

# PC 箱桁定着部破壊解析委員会報告 (その 2)

## — 定着部に付与すべき安全性と設計ガイドライン (試案) —

田辺 忠顕\*1・内田 裕市\*2

### 1. はじめに

前報<sup>1)</sup>では、定着突起の耐力が非線形 FEM によって、解析的に求めるということを報告した。そこで、非線形 FEM 解析を柱とする突起定着部の限界状態設計ガイドラインの試案を考えることにしたが、ガイドラインの骨格を形成するに際していくつかの統一すべき設計理念の検討課題が上がってきた。たとえば、設計の方法は限界状態設計法で行えるか否か、限界状態設計法で行う場合には部分安全係数を用いたレベル 1 の信頼性設計になろうか、部分安全係数を決定しうるであろうか、等である。本報告ではこれらの課題に対する委員会の見解を述べ、とくに確率計算による部分安全係数の概略値の検討結果を詳しく述べる。

最終的に、前報と今回の検討結果に基づいて、設計ガイドラインの試案を提案し、その試案に基づいた見延橋の定着部設計の数値的な検討を行った。なお、このガイドラインはあくまで試案であって、今後さらなる検討を経て完成されるべきものであり、今回はそのための 1 ステップにすぎないことをご理解いただきたい。

### 2. 定着部設計のための設計フォーマット

定着部の設計を行うにあたり、新たな課題としていくつかの点について考え方を統一しなければならないことが明らかになってきた。それらの、課題を重要度順に列記すると以下のようなものである。

(I) 従来は許容応力度法による設計（厳密な意味ではそうではなく、前報でも述べたようにもっと曖昧である）が踏襲されてきたが、限界状態設計法で行えるか否か。この場合に安全係数のとり方、あるいは決め方はどうあるべきか。

(II) FEM による非線形解析だけで定着部耐力を決めてしまっても良いか。コンクリート構造物（無筋、有筋を含めて）の破壊耐力を FEM で求めた場合の数値の保証をいかにして行うか。

(III) 定着部の破壊は局所的な破壊であるが、桁の中間に配置される定着部などでは全体的な桁の破壊と連成している。したがってこのような部位の定着部の破壊は、桁の曲げ破壊、あるいはせん断破壊と連成して解析されなくてはならない。これをいかに解決するか。

(IV) PC 定着部の設計荷重の特性値として何を考えるべきか。

(V) 定着部の破壊パターンは少なくとも 3 種類あるが、安全率は同じで良いか。

これらの課題に対する委員会としての考えが設計ガイドライン（試案）には反映されているのであるが、(I) は大きな問題なので詳しく述べる必要上、最後に述べることにする。

まず、(II) について、コンクリート構造物の非線形解析は、一般に誰がどのようにやっても同じ答えが出てくるわけでは決してない。応力場によって異なりうるが、それぞれの場合に使用するコンクリートのモデル、具体的には着目する方向への側圧（圧縮あるいは引張の両作用）の影響、圧縮軟化特性、破壊エネルギーと関係づけられる引張軟化モデル、鉄筋の付着と関係づけられる引張剛性モデル、ひび割れ面におけるせん断伝達モデル等の選択によって答えが大幅に異なる可能性は大きい。したがって、これらのパラメータの選択が適切に行われなければならないのである。これらに関しては、とりあえず規定が現行の土木学会のコンクリート標準示方書（以下、コンクリート標準示方書と呼ぶ）に存在する特性については、それらをそのまま採用することにした。たとえば、コンクリート標準示方書で採用している軟化肢を持たない 1 軸場の圧縮応力-ひずみ曲線をガイドライン（試案）でも採用したのは、暗黙に直交異方性型の構成則を推奨した形になっているが、これは試算の過程において収斂性の問題から実際に大自由度解析の使用に耐えうるのはとりあえずこの種の構成則であろうとの判断に基づいている。また、軟化肢を持たせないことは、収斂性が悪くなることを回避するためのほか、軟化肢の定義方法についても研究は存在するもののもう少し検討を行ったあとの採用が望ましいとの判断によっている。軟化肢を持たない構成則を使用するとコンクリートは破壊しないことになるから計算上はいつまでも耐荷力を保持している結果が得られる。その矛盾を解消するために本ガイドライン（試案）では、FEM 解析を行ってひずみが既定値になったところで耐力を定義することにした。

コンクリート標準示方書に載っていない特性値については、ガイドライン（試案）の中でも記述していない。これは意識的に避けたということもあるが、真意は、非線形解析は経験を十分に積んだ熟練した技術者が実施するのであって、誰でも良いわけではないということを前提に、どのようなモデルを使用するかはその技術者の判断によると考えたからである。いずれにしても、計算結果はこれらのモ

\*1 Tada-aki TANABE : 名古屋大学 名誉教授

\*2 Yuichi UCHIDA : 岐阜大学工学部 社会基盤工学科

デルの選択によって答えが変動するのはやむを得ない。このほかにも、メッシュサイズの大小による答えの変動がある。これらの計算結果の変動をできるだけ小さくし、設計に使用可能な答えをいかにして保証するかが大きな課題であった。そこでガイドライン（試案）では、次の3つの方法で対処することにした。

