

論文 高強度異形鉄筋を用いたCPC梁の曲げひび割れ制御方法

栖原 健太郎*1・辻 幸和*2・芦田 公伸*3

要旨：高強度異形鉄筋の有効な利用を図り、優れた力学的特性を持つコンクリート建造物の建造を目的として、膨張コンクリートを利用した鉄筋コンクリート梁であるケミカルプレストレストコンクリート梁のケミカルプレストレスおよびケミカルプレストレインを仕事量一定則の概念に基づき評価し、曲げひび割れ幅の制御設計の具体的な方法について提案した。コンクリートの膨張エネルギーや引張鉄筋の量を変えることによって、同じ外力モーメントにおける引張鉄筋の応力度を様々に変化させることができ、曲げひび割れ幅を制御することができる。また、高強度異形鉄筋の利用範囲を拡大することが可能である。

キーワード：膨張コンクリート, 高強度異形鉄筋, CPC 梁, 曲げひび割れ幅, ケミカルプレストレイン

1. はじめに

鉄筋コンクリート梁は、一般にコンクリートの曲げ引張部分の抵抗を無視して設計されるので、曲げひび割れが生じて最終耐力に及ぼす影響は小さい。しかしながら、使用状態において許容ひび割れ幅を超える過大なひび割れが生じた場合には、鉄筋腐食の原因となり、耐久性を損なう可能性がある。また、水密性、気密性および美観上などからも、ひび割れ幅に制限を受ける場合もある。そのため、最終耐力に対する安全性には十分な余裕があっても、曲げひび割れの制限から、例えば降伏点応力度が 390N/mm^2 以上の高強度異形鉄筋を有効に使用することが困難な場合が多い。

その対策の一つとして、鉄筋コンクリート (RC) とプレストレストコンクリート (PC) との中間領域の構造形式である PPC や PRC 梁が提案され、その実用化が図られてきた¹⁾。著書らは、膨張コンクリートの利用もその対策として非常に有効であることを提案してきた^{2),3)}。

本文は、膨張コンクリートを適用することにより高強度異形鉄筋の有効な利用範囲を拡大して、優れた力学的特性を持つ、鉄筋コンクリート梁のケミカルプレストレストコンクリート (CPC) 梁の建造を目的とした基礎研究の結果を報告するものである。すなわち、矩形断面の鉄筋コンクリート梁に膨張コンクリートを積極的に適用した CPC 梁の曲げひび割れ性状と、その定量的な制御に関する一方法について提案したものである。

2. CPC 梁の力学的特性

2.1 CPC 梁の曲げひび割れ性状

膨張コンクリートを用いた鉄筋コンクリート梁である CPC 梁の外力による曲げモーメントと引張鉄筋のひずみの増分との関係を、通常の鉄筋コンクリート (RC) 梁

と対比して示した実験の一例が図-1³⁾である。なお、コンクリートの配合を表-1に、使用した鉄筋の種類および機械的性質を表-2に示す。なお、膨張材には、エ

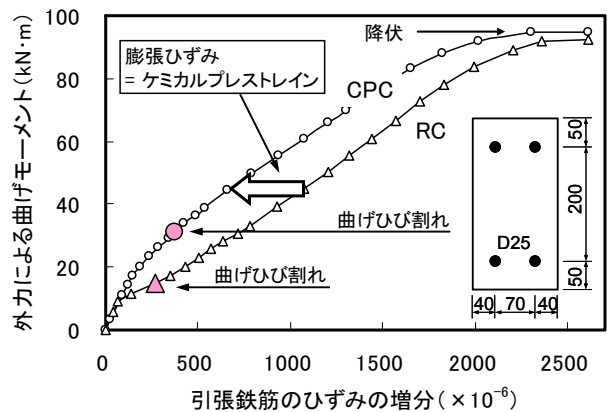


図-1 引張鉄筋のひずみの増分と曲げモーメント³⁾

表-1 コンクリートの配合

	水結合材 比(%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)		
			水	セメント	膨張材
RC	45	37	180	400	0
CPC	45	37	180	340	60

セメントの種類：早強ポルトランドセメント
Gmax : 25mm, スランプ : 7.5cm, 空気量 : 1.5%

表-2 鉄筋の種類および機械的性質

	呼び径	種類	降伏点 (N/mm ²)
引張鉄筋	D25	SD390	470
圧縮鉄筋	D25	SD345	407
スターラップ	D10	SD295	337

*1 電気化学工業株式会社 無機材料研究部 研究員 博士 (工学) (正会員)

