# 論文 各種コンクリート壁体の収縮応力簡易算定法の検討

### 今本 啓一\*1

要旨:本研究は,主として再生粗骨材を用いた5種類のコンクリート壁体を対象として,その収縮ひずみ挙動,応力性状の検討を行うものである。コンクリートのクリープ解析法としては,応力変動の影響を重ね合わせで評価できる逐次法が精算解法の一つとしてあげられるが,本論では,2002年土木学会コンクリート標準示方書「施工編」に示される簡易法についても検討を行うものである。本研究の範囲内において,簡易法は,壁体のひずみ挙動を,特に100日程度の長期材齢においては過大に評価するが,収縮応力については,逐次法とほぼ同程度の値を得ることが可能であることを示す。

キーワード:コンクリート壁体,クリープ,収縮,逐次法,簡易法,再生粗骨材

#### 1. はじめに

コンクリートの乾燥収縮は構造物のひび割れ 発生の主要な原因の一つである。コンクリート の乾燥収縮に起因するひび割れが問題になる部 位として,建築構造物では一般に壁体があげら れる。コンクリート壁体の乾燥収縮応力を対象 とした解析的研究として,中西による FEM 弾 性解析による主応力分布性状の研究<sup>1)</sup>,小柳ら による上下梁部材の経時的なずれを考慮した一 軸型増分解析があり<sup>2)</sup>,また壁体のひずみ挙動 の FEM クリープ解析としては大野らの研究<sup>3)</sup> 等がある。

本研究は,コンクリート壁体の収縮挙動を解 析的に検討している点で上記の既往の研究と共 通するものであるが,その検討対象を,近年実 用化が図られている各種再生粗骨材コンクリー トにまで広げていること,またそれらのひずみ 挙動・収縮応力の簡易な解析法として,土木学 会コンクリート標準示方書に紹介されている簡 易法<sup>4)</sup>の適用性を,逐次法との比較の下に検証 したものである。

なお、本論における実験結果の一部(No.1,3,4) については既報 5に,一部(後述 No.2)の試験 結果の逐次法による解析結果については既報 6) に発表している。本論文はこれらの内容を統合 し,簡易法の適用性を含めて新たな検討を加え るものである。

2. 壁模擬部材の概要

2.1 使用材料・計画調合

本研究では, 普通コンクリート(No.1), 1 種再生粗骨材コンクリート(No.2), 3種再生粗 骨材コンクリート(No.3), 3種再生粗骨材に減 圧・瞬時復圧処理<sup>5)</sup>をしたもの(No.4)およびさら に 3種再生粗骨材に収縮低減剤を混和して減 圧・瞬時復圧処理をしたもの(No.5)の5種類の コンクリートを用いた。コンクリートの使用材 料を表-1,計画調合を表-2に示す。減圧・瞬時 復圧処理はコンクリートの品質改善を図る目的 で実施したものであるが,力学的特徴として, 同一骨材・W/C において圧縮強度が 15~20% 増大する傾向が認められる<sup>5)</sup>。

2.2 壁模擬部材の形状

壁のひずみ挙動を検討するための壁模擬部材 の形状を図-1 に示す。壁模擬部材の下梁には全 て No.2 の調合のコンクリートを用い,直接コン クリート土間の上に作製した。上部コンクリー ト(柱・壁・上梁)の打込み時期は普通骨材, 再生 1 種粗骨材を用いたコンクリート(No.1, 2)で下梁打設後 30 日,再生 3 種粗骨材を用い

\*1 足利工業大学 工学部 建築学科 講師 博士(工学)(正会員)



表-1 使用材料

図-1 壁模擬部材等(a 全体,b 梁・柱配筋,c ダミー部材)

たコンクリート(No.3,4,5)で 31 日とし, 型枠の取り外し時期は打ち込み後 8 日(No.1, 2),および打ち込み後7日(No.3,4,5)とし た。壁模擬部材の上梁上面は型枠取り外しまで ビニルシートで養生した。なお模擬部材の打設 に併せて,同一鉄筋比の壁および梁(柱)のダ ミー部材(図-1(c)参照)を作製し,埋込み型ひ ずみ計により,部材中心部のひずみを測定した。 ダミー部材の型枠脱型時期は模擬部材の型枠取 り外し時期と同一とした。

