

報告 RC 壁のひびわれ制御の一設計方法

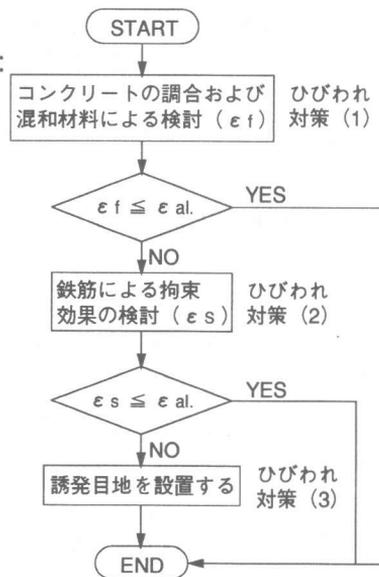
服部高重*¹・並木 哲*²・福島順一*³・宮崎直志*⁴

要旨：現場打設の鉄筋コンクリート壁を対象として、(1) コンクリートの調合による対策（混和材料の活用）、(2) 鉄筋の拘束による対策、(3) 誘発目地による対策を、定量的に評価し、これらと新たに設定したひびわれ制御収縮率とを段階的に比較することによる合理的なひびわれ制御の一設計方法を提案する。

キーワード：RC 壁、ひびわれ制御、設計法、ひびわれ制御収縮率

1. 基本方針

現場打設の鉄筋コンクリート壁に発生するひびわれの主要な原因は、コンクリートの乾燥収縮であるから、コンクリート自体の乾燥収縮率（自由収縮率： ϵ_f ）を低減できれば、ひびわれの発生を防ぐことができる。 ϵ_f が 400×10^{-6} （クレツ限界収縮率）以下であれば、コンクリートの収縮が完全に拘束されてもひびわれが発生しないとする定説 [1] があるが、一般のコンクリートの調合ではこれを満足することは殆ど不可能である（一般のコンクリートの ϵ_f は $600 \sim 800 \times 10^{-6}$ ）。しかし、高性能減水剤や収縮低減剤等の化学混和剤を使用して ϵ_f を低減したり、壁の鉄筋量を増加して鉄筋コンクリートとしての壁の見掛けの収縮率（拘束収縮率： ϵ_s ）を低減することは可能である。従来のひびわれ対策指針類 [2] では、コンクリートの調合による対策・鉄筋の拘束による対策・誘発目地による対策をそれぞれ並列に考慮していた。本ひびわれ制御設計法では、これとは異なり、図-1 に示す段階的なひびわれ対策をイメージしている。すなわち、先ずコンクリートの調合から自由収縮率（ ϵ_f ）を推定し、 ϵ_f が一定のひびわれ制御収縮率（ $\epsilon_{al.}$ ）よりも小さければ、他の対策は不要となる。このひびわれ制御収縮率をどのように設定するかが重要であるが、この点については後述する。コンクリートの調合のみでは、 ϵ_f が $\epsilon_{al.}$ 以下にならない場合、次の段階として、壁筋の拘束によってひびわれを分散させ、見掛けの拘束収縮率（ ϵ_s ）を $\epsilon_{al.}$ 以下にする。当然のことながら、 ϵ_f が大きければ拘束に必要な壁筋量が多くなり、 ϵ_f が小さければ壁筋量は少なくすむ。 ϵ_s をひびわれ制御収縮率以下にするために、壁筋量が過大となりすぎる場合は、次の段階にすすみ誘発目地を設けることになる。



ϵ_f : コンクリートの自由収縮率
 ϵ_s : 鉄筋による拘束収縮率
 $\epsilon_{al.}$: ひびわれ制御収縮率

図-1 ひびわれ制御設計のフロー

*1 大成建設（株）技術研究所，主席研究員，工博（正会員）、*2 同，研究員（正会員）

*3 大成建設（株）設計本部，室長，工修（正会員）、*4 同，技師長

このように、本ひびわれ制御設計法は鉄筋を含む現場打ちの鉄筋コンクリート壁の乾燥収縮量を定量的に評価することによって、コンクリートの調合・鉄筋の拘束・誘発目地の3種類のひびわれ対策を、それぞれ関連付けて段階的に活用する点に特徴がある。