*2 群馬大学大学院 工学研究科 社会環境デザイン工学 教授 工学博士 (正会員)

*3 電気化学工業株式会社 無機材料研究部 主幹研究員 博士 (工学) (正会員)

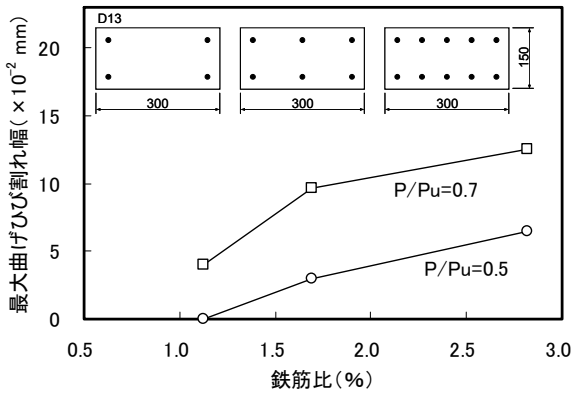


図-2 鉄筋比と最大曲げひび割れ幅⁵⁾

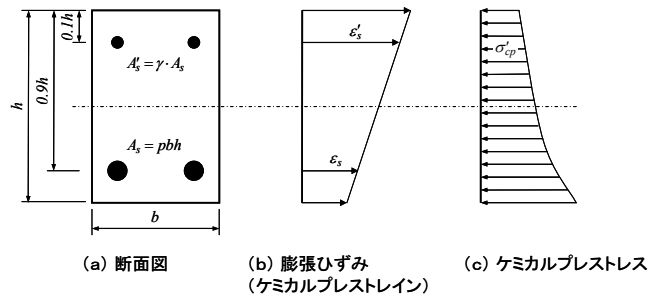
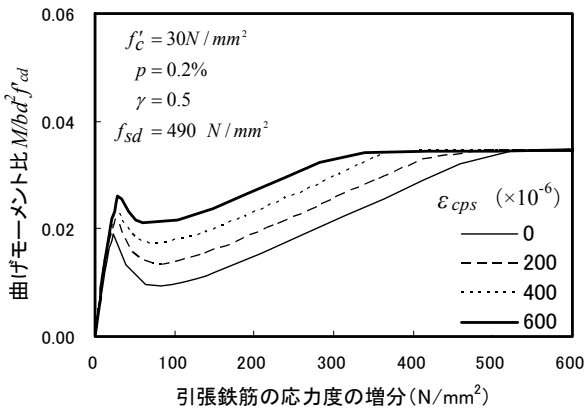
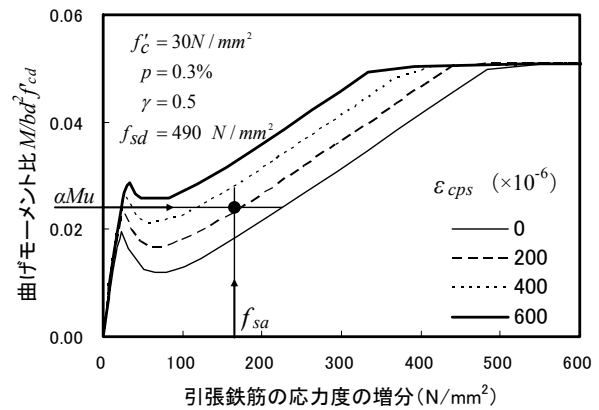


図-3 断面図，膨張ひずみおよびケミカルプレストレス



a) 引張鉄筋比 : 0.2%



b) 引張鉄筋比 : 0.3%

図-4 引張鉄筋のひずみの増分と曲げモーメント比

トリングイト系のものを用いた⁴⁾。

図-1より，膨張コンクリートを用いたCPC梁は，曲げひび割れ発生モーメントが増加して全断面を有効として利用できる範囲が広がる，外力による曲げモーメントに抵抗する引張鉄筋のひずみの増分が曲げひび割れ発生後においても著しく小さくなる，引張鉄筋が降伏した後にコンクリートが圧壊する曲げ引張破壊耐力はRC梁と同等である，などの特徴が読みとれる。

