

(2) 限界状態設計法に基づく
鋼・コンクリート合成柱の設計指針(草案)について

A DRAFT DESIGN CODE FOR CONCRETE FILLED STEEL TUBULAR COLUMNS
BASED ON LIMIT STATE DESIGN METHOD

○石崎 茂 * 栗田 章光 ** 水野 英二 *** 中島 章典 **** 川口 直能 *****
By Shigeru ISHIZAKI, Akimitsu KURITA, Eiji MIZUNO, Akinori NAKAJIMA and Naotaka KAWAGUCHI

Concrete filled steel tubular columns have higher strength and ductility than the cumulative strengths of each element due to interactive effects between steel and concrete. Therefore, it has been, recently, attracted special interest as a seismic advantageous structural members, and investigated the applicability of the column to the highway bridge piers. Under these circumstances, in the committee for ultimate strength of steel structures of JSCE, a subcommittee of composite structures was organized, and has been investigated concerning their structural characteristics in order to propose a design code for composite structures according to limit state design method. For a part of this investigation, a draft design code for concrete filled steel tubular column has been elaborated. This paper describes the outline and the background of the code.

1. まえがき

鋼管内にコンクリートを充填した合成柱は、鋼管とコンクリートが共働作用を発揮するため、断面寸法に比して大きな耐荷力が得られるだけでなく、充填コンクリートが鋼管の局部座屈を抑制するために靱性の向上も期待できる。さらに、弾性限界を超えた終局荷重時においても、充填コンクリートが鋼管の拘束効果により三軸圧縮状態となり、一軸圧縮状態に比して大きな圧縮強度を示すため、軸圧縮強度が増大すると同時に、鋼柱やコンクリート柱に比して、大きな変形性能を有することが確認されている^{1),2)}。これらの理由から、最近になって、合成柱は、耐震設計上も有利な構造部材として注目され、道路橋の橋脚等の土木分野における大規模構造物への適用についても検討が実施されつつある^{3),4)}。

このような状況の下で、土木学会・鋼構造委員会・鋼構造終局強度研究小委員会では、合成構造物の終局強度分科会を組織して、限界状態設計法のフォーマットに基づいた合成構造物の設計指針を提案すべく検討を重ね、この一環として、充填形式合成柱に関する設計指針(草案)を策定するに至った。以下では、この設計指針(草案)の概要と特徴とについて報告する。

* (株)酒井鉄工所 橋梁設計部 ** 工博 大阪工業大学教授 土木工学科
*** Ph.D 名古屋大学助教授 工学部土木工学科 **** 工博 宇都宮大学助教授 工学部建設学科
***** 工博 国士舘大学教授 工学部土木工学科

2. 適用の範囲

建築の分野では、鋼部材をコンクリートで巻き込んだ埋込みタイプの合成柱や、鋼部材のまわりをコンクリートで覆った被覆タイプの合成柱が、耐火性の面から、数多く使用されている。しかし、これらの合成柱を土木構造物に使用する場合、断面寸法、および作用断面力が著しく大きいため、耐荷力や耐久性の面で未検討の事項が多い。かつ、使用実績も少ないため、本指針（草案）では、図-1 に示すように、充填形式の合成柱に限定することとした。さらに、柱の両端が強固なダイヤフラムで拘束され充填コンクリートの拔出しが防止されている合成柱の場合、鋼とコンクリートとは一体的に挙動することが確認されているため、鋼とコンクリートの合成方法としては、内部構造が複雑となるスタッド等を用いず簡単に合成できる端部拘束方式を採用するものとした。なお、本指針は、鋼部分の分担軸方向力が、次式で示す範囲内にある柱に適用することとした。

$$0.2 \leq \delta \leq 0.9 \quad \text{----- (1)}$$

ここで、パラメータ δ は、鋼部分の荷重分担率であり、次式によって定義されるものである。

$$\delta = \frac{N_{sp}}{N_{sp} + N_{cp}} \quad \text{----- (2)}$$

ここに、 N_{sp} ：鋼の分担軸方向力 ($N_{sp} = f_y A_s$)、 N_{cp} ：充填コンクリートの分担軸方向力 ($N_{cp} = 0.85 f'_c A_c$)、 f_y ：鋼の設計圧縮強度、 f'_c ：コンクリートの圧縮強度の特性値、 A_s 、 A_c ：それぞれ鋼部分、およびコンクリート部分の断面積である。