① 付録に載せてある解析例を解析してみる。そして結果が付録に載せてある解析結果とほぼ同一の結果を与えることを確かめて、使用する予定の計算モデルの妥当性を判断する。

② FEM 解析のほかにマクロモデルによる耐力計算を行い、FEM 解析の結果と比較する。両者に大きな差があるときには、その理由を考えて FEM の計算モデルあるいはマクロモデルの回転軸の位置あるいは境界条件の修正を考える。

③ 計算の不確定さは、部分安全係数で考慮する。

これでもまだ不十分である可能性があるが、ガイドラインそのもののさらなる改善を待ちたいと考えている。

(Ⅲ) については、委員会報告書のガイドライン（試案）「7.2 解析モデル」において破壊パターンごとに解析領域が異なり、全体破壊が生じる場合には、構造体を一部取り出すと同時にその部分以外を梁要素などで置き換えた全体系の解析の中で局所的な定着部の耐力を解析するように考えた。この具体的な手法の一例が委員会報告書の「2.4 全体系の解析」に述べてある。その概略は、定着部が破壊するときには桁自体もすでに破壊状態に近く、その状態での定着部耐力でなければならないことに対応している。構造体が終局状態に至っている状態としていくつかの断面が曲げ終局状態に至ってメカニズムが成り立つ状態を想定し、当該定着部を含む近接するヒンジ区間を取り出して、ヒンジでの終局モーメント時の変形状態を境界条件として定着部の耐力を求めるものとしている。

(Ⅳ) については、考えるべき荷重はプレストレス鋼材の張力であるが、プレストレスとして導入される緊張力はきわめて良く制御された荷重であって、変動はごく少ないことが明らかになっている。また、桁が破壊状態になり鋼材位置の変形から鋼材の伸張があり得るが、それによる張力の増分は使用時の緊張力のたかだか 15% 程度であることが判明している。このようなことから、荷重の特性値としては、ケーブル緊張時の緊張力とすることにした。張力の最大値は、プレストレス鋼材の破断強度であるのは明らかなので、設計用値としてこの破断強度を用いることにした。

(Ⅴ) については、すべて区別を設けず同じ部分安全係数を用いることにした

### 3. 桁定着部の安全性の付与に対する考え方

この項では、前節の課題（Ⅰ）に対する委員会としての考えを述べることにする。

現在、構造物の設計においては限界状態設計法のレベル 1 の部分安全係数による設計法を採用するのが世界的な流れである。コンクリート標準示方書もこれを採用していることから、定着部の設計についても同様な枠組での設計を

目指すのが当初からの目標であったが、そのためには部分安全係数の設定ができなければならず、学問的にそれが可能かどうかは課題であった。委員会で検討を行っている中で、もっとも簡単な確率モデルとする仮定を設けることによって、どうか可能となる成果が得られたのでとりあえずその成果を公表することにした。しかし、もっとも簡単な確率モデル、すなわち正規分布を仮定することによる誤差も含まれることは明らかであり、今後も検討課題であることは間違いない。

#### 3.1 棒部材のせん断破壊に対する安全性

まず最初に、突起定着部にどの程度の安全性を付与すべきかについて議論を行った。委員会では、一般の RC 梁のせん断設計に用いられている安全性と同程度を目標とするべきであろうとの意見があったが、それ以上の議論は生じなかった。というのも、コンクリート標準示方書では RC 構造の安全性は部分安全係数によって確保されているものの、それがどの程度の安全確率になっているか定かではなかったこともあって、議論の深まりようがなかったのである。いずれにしても、目標として、一般の RC 梁のせん断設計に用いられている安全性と同程度ということにして、確率計算を行い、どの程度の破壊確率を採用していることになっているか判断することにした。そのうえで、RC 梁のせん断破壊の確率と同程度の破壊確率を定着部に見込めるように部分安全係数を算出することにした。

以下に検討過程における考え方を述べるが、かなり大胆な仮定を計算の単純化のために行っている。したがって、今後手直しや、理論の修正もあり得るであろう。その場合には、直ちに規定を変更しうるように、計算の手順などがはっきりわかるように記録しておくことにした。

#### 3.2 破壊確率の計算方法

現行のコンクリート標準示方書における棒部材のせん断破壊に対する安全性は、部分安全係数によって担保されているが、それがどの程度であるのか、簡単な確率計算によって概算してみる。

コンクリート標準示方書では、せん断耐力は次式で表されるとしている。

$$V_y = V_c + V_s \quad (1)$$

ここで、 $V_c$  はコンクリートの受けもつせん断力、 $V_s$  は腹鉄筋の受けもつせん断力である。

$V_c$  および  $V_s$  を算出するのに主たる変数としてコンクリートの圧縮強度、鉄筋の降伏点強度がある。これらの変数以外は確定値であるとして、コンクリートの圧縮強度と鉄筋の降伏点強度のみを確率変数として確率分布を仮定する。これらに正規分布を仮定すると、

$$V_c = 0.20 \beta_d \beta_p \beta_n^3 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (2)$$