特に，引張鉄筋ひずみの減少の程度は，荷重の載荷までに引張鉄筋に生じた膨張ひずみであるケミカルプレストレインに相当する。曲げひび割れが発生した後は，外力による引張力に主として抵抗するのは引張鉄筋の引張力である。CPC梁では，この引張力の中に，膨張コンクリートの膨張によって与えられたケミカルプレストレインに相当する引張力が含まれ，その分が引張鉄筋のひずみを低減させるのである。また，この図に示すようなRC梁の通常の破壊型式である引張鉄筋がまず降伏して破壊する，いわゆる曲げ引張破壊の場合には，外力モーメントに釣り合う引張力は鉄筋の降伏点に相当する。そのため，導入されたケミカルプレストレインの量にかか

わらず，コンクリートの強度が膨張により著しく低下しないかぎり，曲げ引張破壊モーメントは，コンクリートの膨張量の有無にかかわらないのである。

2.2 鉄筋量の影響

膨張作用により引張鉄筋に生じるケミカルプレストレインは，仕事量一定則の概念³⁾によれば，鉄筋量が少ないほど大きくなり，鉄筋量の平方根にほぼ逆比例する。図-2は，配置した鉄筋の本数のみを3種類に変化させたCPC梁について，曲げ引張破壊時の荷重に対して，50%と70%の荷重における最大曲げひび割れ幅の実測値を示したものである⁵⁾。図より，同じ膨張量のコンクリートを用いる場合には，鉄筋量の少ないCPC梁の方が曲げひび割れ幅の制御に有利となる。

図-3の断面において，仕事量一定則の概念に基づきケミカルプレストレスおよびケミカルプレストレインを算定し，これをコンクリートの引張力も考慮した積層モデルによる逐次計算法⁶⁾により求めた。作用曲げモーメントを M として，引張鉄筋の応力度の増分と曲げモーメント比の関係を示した例が図-4である。なお，凡例に示した膨張ひずみ ϵ_{cps} は，基準となる拘束鉄筋比 p_s が約

0.95%の場合のA法一軸拘束器具 (JIS A 6202) に生ずる長さ変化率を表している。 ϵ_{cps} が 100×10^{-6} とは、後に述べる単位体積あたりの膨張コンクリートが拘束鉄筋に対してなす仕事量 U にして、 $1 \times 10^{-5} \text{ N/mm}^2$ に相当する。

図-4 から、曲げ引張破壊モーメントが同じ梁でも、コンクリートの膨張エネルギーを変えることによって、同じ外力モーメントにおける引張鉄筋の応力度の増分を様々に変化することができる。すなわち、PPC 梁や PRC 梁と同様に、膨張コンクリートの利用によって、使用荷重の作用時における曲げひび割れ幅を制御できることが、この計算例から明らかである。

なお、使用する鉄筋の強度に対して鉄筋量が著しく少ないと、図-4 a) に示すように、曲げひび割れの発生から曲げ引張破壊耐力までの余裕が少なくなる。また、著しい場合には、コンクリートが受け持っていた引張力を鉄筋が受け持たなくなって、曲げひび割れ発生後に直ちに引張鉄筋が降伏して破壊に至るといふ、RC 梁として非常に好ましくない性状^{5), 7)}を示す。そして、このような性状は膨張エネルギーの大きいものほど顕著となる。鉄筋量が少ない場合には、強度の高い鉄筋を用いることで、曲げ引張破壊耐力を増加させることができる。すなわち、膨張エネルギーに応じた適切な強度を持つ鉄筋を組み合わせることで、曲げひび割れの制御に優れた CPC 梁を設計することができる。

次章に、CPC 梁の曲げひび割れ幅の制御に関する一方方法について述べる。

3. CPC 梁の曲げひび割れ幅の制御に関する設計方法

曲げひび割れ発生モーメントに関する設計方法は、コンクリートに導入された圧縮応力度のケミカルプレストレスを、従来の機械的なプレストレスと同様に考えれば実用上安全側となるので^{2), 3)}、ここでは省略し、以下には曲げひび割れ幅の制御に基づく設計方法を述べる。

設計条件として、曲げ引張破壊モーメントとして M_u 、また、曲げひび割れ条件として作用曲げモーメント $M_s = \alpha M_u$ において許容ひび割れ幅 w_a が与えられた場合を考える。