2.3 コア抜き用部材(無筋)

構造体 (コア)強度・ヤング係数を調査する ため,縦400×横600×高さ420mmの無筋の コア抜き用部材を作製し,気中養生材齢 7,28,56,91日の時点でそれぞれコンクリートコ アを2~4本抜き取り,圧縮強度およびヤング 係数を求めた。

### 3 実験結果

- 3.1 コンクリートの物性値
- a. 圧縮強度,ヤング係数の変化

コア抜き用部材から得られた圧縮強度の変化 を図-2 に,ヤング係数の変化および CEB-FIP Model Code1990<sup>7)</sup>による近似結果を図-3 に示す。



表-2 計画調合

No.	粗骨材の種類	W/C (%)	粗骨材かさ 容積(m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					混和剤 (C × %)	備考
					W	С	G	S1+S2	<b>S</b> 3		
1	普通骨材		0.600	47.3			933	811	-	0.79	
2	再生1種			43.6	180	360	959	-	740	1.20	
3	再生3種	50	0.590	45.8			899	-	773	1.70	
4											減圧・瞬時復圧処理
5										3.70	No.4 + 収縮低減剤



図-3 ヤング係数の変化と CEB-FIP Model Code1990による近似結果(No.1~No.5)

図-3 に示されるように,ヤング係数の発現は, 材齢 28 日の値が既知であれば,普通コンクリー ト,再生粗骨材コンクリートに関わらず, CEB-FIP Model Code1990 により概ね近似でき ることが分かる。図中式に用いるsはセメント の種類に応じた係数であり,ここでは普通ポル トランドセメントの係数 0.25 を用いた。後述の 解析では,CEB-FIP Model Code1990 による計算 値を用いることとする。

b. クリープ・収縮性状

クリープ・収縮ひずみは,後述する実大模擬 壁と同一の場所に存置し測定を行った。ひずみ の測定は 100×200mm 供試体(無筋)を用い, 埋め込みゲージにより行った。乾燥開始までは 封緘養生とし,材齢7日で乾燥およびクリープ については載荷(載荷応力=載荷時強度の約 1/3)を開始した。打設時コンクリート温度は約 18 であり,材齢約90日までの平均気温は約



14 (最低-4 ,最高 25.2 )である。

収縮ひずみの変化を図-4 に示す。図に示され るように,収縮ひずみは材齢約130日の時点で 約200×10<sup>-6</sup>の差が生じており,その大きさは 再生3種粗骨材(No.3)>再生3種+減圧・瞬 時復圧(No.4)>普通骨材(No.1)>再生1種 (No.2)>再生3種+収縮低減剤+減圧・瞬時 復圧(No.5)となっている。普通骨材よりも1 種再生骨材使用のコンクリートの乾燥収縮が小 さいが,これは原骨材の品質によるものと思わ れる。

クリープひずみの変化を図-5 に示す。コンク リートの単位応力度当たりのクリープひずみは 材齢約130日の時点で約40×10<sup>-6</sup>の差が生じて おり,その大きさは再生3種粗骨材(No.3)> 普通骨材(No.1)>再生3種+減圧・瞬時復圧 (No.4) 再生1種(No.2)>再生3種+収縮 低減剤+減圧・瞬時復圧(No.5)となっている。

なお,No.1のダミー部材の収縮ひずみとその 近似値,各ダミー部材のクリープ係数 (材齢 28 日ヤング係数を基準とした弾性ひずみに対 するクリープひずみの比)とその近似値を図-6, 7 に示す。後述の解析においては,これらの図 に示される近似曲線に基づいて計算した値を入 力値とした。なお,図に示す倍率は特にひび割 れ発生までの材齢が短い試験体では大きい(最 大:No.3の2.5倍)が,これは,提案式構築の 元になったデータが長期材齢(平均材齢約400 日)を対象としており,短期の実験値に適合し ない点があるためと思われる。



図-6 各ダミー部材(壁および梁)の収縮ひず みとその近似(No.1)



4. 応力算定方法

ここでは,収縮に伴う応力変動の影響を各ス テップにおいて重ね合わせで評価することので きる逐次法と,各ステップの応力変動が独立し た形で表現される簡易法について検討する。