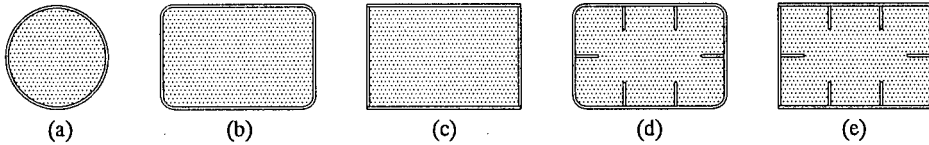


図-1 合成柱断面の使用例

3. 部材の断面強度の算定式

3.1 軸方向圧縮力を受ける部材

軸方向圧縮力を受ける合成柱部材の断面強度の設計値は、ECCS の耐荷力曲線^{5),6)}を基準とし、阪神高速道路公団の合成柱（充填方式）を有する鋼製橋脚の設計・施工指針（案）⁷⁾を参考にして、式(3)で算定することとした。

$$P_u = \phi \kappa (f_{cuo}^* A_s + 0.85 f'_c A_c) \quad \text{----- (3)}$$

ここに、 P_u ：合成柱部材の軸圧縮強度の設計値、 f_{cuo}^* ：圧縮板の局部座屈強度から充填コンクリート硬化前の応力度のうち、構造物完成後まで残留する圧縮応力度を控除した圧縮板の最大応力度、 ϕ ：合成柱部材の抵抗係数、 κ ：ECCS の耐荷力曲線より鋼断面の種類と換算細長比 $\bar{\lambda}$ に対して与えられる合成柱部材の全体座屈に対する低減係数であり、以下の諸式により算定する。

$$\left. \begin{aligned} \kappa &= 1.0 & (\bar{\lambda} \leq 0.2) \\ \kappa &= \eta - \sqrt{\eta^2 - 1/\bar{\lambda}^2} & (\bar{\lambda} > 0.2) \end{aligned} \right\} \quad \text{----- (4)}$$

$$\eta = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2)}{\bar{\lambda}^2} + 1 \right\} \quad \text{----- (5)}$$

$$\bar{\lambda} = \frac{l}{\pi} \sqrt{\frac{f_y A_s + 0.85 f'_c A_c}{E_s I_y}} \quad \text{----- (6)}$$

ここに、 α ：初期不整に対する係数であり、箱形断面に対して $\alpha = 0.34$ 、そして円形断面に対して $\alpha = 0.21$ とする。また、 l ：合成柱部材の有効座屈長、 I_y ：鋼材に換算した合成断面の断面二次モーメント、 E_s ：鋼材のヤング係数である。

3.2 曲げモーメントを受ける部材

曲げモーメント、および曲げモーメントと軸方向力とを同時に受ける合成柱部材の断面強度の算定法としては、鋼部材と充填コンクリートのひずみの適合を考慮しない累加強度方式と、それらの適合が保持されることとした鉄筋コンクリート方式との二種類が考えられる。本指針（草案）では、柱両端部に設ける強固な隔壁によって鋼部材と充填コンクリートのずれが拘束され、ひずみの適合が保持されると考えられることから、後述の鉄筋コンクリート方式を採用することとした。すなわち、合成柱断面のひずみ分布が平面保持の法則に従うものとし、引張側コンクリートを無視した断面における鋼部材に換算した合成柱部材の塑性断面係数 Z を用いて式(7)より算定することとした。なお、圧縮側鋼板の局部座屈が卓越する合成柱では、終局曲げ強度が全塑性モーメントの90%程度に低下することが実験により確認されている^{8),9)}。そのため、式(7)では、合成柱部材の曲げ強度 M_u を算定する際の圧縮板の最大応力度に式(3)に示した局部座屈強度を基準とする応力度 f_{cuo}^* を用いることとした。