3.1 CPC 梁の断面応力度の算定方法

膨張作用により引張鉄筋に生じる応力度の算定には、「膨張コンクリートが拘束鉄筋に対してなす仕事量は、拘束鉄筋量にかかわらず一定である」とした仕事量一定則の概念に基づいた方法⁷⁾を採用する。単位体積あたりの膨張コンクリートが拘束鉄筋に対してなす仕事量 U は、基準となる JIS A 6202 「コンクリート用膨張材」附属書 2 に規定している A 法一軸拘束器具の拘束鉄筋比を p_s 、拘束鉄筋のヤング係数を E_s (N/mm²)、その膨張ひずみである長さ変化率を ϵ_{cps} 、導入されたケミカルプレスト

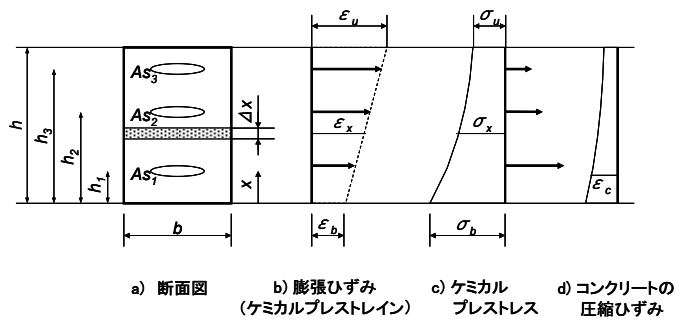


図-5 CPC 梁の仕事量一定則の概念

レスを σ_{cp} とすると、式(1)で与えられる。

$$U = \frac{1}{2} \sigma_{cp} \cdot \epsilon_{cps} = \frac{1}{2} \cdot p_s \cdot E_s \cdot \epsilon_{cps}^2 \quad (1)$$

一方、図-5 に示すように、鉄筋が断面に対して高さ方向に非対称に配置される断面の膨張ひずみ ϵ_x は、膨張ひずみが断面の高さ方向に直線分布するものと仮定し、断面の高さを h 、下縁の膨張ひずみ ϵ_b 、上縁の膨張ひずみ ϵ_u 、CPC 梁の下縁からの距離を x として、式(2)で与えられる。

$$\epsilon_x = \frac{1}{h} \{ \epsilon_b (h-x) + \epsilon_u \cdot x \} \quad (2)$$

また、CPC 梁におけるケミカルプレストレス σ_x は、仕事量を U として式(2)の膨張ひずみを適用すると、式(3)となる。

$$\sigma_x = \frac{2U}{\epsilon_x} = \frac{2Uh}{\epsilon_b (h-x) + \epsilon_u \cdot x} \quad (3)$$

次に、断面の幅を b 、鉄筋 i の鉄筋断面積を A_{si} として、鉄筋の引張力と膨張コンクリートの圧縮力との力の釣合い条件から式(4)が、下縁におけるモーメントの釣合い条件から式(5)がそれぞれ成立する。

$$b \int_0^h \sigma_x dx - \sum_{i=1}^n A_{si} \cdot \epsilon_i \cdot E_s = 0 \quad (4)$$

$$b \int_0^h \sigma_x \cdot x dx - \sum_{i=1}^n A_{si} \cdot \epsilon_i \cdot E_s \cdot h_i = 0 \quad (5)$$

式(3)において ϵ_b および ϵ_u を仮定して、式(4)および式(5)を満足させる ϵ_b および ϵ_u を逐次計算法などにより求めることで、CPC 梁のケミカルプレストレスの分布を式(3)で、ケミカルプレストレインの分布を式(2)で簡便に精度良く評価できる。

式(6)および式(7)は、仕事量一定則の概念を適用して、式(4)および式(5)を基準となる拘束鉄筋比が p_s における膨張ひずみ (長さ変化率) ϵ_{cps} で表したものである。したがって、式(6)および式(7)を用いることで、CPC 梁のケミカルプレストレインと、基準となる JIS A 6202 の A 法一軸拘束膨張試験の結果とを対応させることができる。

$$p_s \cdot \varepsilon_{cps}^2 \cdot bh \int_0^h \frac{1}{\varepsilon_b(h-x) + \varepsilon_u \cdot x} dx - \sum_{i=1}^n A_{si} \cdot \frac{\varepsilon_b(h-h_i) + \varepsilon_u \cdot h_i}{h} = 0 \quad (6)$$

$$p_s \cdot \varepsilon_{cps}^2 \cdot bh \int_0^h \frac{x}{\varepsilon_b(h-x) + \varepsilon_u \cdot x} dx - \sum_{i=1}^n A_{si} \cdot \frac{\varepsilon_b(h-h_i) + \varepsilon_u \cdot h_i}{h} \cdot h_i = 0 \quad (7)$$