4.1 逐次法

逐次法の基本式は次に示すとおりである<sup>9</sup>。  $\sigma(t_{i+1/2}) = \frac{1}{J(t_{i+1/2}, t_i)} \left\{ \varepsilon(t_{i+1/2}) - \varepsilon_e(t_{i-1/2}) - \varepsilon_f(t_{i+1/2}) \right\}$ 

$$\begin{aligned} \mathbf{z} = \mathbf{z} = \mathbf{z} \\ J(t_{i+1/2}, t_i) &= \frac{1}{E(t_i)} + \frac{\phi(t_{i+1/2}, t_i)}{E_{28}} \\ \varepsilon_e(t_{i-1/2}) &= \sum_{j=1}^i \Delta \sigma(t_j) J(t_{i+1/2}, t_j) - J(t_{i+1/2}, t_i) \sigma(t_{i-1/2}) \end{aligned}$$

 $\sigma(t_{i+1/2}): ステップt_{i+1/2}$ でのコンクリート応力 (N/mm<sup>2</sup>)  $\varepsilon(t_{i+1/2}): ステップt_{i+1/2}$ での実ひずみ  $\varepsilon_f(t_{i+1/2}): ステップt_{i+1/2}$ での自由ひずみ  $\phi(t_{i+1/2}, t_j): ステップt_j$ で載荷されたステップ $t_{i+1/2}$ での クリープ係数  $E(t_i): ステップt_i$ でのヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>)  $E_{28}: 標準養生材齢 28 日ヤング係数 (N/mm<sup>2</sup>)$ 

壁模擬部材において,梁の軸剛性は柱の曲げ 剛性よりも小さいため,壁の水平方向の変形(収 縮)は梁部材によって優先的に拘束される。そ こで本部材を一軸モデルとし,壁体・上下梁部 材において力の釣り合いを仮定すると,

となりここに ,
$$E_e(t_{i+1/2},t_i) = \frac{1}{J(t_{i+1/2},t_i)}$$
A , A , A : 壁体 , 上梁 , 下梁の断面積  
: 上梁に関連, : 下梁に関連

これらに加え、上梁、下梁が分担する圧縮力

が等しいこと(式(3)),およびひずみの平面保 持(式(4))を仮定することにより,上梁と下梁 を分割打設した場合において壁体に生じる応力, ひずみ挙動を逐次的に追跡することが数式上可 能となる。

$$E'_{e}(t_{i+1/2},t_{i})A' \left\{ \varepsilon'(t_{i+1/2}) - \varepsilon'_{e}(t_{i-1/2}) - \varepsilon'_{f}(t_{i+1/2}) \right\}$$
  
=  $E''_{e}(t_{i+1/2},t_{i})A'' \left\{ \varepsilon''(t_{i+1/2}) - \varepsilon''_{e}(t_{i-1/2}) - \varepsilon''_{f}(t_{i+1/2}) \right\}$  (3)

$$\varepsilon(t_{i+1/2}) = \frac{\left\{\varepsilon'(t_{i+1/2}) + \varepsilon''(t_{i+1/2})\right\}}{2}$$
(4)

## 4.2 簡易法

簡易法の基本式は次に示すとおりである 4)。

$$\sigma(t_i) = \sum_{j=1}^{i} E_e(t_i, t_j) \Delta \mathcal{E}_e(t_j)$$
(5)

$$E_{e}(t_{i}, t_{j}) = \frac{E(t_{j})}{1 + \{E(t_{j}) / E_{28}\}} \phi'(t_{i}, t_{j})$$

ここに,  $\Delta \varepsilon_e(t_i)$ :有効ひずみ増分

(本研究では, $\Delta \varepsilon(t_i) - \Delta \varepsilon_f(t_i)$ )

壁模擬部材を一軸モデルと考えた場合の力の 釣り合い条件,ひずみの平面保持等については 式(2)~(4)におけるものと( $E_e(t_i,t_j)$ の表記以外 は)同じである。

## 5. 結果の検討

- 5.1 解析の前提条件
  - 本解析における前提条件は以下の通りである。 クリープについて, 10×20cm 供試体の圧 縮クリープ試験結果(図-7)を既往の式に 適合させ,壁部材,梁部材の体積/暴露表面 積に応じた計算値を用いる。