$$M_u = \phi f_{cuo}^* Z \quad \text{----- (7)}$$

なお、鋼断面が円形の充填形式の合成柱の場合、終局荷重作用時には、鋼管の拘束により充填コンクリートが三軸応力状態となり強度の増加と靱性の増大が期待できることが実験により確認されている¹⁰⁾。そこで、終局限界状態の照査の際、充填コンクリートの応力-ひずみ曲線における最大圧縮強度を $1.0 f_{ck}'$ とし、終局圧縮ひずみを無限大として断面強度を算定してよいこととした。

3.3 圧縮力を受ける鋼板の局部座屈強度

箱形断面を有する合成柱の充填コンクリート硬化後の鋼板の局部座屈強度は、阪神高速道路公団の合成柱（充填方式）を有する鋼製橋脚の設計・施工指針（案）⁷⁾を参考にして定めた、すなわち、無補剛板に対しては、周辺固定圧縮板において座屈変位が鋼部材の外側にのみ生じるものとして算定された局部座屈強度¹¹⁾を用いた。また、補剛板に対しては、横補剛材、またはダイヤフラムで固定支持された鋼板と縦補剛材で構成されるT形断面柱が、鋼部材の外側にのみ座屈変形するものとして ECCS の耐荷力曲線 'c' より算定された局部座屈強度¹²⁾を採用することとした。

$$f_{cul} = \chi f_y \quad \text{----- (8)}$$

ここに、 f_{cul} ：圧縮鋼板の局部座屈強度、 χ ：圧縮板の局部座屈強度に対する低減係数で、以下の諸式を用いて算定する。

(1) 無補剛板の場合：

$$\left. \begin{aligned} \chi &= 1.0 & (R_f \leq 0.5) \\ \chi &= 0.433 (R_f - 0.5)^2 - 0.831 (R_f - 0.5) + 1 & (0.5 < R_f \leq 1.3) \end{aligned} \right\} \quad \text{----- (9)}$$

ここに、 R_f ：幅厚比パラメータ [$R_f = 0.323 (b/t) \sqrt{f_y/E_s}$ ， b ：板幅、 t ：板厚] である。

(2) 補剛板の場合：

$$\left. \begin{aligned} \chi &= 1.0 & (\bar{\lambda} \leq 0.2) \\ \chi &= \beta - \sqrt{\beta^2 - 1/\bar{\lambda}^2} & (\bar{\lambda} > 0.2) \end{aligned} \right\} \quad \text{----- (10)}$$

$$\beta = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1 + 0.49 (\bar{\lambda} - 0.2)}{\bar{\lambda}^2} + 1 \right\}, \quad \bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_y}{E_s}} (l_e/r)$$

ここに、 $l_e = L/2$ (L ：横補剛材、またはダイヤフラムの間隔)、 r ：仮想T形断面柱の回転半径である。また、円形鋼管を用いた合成柱の場合も、充填コンクリートにより鋼管の座屈変位が制限されるため、鋼断面のみの場合より局部座屈強度が向上するものと思われる。しかし、円形断面の充填鋼管合成柱の局部座屈に着目した研究例は少なく、実験データも少ないため、安全側の観点から鋼部材の局部座屈強度を、そのまま使用することとした。

4. 終局限界状態に対する照査

4.1 軸方向圧縮力を受ける部材

軸方向圧縮力を受ける合成柱は、式(3)に示した合成柱部材の設計軸圧縮強度 P_u を用いて、式(11)により照査することとした。

$$P/P_u \leq 1 \quad \text{----- (11)}$$

ここに、 P ：終局時の荷重による作用軸方向圧縮力の設計値である。なお、文献 13)によれば、軸方向圧縮力を受ける矩形断面の合成柱で、作用曲げモーメントが断面の曲げ強度の 0.1 倍以下の場合には、その軸方向圧縮耐力が ECCS の耐力力曲線より得られる耐力より若干高い値を示すことが確認されている。このことより、作用曲げモーメントが前記の範囲内にある合成柱は、中心軸圧縮力のみを受ける柱とみなしてよいこととした。

