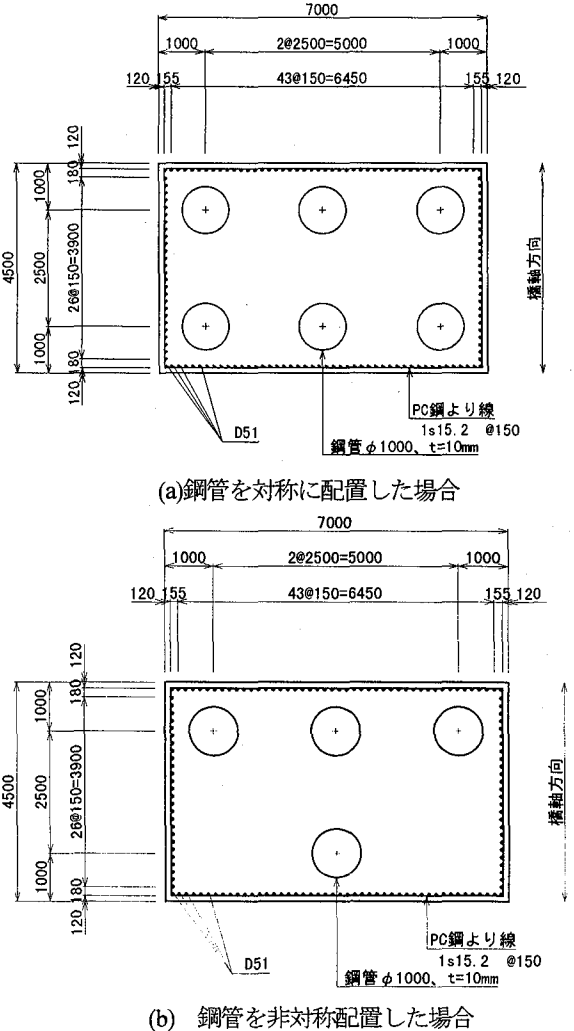


図-6 鋼管・コンクリート複合構造橋脚の断面形状（寸法単位：mm）

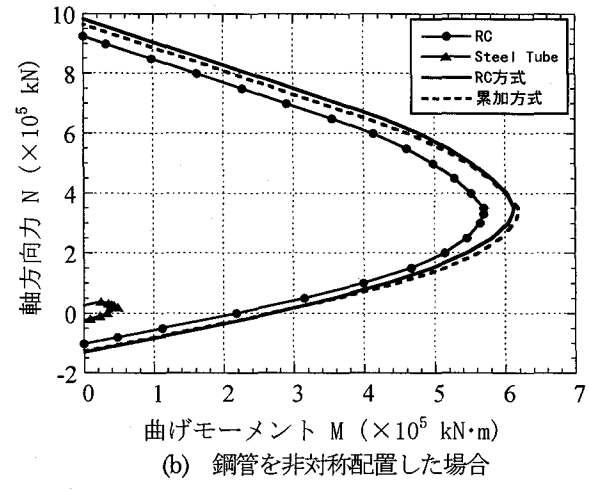


図-7 N-M 強度相関曲線の比較結果（算定例(2)）

ように設定すれば良いことが分かる。また、全断面は、鋼管、鉄筋、コンクリートの3要素により構成されるので、鉄筋の最適配置に対しても同様な議論が可能と考えられる。

次に、鋼管を対称に配置した断面に対して、RC方式により求めた一定軸力下の曲げモーメント-曲率関係の一例を図-8に示す。道路橋示方書では、圧縮側鉄筋位置でコンクリートのひずみが圧壊ひずみに達した時、終局としているが、最大曲げモーメント点へはその直前に到達していることが確認される。また、対象断面の実設計における軸力レベル ($N=1.3 \times 10^4 \text{ kN}$) では靱性的な挙動をしているが、高軸力下では、コンクリート圧壊直後に急激に曲げモーメントが低下することがわかる。例えば、 $N=1.5 \times 10^5 \text{ kN}$ では、許容塑性率 (ϕ_u/ϕ_y) が、2.86 と非常に低い値を示した。したがって、鋼管・コンクリート複合構造橋脚においても、低軸圧縮力の場合のみ高い靱性を発揮でき、高軸力下においては耐震性の検討が必要と考えられる。特に、高橋脚を有するラーメン構造では軸力変動が顕著であるため、全体構造系における耐震性の検討が必要とされる。