CPC 梁の断面応力度は、上述した仕事量一定則の概念により得られたケミカルプレストレスおよびケミカルプレストレスを積層モデルに適用することで算定できる⁸⁾。また、引張鉄筋の応力度が求まれば、曲げひび割れ幅は、例えば土木学会コンクリート標準示方書 [設計編]⁹⁾の曲げひび割れ幅の算定式より求めることができる。

3.2 CPC 梁の曲げひび割れ幅の制御

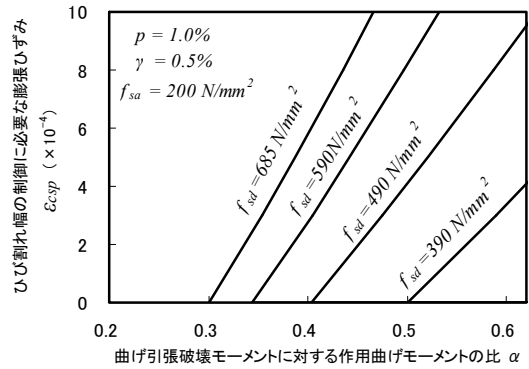
図-4 に示した計算例は、 $p=As/bh$ 、 $\gamma=As/As=0.5$ 、 $f'_c=30\text{N/mm}^2$ 、 $f_{sd}=490\text{N/mm}^2$ の条件において、コンクリートと鉄筋の強度を一定にして、JIS A 6202 の A 法一軸拘束体の膨張ひずみ ε_{cps} を 0, 200, 400, 600×10^{-6} に変化させたものである。 p は、0.2% と 0.3% の場合である。

図-4 b) に示すように、曲げ引張破壊モーメント M_u に対して α 倍の作用曲げモーメント $M_s=\alpha M_u$ において、許容ひび割れ幅 w_a が与えられたときには、その w_a に対応する引張鉄筋の応力度の増分 f_{sa} と αM_u の交点が、曲げひび割れ幅の制御に必要な膨張ひずみ ε_{cps} となる。

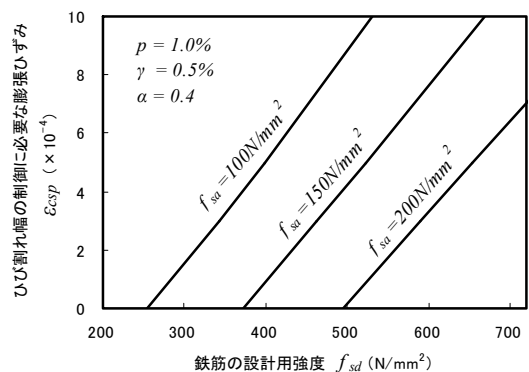
さらに、計算例として、 $p=As/bh=1.0\%$ 、 $\gamma=As/As=0.5$ の条件について図-6 a) および b) に、鉄筋比 p を 0.4~1.4% に変化させた場合を図-6 c) にそれぞれ示す。

図-6 a) は、許容ひび割れ幅 w_a として、土木学会コンクリート標準示方書⁹⁾の曲げひび割れ幅の算定式より定まる鉄筋の応力度の増分 f_{sa} が例えば 200N/mm^2 であった場合において、曲げ引張破壊モーメントに対する作用曲げモーメントの比 α と鉄筋の設計用強度 f_{sd} が 390, 490, 590, 685N/mm^2 の場合との組合せを示したものである。また、b) は、 α を 0.4 の一定にしての f_{sd} と f_{sa} の組合せを示している。さらに、 α を 0.4 と f_{sa} を 150N/mm^2 の一定にした場合において、引張鉄筋比 $p=As/bh$ が 0.2~1.4% に変化させた場合の f_{sd} に対応する必要な膨張ひずみ ε_{cps} を示したのが c) である。