2. ひびわれ制御収縮率の設定

一般に、鉄筋コンクリートの乾燥収縮量は、部材断面の小さい方が大きい。コンクリートの乾燥収縮の主要な原因は、セメントの水和反応に寄与しなかった余剰水（自由水、ゲル水）の蒸発によるものであるから、（表面積）/（体積）が大きいすなわち断面の小さい部材ほど、乾燥収縮量大きいことになる。図-2に、壁と梁相互の乾燥収縮のメカニズムを示す。O点は打設後の乾燥収縮の始まる原点である。A点とB点は、それぞれ壁および梁が独立に収縮した場合の移動点で、前述のように断面の小さい壁の変形量（ ϵ_w ）の方が梁の変形量（ ϵ_B ）よりも大きい。実際は壁と梁は一体に打設されるから、このように独立に変形することはなく、壁と梁が一体となった全体の移動点はA点とB点の中間のC点となる。つまり、壁はA点からC点まで引張り変形（ ϵ_{wt} ）を強制され、逆に梁はB点からC点までの圧縮変形（ $\epsilon_w - \epsilon_B - \epsilon_{wt}$ ）を強制されることになる。このことが、コンクリートの乾燥収縮によって外壁に垂直方向のひび割れの発生するメカニズムである。C点の位置は、次のように力の釣合から求めることができる。

$$\epsilon_{wt} A_w E_w = (\epsilon_w - \epsilon_B - \epsilon_{wt}) A_B E_B \quad (1)$$

ここに、 A_B ：梁の断面積（対象とした壁の上下にも壁を想定し、上下梁の平均断面積）

A_w ：壁の断面積、 E_B ：梁のヤング係数、 E_w ：壁のヤング係数

壁と梁のヤング係数を同一と仮定すれば、(1)式より、

$$\epsilon_w = \epsilon_B + (1 + A_w/A_B) \epsilon_{wt} \quad (2)$$

(2)式に、梁の最終収縮率 $\epsilon_B = 200 \times 10^{-6}$ 、コンクリートのひび割れ限界伸び能力 $\epsilon_{wt} = 150 \times 10^{-6}$ 、壁の断面積 $A_w = 5,040 \text{ cm}^2$ ($h \times t = 280 \times 18$)、梁の断面積 $A_B = 3,000 \text{ cm}^2$ ($b \times D = 40 \times 75$) と仮定して、 ϵ_w を算出すると 602×10^{-6} となる。この仮定では、壁の収縮率が概ね 600×10^{-6} を越えなければ、壁に強制される引張り変形はコンクリートのひびわれ限界伸び能力を越えないことになる。本ひびわれ制御設計法では、図-1中のひびわれ制御収縮率として、この 600×10^{-6} を安全側に 50×10^{-6} 減少させた 550×10^{-6} に設定する。なお、上記の仮定値の $\epsilon_B = 200 \times 10^{-6}$ と $\epsilon_{wt} = 150 \times 10^{-6}$ は一般的な値 [2] であり、壁と梁の断面積は日本建築学会の「RC計算規準・同解説」付録の計算例の標準断面を参考に設定したものである。