で表される  $V_c$  はもはや正規分布ではない特殊な確率分布になるがその場合であっても  $\sqrt{f'_c}$  は、圧縮強度の単調増加関数であることから設計用値以下となる超過確率は、正規分布をなすコンクリートの圧縮強度が設計用値以下になる超過確率に等しい。そこで、 $V_c$  が (2) 式において  $f'_c = f'_{c0}$  とした値以下となる確率が 5% で、 $f'_c = f'_{c50}$  とした値以下となる確率が 50% となるように正規分布で近似する。ここで、

$f'_{ck}$  は、コンクリートの圧縮強度の特性値であり、 $f'_{c0}$  はコンクリート圧縮強度の期待値である。

一般にある確率分布を正規分布で近似するもっとも簡単な方法は、正規分布のパラメータが期待値と分散あるいは標準偏差の2個であることから、任意の2点で正規分布の累積確率積分値と一致させて、その近似化された正規分布の期待値と標準偏差を求めればよい。いまの場合その2点として、超過確率が5%の点と50%の点の2点を選んだことになっている。

一例として、桁有効高 ( $d$ ) が 100 cm、幅が 30 cm の梁の  $V_c$  を  $\beta_d = 1.0$ ,  $\beta_n = 1.0$ ,  $\beta_d = 1.0$ , の場合について、コンクリートの圧縮強度 30 MPa、標準偏差 6 MPa として、実際の分布と正規分布で上のように近似した場合を図 - 1 に示す。

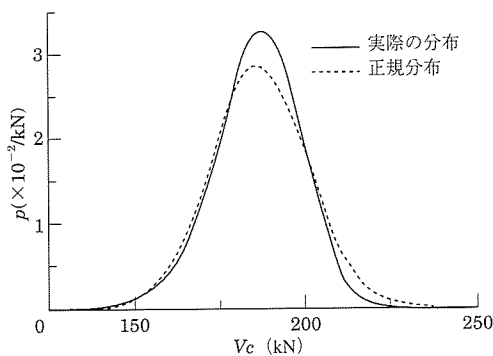


図 - 1  $V_c$  の分布

一方、せん断補強筋による分担分  $V_s$  は

$$V_s = A_w f_{wy} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) / s \quad (3)$$

であり、 $f_{wy}$  に正規分布を仮定すれば、 $V_s$  も正規分布をなす。したがってそれらと  $V_y = V_c + V_s$  のも正規分布をなすことになる。

一方、断面力側 ( $S$ ) についても正規分布を仮定すると、安全指標であるところの (耐荷力 - 断面力) で表される (4) 式の  $I$  も正規分布をなす。

$$I = V_y - S \quad (4)$$

ここで、せん断耐力側の標準偏差を  $\sigma_R$ 、荷重側の標準偏差を  $\sigma_S$  とすると、 $I$  の標準偏差は、 $\sigma_{R,S} = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$  となり、 $R$  の確率密度関数は次式で与えられる。

$$p = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \frac{\{(V_y - S) - (V_{y0} - S_0)\}^2}{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \right] \quad (5)$$

せん断破壊の確率は、Probability ( $V_y - S < 0$ ) であるから、(5) 式の積分関数である正規分布関数  $P(V_y - S)$  において、

$$\text{Probability} (V_y - S < 0) = P \left( -\frac{1}{2} \frac{(V_{y0} - S_0)^2}{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \right) \quad (6)$$

となる。(6) 式は、 $Z = \{(V_y - S) - \mu\} / \sigma$  と置き換えた標準正規分布の  $Z = \mu / \sigma$  の値であるから、これは一般に与えられている数表から求められることになる。すなわち、せん断破壊の確率は、 $\mu = V_{y0} - S_0$  と、 $\sigma = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$  を求めれば数表から計算できる。ここで、 $V_{y0}$  は、せん断耐力

の期待値、すなわちコンクリートの圧縮強度の期待値、ならびに鉄筋の降伏点強度の期待値を用いて、(2), (3) 式からコンクリートおよび鉄筋が分担するせん断耐力を計算し、その和を取ったものである。一方、 $S_0$  は断面力の期待値である。

### 3.3 部分安全係数と破壊確率との関係

$\mu = V_{y0} - S_0$  の値がコンクリート標準示方書で規定する部分安全係数から計算できるが、まず、 $V_{cd}$  と  $V_{c0}$  との関係述べる。 $V_{c0}$  は (2) 式において  $f'_c$  に、正規分布をなす圧縮強度の期待値  $f'_{c0}$  を代入したもので近似した。 $V_{cd}$  はせん断耐力のコンクリートが受けもつ分の設計用値であるが、(2) 式の  $f'_c$  に、 $f'_{cd}$  すなわち圧縮強度の設計用値を代入することによって得られる。ここで、コンクリート標準示方書は、コンクリートの圧縮強度が正規分布をなすとして超過確率が5%の特性値を以下のように規定している。

$$f'_{ck} = f'_{c0} - 1.64 \sigma_{fc} \quad (7)$$

さらに、材料係数  $\gamma_c$  で割って

$$f'_{cd} = \frac{1}{\gamma_c} f'_{ck} = \frac{1}{\gamma_c} (f'_{c0} - 1.64 \sigma_{fc}) \quad (8)$$

