

第4編

合 成 柱 編

第1章 一般

1. 1 適用の範囲

1. 1. 1 本編で対象とする合成柱

- (1) 本編は、鋼製の閉断面部材の一部、または全体にコンクリートを充填した柱(以下、合成柱という)の設計・施工に適用するものとする。
- (2) 充填コンクリートの両端は、強固な隔壁によって拘束されているものとする。

【解説】 (1)について

本編では、解説図 1.1 (a)～(e) に示す閉断面の鋼管内にコンクリートを充填した合成柱を対象とした。そして、鋼部分の分担軸方向圧縮力を表す荷重分担率 δ を、式(解 1.1)、すなわち

$$\delta = \frac{N_{s,p}}{N_{s,p} + N_{c,p}} \quad (\text{解 1.1})$$

によって求めるとき、式(解 1.2) に示す範囲内にある合成柱の設計・施工に適用できるものとした。

$$0.2 \leq \delta \leq 0.9 \quad (\text{解 1.2})$$

ここに、 $N_{s,p}$: 鋼部分の分担軸方向圧縮耐力(kgf)

$$N_{s,p} = F_u A_s$$

F_u : 本指針 第1編 5.2 に示す鋼材の設計基準強度(kgf/cm²)

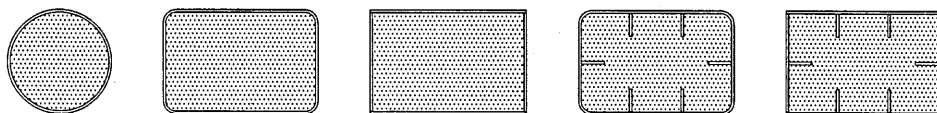
A_s : 鋼部分の断面積(cm²)

$N_{c,p}$: 充填コンクリートの分担軸方向圧縮耐力(kgf)

$$N_{c,p} = 0.85 f'_{cd} A_c$$

f'_{cd} : 本編 4.1.2 に規定する充填コンクリートの設計圧縮強度(kgf/cm²)

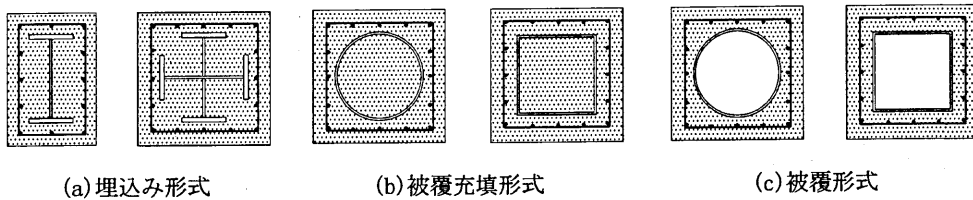
A_c : コンクリート部分の断面積(cm²)



(a)円形 (b)角R付長方形 (c)長方形 (d)角Rリブ付長方形 (e)リブ付長方形

解説 図 1.1 充填形式合成柱断面の使用例

建築の分野では、解説図 1.2 に示すように、鋼部材をコンクリート内に埋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被覆し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に、耐荷力や耐久性に関して未検討の事項が多く、かつ使用実績も少ない。したがって、本指針では、適用範囲を鋼管内にコンクリートを充填する充填形式の合成柱に限定することとした。埋込み、または被覆タイプの合成柱を使用する場合は、土木学会の鋼構造物設計指針 PART B¹⁾や、建築学会の鉄骨鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説²⁾などを参考にすることとした。



解説 図 1.2 埋込みおよび被覆タイプ合成柱断面の使用例

鋼管内にコンクリートを充填した合成柱は、①鋼管とコンクリートとの合成効果により、大きな耐荷力が得られると同時に、靱性も増大する、②充填コンクリートが鋼管の局部座屈を抑制する、また③終局荷重用時に、鋼管の拘束効果によってコンクリートの圧縮強度を増加させ、耐荷力が向上するなど種々の優れた特長を有しており、耐震設計上も有利な構造部材といえる。このような合成柱の応用例としては、高架橋の橋脚^{3), 4), 5)}のほか、上路トラスの上弦材⁶⁾、あるいはアーチ橋⁷⁾などへの適用が考えられる。

なお、コンクリートを部分充填した柱に対しては、コンクリート充填部分の設計に対してのみ本編の規定を適用するものとした。そして、鋼断面部、および柱全体の強度に対しては、鋼部材とみなして設計するものとした。このような部分充填柱の設計には、文献 8)、および文献 9)などを参考とされたい。

(2)について

鋼柱の両端に強固なダイヤフラムが設けられ、それらによって充填コンクリートが拘束され、また充填コンクリートの鋼柱からの拔出しが防止されている合成柱では、鋼とコンクリートとが一体的な挙動を呈することが確認されている。そこで、鋼とコンクリートとの合成方法としては、内部構造が複雑となるスタッドなどを用いず、合成作用が簡便に実現できる端部拘束方式を採用するものとした。なお、リブ付き鋼管¹⁰⁾などを利用したときの合成作用については、別途、検討のうえ使用することとした。

1. 1. 2 設計の基本

- (1) 合成柱の設計においては、鋼とコンクリートとを効果的に組み合わせ、かつ両者を有効に使用して、合成柱の特性を十分に活かすように心掛けねばならない。
- (2) 合成柱の各部材を設計する際、まず充填コンクリートの硬化前に作用する荷重に対しては、鋼部材としての使用性、および耐荷性を照査する。つぎに、硬化後の荷重に対しては、合成柱としての使用性、および耐荷性を照査するものとする。
- (3) 本編に規定されていない事項については、本指針の各編、および土木学会・鋼構造物設計指針、ならびに土木学会・コンクリート標準示方書などによるものとする。

【解説】 (1)について

合成柱の特性としては、大きな耐荷力、高い剛性とじん性、および柱基部や梁-柱接合部における応力の平滑化などが挙げられる。合成柱の設計に当たっては、これらの特性を十分に活かすように心掛けることとした。

(2)について

合成柱は、充填コンクリートの硬化以前の施工時荷重に対して、鋼部材のみで抵抗する。そして、コンクリートの硬化後の荷重に対しては、合成断面で抵抗するものである。そこで、本条文では、基本的にコンクリートの硬化前、および硬化後における使用性、ならびに耐荷性の照査を行うこととした。

なお、施工時の応力が完成時まで残留する場合には、これらを取り入れた設計を行う必要がある。

1. 2 用語の定義

本編で使用する主な用語は、以下のように定義するものとする。

(1) 一般的事項

- 1) 充填コンクリート：合成柱において鋼管内に充填したコンクリートをいう。
- 2) ずれ止め：鋼部分とコンクリート部が外力に対し一体となって働くように鋼部材面に設ける結合材。
- 3) 分担軸方向力：鋼，またはコンクリートが分担する軸方向力。
- 4) ヤング係数比：鋼のヤング係数とコンクリートとのヤング係数との比。
- 5) 換算断面積：合成柱のコンクリート部分の断面積をヤング係数比で割って鋼部材に換算した断面積。
- 6) 線形弾性理論：材料の応力－ひずみ関係を線形と仮定し，部材の変形の影響を無視した解析理論。
- 7) クリープ：持続荷重によって，ひずみが時間とともに増加する塑性変形をいう。
- 8) クリープ係数：最終クリープひずみと弾性ひずみとの比。
- 9) 乾燥収縮：コンクリートの硬化時に発生する収縮現象をいう。

(2) 部材の設計に関するもの

- 10) 横変位：軸方向圧縮力を受ける柱部材において，軸圧縮荷重による柱の軸直角方向変位をいう。
- 11) 全体座屈：柱部材が，軸方向圧縮力によって横変位を生じ，耐荷力を失う現象をいう。
- 12) 局部座屈：柱部材を構成する鋼板要素が，柱軸方向の圧縮力によって局部的に面外変形を生じ，耐荷力を失う現象をいう。
- 13) 両縁支持板：長方形断面の合成柱における鋼管を構成する圧縮板で，フランジ，または腹板によって両縁辺を拘束された板。
- 14) 補剛板：長方形断面の合成柱における鋼管を構成する圧縮板で，フランジ，または腹板によって両縁辺を拘束され，中間部を縦リブなどで補剛した板。
- 15) 有効座屈長：部材両端の拘束条件が異なる軸方向圧縮力を受ける部材において，その座屈強度を両端ピン支点柱の座屈強度と等価となるよう換算した部材長をいう。
- 16) 細長比：部材の有効座屈長と断面二次半径の比。
- 17) 細長比パラメータ：細長比をオイラー座屈条件式を用いて正規化した無次元パラメータ。
- 18) 幅厚比パラメータ：圧縮板における幅厚比と局部座屈強度の関係を表す無次元パラメータ。
- 19) 弾性座屈荷重：理想的な中心軸圧縮柱におけるオイラーの座屈荷重をいう。
- 20) 応力勾配：軸方向圧縮力と曲げモーメントとを同時に受ける長方形断面柱における両縁支持板，または補剛板において，両端辺間の応力分布の勾配を表す無次元量をいう。
- 21) 塑性断面係数：曲げにより断面が全塑性状態に到達すると仮定した場合の，断面の塑性中立軸まわりの断面一次モーメントの総和をいう。
- 22) 二軸曲げ：部材の強軸，および弱軸まわりに同時に作用する曲げモーメントをいう。
- 23) M－N相関曲線：曲げモーメントと軸方向圧縮力とを同時に受ける合成柱の相関強度を表す曲線。

(3) 施工に関するもの

- 24) ダイヤフラム：合成柱を構成する鋼管部材において，鋼管内の柱軸直角方向に設ける隔壁をいう。
- 25) 角溶接：長方形断面を有する合成柱において，フランジと腹板とを接合する際のコーナー部の溶接。
- 26) 空気抜き孔：鋼管内に充填コンクリートを打設する際，空気が鋼管内に閉じ込められるのを防止し，コンクリートのまわりを良好ならしめるために鋼板にあけた孔。

1. 3 記 号

本編で使用する記号を、以下のとおり定義するものとする。

- A_c : 充填コンクリートの断面積 (cm^2)
- A_g : 部材断面の総断面積 (cm^2)
- A_s : 鋼部材断面の断面積 (cm^2)
- A_v : 鋼材に換算した合成柱部材の断面積 (cm^2)
- a : 横方向の補剛材間隔, あるいは板の縦方向の固定縁間距離 (cm)
- b : 補剛板の全幅, あるいは板の横方向の固定縁間距離 (cm)
- E_s : 鋼材のヤング係数 (kgf/cm^2)
- $E_{bi\infty}$: クリープの影響を考慮したコンクリートのヤング係数 (kgf/cm^2)
- F : 鋼材の材料強度の規格値 (kgf/cm^2)
- F_u : 鋼材の設計基準強度 (kgf/cm^2)
- f : 応力勾配による係数
- f'_{ck} : コンクリートの設計基準強度 (kgf/cm^2)
- f'_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度 (kgf/cm^2)
- h_r : 縦方向補剛材の高さ (cm)
- h_t : 横方向補剛材の高さ (cm)
- I_c : 充填コンクリートの断面二次モーメント (cm^4)
- I_s : 鋼部材の断面二次モーメント (cm^4)
- I_v : 鋼材に換算した合成柱部材の断面二次モーメント (cm^4)
- k : 座屈係数
- l : 柱の有効座屈長 (cm)
- M_s : 鋼管柱部材に作用する曲げモーメント ($\text{kgf}\cdot\text{cm}$)
- M_{sy} : 二軸曲げを受ける場合の鋼管柱部材に作用する y 軸まわりの曲げモーメント ($\text{kgf}\cdot\text{cm}$)
- M_{sz} : 二軸曲げを受ける場合の鋼管柱部材に作用する z 軸まわりの曲げモーメント ($\text{kgf}\cdot\text{cm}$)
- M_{us} : 鋼管柱部材の設計曲げ耐力 ($\text{kgf}\cdot\text{cm}$)
- M_{usy} : 二軸曲げを受ける場合の鋼管柱部材の y 軸まわりの設計曲げ耐力 ($\text{kgf}\cdot\text{cm}$)
- M_{usz} : 二軸曲げを受ける場合の鋼管柱部材の z 軸まわりの設計曲げ耐力 ($\text{kgf}\cdot\text{cm}$)
- M_{uv} : 合成柱部材の設計曲げ耐力 ($\text{kgf}\cdot\text{cm}$)
- M_{ury} : 二軸曲げを受ける場合の合成柱部材の y 軸まわりの設計曲げ耐力 ($\text{kgf}\cdot\text{cm}$)
- M_{urz} : 二軸曲げを受ける場合の合成柱部材の z 軸まわりの設計曲げ耐力 ($\text{kgf}\cdot\text{cm}$)
- M_v : 合成柱部材に作用する曲げモーメント ($\text{kgf}\cdot\text{cm}$)
- M_{vy} : 二軸曲げを受ける場合の合成柱部材に作用する y 軸まわりの曲げモーメント ($\text{kgf}\cdot\text{cm}$)
- M_{vz} : 二軸曲げを受ける場合の合成柱部材に作用する z 軸まわりの曲げモーメント ($\text{kgf}\cdot\text{cm}$)
- N : 中心圧縮の設計総軸方向力 (kgf)
- $N_{c,p}$: 充填コンクリートの分担軸方向圧縮耐力 (kgf)
- $N_{s,p}$: 鋼部分の分担軸方向圧縮耐力 (kgf)
- N_{st} : 中心圧縮の設計持続軸方向力 (kgf)
- N_{usp} : 補剛板要素の無次元化基準圧縮強度
- n : 鋼とコンクリートとの弾性係数比, または縦方向補剛材によって区切られるパネル数