4.2 軸方向圧縮力と曲げモーメントを同時に受ける部材

軸方向圧縮力と曲げモーメントとを同時に受ける合成柱の照査式は、阪神高速道路公団の合成柱(充填方式)を有する鋼製橋脚の設計・施工指針(案)⁷⁾を参考にして定めた。また、2次曲げの影響は、1次理論による作用曲げモーメント M に拡大係数 $[1/(1-P/P_{cr})]$ を乗じることにより評価している。すなわち、中心軸圧縮力と曲げモーメントとを同時に受ける合成柱の耐力力は、式(12)、または(16)により照査するものとした。

(1) 圧縮と一軸曲げとを同時に受ける場合：

$$\frac{M}{M_u \left(1 - \frac{P}{P_{cr}}\right)} \leq \phi \quad \text{----- (12)}$$

ここに、 M ：終局時荷重による作用曲げモーメントの設計値、 P_{cr} ：式(13)による柱の弾性座屈荷重、 ϕ ：式(14)による合成柱の M - N 相関曲線に基づく係数である。

$$P_{cr} = \frac{\pi^2}{l^2} E_s I_v \quad \text{----- (13)}$$

$$\phi = 1 - (1 + \beta) \left(\frac{P}{P_u}\right)^2 + \beta \left(\frac{P}{P_u}\right) \quad \text{----- (14)}$$

$$\beta = 9.17 \delta^2 - 13.75 \delta + 4.63 \quad \text{----- (15)}$$

ここに、 δ ：式(2)で与えられる鋼部分の荷重分担率である。

(2) 圧縮と二軸曲げとを同時に受ける場合：

$$\frac{M_y}{M_{yu} \left(1 - \frac{P}{P_{cry}}\right)} + \frac{M_z}{M_{zu} \left(1 - \frac{P}{P_{cz}}\right)} \leq \phi \quad \text{----- (16)}$$

ここに、 M_y, M_z ：それぞれ、 y 軸、および z 軸回りの作用曲げモーメントの設計値、 M_{yu}, M_{zu} ：それぞれ、 y 軸、および z 軸まわりの合成柱部材の設計曲げ強度、 P_{cry}, P_{cz} ：それぞれ、 y 軸、および z 軸まわりの弾性座屈荷重を示す。

4.3 軸圧縮、曲げ、ねじり、および、せん断力を同時に受ける部材

垂直応力とせん断応力が同時に作用する部材の強度は、せん断ひずみエネルギー一定説によれば、垂直応力のみが作用する部材の強度からせん断応力の影響分を控除し、式(17)による見かけの垂直応力を用いて評価できる。すなわち、式(3)による断面の設計軸圧縮強度、および式(7)による断面の設計曲げ強度を算定する際に使用する圧縮板の最大応力度 f_{cu0} に、ねじりモーメント、および、せん断力により鋼部材に発生するせん断応力の影響を考慮した式(17)による見かけの最大応力度を用いることによって、部材強度を評価することとした。

$$f_{cuo}^{**} = 1.1 \sqrt{f_{cuo}^{*2} - 3 \tau_{max}^2} \quad \text{-----} (17)$$

$$\text{ただし、} f_{cuo}^{**} \leq f_{cuo}^{*}$$

ここに、 f_{cuo}^{**} ：せん断応力の影響を考慮した圧縮板の見かけの最大応力度、 τ_{max} ：ねじりモーメント、および、せん断力により鋼断面に作用する設計せん断応力度の最大値である。ここで、式(17)の右辺の係数1.1は、垂直応力度とせん断応力度とを同時に考慮する場合、経験的に10%程度の強度の割増を行っても十分安全であるとされている¹⁴⁾ことに基づく割増係数である。