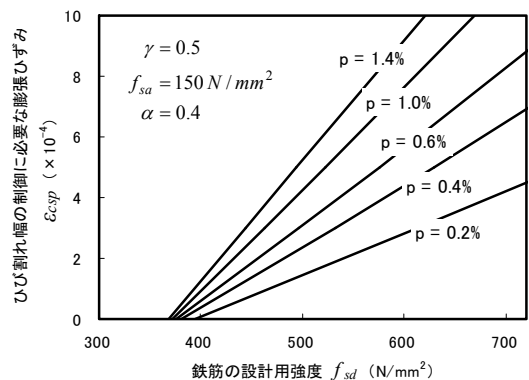
図-6 a) および b) の結果より、コンクリートの膨張エネルギーや、引張鉄筋の強度を変えることによって、同じ外力モーメントにおける引張鉄筋の応力度の増分を様々に変化することができる。曲げひび割れの制約からその有効な使用が制限されていた降伏点が 490N/mm^2 以上の高強度異形鉄筋も、膨張コンクリートを併用することにより、十分に活用でき、曲げ特性の優れた鉄筋コンクリート梁である CPC 梁を建造できる。このような高強



a) 作用曲げモーメント比 α と膨張ひずみ



b) 鉄筋の設計強度と膨張ひずみ



c) 鉄筋比と膨張ひずみ

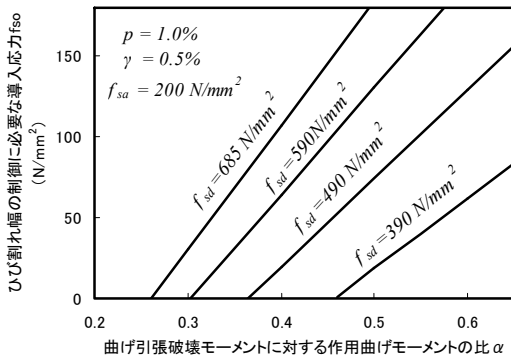
図-6 一般的な方法による解法

度異形鉄筋の活用は、引張鉄筋の少ない断面において膨張コンクリートに必要な膨張力が小さくて良いことを、図-6 c) の計算例からも確認することができる。

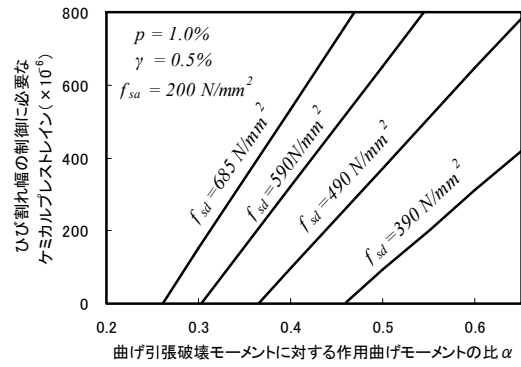
4. 簡略な方法

前述した一般的な方法は繁雑となるので、ここでは通常の鉄筋コンクリート梁の設計で仮定するようにコンクリートの引張力を無視し、さらに計算を簡単にするため、圧縮鉄筋の圧縮力も考慮しない簡略な方法について示す。