- P_{crs} : 鋼管柱部材の弾性座屈荷重 (kgf)
- P_{crsy} : 鋼管柱部材の y 軸まわりの弾性座屈荷重 (kgf)
- P_{crsz} : 鋼管柱部材の z 軸まわりの弾性座屈荷重 (kgf)
- P_{crv} : 合成柱部材の弾性座屈荷重 (kgf)
- P_{crvy} : 合成柱部材の y 軸まわりの弾性座屈荷重 (kgf)
- P_{crvz} : 合成柱部材の z 軸まわりの弾性座屈荷重 (kgf)
- P_s : 鋼管柱部材に作用する軸方向圧縮力 (kgf)
- P_{us} : 鋼管柱部材の設計軸方向圧縮耐力 (kgf)
- P_{uv} : 合成柱部材の設計軸方向圧縮耐力 (kgf)
- P_v : 合成柱部材に作用する軸方向圧縮力 (kgf)
- Q_c : 局部座屈を生ずる短柱の無次元化強度
- R : 幅厚比パラメータ
- R_{cp} : 縦横の補剛材で囲まれた圧縮板の幅厚比パラメータ
- R_f : 無補剛板の幅厚比パラメータ
- R_r : 周辺支持板の幅厚比パラメータ
- r : 着目する部材軸に関する総断面の断面二次半径 (cm)
- t : 鋼板の板厚 (cm)
- t_r : 縦方向補剛材の板厚 (cm)
- t_t : 横方向補剛材の板厚 (cm)
- Z : 鋼部材に換算した合成柱部材の塑性断面係数 (cm³)
- α : 初期不整係数
- β_{WN} : コンクリートの立方体強度 (kgf/cm²)
- δ : 鋼管柱部材の荷重分担率
- κ : 合成柱部材の全体座屈に対する低減係数
- $\bar{\lambda}$: 細長比パラメータ
- $\bar{\lambda}_0$: 限界細長比パラメータ
- μ : ポアソン比
- Σ : 断面を構成する板要素の総和
- σ_{bul} : 面内曲げを受ける両縁支持板の局部座屈強度 (kgf/cm²)
- σ_{cul} : 圧縮鋼板の局部座屈強度 (kgf/cm²)
- σ_{culp} : 両縁支持板の基準圧縮強度 (kgf/cm²)
- σ_{*cuo} : 圧縮鋼板の最大強度 (kgf/cm²)
- σ^{**cuo} : せん断応力の影響を考慮した圧縮鋼板の換算応力度 (kgf/cm²)
- σ_e : 充填コンクリートが硬化する前に鋼板に作用する応力度のうち、構造物の完成後まで残留する圧縮応力度 (kgf/cm²)
- $\sigma_{s,max}$: 使用時荷重によって鋼部分に発生する最大応力度の換算値 (kgf/cm²)
- σ_T : 縦補剛材間の板パネルと縦補剛材 1 本とで構成される T 形断面部材の基準圧縮強度 (kgf/cm²)
- τ_{cul} : せん断に対する局部座屈強度 (kgf/cm²)
- τ_{max} : ねじりモーメント、および、せん断力による作用せん断応力度の最大値 (kgf/cm²)
- τ : 鋼部分に作用するせん断応力度 (kgf/cm²)
- τ_u : 鋼部材のせん断強度 (kgf/cm²)

- ϕ : クリープ係数
 ϕ_t : 試験法係数
 ϕ_b : 部材強度係数 (抵抗係数)
 χ : 圧縮鋼板の局部座屈強度に対する低減係数
 ϕ : 応力勾配, あるいは合成柱の $M-N$ 相関曲線に基づく係数

参考文献

- 1) 土木学会 : 鋼構造物設計指針 PART B 特定構造物, 1987 年 11 月.
- 2) 日本建築学会 : 鉄骨鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1987 年 6 月.
- 3) 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.
- 4) 本山 蒔, 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設計(上), (下), 橋梁と基礎, Vol.22, No.2, pp. 2 ~ 10, および No.3, pp. 36 ~ 45, 1988 年 2 月, および 3 月.
- 5) 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.
- 6) 中井 博, 阪野雅則, 本田英尚 : 上弦材に合成柱を用いた上路トラス橋の開発, 土木施工, Vol.35, No. 4, pp. 99 ~ 104, 1994 年 4 月.
- 7) 中井 博, 田中忠夫, 佐々木保隆 : 合成アーチ橋, 土木施工, Vol.35, No.6, pp. 103 ~ 110, 1994 年 4 月.
- 8) 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, 土木学会, pp. 249 ~ 262, 1993 年 3 月.
- 9) 葛漢 彬, 宇佐美勉 : コンクリートを部分的に充填した鋼箱形断面柱の終局強度と変形能に関する研究, 土木学会論文集, No. 513/I -31, pp. 77 ~ 88, 1995 年 4 月.
- 10) 土木学会 : 構造工学委員会, 鋼・コンクリート複合構造研究小委員会, 合成構造用鋼材の利用に関する調査研究報告書, 1993 年 3 月.

第2章 材 料

2. 1 鋼材

合成柱に使用する構造用鋼材としては、JIS G 3101 の一般構造用圧延鋼材である SS400，ならびに JIS G 3106 の溶接構造用圧延鋼材である SM400，SM490Y，SM520，および SM570 などの規格に適合するものを標準として使用するものとする。

また、鋼管としては、JIS G 3444 の一般構造用炭素鋼鋼管である STK400，および STK490 などの規格に適合するものを標準として使用するものとする。

【解説】 鋼管材料のうち、STK490 については、使用実績が少ないため、使用に際しては、溶接について十分な配慮が必要である。また、JIS G 3466 の一般構造用角形鋼管である STKR400，および STKR490 については、使用実績も少なく、寸法も小さいものに限られるため、本指針の使用材料から除外することとした。

2. 2 コンクリート

充填コンクリートの設計基準強度 f'_{ck} は材令 28 日における圧縮試験強度に基づいて定めるものとし、また f'_{ck} は 240 kgf/cm^2 以上を確保するものとする。

【解説】 充填コンクリートは、合成柱の耐荷力、および、じん性の向上の観点から圧縮強度の高いものが望ましい。したがって、本編では、橋梁下部工などで一般に使用されているコンクリート以上の強度を確保することを標準とした。その他のコンクリートとしては、膨張コンクリート¹⁾、高強度コンクリート²⁾、および高流動コンクリート³⁾などの使用も考えられる。しかし、まだいずれも検討段階にあるため、本編では、普通コンクリートを使用することとした。なお、上記の特殊コンクリートを使用する場合は、設計法、および施工に対して十分に検討を加える必要がある。その際には、本編の 資料 3.B を参考にされたい。

2. 3 ずれ止め

ずれ止めには、JIS B 1198 の頭付きスタッドに規定されるもののうち、軸径 19mm，および 22mm のものを標準として使用するものとする。

【解説】 本指針で対象とする合成柱は、端部拘束方式としているので、一般にずれ止めが不要である。しかし、責任技術者によって、とくに必要と判断される場合は、最も使用実績が多く、かつ合成効果の高い、頭付きスタッドを用いることとした。

参考文献

- 1) 松田 敏，他：充填型鋼管コンクリートの基礎物性と圧入施工実験，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 15, No. 1, pp. 1061～1069, 1993 年。
- 2) 土木学会：コンクリート技術の現状と示方書改訂の動向，コンクリートライブラリー 79, 1994 年 7 月。
- 3) 日本コンクリート工学協会：超流動コンクリート研究委員会報告書(Ⅲ)，1994 年 5 月。

第3章 構造解析

3. 1 断面力および変形量の算定

合成柱断面の設計に必要な断面力、および変形量は、線形弾性理論によって算出するのを原則とする。ただし、本編の 6. 3 に規定する細長比が 35 を超える合成柱の断面力、および変形量は、横変位の影響を考慮して算出しなければならない。

【解説】 鋼部材の断面積がコンクリート部材の断面積に比して小さい合成柱では、荷重－変形曲線がコンクリート部材と類似し、完全な弾性体としての挙動を呈さない。しかしながら、断面力の算出が容易なこと、また厳密な計算と比較してもこの方法の安全性が損なわれないなどの理由により、本指針では、線形弾性理論によって断面力や変形量を算出してよいこととした。この場合、部材の曲げ剛性、および、ねじり剛性は、コンクリートの全断面を有効とし、本編の 3. 2 に示すヤング係数比による換算断面積を用いて算定するものとする。ただし、細長比が 35 を超える合成柱については、適切な方法によって横変位の影響を考慮して断面力や変形量を算出することとした。

3. 2 鋼とコンクリートのヤング係数比

合成柱を有する構造物の弾性変位、および不静定力の計算に用いる鋼材と充填コンクリートとのヤング係数比 n は、 $n = 10$ にとるのを標準とする。この場合、充填コンクリートは、全断面を有効とみなして計算してよい。

【解説】 コンクリート標準示方書・設計編¹⁾によれば、コンクリートのヤング係数は、設計基準強度 $f'_{ck} = 24 \text{ N/mm}^2$ に対して 25 kN/mm^2 としている。これより計算される鋼とコンクリートとのヤング係数比は、 $n = 10$ に対して、若干、小さめの値となる。しかしながら、ここでは、ヤング係数比の多少の変化が変形量や構造物の安全性に与える影響が小さいと考えられることから、設計計算の煩雑さを避けるため、一律に $n = 10$ を用いてよいこととした。

3. 3 充填コンクリートのクリープの影響

合成柱の構造系が施工中と施工後とで変化する場合は、充填コンクリートのクリープによって生じる不静定力の影響を考慮して設計しなければならない。

【解説】 構造系が施工中と施工後とで変化する場合の充填コンクリートのクリープによる不静定力の影響は、式(解 3.1)に示す換算弾性係数比 $n(\varphi)$ を用いて計算してよい。

$$n(\varphi) = n \{ e^{\alpha \varphi} + (\alpha - 1) \} / \alpha \quad (\text{解 3.1})$$

ここで、 n は、本編の 3. 2 に示す鋼とコンクリートとの弾性係数比($n = 10$)で、係数 α は、式(解 3.2)より求めるものとする。

$$\alpha = \frac{A_s I_s}{A_v I_v} \quad (\text{解 3.2})$$

ここに, A_s, I_s : それぞれ鋼管柱の断面積(cm^2), および断面二次モーメント(cm^4)

A_v, I_v : それぞれ $n = 10$ として鋼材に換算した合成柱の断面積(cm^2), および断面二次モーメント(cm^4)

φ : 解説 表 3.1 に示すクリープ係数

解説 表 3.1 充填コンクリートのクリープ係数 φ

持続荷重を載荷したときの コンクリートの材令(日)		4 ~ 7	14	28	90	365
クリープ 係数(φ)	早強セメント使用	2.6	2.3	2.0	1.7	1.2
	普通セメント使用	2.8	2.5	2.2	1.9	1.4

一方, 文献 2) によると, コンクリートのクリープの影響は, 次のような簡易な方法で算出してよいと定めている. すなわち, 設計軸方向力が全て持続荷重である場合, コンクリートのクリープの影響を考慮したヤング係数 $E_{bi,\infty}$ は, 式(解 3.3)を用いて求めてよい.

$$E_{bi,\infty} = 250 \beta_{WN} \quad (\text{解 3.3})$$

また, 設計軸方向力の一部が持続荷重である場合は, 式(解 3.4)を用いて評価してよい.

$$E_{bi,\infty} = 500 \beta_{WN} \left(1 - 0.5 \frac{N_{st}}{N}\right) \quad (\text{解 3.4})$$

ここに, $E_{bi,\infty}$: クリープの影響を考慮したコンクリートのヤング係数(kgf/cm^2)

β_{WN} : コンクリートの立方体強度(kgf/cm^2)で, $\beta_{WN} \cong 1.2 f'_{ck}$ とする.