3.3 コンクリート強度・限界ひずみの影響

累加方式による強度評価の精度は、複合断面が最大強度を発揮する時、鋼断面と RC 断面のそれぞれの断面の終局状態の整合性に左右され、鋼材の延性的特性を考慮すると、結果的にコンクリートの強度と限界ひずみが大きく影響することが理解できる。ここでは、表-4に示すコンクリートの物性値の組み合わせに対して累加方式による強度評価の精度を検討した。なお、他の条件は、3.1節および3.2節に記載の通りである。しかし、コンクリートの応力-ひずみ関係には、帯鉄筋の拘束効果を明瞭に考慮しない図-9に示す一般的な関係を用いた。

建築SRC柱および橋脚SRC柱に対する相関曲線の比較結果をそれぞれを図-10および図-11に示す。建築SRC柱においては、3.1節での結果と同様に累加方式による強度はRC方式による強度より大きく、限界ひずみが小さいほど、またコンクリート強度が小さいほど（鋼断面とRC断面の耐力差が広がる）、誤差は大きくなる傾向にある。一方、橋脚SRC柱では、コンクリートの強度および限界ひず

に関わらず誤差は極めて小さいことがわかる。

表-3 断面特性の比較結果

対象断面	建築SRC柱	橋脚SRC柱 (対称断面)
強度比(RC/鋼)	1.47	7.75
かぶり厚, 断面寸法比	0.162	0.111
鋼材比 (%)	5.16	0.592

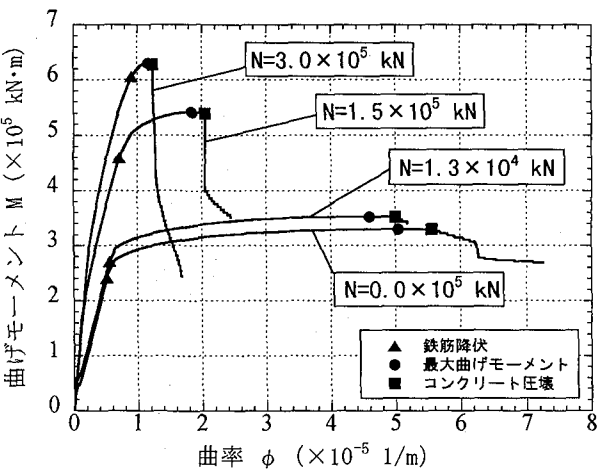


図-8 曲げモーメント-曲率曲線

表-4 コンクリートの強度と限界ひずみ

対象断面	建築SRC柱	橋脚SRC柱 (対称断面)
強度(N/mm^2) σ_{ck}	21, 63	30, 60
限界ひずみ ϵ_{cu} (%)	0.25, 0.35	

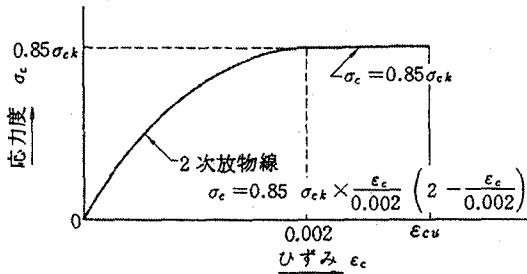


図-9 拘束効果を考慮しない応力-ひずみ関係

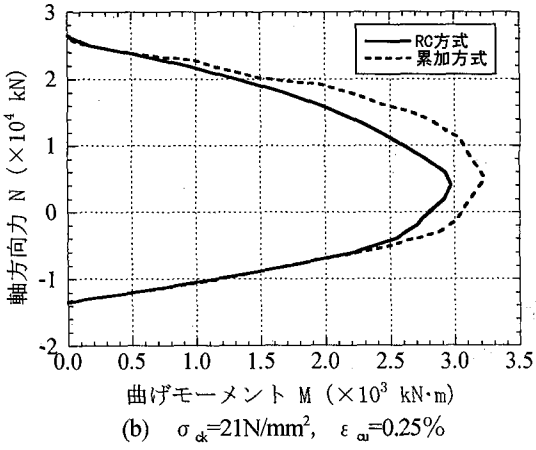
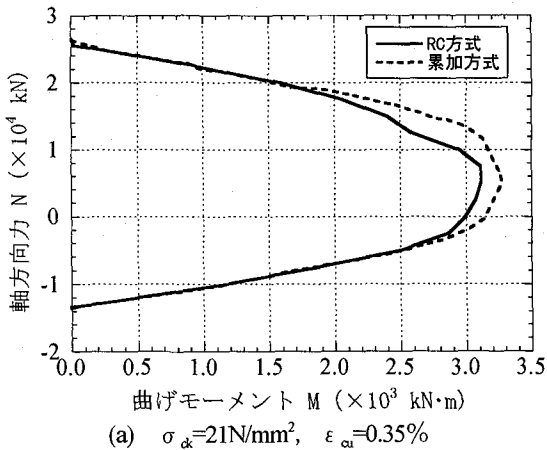