まず、曲げ引張破壊モーメントおよび作用曲げモーメントは、式(8)および式(9)が成立しなければならない。

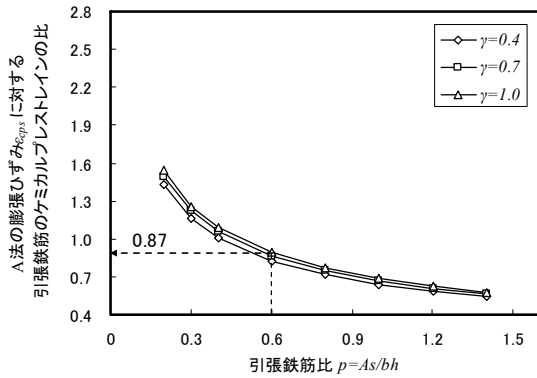


a) ひび割れ制御に必要な導入応力 f_{so}

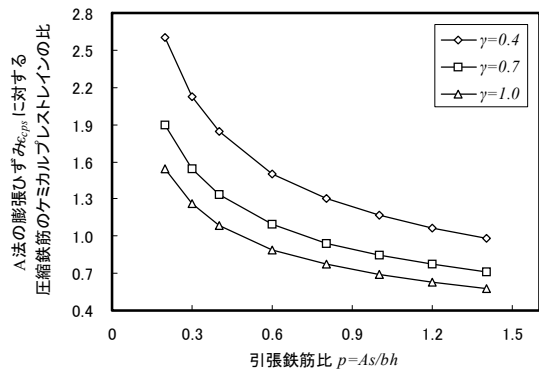


b) ひび割れ制御に必要なケミカルプレストレイン

図-7 作用曲げモーメント比に対する鉄筋の応力度とケミカルプレストレイン



a) 引張鉄筋



b) 圧縮鉄筋

図-8 鉄筋比と膨張ひずみ ϵ_{cps} に対する引張鉄筋のケミカルプレストレインの比

$$A_s \cdot f_{sd} \cdot Z_u \geq M_u \quad (8)$$

$$A_s (f_{so} + f_{sa}) \cdot Z \geq \alpha M_u \quad (9)$$

ここに、 A_s は引張鉄筋の断面積、 f_{sd} は鉄筋の設計用強度、 f_{sa} は許容ひび割れ幅 w_a から定まる引張鉄筋の応力度の増分、 Z_u および Z はそれぞれ、終局時および使用時における内力間の距離を示す。また、 f_{so} は、曲げひび割れ幅の制御のために必要な膨張作用により引張鉄筋に生じさせる応力度を示し、ケミカルプレストレインにヤング係数を乗じたものである。

式(8)と式(9)より、 f_{so} は次式を満足すればよい。

$$f_{so} \geq (\alpha \cdot Z_u / Z) \cdot f_{sd} - f_{sa} \quad (10)$$

なお、通常の鉄筋コンクリート梁において、終局強度よりもひび割れ幅の制限から必要鉄筋量が定まる場合には、式(10)の右式は正の値をとり、この場合に膨張コンクリートを用いることになる。

図-7 は、図-3 の断面において、式(10)を用いて算定した f_{so} と、これに対応するケミカルプレストレインを、曲げ引張破壊モーメントに対する作用曲げモーメントの比 α で整理したものである。図-7 において、作用曲げ

モーメント αM_u のときに、許容ひび割れ幅が w_a となる鉄筋の応力度の増分 f_{sa} は、一般的な方法と同様に、土木学会コンクリート標準示方書⁹⁾の曲げひび割れ幅の算定式より求まる。そして、 Z_u/Z の値は、断面の形状寸法と鉄筋の配置方法により変化するが、3章で述べた積層モデルの計算結果から、1.02~1.12 となることが確認された。したがって、曲げひび割れ幅を、許容値の w_a より小さく制御するためには、式(10)において、簡易に Z_u/Z を 1.12 と置いて応力度の増分 f_{so} を求め、この f_{so} に対応するケミカルプレストレインを導入できる膨張ひずみ ϵ_{cps} を、式(6)および式(7)より求めればよい。

図-8 は、図-3 に示す断面において、式(6)および式(7)を用いて、A法一軸拘束試験における膨張ひずみ ϵ_{cps} に対する引張鉄筋および圧縮鉄筋のケミカルプレストレインの比を、引張鉄筋比で整理したものである。図-8 より、引張側の鉄筋比が 0.6%、 γ が 0.7 のとき、膨張ひずみ ϵ_{cps} に対する引張鉄筋のケミカルプレストレインの比は 0.87 であることから、曲げひび割れ幅の制御に必要な A法一軸拘束試験における膨張ひずみ ϵ_{cps} は、先に求めたケミカルプレストレインを 0.87 で除した値となる。すなわち、図-8 の関係図を予め求めておくことで、図解法により、曲げひび割れ幅の制御に必要な膨張ひずみ ϵ_{cps}

を得ることができる。

図-9は、それぞれ図-6に対応した簡略な方法により作成した図である。 Z_u/Z を1.12と固定したため、一般的な方法により作成した図より少し大きな膨張ひずみ ϵ_{csp} が必要になるが、ひび割れ幅の制御の観点からは安全側の評価であるため、実用上の問題はない。