先にも述べたように、 $V_c$  が  $V_{cd}$  以下となる確率は、 $V_c$  に正規分布を仮定し標準偏差を  $\sigma_{vc}$  とする場合には、(7), (8) 式を用いて、同じ  $\gamma_c$  を用いて同形式で次のように設定できる。すなわち、コンクリートの分担分に対する部材係数を  $\gamma_{bc}$  とすれば、

$$V_{cd} = V_{c0} - 1.64 \sigma_{vc} \quad (9)$$

$$V_{cd} = \frac{1}{\gamma_{bc} \gamma_c} V_{ck} = \frac{1}{\gamma_{bc} \gamma_c} (V_{c0} - 1.64 \sigma_{vc}) \quad (10)$$

さて、腹鉄筋の受けもつせん断耐力成分  $V_s$  については、 $V_s$  が鉄筋の降伏点強度  $f_{wy}$  の一次関数であるから正しく正規分布をなし、 $V_{s0}$  と  $V_{sd}$  との関係は、鉄筋の材料係数を  $\gamma_s$ 、部材係数を  $\gamma_{bs}$  として

$$V_{sk} = V_{s0} - 1.64 \sigma_{vs} \quad (11)$$

$$V_{sd} = \frac{1}{\gamma_{bs} \gamma_s} V_{sk} = \frac{1}{\gamma_{bs} \gamma_s} (V_{s0} - 1.64 \sigma_{vs}) \quad (12)$$

ただし、 $V_{s0} = A_w f_{wy0} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) / s$  で  $f_{wy0}$  は、降伏点強度の期待値である。

棒部材のせん断耐力  $R$  は、

$$R = V_c + V_s \quad (13)$$

であり、 $V_c$ ,  $V_s$  はそれぞれ正規分布をなすから、 $R$  も正規分布をなす。その期待値は、 $R_0 = V_{c0} + V_{s0}$  で標準偏差  $\sigma_R = \sqrt{\sigma_{vc}^2 + \sigma_{vs}^2}$  である。したがって、設計用値  $R_d$  は、

$$R_d = V_{cd} + V_{sd} \quad (14)$$

(14) 式に (10), (12) 式を代入すると

$$R_0 - R_d = V_{c0} + V_{s0} - \frac{1}{\gamma_{bc} \gamma_c} (V_{c0} - 1.64 \sigma_{vc}) - \frac{1}{\gamma_{bs} \gamma_s} (V_{s0} - 1.64 \sigma_{vs}) \quad (15)$$

となる。

一方、荷重に対しては、コンクリート標準示方書ではは特定のものを仮定せず、最大荷重分布の期待値を特性値とすることを定めている。この特性値に荷重係数  $\gamma_f$  を乗じて、設計用値とする。すなわち、

$$F_d = \gamma_f F_k = \gamma_f F_0 \quad (16)$$

さらに、部材に作用する断面力  $S$  については、

$$S_d = \gamma_a S (F_d) \quad (17)$$

ここで、 $\gamma_a$  は構造解析係数である。

コンクリート標準示方書における安全性の照査は、

$$R_d / S_d > \gamma_i \quad (18)$$

を確かめることであり、 $\gamma_i$  は構造物係数である。

荷重についても正規分布を仮定し荷重とせん断力が線形関係にあるとすると、断面のせん断力の期待値の  $S_0$  と設計用値  $S_d$  との関係は、

$$S_d = \gamma_a \gamma_f S_k = \gamma_a \gamma_f S_0 \quad (19)$$

したがって、

$$S_0 = \frac{1}{\gamma_a \gamma_f} S_d = \frac{1}{\gamma_a \gamma_f \gamma_i} R_d \quad (20)$$

結局 (15), (17), (19) 式を用いて (図 - 2 参照)、

$$\begin{aligned} R_0 - S_0 &= V_{c0} \left(1.0 - \frac{1}{\gamma_{bc} \gamma_c}\right) + V_{s0} \left(1.0 - \frac{1}{\gamma_{bs} \gamma_s}\right) \\ &+ \frac{1}{\gamma_{bc} \gamma_c} 1.64 \sigma_{vc} + \frac{1}{\gamma_{bs} \gamma_s} 1.64 \sigma_{vs} + \left(1.0 - \frac{1}{\gamma_i}\right) \\ &\left\{ \frac{1}{\gamma_{bc} \gamma_c} (V_{c0} - 1.64 \sigma_{vc}) + \frac{1}{\gamma_{bs} \gamma_s} (V_{s0} - 1.64 \sigma_{vs}) \right\} \\ &+ \left(1.0 - \frac{1}{\gamma_a \gamma_f}\right) \frac{1}{\gamma_f \gamma_i} \left\{ V_{c0} \left(1.0 - \frac{1}{\gamma_{bc} \gamma_c}\right) + V_{s0} \left(1.0 - \frac{1}{\gamma_{bs} \gamma_s}\right) \right. \\ &\left. + \frac{1}{\gamma_{bc} \gamma_c} 1.64 \sigma_{vc} + \frac{1}{\gamma_{bs} \gamma_s} 1.64 \sigma_{vs} \right\} \quad (21) \end{aligned}$$