N : 中心圧縮の設計総軸方向力(kgf)

N_{st} : 中心圧縮の設計持続軸方向力(kgf)

3. 4 充填コンクリートの乾燥収縮の影響

充填コンクリートの乾燥収縮の影響は, 無視してよい.

【解説】 充填形式合成柱の場合, コンクリートが密閉された状態で固結するため, 乾燥収縮量は, 小さいことが指摘されている^{3), 4)}. そのため, 本指針では, コンクリートの乾燥収縮を無視してよいこととした.

参考文献

- 1) 土木学会 : コンクリート標準示方書・設計編, 平成 8 年制定.
- 2) Deutsche Norm : DIN 18806, Teil 1, Verbundkonstruktionen, Verbundstützen, März 1984.
- 3) 合成柱研究会 : 合成橋脚とその計算例・解説, 現代理工学出版, 1992 年 7 月.
- 4) Nakai, H., Kurita, A. and Ichinose, L. H. : An Experimental Study on Creep of Concrete Filled Steel Pipes, Proc. of 3rd Int. Conference on Steel-Concrete Composite Structures, Fukuoka, JAPAN, pp. 55 ~ 60, Sept. 1991.

第4章 材料および部材の強度

4. 1 材料の強度

4. 1. 1 鋼材の設計強度

合成柱に使用する鋼材の設計強度は、本指針 第1編の 5.2 に規定する鋼材の設計基準強度に等しくとてよい。

4. 1. 2 コンクリートの設計強度

(1) コンクリートの設計圧縮強度 f'_{cd} は、設計基準強度 f'_{ck} を用い、式(4.1) によって算定するものとする。

$$f'_{cd} = \phi_m f'_{ck} \quad (4.1)$$

ここに、 ϕ_m : 充填コンクリートの材料係数で、 $\phi_m = 0.9$ とする。

(2) 断面耐力を算定する際の充填コンクリートの強度は、以下に示すとおりとする。

- 1) コンクリートの圧縮強度は、設計圧縮強度 f'_{cd} の85%とする。
- 2) コンクリートの引張強度は、無視する。
- 3) コンクリートのせん断強度は、無視する。

【解説】 (1)について

コンクリート標準示方書・設計編¹⁾では、コンクリートの材料強度係数 γ_m を $f'_{ck} \leq 60\text{N/mm}^2$ のコンクリートに対して1.3としている。しかし、本指針で対象とした充填方式の合成柱の場合、鋼管の拘束効果によって充填コンクリートの強度増加が期待できることから、 γ_m としては、1.1程度の値を使用しても十分安全であると考えられる。また、DIN 18806²⁾では、一般のコンクリートの設計圧縮強度を立方体強度の0.6倍としているのに対し、充填コンクリートの場合0.7倍と高めの強度を採用している。この比と γ_m とにより、コンクリートの材料係数を算定すれば、 ϕ_m の値は、0.90程度となる。これらのことから、本指針では、 ϕ_m の値として0.9を使用することとした。

(2)について

断面耐力を算定する際のコンクリートの設計圧縮強度は、土木学会・コンクリート標準示方書・設計編¹⁾に準拠して定めた。また、せん断強度は、本編の4.4に示すとおり、合成柱に作用するせん断力を鋼部材のみで負担させることとし、これを無視することとした。

4. 1. 3 鋼材の溶接部の設計強度

(1) 工場溶接による溶接部の強度は、全断面溶込みグループ溶接に対して母材の強度と等しく、また隅肉溶接に対して母材のせん断強度に等しいものとする。

(2) 現場溶接部の強度は、工場溶接の90%の強度にとるのを原則とする。

【解説】 (1)について

溶接部の設計強度は、道路橋示方書・同解説、Ⅱ 鋼橋編³⁾ 2.2.3 に準拠して定めた。なお、部分溶込み

グループ溶接については、すみ肉溶接と同様に溶接部の設計強度を母材のせん断強度と等しくとってよい。
(2)について

近年、溶接技術が進歩し、現場における品質管理、および施工管理も十分に行われてきている。そのため、全断面溶込みグループ溶接によって、工場溶接と同等、あるいは、それ以上の品質管理、および施工管理を行い、かつ溶接全長にわたって検査を行う場合は、溶接部の強度を母材強度と等しくとってよい。

4. 2 軸方向圧縮力を受ける部材の設計圧縮耐力の算定

4. 2. 1 コンクリート充填前の鋼管柱部材の圧縮耐力

鋼管柱部材の局部座屈を考慮した設計軸方向圧縮耐力は、それぞれ式(4.2)に示す値を強軸まわり、および弱軸まわりについて算出し、それらのうち小さい方の値を採用するものとする。

$$\left. \begin{aligned} P_{us} &= A_g Q_c F_u \left\{ 1 - (1 - \phi_b) \frac{\bar{\lambda}}{\bar{\lambda}_0} \right\} & (\bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0) \\ &= \frac{\phi_{bs} A_g Q_c F_u}{2 \bar{\lambda}^2} \left\{ \beta - \sqrt{\beta^2 - 4 \bar{\lambda}^2} \right\} & (\bar{\lambda} > \bar{\lambda}_0) \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

$$\text{ただし, } \beta = 1 + \alpha (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2 \quad (4.3)$$

ここに、 P_{us} ：鋼管柱部材の設計軸方向圧縮耐力(kgf)

ϕ_{bs} ：圧縮力を受ける鋼管柱部材の抵抗係数で、断面形状、および製作過程に応じ、表 4.2 より選択する。

A_g ：照査する断面の総断面積(cm²)

F_u ：第1編の 5.2 に規定する鋼材の設計基準強度(kgf/cm²)

$\bar{\lambda}$ ：式(4.4)によって求められる細長比パラメータ

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{Q_c F}{E_s}} \frac{l}{r} \quad (4.4)$$

l ：部材の有効座屈長(cm)で、両端ピン支持条件の場合の部材長 L を基準とし、部材両端の支持条件に応じて表 4.1 に示す値を標準にとる。ただし、拘束が不十分と考えられる場合には、その値を合理的な値まで増大させるものとする。

r ：着目する部材軸に関し、総断面を用いて求めた断面二次半径(cm)

$\bar{\lambda}_0$ ：限界細長比パラメータで、断面形状、および製作過程に応じ表 4.2 より選択する。

α ：初期不整係数で、表 4.2 より選択する。

F ：第1編の 5.3 に規定する鋼材の材料強度の規格値(kgf/cm²)

E_s ：鋼のヤング係数(kgf/cm²)

Q_c ：局部座屈を生ずる短柱の無次元化強度で、式(4.5)により算定する。

$$Q_c = \frac{\sum(\sigma_{cul} A_{fc})}{A_g F_u} \quad (4.5)$$

σ_{cul} ：両縁支持板、補剛板、および円形鋼管に対し、本編 4.6.1 の 1)～7) の諸式で与えられる鋼管部材の局部座屈強度(kgf/cm²)

A_{fc} ： σ_{cul} を計算した板要素、または鋼管の断面積(cm²)

Σ ：断面を構成する板要素の総和

表 4.1 部材の有効座屈長 l (cm)

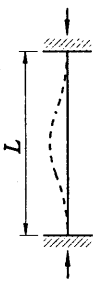
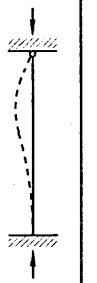
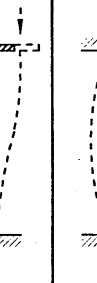
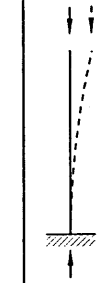
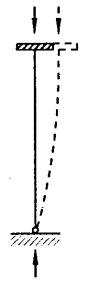
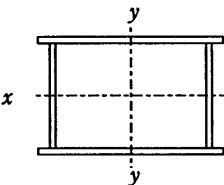
種 別			1	2	3	4	5	6
座屈波形が点線の形状を呈する場合								
			有効座屈長 l の理論値	$0.5L$	$0.7L$	L	L	$2L$
支 持 条 件	上 端	回 転	固定	自由	固定	自由	自由	固定
		水平変位	固定	固定	自由	固定	自由	自由
	下 端	回 転	固定	固定	固定	自由	固定	自由
		水平変位	固定	固定	固定	固定	固定	固定

表 4.2 鋼柱断面の区分

断 面	座 標 軸	グループ	α	$\bar{\lambda}_0$	ϕ_{bs}
 溶接箱桁	両軸とも	1	0.089	0.2	0.957
圧延箱桁, 円形鋼管	両軸とも	1	0.089	0.2	0.957
圧延 I 桁 $t \leq 40\text{mm}$	両軸とも	1	0.089	0.2	0.957
$t > 40\text{mm}$	両軸とも	3	0.432	0.2	0.924
溶接 I 桁 $t \leq 40\text{mm}$	両軸とも	2	0.224	0.2	0.924
$t > 40\text{mm}$	両軸とも	3	0.432	0.2	0.924

【解説】 本指針では、文献 4) のもとに柱の耐荷力曲線として ECCS 曲線を用い、柱の断面形状、および製作加工法の相違により 3 種類に分けた複数の耐荷力曲線を定義している。また、ラーメン構造物のような骨組部材の有効座屈長に関しては、道路橋示方書・同解説、Ⅱ鋼橋編³⁾の規定を用いることができる。

4. 2. 2 コンクリート充填後の合成柱部材の圧縮耐力

軸方向圧縮力を受ける合成柱部材の設計圧縮耐力は、式(4.6)によって算定するものとする。

$$P_{uv} = \phi_b K (\sigma_{cuo}^* A_s + 0.85 f'_{cd} A_c) \quad (4.6)$$

ここに, P_{uv} : 合成柱部材の設計軸方向圧縮耐力(kgf)

σ^*_{cuo} : 式 (4.7) によって求められる圧縮鋼板の最大強度(kgf/cm²)

$$\sigma^*_{cuo} = \sigma_{cul} - \sigma_e \quad (4.7)$$

σ_{cul} : 本編の 4.6.1 に定められる圧縮鋼板の局部座屈強度(kgf/cm²)

σ_e : 充填コンクリート硬化前に作用する応力度のうち, 構造物の完成後まで残留する圧縮鋼板の圧縮応力度(kgf/cm²)

f'_{cd} : 充填コンクリートの設計圧縮強度(kgf/cm²)

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(cm²)

ϕ_b : 合成柱部材の抵抗係数で, 本編 第1章の 式解(1.1) に示す鋼管柱の荷重分担係数 δ に応じて 式(4.8) により算定する.

$$\phi_b = \phi_{bc} + (\phi_{bs} - \phi_{bc})\delta \quad (4.8)$$

ϕ_{bc}, ϕ_{bs} : それぞれコンクリート柱部材, および鋼管柱部材の抵抗係数で, 下記による.

$$\phi_{bc} = 0.769$$

$$\phi_{bs} = 0.957$$

κ : 式 (4.9) によって求められる合成柱部材の全体座屈に対する低減係数

$$\left. \begin{aligned} \kappa &= 1.0 & (\bar{\lambda} \leq 0.2) \\ \kappa &= \eta - \sqrt{\eta^2 - 1/\bar{\lambda}^2} & (\bar{\lambda} > 0.2) \end{aligned} \right\} \quad (4.9)$$

$$\text{ただし, } \eta = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2)}{\bar{\lambda}^2} \right\} + 1 \quad (4.10)$$

$\bar{\lambda}$: 式(4.11) によって求められる無次元化細長比

$$\bar{\lambda} = \frac{l}{\pi} \sqrt{\frac{F_u A_s + 0.85 f'_{cd} A_c}{E_s I_v}} \quad (4.11)$$

α : 初期不整に対する係数で, 箱形断面に対して $\alpha = 0.34$, また円形断面に対して $\alpha = 0.21$ とする.