このように、ひび割れ幅の制御に必要なCPC梁の膨張ひずみを、鉄筋の強度、鉄筋量、使用時の作用モーメントの比などから評価することができる。

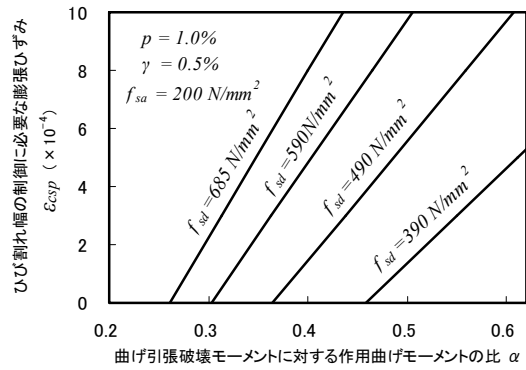
5. まとめ

高強度異形鉄筋の有効な利用を図り、優れた力学的特性をもつ新しいコンクリート構造物の建造を目的として、膨張コンクリートを利用した鉄筋コンクリート梁であるCPC梁の曲げひび割れ性状と、曲げひび割れ幅の制御設計の方法について、仕事量一定則の概念に基づきケミカルプレストレスおよびケミカルプレストレインを評価し、これを積層モデルに適用して断面の応力度を求める一般的な方法と、簡略な方法を提案した。以下に得られた知見を示す。

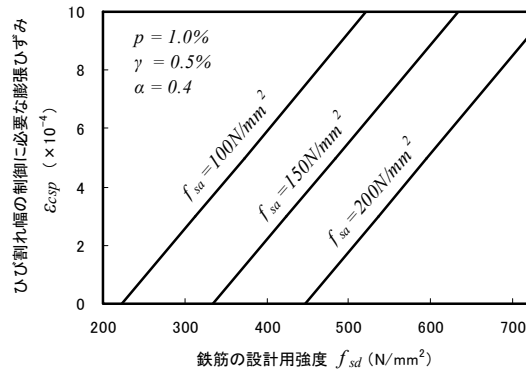
- (1) PPC梁やPRC梁と同様に、膨張コンクリートの利用によって、使用時における曲げひび割れ幅を制御できる。
- (2) 膨張コンクリートと高強度異形鉄筋とを組み合わせることで、同じ外力モーメントにおける引張鉄筋の応力度の増分を様々に変化することができる。
- (3) 提案した簡略な方法により、曲げひび割れ幅の制御に必要な膨張コンクリートの膨張エネルギーを簡便に算定できる。

参考文献

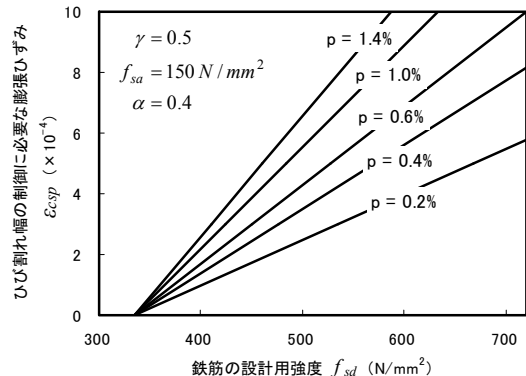
- 1) 横道英雄：コンクリート橋，技報堂，1962
- 2) 岡村甫，辻幸和：ケミカルプレストレスを導入したコンクリート部材の力学的特性，土木学会論文報告集，第225号，pp.101-108，1974年5月
- 3) 辻幸和：コンクリートにおけるケミカルプレストレスの利用に関する基礎研究，土木学会論文報告集，第235号，pp.111-124，1975年3月
- 4) 辻幸和，池田正志：ケミカルプレストレストコンクリート梁における高強度鉄筋の利用に関する基礎研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，2010（投稿中）
- 5) 辻幸和，前山光宏：ケミカルプレストレスを導入したコンクリート部材の最少鉄筋比に関する研究，足利工業大学研究集録，第3号，pp.73-80，1977年3月
- 6) 辻幸和：ケミカルプレストレスおよび膨張分布の推定方法，コンクリート工学，Vol.19，No.6，pp.99-105，June 1981



a) 作用曲げモーメント比 α と膨張ひずみ



b) 鉄筋の設計強度と膨張ひずみ



c) 鉄筋比と膨張ひずみ

図-9 簡略な方法による解法

- 7) Yukikazu TSUJI and Mitsuhiro Maeyama: Control of Bending Cracks of Reinforced Concrete Members through Utilization of Expansive Concrete, Proceedings of the 21st Japan Congress on Materials Research, pp.180-184, 1978
- 8) 栢原健太郎，李春鶴，芦田公伸，辻幸和：膨張コンクリートを用いたCPCはりの曲げひび割れ幅の評価，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.2，pp.229-234，2009
- 9) 土木学会，コンクリート標準示方書〔設計編〕，2007年制定，2007