4.4 橋脚の地震時保有水平耐力の照査

一般に、合成柱は、最大耐力力以降のねばりを期待しうる構造であると考えられる。しかし、地震荷重の影響を大きく受け、かつ重要度の高い構造物として合成柱を使用する場合は、文献15)、あるいは、文献16)などを参考にして、適切な解析方法、あるいは実験結果に基づいて、その変形性能を調べ、過去に観測された最大規模の地震に対しても、ぜい性的な破壊を生じないことを確認しておくこととした。

5. 使用限界状態の照査

合成柱部材の使用限界状態としては、使用時荷重による過度の変形、変位、および振動などが考えられる。本指針(草案)では、合成柱部材の使用期間中における機能、使用性、ならびに耐久性を保持するため、合成柱の梁・柱結合部や柱基部における鋼部材の降伏による永久変形を防止する必要がある。そのため、従来の活荷重による変形量の制限規定の他に、次式による鋼部材の降伏に対する照査規定を設けることとした。

$$f_{s,max}^{*} \leq f_y \quad \text{-----} (18)$$

ここに、 $f_{s,max}^{*}$ ：使用時荷重により鋼部分に発生する最大応力度の換算値で、次式により算出することとした。

$$f_{s,max}^{*} = \sqrt{f_{s,max}^2 + 3 \tau^2} \quad \text{-----} (19)$$

ここに、 $f_{s,max}$ ：使用時荷重により鋼部分に発生する垂直応力度の最大値、 τ ： $f_{s,max}$ を生じる載荷状態において鋼部分に発生するせん断応力度である。

6. 構造細目

6.1 矩形断面の辺長比の制限

偏平な矩形断面合成柱の変形性状や耐荷機構は、これまで実験等で確認されている長辺と短辺の比が1に近い合成柱と異なる挙動を示すと考えられる。そのため、矩形断面合成柱の長辺と短辺の比は、2以下を原則とした。

6.2 梁・柱接合部

箱断面の鋼製梁が柱に剛結された構造で梁部にコンクリートを充填しない場合は、梁フランジ部にせん断遅れ現象が発生する。しかし、梁・柱交差部の柱端から梁幅の1/2以上の範囲にコンクリートを充填した場合、この現象がほとんど発生しないことが実験により明らかにされている¹⁷⁾。したがって、梁部におけるコンクリート充填範囲の規定を設けると共に、充填コンクリート硬化後は、隅角部を設計する際、せん断遅れ現象を考慮しなくてよいものとした。

6.3 ダイヤフラム

本指針では、終局荷重時における充填コンクリートの抜け出しを防止するため充填コンクリート両端部に設置する端ダイヤフラム、および梁・柱接合部において、梁に作用する曲げモーメントを確実に柱に伝達するため、梁フランジの背面に設置する接合部ダイヤフラム、および充填コンクリート硬化前の荷重に対して

鋼板の局部座屈を防止し、鋼部材の製作、運搬、ならびに架設途中における過大な変形を防止することを目的として設置される中間ダイヤフラムの3種類のダイヤフラムについて規定している。

6.4 溶接箱断面合成柱の角溶接

溶接箱断面の合成柱においては、フランジと腹板との角溶接を隅肉溶接や部分溶け込み溶接とすると、終局荷重時にこの部分が弱点となりやすいため、全断面溶け込みグルーブ溶接を標準とした。