また, l : 合成柱部材の有効座屈長(cm)

F_u : 本指針の 第1編 5.2 に規定する鋼材の設計基準強度(kgf/cm²)

I_v : 式 (4.12) より求められる鋼材に換算した合成柱の断面二次モーメント(cm⁴)

$$I_v = I_s + \frac{I_c}{n} \quad (4.12)$$

I_s : 鋼部材の断面二次モーメント(cm⁴)

I_c : 充填コンクリートの断面二次モーメント(cm⁴)

n : 鋼とコンクリートとのヤング係数比

E_s : 本指針の 共通編 2.1.3 に規定する鋼材のヤング係数(kgf/cm²)

【解説】 軸方向圧縮力を受ける合成柱部材の耐荷力の算定式としては, ECCSの耐荷力曲線を基準にし, 阪神高速道路公団でまとめられた合成柱(充填方式)を有する鋼製橋脚の設計・施工指針(案)⁵⁾を参考にして定めることとした. ここでは, 合成柱の断面強度を算定する際の鋼部材の強度として, 道路橋示方書・同解

説Ⅱ. 鋼橋編³⁾に準じ、局部座屈と全体座屈との連成を考慮している。すなわち、局部座屈強度を求め、さらに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応力度を鋼部材の断面強度から控除することによって、合成柱の圧縮強度を算定することとした。

なお、その際、充填コンクリート硬化前の応力度を算定するときの充填コンクリート打設時の側圧は、土木学会・コンクリート標準示方書・施工編⁶⁾の11.1.2を参照されたい。

合成柱部材の有効座屈長は、その両端の支持形式に応じて求める必要がある。しかし、ここでは、一般に、土木学会・鋼構造物設計指針の規定を準用してよいものとする。なお、合成柱部材を有するラーメンの有効座屈長は、道路橋示方書・同解説Ⅱ. 鋼橋編³⁾の13.5によって算出してよい。

4. 3 曲げモーメントを受ける部材の設計曲げ耐力の算定

4. 3. 1 コンクリート充填前の鋼管柱部材の曲げ耐力

曲げモーメントを受ける鋼管柱部材の設計曲げ耐力 M_{us} は、本指針 第2編 4.4 の式(4.1)によって求めるものとする。

【解説】 ここでは、鋼管柱部材の曲げ耐力を本指針 第2編 の 4.4 に従って求めることとした。

4. 3. 2 コンクリート充填後の合成柱部材の曲げ耐力

曲げモーメントを受ける合成柱部材の設計曲げ耐力は、以下に示す仮定に基づいて、式(4.13)によって算定するものとする。

- 1) 合成柱断面のひずみ分布は、平面保持の法則に従うものとする。
- 2) 引張側コンクリートの断面は、無視するものとする。
- 3) 合成柱の断面強度を算定する際の充填コンクリートの応力-ひずみ曲線は、本指針の 第1編 の図 5.1 によるものとする。

$$M_{uv} = \phi_b \sigma_{cuo}^* Z \quad (4.13)$$

ここに、 M_{uv} : 合成柱部材の設計曲げ耐力(kgf/cm²)

ϕ_b : 本編の 4.2.1 の式(4.8)による合成柱部材の抵抗係数

σ_{cuo}^* : 本編の 4.2.1 の式(4.7)による圧縮鋼板の最大強度(kgf/cm²)

Z : 鋼部材に換算した合成柱部材の塑性断面係数(kgf/cm³)

【解説】 曲げモーメントを受ける合成柱部材の断面耐力の算定法としては、①鋼部材と充填コンクリートとのひずみの適合性を考慮しない累加強度方式、および②それらの適合が保持されるとみなした鉄筋コンクリート方式との2種類の方法がある。本指針では、本編の 1.1.1 (2)に規定する強固な隔壁によって鋼部材と充填コンクリートとのずれが拘束され、ひずみの適合性が保持されることを前提としていることから、鉄筋コンクリート方式を採用することとした。

また、圧縮側の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^{7)・8)}。本指針では、合成柱の終局曲げモーメントを算定する際の圧縮側鋼板の最大強度として局部座屈強度を用いることにより、この強度の低下を近似することとした。

さらに、充填形式の合成柱では、終局荷重作用時に、鋼管の拘束によって充填コンクリートが三軸応力状態となり、強度の増加と延性の増大とが大いに期待できる。しかしながら、長方形断面の合成柱では、拘束圧の分布が複雑であり、研究例も少ないため、本指針の 第1編 5.6 に示した応力-ひずみ曲線を用いて

曲げ強度を算定することとした。ただし、鋼断面が円形断面の合成柱では、上記の三軸応力効果が実験により確認されている⁹⁾。そこで、終局限界状態の照査においては、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 $1.0f'_{cd}$ にとり、終局圧縮ひずみを ∞ とみなして曲げ強度を算定してよいものとした。

4. 4 セン断力を受ける部材の設計せん断耐力の算定

せん断力を受ける鋼管柱部材、および合成柱部材の設計せん断耐力は、鋼断面のみで、せん断力を負担するものとみなし、以下に従って算定してよい。

1) 長方形断面で、周辺支持板を有する鋼管のせん断強度については、式(4.14)に示す値を標準とする。

$$\left. \begin{aligned} \tau_{cul} &= \tau_u & (R_r \leq 0.35) \\ &= \left(\frac{0.6}{R_r} \right)^{0.32} \phi_p \tau_u & (0.35 < R_r) \end{aligned} \right\} \quad (4.14)$$

ここに、 ϕ_p : 抵抗係数(= 0.989)

τ_{cul} : 局部座屈強度(kgf/cm²)

τ_u : 本指針 第1編 の 式(5.3) に示す鋼材のせん断強度(kgf/cm²)

R_r : 式(4.15) に示す周辺支持板の幅厚比パラメータ

$$R_r = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{k}} \sqrt{\frac{F}{E_s}} \frac{b}{t} \quad (4.15)$$

μ : 本指針 第1編 の 表 2.2 に示すポアソン比

k : 式(4.16)に示す座屈係数

$$\left. \begin{aligned} k &= 5.34 + 4.0(b/a)^2 & (a/b > 1) \\ k &= 4.0 + 5.34(b/a)^2 & (a/b \leq 1) \end{aligned} \right\} \quad (4.16)$$

F : 本指針 第1編 の 5.3 に示す鋼材の材料強度の規格値(kgf/cm²)

E_s : 本指針 第1編 の 表 2.2 に示すヤング係数(kgf/cm²)

a, b : それぞれ 図 4.1 に示す縦方向、および横方向の板の固定縁間距離(cm)

t : 板厚(cm)

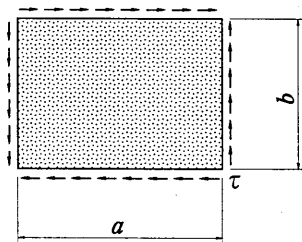


図 4.1 セン断を受ける板

2) 円形断面を有する鋼管のせん断強度については、式(4.17)に示す値を標準とする。

$$\left. \begin{aligned} \tau_{cul} &= \tau_u & (R_r \leq 0.682) \\ &= \frac{0.57}{R_r^{1.25}} \tau_u & (0.682 < R_r \leq 1.50) \end{aligned} \right\} \quad (4.17)$$

ここに, τ_{cul} : 鋼管のせん断に対する局部座屈強度(kgf/cm²)

τ_u : 本指針 第1編 の式 (5.3) に示す鋼材のせん断強度(kgf/cm²)

R_r : 式 (4.18) に示す鋼管の径厚比パラメータ

$$R_r = 2.63 \left(\frac{F}{\sqrt{3} E_s} \right)^{0.80} \frac{r}{t} \quad (4.18)$$

F, E_s : それぞれ式 (4.15) に対する記号と同じとする.

t : 鋼管の板厚(cm)

r : 鋼管の半径 (中心から外縁までの距離) (cm)

【解説】 せん断力が卓越して作用する合成柱の強度に関する研究は、極めて少ない。そのため、せん断に対する鋼とコンクリートとの共働作用については、いまだに不明な点が多々ある。したがって、ここでは、安全側の立場から、せん断力を鋼部材のみで負担させるものとした。

4. 5 ねじりモーメントを受ける部材の設計せん断耐力の算定

ねじりモーメントを受ける鋼管柱部材、および合成柱部材の設計ねじり耐力は、ともに鋼断面のみでねじりモーメントを負担するものとみなして算定してよい。

【解説】 箱形断面を有する充填形式合成柱のねじり耐力は、鋼板がコンクリートの膨張を拘束するため、鋼断面のみの場合より、上昇することが確かめられている¹⁰⁾。しかしながら、現時点では、まだ実験例も少なく、寸法効果などに関して不明な点も多々ある。そのため、本指針では、せん断力が作用する場合と同様に、鋼部材のみで、ねじりモーメントを負担させるものとした。

4. 6 圧縮力を受ける鋼板の設計局部座屈強度の算定

4. 6. 1 コンクリート充填前の鋼管柱部材の局部座屈強度

1) 一様な圧縮力を受ける両縁支持板の局部座屈強度としては、式 (4.19) に示す値を標準とする。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{cul} &= F_u & (R \leq 0.63) \\ &= \left(\frac{0.7}{R} \right)^{0.80} \phi_p F_u & (0.63 < R) \end{aligned} \right\} \quad (4.19)$$

ここに, σ_{cul} : 一様な圧縮力を受ける両縁支持板の局部座屈強度(kgf/cm²)

ϕ_p : 抵抗係数で, $\phi_p = 0.913$ とする。

F_u : 本指針の 第1編 5.2 に規定する鋼材の設計基準強度(kgf/cm²)

R : 幅厚比パラメータ

$$R = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{k}} \sqrt{\frac{F}{E_s}} \frac{b}{t} \quad (4.20)$$

μ : 本指針の 第1編 表 2.2 に示すポアソン比

k : 座屈係数で, $k = 4.0$ とする。

F, E_s : それぞれ式 (4.15) に対する記号と同じとする。

b, t : それぞれ 図 4.2 に示す板の固定縁間距離, および板厚(cm)

- 2) 面内曲げを受ける両縁支持板の局部座屈強度としては、式(4.21)に示す値を標準とする。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{bul} &= F_u & (R \leq 0.89) \\ &= \left(\frac{1.0}{R} \right)^{0.80} \phi_p F_u & (0.89 < R) \end{aligned} \right\} \quad (4.21)$$

ここに、 σ_{bul} ：面内曲げを受ける両縁支持板の局部座屈強度(kgf/cm²)

ϕ_p, F_u, R ：それぞれ 式(4.19) に対する記号と同じとする。ただし、幅厚比パラメーター R を計算する際の座屈係数は、 $k = 23.9$ とする。

- 3) 面内曲げと一様圧縮の組み合わせ力を受ける両縁支持板の局部座屈強度としては、式(4.22)に示す値を標準とする。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{cul} &= F_u & (R \leq 0.63) \\ &= \left(\frac{0.7}{R} \right)^{0.80} \phi_p F_u & (0.63 < R) \end{aligned} \right\} \quad (4.22)$$

ここに、 σ_{cul} ：面内曲げと一様圧縮の組み合わせ力を受ける両縁支持板の局部座屈強度(kgf/cm²)

ϕ_p, F_u ：それぞれ 式(4.19) に対する記号と同じとする。

R ：式(4.23) に示す幅厚比パラメーター

$$R = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{12(1-\mu^2)}{k}} \sqrt{\frac{F}{E_s}} \frac{b}{ft} \quad (4.23)$$