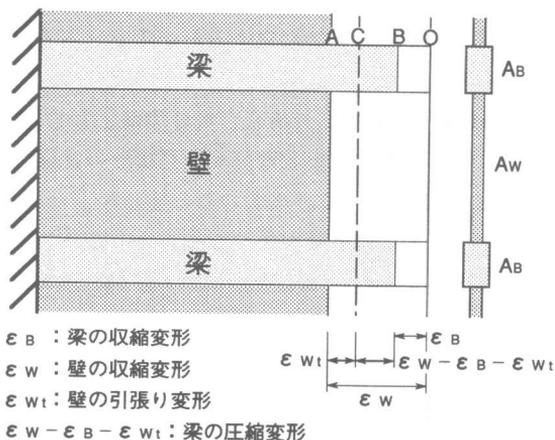


図-2 壁と梁の乾燥収縮のメカニズム

3. コンクリートの自由収縮率の推定

コンクリートの自由収縮率 (ϵ_f) は、調合・部材寸法・環境（とくに湿度）の諸条件によって異なる。これらの条件をすべて考慮した ϵ_f の推定式 [3] [4] が提案されているが、その構成は極めて複雑である。一方、JIS A 1129（モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法）では、コンクリートの供試体として $10 \times 10 \times 40$ (cm³) の角柱を用い、恒温恒湿室 (20℃・60% RH) に保存するので、部材寸法と環境の影響を除いた条件で、 ϵ_f におよぼすコンクリートの調合のみの影響を見ることができる。 ϵ_f に対する影響要因として調合のみに絞っても、コンクリートの材料（セメント・骨材・混和材料の種類）や各材料の単位量の影響が複雑に絡み合っていて ϵ_f の一義的な推定は困難であるが、ここでは敢えて最も単純な形で、普通コンクリートの ϵ_f と単位水量 (W) の関係を求める。図-3は、JASS 5 に掲載されている解説図 (JIS A 1129による普通コンクリートの材令26週における ϵ_f と W の関係、普通ポルトランドセメント使用、スランプ：4~21cm) から、 ϵ_f と W の関係を最小2乗法によって1次式に近似したものである。この近似式は、

$$\epsilon_f = (7.5W - 620) \times 10^{-6} \quad (3)$$

となり、 $\epsilon_f \leq \epsilon_{al.} = 550 \times 10^{-6}$ を満足する単位水量は $W \leq 156 \text{ kg/m}^3$ となる。通常、現場打ちのRC壁に使用されているスランプ 18 cm のコンクリートで、この単位水量を満足することは困難である。とくに、西日本では 180 kg/m^3 程度の単位水量となることが多く、この場合 (3) 式で推定される ϵ_f は 730×10^{-6} 程度となる。 180 kg/m^3 の単位水量を 156 kg/m^3 に減少させるためには、約 13% ($156/180 = 0.87$) の減水が必要となる。通常のコンクリートには既にAE減水剤が使用されているが、高性能AE減水剤の使用によって更に 13% の減水は不可能ではない。ただし、通常のコンクリートに大量の高性能AE減水剤を使用して単位水量を減少させると、セメント量も少なくなる。この結果、粉体量の不足により分離しやすく、ワーカビリティの悪いコンクリートとなりやすいので、試験練りによる十分な事前検討が必要である。単位水量を減少させずに ϵ_f を低減する方法として、収縮低減剤の使用が考えられる。例えば、図-4に示すように、この混和剤をセメント重量の4%混入することによって、 ϵ_f を最大で60%程度に低減することができる [5]。

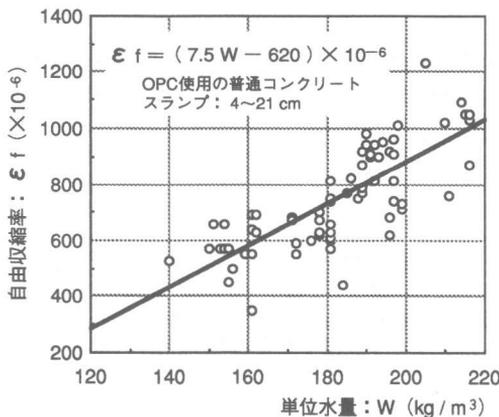


図-3 自由収縮率と単位水量の関係

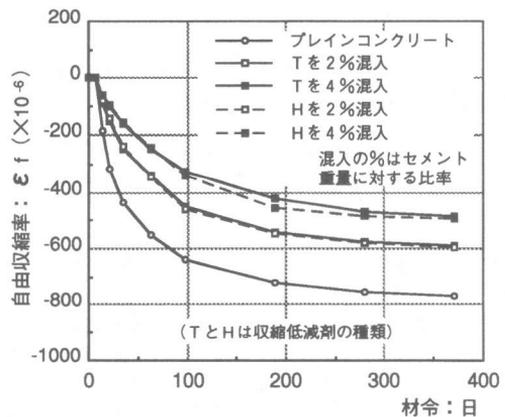


図-4 収縮低減剤の効果

4. 鉄筋コンクリート壁の拘束収縮率の推算

上記の ϵ_f は、壁の鉄筋を考慮しないコンクリート自体の自由収縮率であるが、壁には必ず鉄筋が配筋されるから、図-2の壁の収縮変形 (ϵ_w) は壁筋の拘束により ϵ_f よりも小さな値である。この鉄筋コンクリートとしての収縮率 (ϵ_s) の評価方法として次式がある [6]。

$$\epsilon_s = \frac{2 \epsilon_f}{(1+10P) + \sqrt{(1+10P)^2 + 32 E_s P^2 \epsilon_f / 3}} \quad (4)$$