さて、(6) 式中の  $\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}$  は、

$$\begin{aligned} \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} &= \sqrt{\sigma_{vc}^2 + \sigma_{vs}^2 + \sigma_s^2} \quad (22) \\ &= \sigma_{vc} \sqrt{1.0 + \left(\frac{\sigma_{vs}}{\sigma_{vc}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_{vc}}\right)^2} \end{aligned}$$

となり、コンクリートの受けもつせん断耐力の標準偏差で、鉄筋の受けもつせん断耐力の標準偏差、および荷重の標準偏差を割った比率で表されている。

(21) 式を (22) 式で割れば (6) 式の標準正規分布の  $Z = \mu / \sigma$  の値が得られる。

$$Z = \frac{\mu}{\sigma} = \frac{R_0 - S_0}{\sigma_{vc} \sqrt{1.0 + \left(\frac{\sigma_{vs}}{\sigma_{vc}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_{vc}}\right)^2}} \quad (23)$$

ここで、概算であるので次のような標準状態を考える。

- ・  $V_c$  の変動係数：0.15
- ・  $V_s$  の変動係数：0.03
- ・ せん断耐力の比率： $V_{s0}/V_{c0} = 1.0 \sim 5.0$
- ・  $V_c$  と  $V_s$  の標準偏差の比率  $\sigma_{vs} / \sigma_{vc}$  はそれぞれの変動係数で表すことができる
- ・ 荷重と  $V_c$  標準偏差の比率  $\sigma_s / \sigma_{vc}$  については、荷重のばらつきがよく分からないが、耐力の標準偏差の1倍～2倍程度と考えて次のように仮定する。

$$\sigma_s = 1.0 \sqrt{\sigma_{vc}^2 + \sigma_{vs}^2} \sim 2.0 \sqrt{\sigma_{vc}^2 + \sigma_{vs}^2} \quad (24)$$

### 3.4 棒部材のせん断破壊の確率

さて、(23) 式に上で述べた標準的な数値をいれて、破壊確率を計算してみる。

部分安全係数がもっとも小さい場合と大きい場合でそれぞれ破壊確率を計算してみると表 - 1 のようになる。

表 - 1 破壊確率の計算結果

安全係数	$\frac{V_{s0}}{V_{c0}}$	$\frac{\sigma_s}{\sqrt{\sigma_{vc}^2 + \sigma_{vs}^2}}$	$Z = \frac{\mu}{\sigma}$	破壊確率
小*	1.0	1.0	3.21	$1.0 \times 10^{-3}$
	1.0	2.0	2.04	$2.0 \times 10^{-2}$
	5.0	1.0	4.43	$5.0 \times 10^{-6}$
	5.0	2.0	2.59	$6.0 \times 10^{-3}$
大**	1.0	1.0	4.64	$3.0 \times 10^{-6}$
	1.0	2.0	2.96	$2.0 \times 10^{-3}$
	5.0	1.0	7.30	$< 1.0 \times 10^{-11}$
	5.0	2.0	4.16	$3.0 \times 10^{-6}$

\*  $\gamma_c = 1.3, \gamma_s = 1.0, \gamma_{bc} = 1.3, \gamma_{bs} = 1.1, \gamma_f = 1.0, \gamma_a = 1.0, \gamma_i = 1.0$

\*\*  $\gamma_c = 1.3, \gamma_s = 1.0, \gamma_{bc} = 1.3, \gamma_{bs} = 1.1, \gamma_f = 1.2, \gamma_a = 1.0, \gamma_i = 1.2$

これらの結果によれば、破壊の確率は設計条件によって大きく変化すること、とくに荷重のばらつきが大きいと破

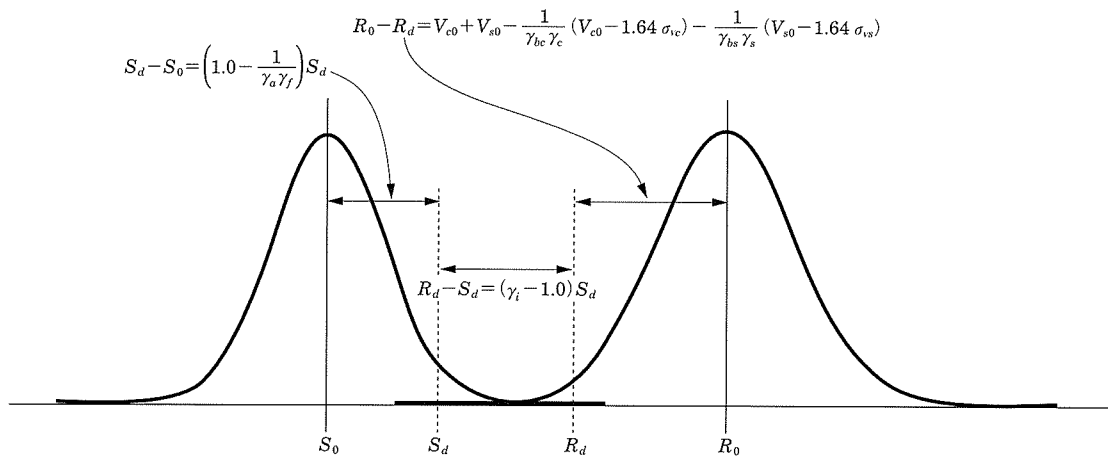


図 - 2 断面力および耐力の正規確率分布と破壊の確率

壊確率が2桁ぐらい簡単に下がること、またせん断耐力の分担が鉄筋に比重がある場合にはやはり2桁程度の破壊確率の低減が見られることがわかる。考えてみればこれは当然なことであって、実際の状況は上の場合とは多少異なる。実際の状況では荷重のばらつきは実情から決定できるし、断面設計が決まれば、せん断耐力の分担も決まるわけだから、破壊の確率は決まってくることになり、上記のばらつきを大きく減じることになる。