μ, k, F, E_s, b, t ：それぞれ 式(4.20) に対する記号と同じとする。

f ：応力勾配による係数で、式(4.24) により算定する。

$$f = 0.32 \psi^2 + 0.08 \psi + 1 \quad (4.24)$$

ψ ：式(4.25) に示す応力勾配

$$\psi = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1} \quad (0 \leq \psi \leq 2) \quad (4.25)$$

σ_1, σ_2 ：図 4.3 に示すように、それぞれ板の両縁における縁応力度(kgf/cm²)。

ただし、圧縮応力度を正とし、また $\sigma_2 \leq \sigma_1$ とする。

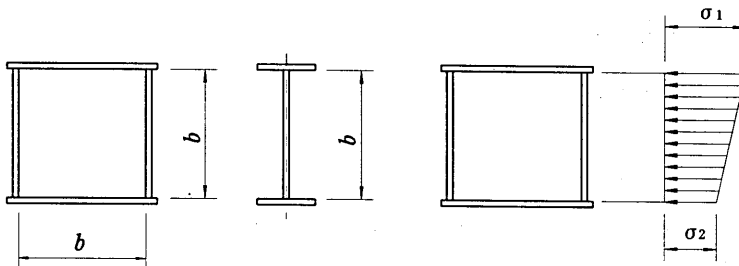


図 4.2 両縁支持板の固定縁間距離

図 4.3 両縁支持板の縁応力度

- 4) 一様圧縮を受ける補剛板の局部座屈強度としては、式(4.26) に示す値を標準とする。

$$\sigma_{cul} = \phi_p N_{usp} F_u \quad (4.26)$$

ここに、 σ_{cul} ：一方向圧縮を受ける補剛板の局部座屈強度(kgf/cm²)

ϕ_p ：抵抗係数で、 $\phi_p = 0.880$ とする。

F_u : 本指針の 第1編 5.2 に規定する鋼材の設計基準強度(kgf/cm²)

N_{usp} : 式(4.27)で与えられる補剛板要素の無次元化基準圧縮強度

$$N_{usp} = \frac{(n-1)\sigma_T(bt/n + h_r t_r) + bt\sigma_{culp}/n}{bt + (n-1)h_r t_r} \quad (4.27)$$

ここに, σ_{culp} : 式(4.28)で与えられる両縁支持板の無次元化基準圧縮強度

$$\sigma_{culp} = \left(\frac{0.7}{R_{cp}}\right)^{0.86} \quad (4.28)$$

ただし, $\sigma_{culp} \leq 1$

σ_T : 式(4.29)で与えられる縦補剛材間の板パネルと縦補剛材1本とで構成される
T形断面部材の無次元化基準圧縮強度

$$\left. \begin{aligned} \sigma_T &= 1.0 & (\bar{\lambda}^* \leq 0.2) \\ &= \frac{S - \sqrt{S^2 - 4\bar{\lambda}^{*2}}}{2\bar{\lambda}^{*2}} & (\bar{\lambda}^* > 0.2) \end{aligned} \right\} \quad (4.29)$$

n : 縦方向補剛材によって区切られるパネル数 ($n \geq 2$)

b, t : それぞれ 図 4.4 に示す補剛板の板幅, および板厚(cm)

また, 式(4.28), および(4.29)式中の記号は, 以下の式で与えられる。

$$S = 1 + 0.339(\bar{\lambda}^* - 0.2) + \bar{\lambda}^{*2} \quad (4.30)$$

$$\bar{\lambda}^* = \left(\frac{2400}{F}\right)^{0.2} \sqrt{\frac{F}{E_s}} \frac{\eta \beta a}{\pi r} \quad (4.31)$$

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{\sigma_{culp}}} \quad (4.32)$$

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \frac{1}{1.164 C^{0.251}} & (0 < C \leq 0.54) \\ &= 1.0 & (0.54 < C) \end{aligned} \right\} \quad (4.33)$$

$$r = \sqrt{\frac{I_r}{A_r}} \quad (4.34)$$

$$e = \frac{h_r^2 t_r - b t^2 / n}{2 A_r} \quad (4.35)$$

$$C = \left(\frac{a}{b}\right)^3 \frac{I_t}{I_r} \quad (4.36)$$

$$I_t = \frac{h_r^3 t_r}{3} \quad (4.37)$$

$$I_r = \frac{1}{3} \left(h_r^3 t_r - \frac{b t^3}{n} \right) - e^2 A_r \quad (4.38)$$

$$A_r = \frac{b t}{n} + h_r t_r \quad (4.39)$$

ここに, a : 横方向補剛材の間隔(cm)

h_r, t_r : それぞれ縦方向補剛材の高さ, および板厚(cm)

- h, t : それぞれ横方向補剛材の高さ, および板厚(cm)
 R_{cp} : 縦横の補剛材で囲まれた圧縮板の幅厚比パラメータ
 F, E_s : それぞれ 式 (4.4) に対する記号と同じとする.

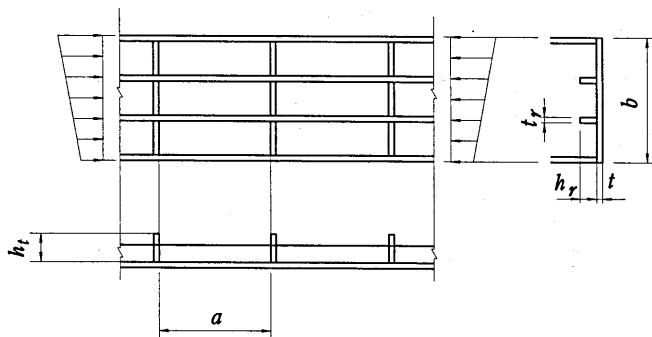


図4.4 補剛板

- 5) 一様圧縮を受ける円形鋼管の局部座屈強度としては, 式 (4.40) に示す値を標準とする.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{cul} &= F_u & (R_t \leq 0.119) \\ &= \left(0.723 + \frac{0.033}{R_t} \right) F_u & (0.119 < R_t \leq 0.355) \end{aligned} \right\} \quad (4.40)$$

ここに, σ_{cul} : 一様圧縮を受ける円形鋼管の局部座屈強度(kgf/cm²)

F_u : 本指針の 第1編 5.2 に規定する設計材料強度(kgf/cm²)

R_t : 式 (4.41) に示す径厚比パラメータ

$$R_t = 1.65 \frac{F}{E_s} \cdot \frac{r}{t} \quad (4.41)$$

F, E_s : それぞれ 式 (4.4) に対する記号と同じとする.

r : 鋼管の半径 (中心から外縁までの距離) (cm)

t : 鋼管の板厚(cm)

- 6) 曲げを受ける円形鋼管の局部座屈強度としては, 式 (4.42) に示す値を標準とする.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{bul} &= 1.20 F_u & (R_t \leq 0.099) \\ &= \left(0.867 + \frac{0.033}{R_t} \right) F_u & (0.099 < R_t \leq 0.279) \end{aligned} \right\} \quad (4.42)$$

ここに, σ_{bul} : 曲げを受ける円形鋼管の局部座屈強度(kgf/cm²)

F_u, R_t : それぞれ 式 (4.40) に対する記号と同じとする.

- 7) 曲げと圧縮とを同時に受ける円形鋼管の局部座屈強度としては, 式 (4.43) に示す値を標準とする.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{cul} &= f F_u & (R_t \leq \frac{0.119}{f}) \\ &= \left(0.723 f + \frac{0.033}{R_t} \right) F_u & (\frac{0.119}{f} < R_t \leq \frac{0.355}{f}) \end{aligned} \right\} \quad (4.43)$$

ここに, σ_{cul} : 曲げ, および圧縮を同時に受ける円形鋼管の局部座屈強度(kgf/cm²)

F_u, R_t : それぞれ 式 (4.40) に対する記号と同じとする.

f : 応力勾配による係数で, 式 (4.44) により算定する.

$$f = 1 + \frac{\psi}{10} \quad (4.44)$$

ψ : 応力勾配で, 式 (4.45) により算定する.

$$\psi = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1} \quad (0 \leq \psi \leq 2) \quad (4.45)$$

σ_1, σ_2 : それぞれ曲げによって鋼管に圧縮が生じる側の合応力度, および鋼管に引張が生じる側の合応力度(kgf/cm²). ただし, 符号は, 圧縮応力度を正とする.

【解説】(1)について

まず, 圧縮応力を受ける板の局部座屈強度は, 解説 図 4.1に示すように, 等分布圧縮応力を受ける板厚一定の長方形板の弾性座屈応力度

$$\sigma_E = k \frac{\pi^2 E_s}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 \quad (\text{解 4.1})$$

を基に, 基準となる幅厚比パラメータを

$$R = \sqrt{\frac{F}{\sigma_E}} = \frac{b}{\pi t} \sqrt{\frac{12(1 - \mu^2)}{k}} \sqrt{\frac{F}{E_s}} \quad (\text{解 4.2})$$

と定めている. そして, 残留応力や初期変形の影響による局部座屈強度の低下を考慮するとともに, 幅厚比の大きい範囲では, 弾性座屈後の耐荷余力を見込んで局部座屈強度を定めている. ここに, 座屈係数 k は, $b = \infty$ のときを考えて最小値をとる. とくに, 一様な圧縮力を受ける両縁支持板の場合には, $k = 4.0$ としている.

つぎに, 式(4.22)については, 幅厚比パラメーター R における応力勾配を示すパラメーター f を導入する. この f 値は, 応力勾配がある場合の座屈係数を応力勾配 $\psi = 0$ の場合に比較して f 倍できるとみなして, 式 (解4.2) より,

$$f = \sqrt{\frac{k(\psi = \psi)}{k(\psi = 0)}} \quad (\text{解 4.3})$$

とおく. そして, 解説 表 4.1に示すように, $\psi = 0, 1$, および 2 のときの f の値を, 計算する.

このようにして計算された f の値は, ψ に関する2次放物線とみなして,

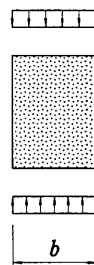
$$f = 0.32 \psi^2 + 0.08 \psi + 1 \quad (\text{解 4.4})$$

と定めることにした.

解説 表 4.1

応力勾配 $\psi = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_1}$	$\psi = 0$	$\psi = 1$	$\psi = 2$
座屈係数 k	$k = 4.0$	$k = 7.81$	$k = 23.9$
応力勾配による補正係数 f	$f = 1.0$	$f = 1.40$	$f = 2.44$

さらに, 一方向の圧縮や面内曲げを受ける補剛板の補剛材の剛度と配置とは, 道路橋示方書に準ずることとした. また, 補剛材の配置については, 等間隔とした.