図-10 建築SRC柱のN-M強度相関曲線の比較

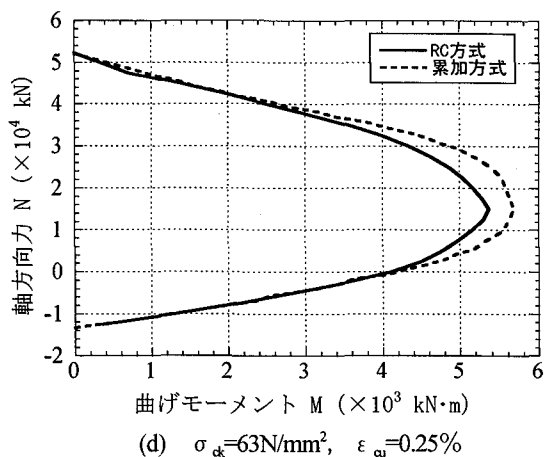
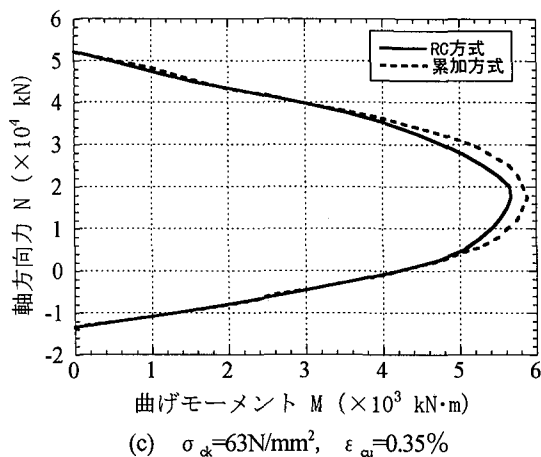


図-10 建築SRC柱のN-M強度相関曲線の比較 (続き)

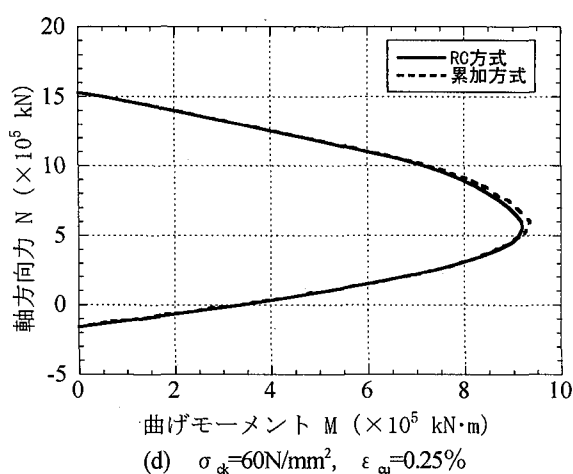
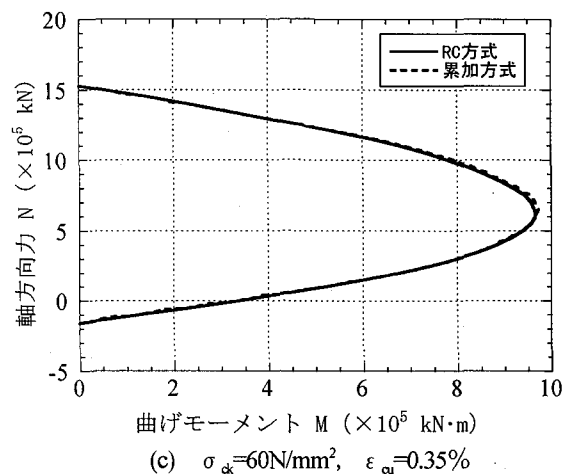
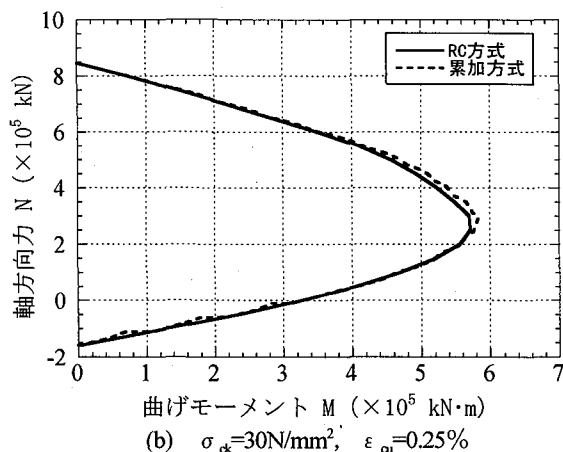
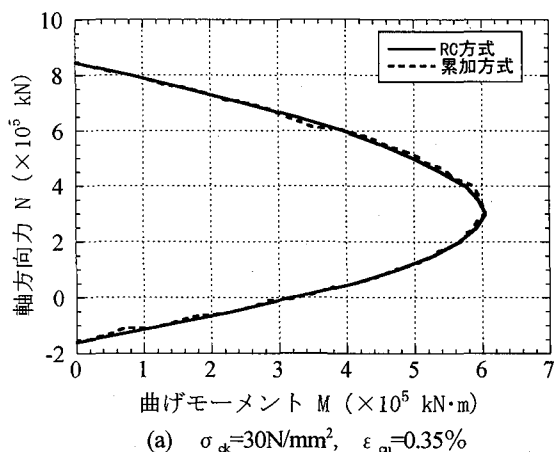