いずれにしても、今回はせん断耐力の平均的な破壊確率を求めたい。そこで、これらの結果から、棒部材の平均的な破壊確率として、実際の状況を勘案して、

せん断分担率： $V_{sd}/V_{ed} = 2.0$  程度

荷重のばらつき：耐荷力側の1.5倍程度、すなわち

$$\sigma_s = 1.5 \sqrt{\sigma_{vc}^2 + \sigma_{vs}^2}$$

部分安全係数：大きい値を採用する、すなわち

$$\gamma_c = 1.3, \gamma_s = 1.0, \gamma_{bc} = 1.3, \gamma_{bs} = 1.1,$$

$$\gamma_f = 1.2, \gamma_a = 1.0, \gamma_i = 1.2$$

として、棒部材のせん断破壊の平均的な破壊確率を求めたところ、 $Z = \mu/\sigma = 4.43$ 、破壊の確率  $7 \times 10^{-6}$  が得られた。

### 3.5 定着部性能照査設計における部分安全係数の設定

定着部設計において、付与すべき破壊の確率は棒部材のせん断設計の場合とほぼ同程度か多少安全側の破壊確率ということから、 $10^{-5}$ ないし  $10^{-6}$ の値を付与せねばならないことが明らかになった。これに見合う、耐力側の期待値  $R_0$  と荷重の期待値  $S_0$  の相互関係を部分安全係数によって与えなければならない。

まず、耐力側の期待値  $R_0$  であるが、これは、コンクリートの強度と鉄筋の強度にそれぞれの期待値を用いた非線形解析によって得られる最大耐力と考える。耐力  $R$  ならびに荷重  $S$  が、正規分布をなすと仮定できるとして、

$$R_0 - S_0 = 4.5\sigma_{R-S} \quad (25)$$

が成り立つような部分安全係数の設定を考えることになる。 $4.5\sigma_{R-S}$  は、破壊の確率を  $10^{-6}$  程度としたときの、正規分布の期待値と標準偏差との関係である。 $\sigma_{R-S}$  は変数  $(R - S)$  の標準偏差である。

$4.5\sigma_{R-S}$  を荷重係数、材料係数、部材係数、構造物係数などで取することを考える。当然のことながら、 $\sigma_{R-S}$  の中身は、荷重のばらつきによる寄与分、材料のばらつきによる寄与分、計算のばらつきによる寄与分（ここでは部材係数に相当する）等によっているから、 $4.5\sigma_{R-S}$  の内訳、すなわち部分安全係数の割り当ては、その  $\sigma_{R-S}$  への寄与分の比率で分担するのが合理的かも知れない。しかし、その寄与率がはっきりわからないので、ここでは、以下のように決定することにした。

PC定着部における荷重  $S$  としては、一般の外荷重ではなくてPCケーブルの荷重であるので、破断強度以上にはなり得ないし、破断強度のばらつきも耐力のばらつきに比べてわずかであることが試験結果からわかっている（変動係数で3%弱）。そこで、

$$\sigma_{R-S} = \sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2} \cong \sigma_R \quad (26)$$

と考えると良い。したがって、

$$R_0 - S_0 = 4.5\sigma_R \quad (27)$$

とにおいて、 $4.5\sigma_R$  の内、 $1.5\sigma_R$  を材料の特性値と期待値との距離、あるいは材料係数でとるように割り当てる。残りの  $3.0\sigma_R$  は、他の部分係数で取ることにする。すなわち、 $R_0$  から  $1.5\sigma_R$  だけ減少した点を従来の強度に関するアナロジーによって耐力の特性値とする。（コンクリート標準示方書にはこのような用語はないが）

$$R_k = R_0 - 1.5\sigma_R \quad (28)$$

いま、耐力側の変動係数を15%と仮定した場合についてのどのような部分安全係数が導かれるか例示的に示すことに確率分布する。

$$\sigma_R/R_0 = 0.15 \quad (29)$$

まず、耐力側設計用値を、これもアナロジー的に、 $R_k$  から、 $1.64\sigma_R$  だけ減少した点と定義し、そこまでを部材係数で低減させる。すなわち、(28)、(29)式を使って

$$R_d = R_k - 1.64\sigma_R = 0.687R_k = \frac{1}{1.46}R_k \quad (30)$$

これは、部材係数が1.46となることを示している。このとき、

$$R_d = 3.53\sigma_R \quad (31)$$

非線形FEM解析による耐力のばらつきは内部変数によるばらつきよりも、FEMそのものの計算技術上のばらつきが大きく、これは構造解析係数の範囲に入るともいえるが、耐力側ということから、部材係数で考えることにしているのである。