解説 図 4.1 等分布圧縮応力を受ける長方形板

4. 6. 2 コンクリート充填後の合成柱部材の局部座屈強度

- (1) 箱形断面を有する合成柱の充填コンクリート硬化後における圧縮鋼板の設計局部座屈強度は、式 (4.46) によって算出するものとする。

$$\sigma_{cul} = \phi_p \chi F_u \quad (4.46)$$

ここに、 σ_{cul} : 圧縮鋼板の局部座屈強度(kgf/cm²)

ϕ_p, F_u : それぞれ 式 (4.19) に示す記号と同じとする。

χ : 以下に示す 式 (4.47) , および 式 (4.48) による圧縮鋼板の局部座屈強度に対する低減係数

- 1) 無補剛板の場合 :

$$\left. \begin{aligned} \chi &= 1.0 & (R_f \leq 0.5) \\ \chi &= 0.433(R_f - 0.5)^2 - 0.831(R_f - 0.5) + 1 & (0.5 < R_f \leq 1.3) \end{aligned} \right\} \quad (4.47)$$

- 2) 補剛板の場合 :

$$\left. \begin{aligned} \chi &= 1.0 & (\bar{\lambda} \leq 0.2) \\ \chi &= \beta - \sqrt{\beta^2 - 1/\bar{\lambda}^2} & (\bar{\lambda} > 0.2) \end{aligned} \right\} \quad (4.48)$$

ここに、 R_f : 式 (4.49) に示す無補剛板の幅厚比パラメータ

$$R_f = 0.323 \sqrt{\frac{F}{E_s}} \frac{b}{t} \quad (4.49)$$

F : 本指針の 第1編 5.3 に規定する鋼材の材料強度の規格値(kgf/cm²)

E_s : 本指針の 第1編 表 2.2 に示す鋼材のヤング係数(kgf/cm²)

b, t : それぞれ 図 4.4 に示す補剛板の板幅, および板厚(cm)

β : 式 (4.50) で与えられる係数

$$\beta = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1 + 0.49(\bar{\lambda} - 0.2)}{\bar{\lambda}^2} + 1 \right\} \quad (4.50)$$

また、 $\bar{\lambda}$: 式 (4.51) で与えられる無次元化細長比

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{F}{E_s}} \frac{l}{r} \quad (4.51)$$

ここに、 $l = a/2$

a : 横補剛材, またはダイヤフラムの間隔(cm)

r : 図 4.5 に示す T 形断面柱の断面二次半径(cm)

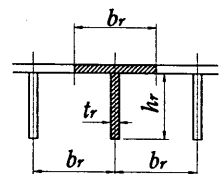


図 4.5 T形断面柱

- (2) 円形断面を有する合成柱の充填コンクリート硬化後における鋼管の局部座屈強度は、本編の 4.6.1 の 5), 6), および 7) の規定によるものとする。

【解説】 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)⁵⁾を参考にして定めることとした。すなわち、無補剛板の局部座屈強度は、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

されたものである¹¹⁾。また、補剛板の局部座屈強度は、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みなして、弾塑性有限変位解析や ECCS の耐力曲線 'c' すなわち、圧延フランジを有する I 形断面の弱軸まわりの座屈に対する耐力曲線を用いて算定されたものである¹²⁾。

円形鋼管の場合も充填コンクリートによって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、僅小で、実験データの蓄積も少ない。そのため、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。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書・設計編，平成 8 年制定。
- 2) Deutsche Norm：DIN 18806, Teil 1, Verbundkonstruktionen, Verbundstützen, März 1984.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅱ鋼橋編，平成 6 年 2 月。
- 4) 東海鋼構造研究グループ（代表：福本嘯士）：鋼構造部材の抵抗強度の評価と信頼性設計への適用(上)，(下)，橋梁と基礎，Vol.14, No.11, pp. 33～41, および No.12, pp. 38～44, 1980 年 11 月，および 12 月。
- 5) 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。
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書・施工編，平成 8 年制定。
- 7) 中井 博，吉川 紀，中村一平，袴田文雄，寺田博昌：合成柱(充填方式)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, No.10, pp. 19～27, 1985 年 6 月。
- 8) 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, No. 374 / I - 6, pp. 67～77, 1986 年 10 月。
- 9) 佐藤孝典：円形断面の充填鋼管コンクリート構造におけるコンファインド効果のメカニズムとモデル化，日本建築学会構造系論文報告集，第 452 号，pp. 149～158, 1993 年 10 月。
- 10) 北田俊行，中井 博，才村幸生，神崎昭雅：コンクリートを充填した鋼製箱形断面材の終局ねじりモーメントに関する実験的研究，土木学会論文集，No437 / I - 17, pp. 89～95, 1991 年 10 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一設計法，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 2 月。

第5章 限界状態の照査

5. 1 終局限界状態の照査

5. 1. 1 一般

合成柱部材の終局限界状態に対する照査は、合成柱部材の設計断面耐力 R_d が、設計断面力 S_d 以上であることを確かめることによって行うのを原則とする。ここで、 R_d 、および、 S_d は、以下のようにして算出する。

- (1) 設計断面耐力 R_d は、本指針の第4編、第4章に示す設計材料強度を用いて計算される合成柱部材の断面強度に抵抗係数 ϕ_b を乗じることによって算出するものとする。
- (2) 設計断面力 S_d は、荷重効果の設計値である。すなわち、設計荷重を γ 倍し、本指針の第4編、第3章に基づいて荷重効果を算出するものとする。

【解説】 安全率 γ は、構造物の種類、考慮する荷重の種類、および荷重の組合わせによって異なるものであり、構造物の種類や荷重の組み合わせに応じて、適宜、定めるものとした。

また、抵抗係数 ϕ_b は、コンクリート構造物で考えられている部材係数 γ_b の逆数を表したもので、1より小さい値をとる。一般に、合成柱部材に対する ϕ_b の値は、コンクリート柱に対する ϕ_b の値と、鋼柱に対する ϕ_b の値とを鋼管柱の荷重分担係数 δ に応じて直線補間してよい。

5. 1. 2 鋼部材としての照査

充填コンクリート硬化前の荷重に対しては、鋼部材として終局限界状態の照査を行うものとする。

【解説】 充填コンクリート硬化前の荷重としては、鋼部材、および充填コンクリートの自重、施工機材・仮設備の重量などによる鉛直荷重、風圧、流水圧、地震による水平力、ならびに充填コンクリート打設時の側圧などが考えられる。合成柱の設計に際しては、充填コンクリート硬化前に、これらの荷重に対し鋼部材とみなして終局限界状態に対する安全性を照査しなければならない。

5. 1. 3 軸方向圧縮力を受ける部材の照査

(1) コンクリート充填前の鋼管柱部材の照査

コンクリート充填前の軸方向圧縮力を受ける鋼管柱は、式(5.1)によって終局限界状態を照査するものとする。

$$\frac{P_s}{P_{us}} \leq 1 \quad (5.1)$$

ここに、 P_s : 鋼管柱部材に作用する軸方向圧縮力(kgf)

P_{us} : 本指針の第4編 4.2.1 に示す鋼管柱部材の設計軸方向圧縮耐力(kgf)

(2) コンクリート充填後の合成柱部材の照査

コンクリート充填後の軸方向圧縮力を受ける合成柱は、式(5.2)によって終局限界状態を照査するものとする。

$$\frac{P_v}{P_{uv}} \leq 1 \quad (5.2)$$

ここに、 P_v : 合成柱部材に作用する軸方向圧縮力(kgf)

P_{uv} : 本指針の 第4編 4.2.2 に示す合成柱部材の設計軸方向圧縮耐力(kgf)

なお、作用曲げモーメントが 式 (5.3) に示す範囲にある合成柱は、軸方向圧縮力のみを受ける合成柱部材とみなして設計してよい。

$$\frac{M_v}{M_{uv}} \leq 0.1 \quad (5.3)$$

ここに、 M_v : 設計曲げモーメント(kgf·cm)

M_{uv} : 本指針の 第4編 4.3.2 によって算定される合成柱の設計曲げ耐力(kgf·cm)

【解説】(1)について

ここでは、本指針の 第4編 4.2.1 に示す鋼管柱の設計圧縮強度を用いて、終局限界状態を照査することとした。

(2)について

本指針の 第4編 4.2.2 に示す軸方向圧縮力を受ける合成柱の断面耐力は、ECCS の耐荷力曲線に基づいて定められたものである。

一方、文献 1) によれば、軸方向圧縮力を受ける長方形断面の合成柱において、付加曲げモーメントが $0.1M_p$ 以下の場合には、その耐荷力が ECCS の耐荷力曲線より、若干、高い値を示すことが確認されている。このことから、作用曲げモーメントが上記の範囲内にある場合には、中心軸圧縮力のみを受ける合成柱とみなしてもよいこととした。

5. 1. 4 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部材の照査

(1) コンクリート充填前の鋼管柱部材の照査

コンクリート充填前の中心軸圧縮力と曲げモーメントとを同時に受ける鋼管柱部材は、式(5.4)、または 式(5.6) によって終局限界状態を照査するものとする。

1) 圧縮と一軸曲げとを受ける場合

$$\frac{P_s}{P_{us}} + \frac{M_s}{M_{us}(1 - P_s/P_{cs})} \leq 1 \quad (5.4)$$

ここに、 P_s : 鋼管柱部材に作用する軸方向圧縮力(kgf)

P_{us} : 本編の 4.2.1 に示す鋼管柱部材の設計軸方向圧縮耐力(kgf)

M_s : 鋼管柱部材に作用する曲げモーメント(kgf·cm)

M_{us} : 本編の 4.3.1 より算定される鋼管柱部材の設計曲げ耐力(kgf·cm)

P_{cs} : 式(5.5) より求められる鋼管柱部材の弾性座屈荷重(kgf)

$$P_{cs} = \frac{\pi^2}{l^2} E_s I_s \quad (5.5)$$

l, E_s : それぞれ本編の 4.2.1 に示した記号と同じものとする。

I_s : 鋼管柱部材の断面二次モーメント(cm⁴)

2) 圧縮と二軸曲げとを受ける場合

$$\frac{P_s}{P_{us}} + \frac{M_{sy}}{M_{usy} (1 - P_s/P_{crsy})} + \frac{M_{sz}}{M_{usz} (1 - P_s/P_{crsz})} \leq 1 \quad (5.6)$$

ここに、 P_s, P_{us} : それぞれ本章の式 (5.5) に示した記号と同じものとする。

M_{sy}, M_{sz} : それぞれ y 軸、および z 軸まわりの鋼管柱部材に作用する曲げモーメント(kgf-cm)

M_{usy}, M_{usz} : それぞれ本編の 4.3.1 より算定される鋼管柱部材の y 軸、および z 軸まわりの設計曲げ耐力(kgf-cm)

P_{crsy}, P_{crsz} : それぞれ y 軸、および z 軸まわりの座屈に対する鋼管柱部材の弾性座屈荷重(kgf)で、式(5.7)により算定する。

$$\left. \begin{aligned} P_{cry} &= \frac{\pi^2}{l^2} E_s I_{sy} \\ P_{crz} &= \frac{\pi^2}{l^2} E_s I_{sz} \end{aligned} \right\} \quad (5.7)$$

l, E_s : それぞれ本章の式 (5.5) に示した記号と同じものとする。

I_{sy}, I_{sz} : それぞれ y 軸、および z 軸まわりの鋼管柱部材の断面二次モーメント(cm⁴)

(2) コンクリート充填後の合成柱部材の照査

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は、式(5.8)、または 式(5.12) によって終局限界状態を照査するものとする。

1) 圧縮と一軸曲げとを受ける場合

$$\frac{M_v}{M_{uv} (1 - P_v/P_{crv})} \cdot \frac{1}{\phi} \leq 1 \quad (5.8)$$

ここに、 M_v : 合成柱部材に作用する設計曲げモーメント(kgf-cm)

M_{uv} : 本編の 4.3.2 により算定される合成柱部材の設計曲げ耐力(kgf-cm)

P_v : 合成柱部材に作用する軸方向圧縮力(kgf)

P_{crv} : 式(5.9) による合成柱部材の弾性座屈荷重(kgf)

$$P_{crv} = \frac{\pi^2}{l^2} E_s I_v \quad (5.9)$$

l, E_s : それぞれ本章の式 (5.5) に示した記号と同じものとする。

I_v : 鋼材に換算した合成柱部材の断面二次モーメント(cm⁴)

ϕ : 式(5.10)より求められる合成柱の $M-N$ 相関曲線に基づく係数

$$\phi = 1 - (1 + \beta) \left(\frac{P_v}{P_{uv}} \right)^2 + \beta \left(\frac{P_v}{P_{uv}} \right) \quad (5.10)$$

β : 式(5.11)で与えられる係数

$$\beta = 9.17 \delta^2 - 13.75 \delta + 4.63 \quad (5.11)$$

δ : 本編の 1.1 の 式(解 1.2) に示す鋼管柱の荷重分担率

P_{uv} : 本編の 4.2.2 に示す合成柱部材の設計軸方向圧縮耐力(kgf)

2) 圧縮と二軸曲げとを受ける場合

$$\left\{ \frac{M_{vy}}{M_{uyv}(1-P_v/P_{crvy})} + \frac{M_{vz}}{M_{vuz}(1-P_v/P_{crvz})} \right\} \frac{1}{\phi} \leq 1 \quad (5.12)$$

ここに, M_{vy}, M_{vz} : それぞれ合成柱部材の y 軸, および z 軸まわりに作用する曲げモーメント(kgfc $\cdot$ m)

M_{uyv}, M_{vuz} : それぞれ本編の 4.3.2 より算定される合成柱部材の y 軸, および z 軸まわりの設計曲げ耐力(kgfc $\cdot$ m)

P_v, ϕ : それぞれ 式(5.8) に示した記号と同じものとする.