ここで、P：壁の鉄筋比、 E_s ：鉄筋のヤング率 ($2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$)

(4) 式から、鉄筋による収縮率の低減率 (ϵ_s / ϵ_f) と鉄筋比 (P) の関係を求めると、図-5が得られる。これによれば、通常の設計で用いられている壁筋の最小鉄筋比 0.4 % では、鉄筋による収縮率の低減効果は概ね 8 %、壁筋比を 1 % に増大させるとその低減効果は 25 % 程度となる。図-6 に、鉄筋を考慮した壁の収縮率と単位水量の関係を示す。図中の収縮率は、P = 0 の場合は (3) 式、P > 0 場合は (4) 式で算出したものである。この図から、ひびわれ制御収縮率 (ϵ_{al}) とコンクリートの単位水量および鉄筋比の関係を読み取ることができる。

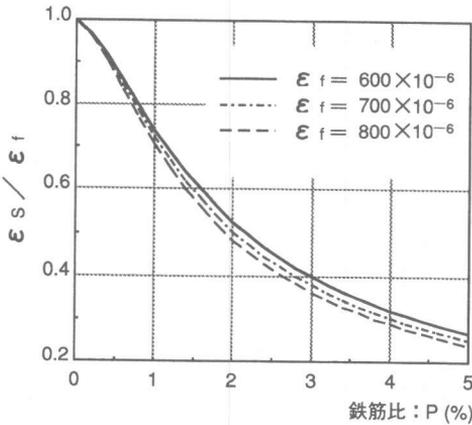


図-5 鉄筋の収縮率低減効果

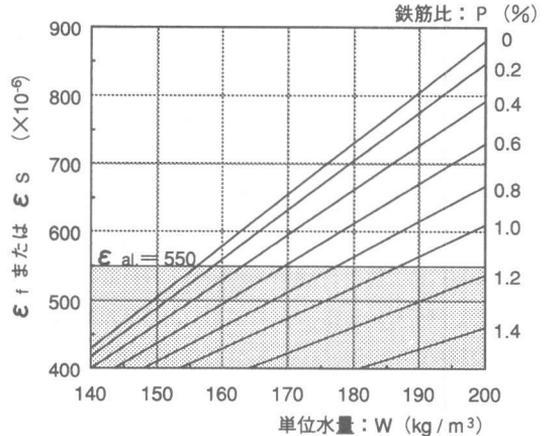


図-6 収縮率と単位水量および鉄筋比の関係

5. 結 び

コンクリートの自由収縮率と鉄筋による拘束効果を定量的に評価して、ひびわれ制御収縮率と対比する、鉄筋コンクリート壁の新しいひびわれ制御設計法を提案した。今後、自由収縮率と鉄筋の拘束効果の推算方法およびひびわれ制御収縮率の設定について、さらに詳細な検討を行い、より合理的なひびわれ制御手法を確立する予定である。

参考文献

- 1) 大野和男：コンクリートの膨張収縮に関する研究(1),(2)、日本建築学会大会論文集 昭10.4, 昭12.3
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造のひび割れ対策（設計・施工）指針・同解説、1990
- 3) H.K.Hilsdorf：Prediction for Shrinkage and Creep Coefficients for Structural Concrete、日米セミナー 1968
- 4) 池永博威、大島久次：コンクリートの乾燥収縮と引張クリープに関する実験的研究、日本建築学会論文報告集 第216号 pp.1-9, 昭49.2
- 5) 杉山雅、大橋潤一、瀬野康弘、小松和夫：コンクリートの乾燥収縮性状及びクリープ性状に及ぼす混和剤（材）の影響、コンクリート工学年次論文集、pp.567-572, 1992
- 6) 大野和男、柴田拓二、服部高重：コンクリートの乾燥収縮に及ぼす鉄筋の拘束効果とこれに伴う亀裂について、JCI "コンクリート構造物のひびわれに関するシンポジウム" 論文集、pp.93-98, 昭52.3