荷重側の特性値としては、緊張時の応力（一般的には  $0.7\sigma_{pu}$ ）そのものとし、設計用値（一般的には破断強度  $1.0\sigma_{pu}$ ）を  $S_d$  とすると、

$$S_d = \gamma_f \cdot S_0 \quad (32)$$

であり、 $\gamma_f$  は1.43となる。

いま、(27)式の  $4.5\sigma_R$  の内  $3.14\sigma_R$  を材料のばらつきに対応する特性値と期待値の距離および部材係数でカバーしたから、残りの、 $1.36\sigma_R$  を構造物係数  $\gamma_i$  と荷重係数  $\gamma_f$  でカバーする。すなわち、

$$R_D - S_0 = 1.36\sigma_R \quad (33)$$

(27)、(29)式を用いると、

$$S_0 = 2.17\sigma_R \quad (34)$$

(32)式と(34)式から、

$$S_d = 2.17\gamma_f\sigma_R \quad (35)$$

したがって、 $\gamma_i = R_d/S_d = 1.14$  となる。いま、耐力側の変動係数  $\sigma_R/R_0 = 0.17$  と仮定すると、同様にして、 $\gamma_b = 1.60$ 、 $\gamma_i = 1.39$ 、 $\gamma_f = 1.43$  が導かれる。これらの部分安全係数は、変動係数が20%近くになると急激に大きくなる。

以上のように、正規分布を仮定して部分安全係数が求められたが、その決定方法は本来的にその部分の確率分布に基づいてはいないということで、前にも述べたように、正統的ではないし数値的な変更はいく種類でもあり得る。しかし、正規分布を仮定するがぎり、最終的な破壊確率を担保した形となっている。結局このようにして、耐力ならびに荷重に関して正規分布を仮定することによって、 $\sigma_{R-S}$  ( $\cong \sigma_R$ ) の変動が15%あるいは17%の場合について、対応する部分安全係数が求められた。

## 4. ガイドライン（試案）の構成

2. および3. 節で述べてきたことから、定着部設計ガイドライン（試案）の骨格が決まってきたのであるが、実際に提案したガイドライン（試案）は、全7章と参考資料から成り立っている。

- 1章 総則
- 2章 要求性能と照査方法
- 3章 材料の設計値
- 4章 荷重
- 5章 要求性能の照査
- 6章 構造解析
- 7章 構造細目と施工
- 参考資料 標準解析事例

詳細は、委員会報告書をご覧いただきたい。要求性能の規定や性能指標など委員会としてかなり議論して書いたところのある一方、コンクリート標準示方書の条文がそのまま入っていて、紛らわしい点も多い。たとえば、荷重係数の規定など、数値が土木学会のものがそのまま載っているが、これは定着部の設計には直接的には関係ない。また、コンクリートおよび鉄筋の材料設計用値がコンクリート標準示方書の数値がそのまま載せてあるが、特性値によるFEM非線形解析を行うことを前提にしているからとくに必要はない。また、マクロモデルについても、FEMの計算結果と比較するのであるから、材料の特性値を用いなければならない。それでは、特性値以外に材料のばらつきによる低減はどこで行っているかについては、FEM計算値（耐力の特性値）から、設計用値への低減時の部材係数の中に取り入れてしまっている形となっているのである。

## 5. ガイドラインに基づく定着部設計の妥当性の検討

最後に、実際の定着部設計を行うわけではないが、見延橋の定着部の実際の設計データがあるので、提案したガイドラインによる数値的な検討を行って、概略的に従来の設計との比較を行ってみる。

見延橋の定着部は500 tf（4900 kN）の設計緊張力、および終局時緊張力668 tf（6546 kN）に対して設計されている。（以下もとの資料にあるように重力単位で記述する）

設計ガイドライン（試案）第4章「荷重」の規定から、

$$S_0 = 500 \text{ tf}, S_d = \gamma_f \cdot S_0 = 668 \text{ tf}$$

いま、計算値の変動も含めて（非線形計算のばらつきも含めて）、変動係数（ $\sigma_R/R_0$ ）を15%と仮定したときに、設計ガイドライン（試案）第6章 6.2項の規定を参考にすれば、 $\gamma_i = 1.14$ 、 $\gamma_b = 1.46$ が与えられて、

$$R_d = \gamma_f \cdot S_d = 1.14 \times 668 \text{ tf} = 762 \text{ tf}$$

$$R_k = \gamma_b \cdot R_d = 1.46 \times 762 \text{ tf} = 1110 \text{ tf}$$

と、必要な耐力の特性値が1110 tfと計算された。実際の設計においては材料の特性値ならびに材料係数で低減した耐力の特性値がこの値であるが、コンクリート標準示方書では耐力の特性値という概念は見あたらない。ここであえ

て用いているのは、非線形計算では、材料係数と称して実際の強度よりもかなり低い強度を用いて計算するとかえって実際と合わない破壊モードとなる可能性があるので、材料の応力-ひずみ関係はできるだけ期待値に近い値を用いる一方、それに基づいて計算される耐力の特性値を新たに定義した方が実状に合うと考えたところによる。