P_{crvy}, P_{crvz} : それぞれ合成柱部材の y 軸, および z 軸まわりの弾性座屈荷重(kg $\cdot$ f)で, 式(5.13)により算定する.

$$\left. \begin{aligned} P_{crvy} &= \frac{\pi^2}{l^2} E_s I_{vy} \\ P_{crvz} &= \frac{\pi^2}{l^2} E_s I_{vz} \end{aligned} \right\} \quad (5.13)$$

l, E_s : それぞれ本章の 式(5.5)に示した記号と同じものとする.

I_{vy}, I_{vz} : それぞれ合成柱部材の y 軸, および z 軸まわりの換算断面二次モーメント(cm 4)

【解説】 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)²⁾を参考にして定めることとした. すなわち, 合成柱が柱としての全体座屈, および鋼部分における局部座屈を生じない場合, 軸方向圧縮力と曲げモーメントとに対する相関強度曲線は, 軸方向圧縮力 P , および曲げモーメント M をそれぞれ断面の全塑性軸力 P_p , および全塑性一モーメント M_p で無次元化すれば, 式(解 5.1)によって与えられる.

$$(1 + \beta)(P/P_p)^2 - \beta(P/P_p) + (M/M_p) \leq 1 \quad (\text{解 5.1})$$

式(解 5.1)において, 長柱の全体座屈, および鋼板の局部座屈の影響を考慮し, P_p と M_p とをそれぞれ終局軸方向力 P_u と終局曲げモーメント M_u とに置き換えれば, 合成柱の相関強度式としては, 式(解 5.2)が得られる.

$$(1 + \beta)(P/P_u)^2 - \beta(P/P_u) + (M/M_u) \leq 1 \quad (\text{解 5.2})$$

条文の照査式は, 式(解 5.2)における β を鋼管柱の荷重分担率 δ をパラメータとした多数のパラメトリック解析によって決め, それに基づいて導かれたものである.

また, 柱の非線形特性を評価するための付加曲げの影響は, それぞれ 式(5.8), および 式(5.12)の線形1次理論による曲げモーメント M に拡大係数 $\{1/(1-P/P_{cr})\}$ を乗じることによって考慮している.

5. 1. 5 ねじりモーメントとせん断力とを同時に受ける合成柱部材の照査

ねじりモーメントとせん断力とが同時に作用する合成柱部材の照査は, 土木学会鋼構造物設計指針によって終局限界状態を照査するものとする.

【解説】 本項では, せん断力, および, ねじりモーメントが単独に作用する合成柱断面の強度を鋼断面のみで負担させることを前提として, 終局限界状態を照査することになっている. そのため, これらの断面力と同時に作用する場合に対しても, 鋼断面のみで抵抗するものとして, 終局限界状態を照査してよいこととした.

5. 1. 6 軸圧縮、曲げ、ねじり、および、せん断力を同時に受ける合成柱部材の照査

軸方向圧縮力、曲げモーメント、ねじりモーメント、および、せん断力が同時に作用する合成柱部材の終局限界状態の照査は、式(5.14)による換算応力度を用い、本編の 5.1.4 によって行うものとする。

$$\sigma^{**}_{cuo} = 1.1 \sqrt{\sigma^{*}_{cuo}{}^2 - 3 \tau_{max}{}^2} \quad \left. \vphantom{\sigma^{**}_{cuo}} \right\} \quad (5.14)$$

ただし、 $\sigma^{**}_{cuo} \leq \sigma^{*}_{cuo}$

ここに、 σ^{**}_{cuo} : せん断応力の影響を考慮した圧縮版の換算応力度(kgf/cm²)

σ^{*}_{cuo} : 本編の 4.2.2 の式 (4.7) による圧縮板の最大強度(kgf/cm²)

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せん断応力度の最大値(kgf/cm²)

【解説】 せん断ひずみエネルギー一定説によれば、垂直応力とせん断応力とが同時に作用する部材の強度は、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た式 (5.14) による換算応力度を用いて評価できるとしている。すなわち、本指針の 第4編 4.2.2 の式 (4.6) による断面の軸圧縮耐力、および本指針の 第4編 4.3.2 の式 (4.13) による断面の曲げ耐力を算定する際に使用する圧縮板の最大強度として、式 (5.14) による換算応力度を用いることによって、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部材の設計耐力を評価できるものとした。

ここで、式 (5.14) 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、十分に安全性が確保されている³⁾ との理由で採用した割増係数である。

5. 1. 7 橋脚の地震時保有水平耐力の照査

高架橋の橋脚のように、地震荷重の影響を著しく受ける構造物に対して合成柱を使用する場合には、過去に観測された最大規模の地震に対しても、十分な変形能を有するとともに、ぜい性的な破壊が生じないことを適切な方法で確かめることが望ましい。

【解説】 一般に、合成柱は、最大耐力以降の粘りを期待しうる構造であると考えられる。しかし、地震荷重の影響を著しく受け、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、道路橋示方書・同解説 V. 耐震設計編⁴⁾、あるいは土木学会の鋼構造物の終局強度と設計⁵⁾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、その耐荷性と変形性能とを調べておく必要がある。そして過去に観測された最大規模の地震に対しても、鋼部材がぜい性的な破壊を生じないことを確認しておくことが望ましい。そのため、ここでは、条文のような規定を設けることとした。その手順については、本編の 資料 3. C を参考にされたい。

5. 2 使用限界状態の照査

5. 2. 1 一般

使用時の荷重による合成柱部材の変形、変位、および振動などが、構造物の機能、使用性、および耐久性を損なわないことを、適切な方法によって照査するものとする。

【解説】 合成柱部材の使用限界状態に影響を及ぼす要因としては、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。構造物の使用期間中における機能、使用性、および耐久性を保持するために

は、これらの量が構造物の使用目的に応じ、適宜、定められる制限値内にあることを適切な方法によって照査することとした。

5. 2. 2 鋼部材の降伏に対する照査

使用時の荷重に対して、合成柱の基部、または梁－柱結合部においては、永久変形を生じないように、式 (5.15) によって鋼部材の降伏に対する安全性を照査するものとする。

$$\frac{\sigma^*_{s,max}}{F_u} \leq 1 \quad (5.15)$$

ここに、 $\sigma^*_{s,max}$ ：式(5.16)に示す使用時荷重によって鋼部分に発生する最大応力度の換算値(kgf/cm²)

$$\sigma^*_{s,max} = \sqrt{\sigma_{s,max}^2 + 3\tau^2} \quad (5.16)$$

$\sigma_{s,max}$ ：使用時荷重によって鋼部分に発生する垂直応力度の最大値(kgf/cm²)

τ ： $\sigma_{s,max}$ を生じる載荷状態に対して鋼部分に発生するせん断応力度(kgf/cm²)

F_u ：本編の 4.1.1 に規定する鋼材の設計基準強度(kgf/cm²)

【解説】 ここでは、使用時の荷重に対して、合成柱に永久変形が生じることがないように、上記の規定を設けることとした。

5. 2. 3 変形量に対する照査

活荷重(衝撃を含まない)による合成柱部材の変形量は、各部材の使用目的に応じ、責任技術者の判断によって、適宜、定められる限界変形量を超えてはならない。

【解説】 活荷重(衝撃を含まない)による合成柱の変形量の限界値は、その部材の使用目的に応じ、責任技術者の判断によって定めることとした。

なお、合成柱を高架橋の橋脚などに使用する場合は、道路橋示方書・同解説 II. 鋼橋編³⁾の 13.7, および 13.8 の規定を準用してもよいこととした。

参考文献

- 1) 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, No374 / I -6, pp.447 ~ 456, 1986 年 10 月.
- 2) 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.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II. 鋼橋編, 1994 年 2 月.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V. 耐震設計編, 1990 年 2 月.
- 5) 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, 1994 年 7 月.

第6章 構造細目

6.1 鋼材の最小板厚

合成柱に使用する鋼部材の最小板厚は、土木学会・鋼構造物設計指針 Part A の規定によるものとする。

【解説】 合成柱の場合、充填コンクリートにより鋼板の内側への変形が拘束されるために、鋼構造物に比して最小厚規定を、若干、緩和できるものと思われる。しかし、ここでは、充填コンクリート硬化前の施工時の変形を抑制するために、鋼構造物設計指針に準じることとした。なお、参考のために、DIN 18808¹⁾、および BS 5400 Part 5²⁾ における無補剛鋼管に対する最小板厚の規定を、解説表 6.1 に示す。

解説表 6.1 諸外国における無補剛鋼管合成柱の最小板厚 t に関する規定

断面形状	BS 5400 Part5	DIN 18806 Teil 1			摘 要
			ST37	ST54	
長方形断面	$t \geq d \sqrt{F/(3Es)}$	$d/t \leq$	51	42	d : 長方形断面の長辺の外径
円形断面	$t \geq D \sqrt{F/(8Es)}$	$D/t \leq$	84	68	D : 円形断面の外径

ここに、 F : 鋼材の設計材料強度 (kgf/cm^2) , Es : 鋼材のヤング係数 (kgf/cm^2)

6.2 長方形断面の辺長比の制限

長方形断面合成柱の長辺と短辺との比 b/h は、2 以下になるのを原則とする。

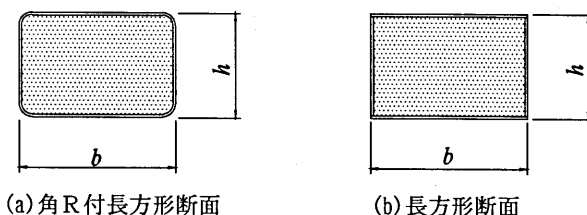


図 6.1 長方形断面の形状

【解説】 偏平な長方形断面合成柱の耐荷力に関する研究は、極めて少ない。そのため、その変形性状や耐荷機構がまだ十分解明されていないので、ここでは、上記の規定を設けることとした。

6.3 細長比の限界

合成柱部材の細長比 l/r は、主要部材に対して 120 以下で、また二次部材に対して 150 以下でなければならない。

ここに、 l : 本編の 4.2.1 の表 4.1 に規定する合成柱部材の有効座屈長(cm)

r : 充填コンクリートの全断面を有効として算定される合成柱部材の断面二次半径(cm)

【解説】 諸外国の規準^{1)・2)}によれば、合成柱部材の細長比の限界値は、鋼柱に比べ、若干、大きくとれるものと思われる。しかし、ここでは、本指針で想定している合成柱部材の断面構成を考慮して、道路橋示方書・同解説 II. 鋼橋編³⁾に準じて上記のように定めることとした。

6. 4 梁－柱接合部

- (1) 隅角部を設計する際、充填コンクリートの硬化後においては、せん断遅れの影響を無視してよいものとする。
- (2) 合成柱と鋼製梁との接合部において、梁にコンクリートを充填する範囲は、梁－柱交差部の柱端から梁幅の1/2以上を標準とする。

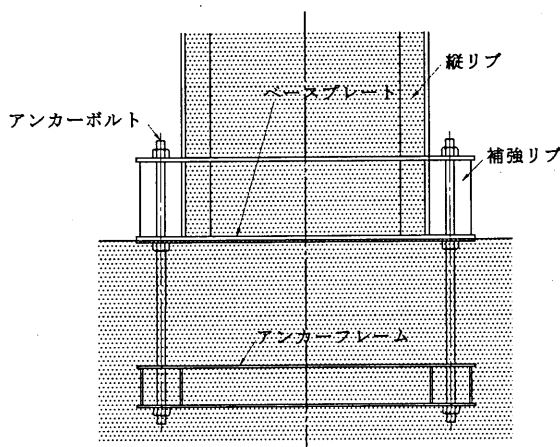
【解説】 箱断面の鋼製梁が柱部材に剛結され、梁部にコンクリートを充填しない構造系の場合は、梁フランジ部にせん断遅れ現象が発生する。しかし、(2)に定める部分にコンクリートを充填した場合、この現象は、ほとんど発生しないことが実験により明らかにされている⁴⁾。したがって、充填コンクリート硬化後は、(1)に示すように、せん断遅れ現象を考慮しなくてよいものとした。