図-11 橋脚SRC柱のN-M強度相関曲線の比較

3.4 鋼板巻き立てRC橋脚との比較結果

鋼断面の最適配置の観点から、鋼管・コンクリート複合構造橋脚柱の代替断面を検討する目的で、断面内に配置した鋼管をコンクリート断面の外側に鋼板として巻き立てた比較断面（鋼管もしくは鋼板巻き立て：板厚8.19mm、図-12を参照）を設定した。その相関強度曲線をRC方式で求め、図-13にまとめて示す。なお、コンクリートおよび鋼材の材料特性は、3.1節および3.2節で採用した値を用いた。比

較結果からわかるように、鋼管断面相当の鋼材を鋼板として外側に巻き立てても、それを主鉄筋として換算するだけでは、RC断面の強度とほとんどかわらない。しかし、鋼板を帯鉄筋にも換算することで、高軸力側の強度が、鋼管・コンクリート複合構造橋脚のそれと同程度となることがわかる。ただし、通常の軸力レベルでは、曲げモーメントは若干小さく、鋼板巻き立てRC断面より鋼管・コンクリート複合構造断面の方が、強度的に優位であることがわかる。

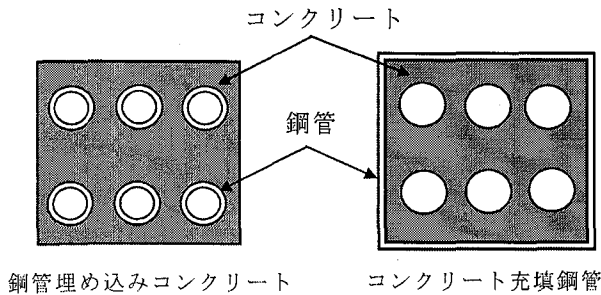


図-12 比較対象の鋼板巻き立てた RC 断面

しかし、外鋼板による拘束効果が期待でき図-14 に示す曲げモーメント-曲率曲線の比較結果からも明かなように鋼板巻き立て時の変形能の高さは、耐震性能上優位であり、今後二重鋼管合成柱等の検討が望まれる。

3.5 各限界状態における相関強度について

これまでの計算過程を通して、複合断面の限界状態の定義によって軸方向力-曲げモーメントの相関曲線に大きな開きがあると予想される（例えば、図-8 の●▼■の曲げモーメント値を参照）。これを検証するために、図-15 に示す一般的な RC 断面に対して鉄筋降伏時、圧縮鉄筋位置でのコンクリートひずみが圧壊ひずみに達する時の終局状態時（道示規定）、一定軸力下で最大曲げモーメントに達する時、および設計時に多用される等価応力ブロック法による終局曲げモーメントの簡易算定結果を比較して、まとめて図-16 に示す。なお、コンクリートおよび鉄筋の強度は、表-5 に示す通りで、応力-ひずみ関係は、図-2 に示す関係を用いた。