この $R_k$ と $R_0$ の距離の仮定は単なるアナロジーに過ぎないのであるが報告書では $1.5\sigma_R$ を仮定している。この距離の取り方はいろいろあり得るであろうが、報告書ではコンクリートの特性値の決め方、鉄筋の特性値の決め方でこの程度の距離は取りうるであろうと仮定している。すなわち、非線形計算が不正確になる可能性のある材料係数による低減は考えなくても、材料の特性値と期待値との距離で最低この程度の耐力の期待値からの距離が取りうるかと仮定しているのである。

さて、このように仮定すると（28）式により、変動係数が15%の場合、

$$R_0 = R_k + 1.5\sigma_R, R_0 = 1.29R_k$$

が導けて、材料の期待値を用いて計算される耐力 $R_0$ は

$$R_0 = 1.29 \times 1110 \text{ tf} = 1430 \text{ tf}$$

となる。これらの一連の計算を変動係数17%で行うと、

$$\gamma_i = 1.39, \gamma_b = 1.60, R_0 = 1.34R_k$$

となり、

$$R_0 = 2000 \text{ tf}$$

が得られる。変動係数が2%変化しただけで、大きな違いがあることがわかる。

さて、以上の結果に対して、実際の見延橋の定着耐力は、前報でも述べたように、ほぼ、FEM計算によっても、あるいはマクロモデルによっても1500 tf～2000 tfは確保されているように見受けられる。すなわち見延橋の定着部設計はこのような考慮なしに設計したのであるが、意外に合理的であったという結果になった。しかし、従来の設計方法がいつもこのような結果になるとはかぎらないこともまた自明のように思われる。

## 6. おわりに

結局のところ、十分な検討結果というよりも時間に追われて、未検討部分があるままの設計ガイドライン（試案）の提案、部分安全係数の数値的な検討ということになってしまった。しかし、従来から問題とされていた定着部の設計を限界状態設計法で行うときにどのような骨組になるか、部分安全係数と破壊確率との関係など、もっとも基本的なところの解明ならびに設計方法開発への一つのトライアルであったことは間違いない。もし時間が許すなら将来の適切な時期にこの先の検討を行って、さらなるPC定着部設計ガイドライン（試案）の改善に取り組みたいと考えている。

## 謝 辞

委員会の構成を表-2に示したが、委員会メンバーならびに協力者から真に労苦をいとわない御貢献を頂いた。最後になったが、深甚なる謝意をここに表す次第です。ま

## ◆ 委員会報告 ◆

た、委員会活動にあたって、事務局の桑山専務理事、担当の青砥嬢から多大なご支援を頂いた。委員会を代表して厚く御礼申し上げます。

表 - 2 PC 箱桁定着部の破壊解析委員会メンバー

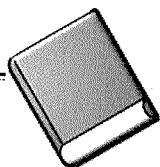
	田邊 忠顯 (名古屋大学, 委員長)
	内田 裕市 (岐阜大学, 幹事)
	伊藤 睦 (中部大学)
	大城 社司 (日本道路公団)
	高 聖彬 (JIP テクノサイエンス (株))
	金子 佳生 (東北大学)
	上迫田和人 (鹿島建設 (株))
	白谷 宏司 (大成建設 (株))
	高木康宏 (三井住友建設 (株))
	堤 忠彦 ((株) 富士ビーエス)
	中井聖棋 ((株) ビーエス三菱)
	中村 光 (名古屋大学)
	長谷川俊昭 (清水建設 (株))
	三輪健治 ((株) 計算力学研究センター)
	柳沼善明 (日本大学)
	余 国雄 (オリエンタル建設 (株))
オブザーバー	中村収志 (三井住友建設 (株))
	村上正明 (JIP テクノサイエンス (株))
協力委員	沖見芳秀 (鹿島建設 (株))
	見原理一 (JIP テクノサイエンス (株))
	吉川信二郎 ((株) 計算力学センター)
	青木圭一 (日本道路公団, 2002.10 まで)

## 参考文献

- 1) 内田, 柳沼, 田辺: PC 箱桁定着破壊解析委員会報告, プレストレストコンクリート, Vol. 47, No.1, pp.71-80, 2005
- 2) PC 箱桁定着の破壊解析委員会: PC 構造の設計における非線形解析の応用, プレストレストコンクリート技術協会, 2003
- 3) PC 箱桁定着の破壊解析委員会: PC 定着部の破壊解析に基づく性能設計, プレストレストコンクリート技術協会, 2004

【2005 年 2 月 22 日受付】

## ● 関連書籍のご案内



### PC箱桁定着部の破壊解析委員会報告書 PC定着部の破壊解析に基づく性能設計

附属資料: 特別講演 日本道路公団技術部構造技術課長 猪熊 康夫氏  
外ケーブル定着部の性能照査型設計ガイドライン (試案)  
標準解析事例

A4判・219頁 (会員価格 5,000 円・非会員価格 6,000 円)

平成16年9月3日発行

(社) プレストレストコンクリート技術協会 PC箱桁定着部の破壊解析委員会

残り10部となりましたので、現金書留にてお早めにお申し込み下さい。