なお、コンクリートの充填部の境界近傍における鋼部材には、応力の乱れが生じる。そこで、この区域の補剛材の配置、および部材断面の変更などには、十分な配慮が必要である。

6. 5 柱基部

柱基部では、合成柱に作用する軸方向力、曲げモーメント、および、せん断力を確実に基礎構造に伝達できる構造を採用しなければならない。

【解説】 一般に、合成柱をコンクリート基礎構造に定着する場合は、解説図 6.1 に示すような構造が用いられている。この場合は、充填コンクリートの拘束効果により、柱基部のせん断遅れ現象が防止されることが実験により確かめられている⁴⁾。したがって、柱基部の合成柱内部の縦リブなどは、特別な補強を必要とせず、通常的设计法により決められた断面をそのまま延長した構造にしてよい。また、ベースプレートには、端部拘束効果が低下するような大きな開口部を設けてはならない。なお、最近では、解説図 6.1 のアンカーフレームを省略し、節突起を有する太径異形棒鋼を用い、アンカーボルトを直接フーチング内に定着する構造も提案されている⁵⁾。



解説 図 6.1 柱基部の構造例

6. 6 ダイヤフラム

(1) 端ダイヤフラム

合成柱のコンクリート充填部分の両端部には、強固な端ダイヤフラムを設けるものとする。

(2) 接合部のダイヤフラム

合成柱の梁－柱接合部の梁フランジ面には、梁フランジと同等、あるいは、それ以上の剛性を有する接合部のダイヤフラムを設置しなければならない。

(3) 中間ダイヤフラム

端ダイヤフラム、または接合部のダイヤフラム間の中間部には、必要に応じて中間ダイヤフラムを設けるものとする。

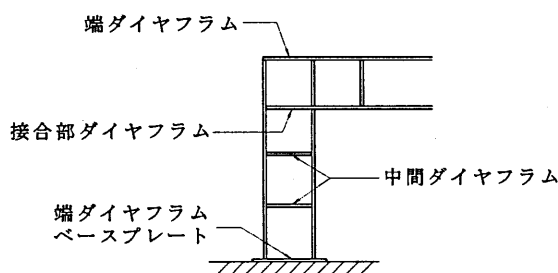


図6.2 ダイヤフラムの配置

【解説】(1)について

本指針では、鋼とコンクリートとの合成方法として端部拘束方式を採用している。そのため、終局荷重時においても、充填コンクリートの抜け出しが防止されていなければならない。充填コンクリートの両端部に強固なダイヤフラムを設けることとした。端ダイヤフラムの剛度と、鋼とコンクリートとの合成効果に関する研究例は、極めて少なく、不明確な点も多い。そこで、合成柱を橋脚柱として使用する場合には、経験的に、柱上端のダイヤフラムに対して梁隅角部のフランジ厚程度の板厚を、また柱下端のダイヤフラムに対して、ベースプレート厚程度の板厚を使用してよい。

(2)について

梁－柱接合部においては、梁に作用する曲げモーメントを確実に柱に伝達しなければならない。そのため、梁フランジの背面には、梁フランジと同等、あるいは、それ以上の剛性を有するダイヤフラムを設置することとした。

(3)について

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、および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、合成柱の端ダイヤフラム間には、必要に応じて中間ダイヤフラムを設けることとした。したがって、中間ダイヤフラムの設計は、充填コンクリート硬化前の荷重に対し、鋼部材とみなして土木学会・鋼構造物設計指針に基づいて行うこととした。また、中間ダイヤフラムの形状は、充填コンクリート打設の際コンクリートが合成柱部材の隅々まで行きわたるように、孔を多数あけた構造としなければならない。

6. 7 ずれ止め

梁-柱結合部や柱基部には、適切な間隔でずれ止めを設けるのがよい。

【解説】 本指針における鋼とコンクリートとの合成方法としては、柱両端に強固なダイヤフラムを配置した端部拘束方式を採用している。そのため、一般に、ずれ止めは、不要と考えられる。しかし、特に大きなせん断力が作用し、応力の伝達機構が複雑となる梁-柱結合部や柱の基部には、ずれ止めを設けるのがよい。この場合は、道路橋示方書・同解説 II. 鋼橋編³⁾の 9.5.4 の規定に準じ、ずれ止めを 60cm 以下の間隔で配置するのがよい。

6. 8 現場継手

柱の現場継手は、現場溶接によって接合することを原則とする。

【解説】 合成柱の現場継手を高力ボルト継手とした場合、ボルトの取替が不可能であること、また防錆面で弱点となりやすいことから、ここでは、現場溶接によることを原則とした。

6. 9 合成柱の角溶接

箱断面を有する合成柱におけるフランジと腹板との角部の溶接は、十分な溶込みを確保できるような構造としなければならない。

【解説】 角形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、あるいは部分溶込み溶接とすると、この部分が弱点となりやすい。そのため、ここでは、上記規定を設けることとした。

参考文献

- 1) Deutsche Norm DIN 18806, Teil 1 : Verbundkonstruktionen Verbundstützen, März 1984.
- 2) BSI : BS 5400 Steel, concrete and composite bridges Part 5. Code of practice for design of composite bridges, 1979.
- 3) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説, II 鋼橋編, 1994 年 2 月.
- 4) 中井 博, 吉川 紀 : コンクリートを充填した鋼製橋脚の耐荷力に関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 344 / I - 1, pp.195 ~ 204, 1984 年 4 月.
- 5) 前野裕文, 後藤芳顕, 小畑 誠, 松浦 聖, 小林洋一 : 鋼製橋脚の新しい定着方法について, 第 2 回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, pp.403 ~ 410, 1989 年 9 月.

第7章 施 工

7. 1 鋼部材の製作精度

鋼部材の製作精度は、道路橋示方書・同解説Ⅱ．鋼橋編の15.3.4によるものとする。

【解説】 合成柱の全体座屈挙動や、その構成材の局部座屈挙動は、充填コンクリートの拘束効果により鋼柱と異なり、座屈強度も向上することが知られている。このため、鋼部材の製作精度を、緩和することも考えられる。しかし、ここでは、道路橋示方書¹⁾の規定をそのまま適用することとした。

7. 2 鋼管とコンクリート接触面の処理

鋼管とコンクリートとの接触面は、プライマー塗布、または無塗装とし、充填コンクリートの打設に先立って油脂、浮き錆、および黒皮などを完全に除去しなければならない。

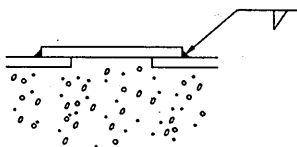
【解説】 鋼管とコンクリートとの接触面の付着強度は、鋼板の表面状態によって著しく異なる。そのため、ここでは、安定した付着強度を保持できるように、上記の規定を設けることとした。

7. 3 マンホール

- (1) 充填コンクリート打設用マンホールは、コンクリート打設後、溶接にて密閉するものとする。
- (2) マンホールの寸法は、コンクリート打設作業に支障をきたさない程度にし、できる限り小さくするものとする。

【解説】 (1)について

マンホールを溶接にて密閉する場合の密閉方法の一例を、解説図7.1に例示する。



解説 図 7.1 充填コンクリート打設用マンホール部の密閉法

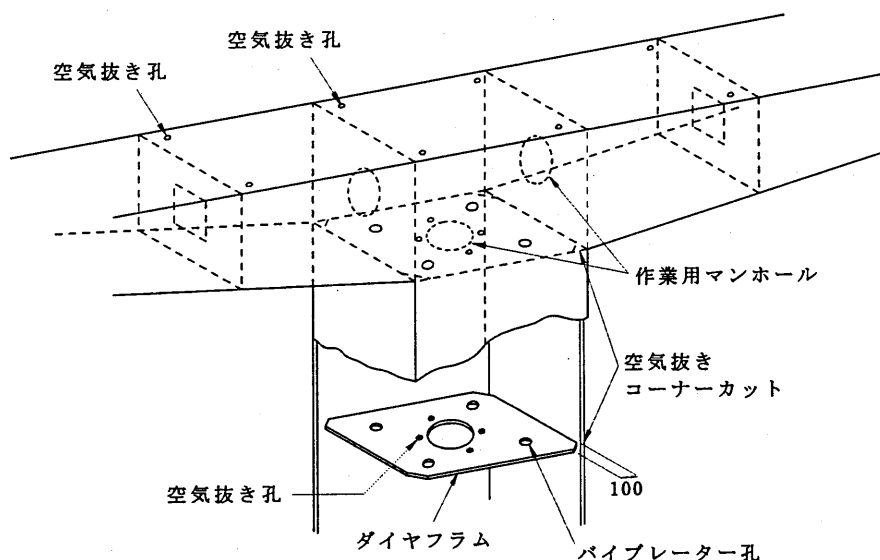
(2)について

充填コンクリート打設用マンホールの径は、一般に、 $\phi 600$ 程度としてよい。

7. 4 空気抜き孔

ダイヤフラムや横梁のフランジ部付近には、充填コンクリートのまわりを良好ならしめるように、空気抜き孔を設けるものとする。

【解説】 ダイヤフラムや横梁のフランジ付近では、充填コンクリート打設時に気泡が閉じこめられないように、空気抜き孔を設け、コンクリートが隅々まで充填されるようにしなければならない。



解説 図 7.2 充填コンクリート打設用の空気抜き孔

7. 5 充填コンクリートのスランプ

充填コンクリートのスランプは、10cm を標準とする。

【解説】 充填コンクリートのスランプ値は、施工実験によると、8cm で施工が困難であり、10cm 程度が望ましいことが確認されているので、その値を用いることとした²⁾。

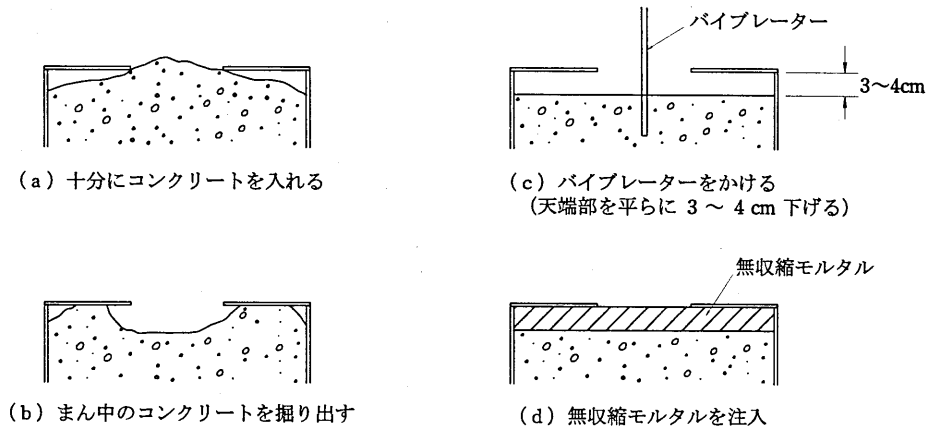
7. 6 充填コンクリートの打設方法

充填コンクリートの打設作業は、骨材とセメントペーストとの分離が生じないように、トレミー管、あるいはパイプを使用し、パイプレータなどで十分に振動を与えながら、柱下端から上方に向かって徐々に打設しなければならない。

7. 7 充填コンクリートの締め固め

鋼板と充填コンクリートとの間には、肌すきを生じないように、充填コンクリートを十分に締め固めなければならない。また、柱上端部には、コンクリート硬化後に無収縮モルタルを注入するものとする。

【解説】 充填コンクリートを隅々まで行きわたらせ、付着強度をできるだけ高めるためには、充填コンクリートを十分に締め固める必要がある。また、合成柱天端のマンホール付近には肌すきが生じやすいので、マンホール内には、溶接にて密閉する前に無収縮モルタルを注入することとした。



解説 図 7.3 合成柱天端の無収縮モルタルの注入方法の一例

なお、高流動コンクリートを使用する場合は、使用コンクリートのフレッシュ性状を十分把握した上で適切な施工方法を採用しなければならない。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II．鋼橋編，pp.390～pp.397，1994年2月．
- 2) 阪神高速道路公団，(財)建設工学研究所：コンクリートを充填した鋼製橋脚の施工法等に関する理論的・実験的研究，1985年10月．