終局曲げモーメントと最大曲げモーメントの差異は、軸力が大きくなるにつれて顕著となり、最大約 25%の差異が確認できる。特に、終局曲げモーメントは、鉄筋降伏時の曲げモーメントをほぼ全領域で下回る結果となった。地震時保有水平耐力照査などに用いる曲げモーメント-曲率の骨格曲線を算定する際に、大きな誤差が混入する可能性があることを示唆している。ただし、安全側の評価とはなっている。一方、等価応力ブロック法においては、終局状態が、圧縮側最外縁のコンクリートが圧壊ひずみに達した時としているが、詳細法である RC 方式（ファイバー法）による算定結果と比較すると最大曲げモーメントと終局曲げモーメントの中間的な値を示しており、限界状態の達する順序から妥当と考えられるが、その差異は問題である。ただし、低軸力下では、大きな差異は生じていないので、実際の RC 部材等の軸力レベルを調査して、その危険度を検証する必要がある。特に、損傷を制御する耐震設計の基本的概念から、強度の下限值のみを保証するのではなく、強度の推定幅を最小化するためには、現行の強度評価法の設計式への導入には、再検討が必要と考えられる。

また、高軸力下においては、圧縮側の鉄筋が先に降伏するため、このような設計軸力下においては、脆性的な破壊が生じ易いので、十分な配慮が必要と考えられる。

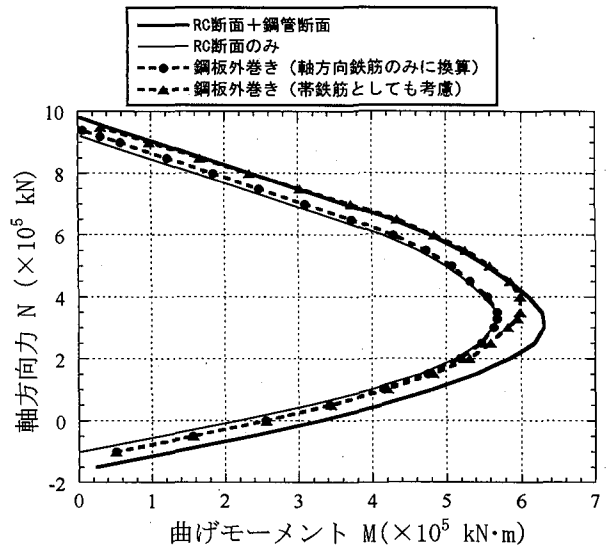


図-13 鋼板巻き立て RC 橋脚との比較結果

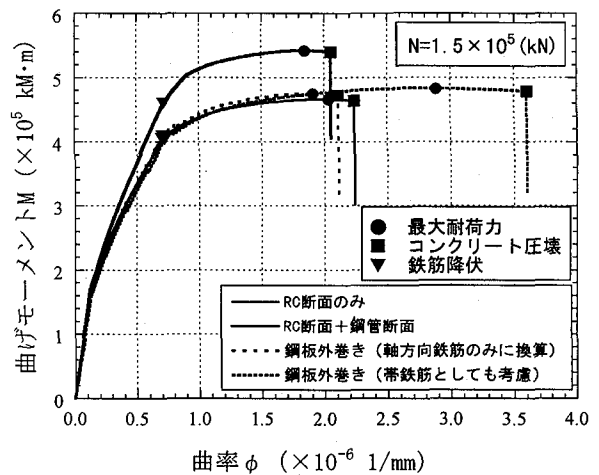


図-14 曲げモーメント-曲率曲線の比較

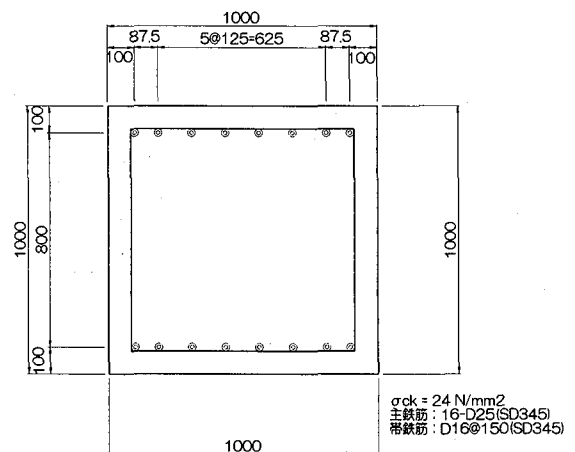


図-15 対象とした一般的な RC 断面（寸法単位：mm）

表-5 断面構成材料の強度

コンクリート	$\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$
鉄筋	SD345 ($\sigma_y=345\text{N/mm}^2$)