収縮は図-6,ヤング係数は図-3の値を用い, 壁体と同一温度履歴とする。

本研究では,土間の拘束の影響を直接的な 形で取り込んでいない。上部コンクリート 打設の際,図-6:No.1 に示されるように, 土間の拘束を受けた状態での下梁ひずみに 進展傾向が見られなかったため,収縮ひず みの入力値を0とした。これにより,間接 的に土間の拘束を考慮することとした。

#### 5.2 応力・ひずみ挙動解析

壁模擬部材・ダミー部材に埋設した,ひび割 れ発生までのひずみの変化と逐次法および簡易 法による解析結果を図-8に示す。各図の下部分 はひずみ挙動,上部分は応力解析結果を示す。 測定したひずみ挙動について,いずれの図にお いても,壁ダミー部材ひずみ>模擬部材壁ひず み,模擬部材上梁ひずみ>梁ダミーひずみとな っている。これは,壁は上・下梁の拘束を受け, 上梁では壁の収縮による圧縮力を受けることに よる。一方これらの部材に先だって打込まれた 下梁のひずみは,上梁のひずみと一致せず小さ い。これは,下梁の材齢がある程度進み,部材 の剛性が上梁のそれよりも大きくなっているこ と,および土間の拘束により,見かけ上,収縮 が小さくなっているためと考えられる。

壁体のひずみ挙動を対象とした,逐次法およ び簡易法による解析結果について,全般に実測 値と逐次法には概ね良い一致が見られている。 一方,簡易法については,クリープによる応力 緩和の影響が次ステップの計算に取り込まれな いため,実測値を若干過大に評価する傾向があ り,特にひび割れ発生までの材齢が長い No.2 ではその影響が顕著である。ひずみ(実ひずみ - 自由ひずみ)に基づいてひび割れ発生の有無 を検討する場合,検討材齢が長期にわたるケー スでは留意が必要と考えられる。

応力(各図上部分)については直接その値を 測定していないため,逐次法との比較により検 討を行った。いずれの試験体についても逐次法 と簡易法には良い一致が見られ,No.2のように 材齢が長くなった場合においても,特に著しい 乖離は見られない。壁体の乾燥収縮応力を対象 とした本検討の範囲内において,本簡易法によ り,逐次法と同等程度の解析結果を得ることが 可能であると考えられる。



図-8 壁体のひずみ挙動・応力性状

6. まとめ

本研究を以下にまとめる。

- 簡易法は壁体のひずみを若干過大に評価し、 特に長期材齢においてはその乖離が大きく なる傾向にある。
- 2) 収縮応力について,簡易法と逐次法には概 ね良い一致が見られた。本検討の範囲内に おいて,簡易法は逐次法と概ね同程度の精 度での検証が可能であると考えられる。

「謝辞」

本研究における実験は高性能再生コンクリー ト研究会(会長 森田 司郎 (財)日本建築総合 試験所 理事長)において実施されたものであ り,実験データの使用にあたり関係諸氏の御快 諾を賜ったことに深謝いたします。

- 大野義照,鈴木計夫他:コンクリートの一軸 拘束ひび割れ試験と壁試験体の収縮拘束ひ び割れ性状,コンクリート工学年次論文報告 集,10-2,pp.261-266,1998.
- 4) 土木学会:コンクリート標準示方書「施工編」 2002.
- 5) 今本啓一他:減圧・瞬時復圧処理した再生粗 骨材コンクリートの実大模擬部材における 性状,日本建築学会構造系論文集,No.555, pp.31-36,2002.5
- 6) 今本啓一:梁部材を分割打設したコンクリート壁体の収縮変形挙動解析-1種再生粗骨材コンクリートを対象とした検証-,日本建築学会学術講演梗概集,材料施工,563-564,2002.8
- 7) CEB Comite Euro-International du Beton : CEB-FIP Model Code 1990, Final Draft ,1991.7.
- 3) 今本啓一,山本俊彦:鉄筋コンクリート部材のクリープ乾燥収縮特性(その1:コンクリートのクリープ・乾燥収縮予測式),日本建築学会東海支部研究報告,第 39 号, pp.105-108,2001.
- Neville A.M., Dilger W.H., and Brooks J.J.: Creep of Plain and Structural Concrete, Construction Press, 1983.