7. あとがき

本文では、充填形式合成柱に関する設計指針(草案)の概要を紹介した。まえがきにも述べたように、本指針(草案)は、土木学会・鋼構造委員会・鋼構造終局強度研究小委員会・合成構造物の終局強度分科会に設置された合成柱ワーキンググループで纏めたものである。本指針(草案)を纏めるに当たり、充填形式合成柱に関する内外の文献リストを作成すると同時に、諸外国、および国内の規準類の比較表を作成した。さらに、充填コンクリートの寸法効果、充填形式合成柱の地震時保有水平耐力の評価方法についても、現在、検討を行いつつある。これらの成果については、別に設計資料として纏める予定であり別の機会に公表したいと考えている。今後、充填形式合成柱が、その特性を生かし、高架橋の橋脚のみならず、他の多くの構造部材として活用されることを期待すると共に、本充填形式合成柱に関する設計指針(草案)がその一助になれば幸いである。最後に、本指針(草案)の作成段階、および本論文をまとめるにあたり貴重なご意見を賜った分科会主査の中井 博・大阪市立大学工学部教授、および分科会委員の吉川 紀・(財)阪神高速道路管理技術センター理事をはじめとする委員各位に対して深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 佐伯彰一、金井道夫：コンクリートを充填した鋼橋脚、道路、第502号、pp.15～19、1982年10月。
- 2) 宇佐美勉、葛 漢彬、水谷慎吾：コンクリートを部分的に充填した無補剛箱形鋼柱の繰返し弾塑性挙動、構造工学論文集、Vol.39A、pp.249～262、1993年3月。
- 3) 中井 博、吉川 紀、山田幸裕、田中実雄、吉田 茂：合成柱(コンクリート充填方式)を有する鋼製橋脚の現場載荷実験、橋梁と基礎、Vol.21、No.3、pp.17～22、1987年3月。
- 4) 本山 薺、角町 洋、辻 秀紀、川口 廣、丸山忠明：関西国際空港連絡橋の計画と下部工の施工(上)、(下)、橋梁と基礎、Vol.22、No.2、pp.2～10、No.3、pp.36～45、1988年2月、3月。
- 5) BSI：BS5400, Steel, concrete and composite bridges Part5. Code of practice for design of composite bridges, 1979.
- 6) Deutsche Industrie Norm：DIN18806 Teil1, Verbundkonstruktionen Verbundstutzen, März 1984.
- 7) 阪神高速道路公団：合成柱(充填方式)を有する鋼製橋脚の設計・施工指針(案)、1986年3月。
- 8) 中井 博、吉川 紀、中村一平、袴田文雄、寺田博昌：合成柱(充てん方式)の圧縮・曲げ耐力および付着力に関する基礎実験、橋梁と基礎、Vol.19、pp.19～27、1985年10月。
- 9) Nakai, H., Yoshikawa, O. and Terada, H.：An Experimental Study on Ultimate Strength of Composite Columns for Compression or Bending, 土木学会論文集、第374号、I-6、pp.67～77、1986年10月。
- 10) 大林組：首都高速道路、コンクリート充填合成柱を有する橋脚の設計・施工指針(案素)〔限界状態設計法編〕、平成3年2月。
- 11) 中井 博、北田俊行、吉川 紀：コンクリートを充填した鋼製角形柱の鋼板要素の設計法、土木学会論文集、第356号、I-3、pp.405～413、1985年4月。
- 12) 中井 博、加藤修吾、吉川 紀、木島信夫：合成柱(充填コンクリート方式)を有する鋼製橋脚の隅角部と柱基部の構造設計について、第30回構造工学シンポジウム論文集、pp.97～104、1984年4月。
- 13) 中井 博、吉川 紀、古田秀博：軸方向圧縮力と曲げを受ける長方形断面合成柱の一耐荷力解析、土木学会論文集、第374号、I-6、pp.447～456、1986年10月。
- 14) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、I 共通編、II 鋼橋編、平成6年2月。
- 15) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、V 耐震設計編、平成2年2月。
- 16) 土木学会・鋼構造委員会・鋼構造終局強度研究小委員会：鋼構造物の終局強度と設計、平成6年7月。
- 17) 中井 博、吉川 紀：コンクリートを充填した鋼製橋脚の耐力に関する実験的研究、土木学会論文集、第344号、I-1、pp.195～204、1984年4月。