4. 結論

本研究では、鉄骨・鉄筋コンクリート柱の強度算定をRC方式と累加方式で行い、高橋脚で標準とされるに至った鋼管・コンクリート複合構造橋脚の断面強度評価における累加方式の適用性を検討した。算定例(1)の鋼材量の多い建築柱では累加方式による強度評価は、高めの評価となるが、その差異は約3%におさまっている。一方、算定例(2)の鋼材量の比較的少ない複合構造橋脚では結果に大きな違いはみられず、累加方式の強度評価の適用には問題はない。また、累加方式の強度評価に生じる誤差は、コンクリートの限界ひずみが大きくなるほど、RC断面の強度に対する鋼断面の強度が小さくなるほど、小さくなる傾向にある。

これらの結果を踏まえ、累加方式による強度評価に影響を及ぼす以下の諸量に対して一層の検討結果を加え、その適用範囲を明らかにする必要がある。

- ① RC部材と鋼部材の強度比
- ② かぶり厚と断面寸法の比
- ③ 鋼材比

特に、塑性理論の適用性を確保するためには、個々の断面の力学的特性が変形能に優れている(限界ひずみが大きい)ことが望ましく、コンクリートの高性能化が望まれる所である。また、鋼材とコンクリートの付着の影響、せん断力を受ける場合等の強度についても別途同様な検討が必要と考えられる。

一方で、鉄筋コンクリート構造における強度評価は、まだまだ簡略化されたモデルにより行われていることが多く、例えば、終局曲げモーメントの算定においても等価応力ブロック法による方法と詳細法であるRC方式による評価結果には、大きな隔たりがある。耐震設計においても性能照査法の導入が望まれ、構造物にある程度の損傷を許容する設計法が採用されるようになった現在では、強度の最低ラインを保証するのみでは不十分で、強度推定が上下限にある許容誤差を設定した範囲に収まるような評価手法が望まれることになる。すなわち、構造物の損傷モードならびに損傷レベルを制御しようとするためである。今後、より多く複合形式の構造が採用されるためには、種々の強度評価手法の精度向上が、コンクリート構造および鋼構造において同程度に高められることが望まれる。高機能鋼材の特性の一つに、狭降伏点レンジ鋼があるが、コンクリートの素材自身にも狭弾性係数レンジ・狭強度レンジコンクリートの開発が望まれる。

【謝辞】

本論文は、(社)建設コンサルタンツ協会近畿支部・合成

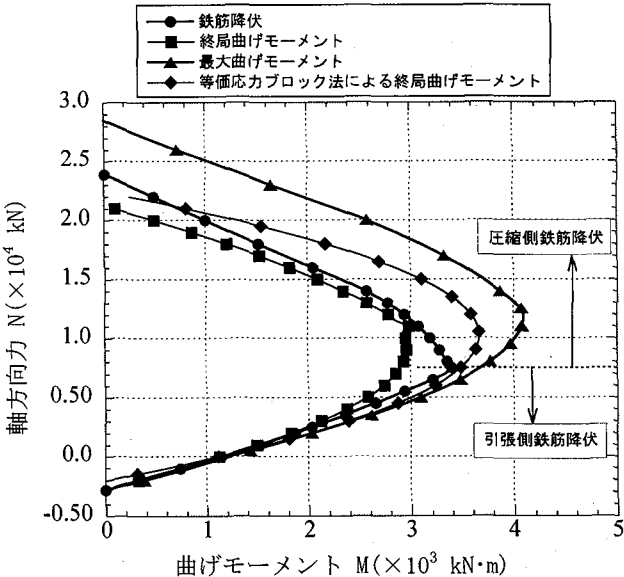


図-16 曲げモーメント-軸方向力の相関曲線の比較

橋梁形式研究委員会(委員長:大阪工業大学・栗田章光教授)による調査研究成果の一部を取りまとめたもので、同委員会委員からは多くの貴重な意見を頂いた。ここに記して謝意を表する。

【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) 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.
- 6) 吉川弘道:鉄筋コンクリートの解析と設計,丸善,1995.6.
- 7) 辻文三・若林實・菅原まりも:合成断面柱の終局曲げ強度と累加強度式,構造工学論文集,日本建築学会,Vol.37B,pp.427-435,1991.3.
- 8) 日本建築学会:鉄骨・鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説,1987.

(2001年9月14日受付)