

論文 実地調査に基づく鉄筋コンクリート壁体の拘束度の評価に関する研究

石川 あゆこ*1・今本 啓一*2・清原 千鶴*3

要旨：鉄筋コンクリート造建築物に生じる収縮ひび割れへの関心が高まる今日、部材間の拘束を把握することは収縮ひび割れを制御する上で要諦をなすにもかかわらず、拘束度に関するデータの蓄積は十分とは言えない。本研究では、実構造物の壁および実大壁試験体の収縮ひずみを測定し、拘束度の実地調査を行なった。その結果、実測から得られた拘束度は部材の断面積比から算定した拘束度の0.4倍程度であった。さらに、この関係から得られた拘束度を適用した有効ヤング係数法によって、拘束応力を算定した結果、Step-by-step法によって算定した値に比べて若干、過大評価する傾向にあるが、概ね傾向を捉えていることが確認できた。

キーワード：収縮ひずみ、拘束度、拘束応力、有効ヤング係数法、Step-by-step法

1. はじめに

鉄筋コンクリート造建築物に生じる収縮ひび割れは耐久性や漏水抵抗性、美観に大きな影響を及ぼす要因のうちのひとつであり、コンクリートの収縮ひび割れ制御への関心が高まる中、その低減対策が進められている。この収縮ひび割れは壁や梁などの部材間の収縮ひずみの差異による拘束によって引き起こされるが、実験室レベルの収縮ひずみを測定した研究は多くあるものの、実構造物のような周囲の環境や部材間の拘束などが複合して作用する収縮ひずみの測定はあまりなされていない。さらに、実構造物における拘束度(壁部材に隣接する部材によってその自由な収縮ひずみが拘束される度合いの強さを

表す指標)を把握することは収縮ひび割れを制御する上で要諦をなすにもかかわらず、日本建築学会の「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説」¹⁾にはFEM解析で得られた拘束度の一例²⁾が紹介されているのみであり、実構造物レベルにおける十分な拘束度のデータが蓄積されていないのが現状である。そこで筆者らは、様々な実構造物の壁および壁試験体の収縮ひずみを測定し、ひずみ挙動の検討および拘束度の実地調査を行なった。そして、設計段階において拘束度を考慮した設計を可能にすることを目的とし、測定から算定した拘束度と部材の断面積比から算定した計算上の拘束度を比較し、応力算定による検討を行なった。

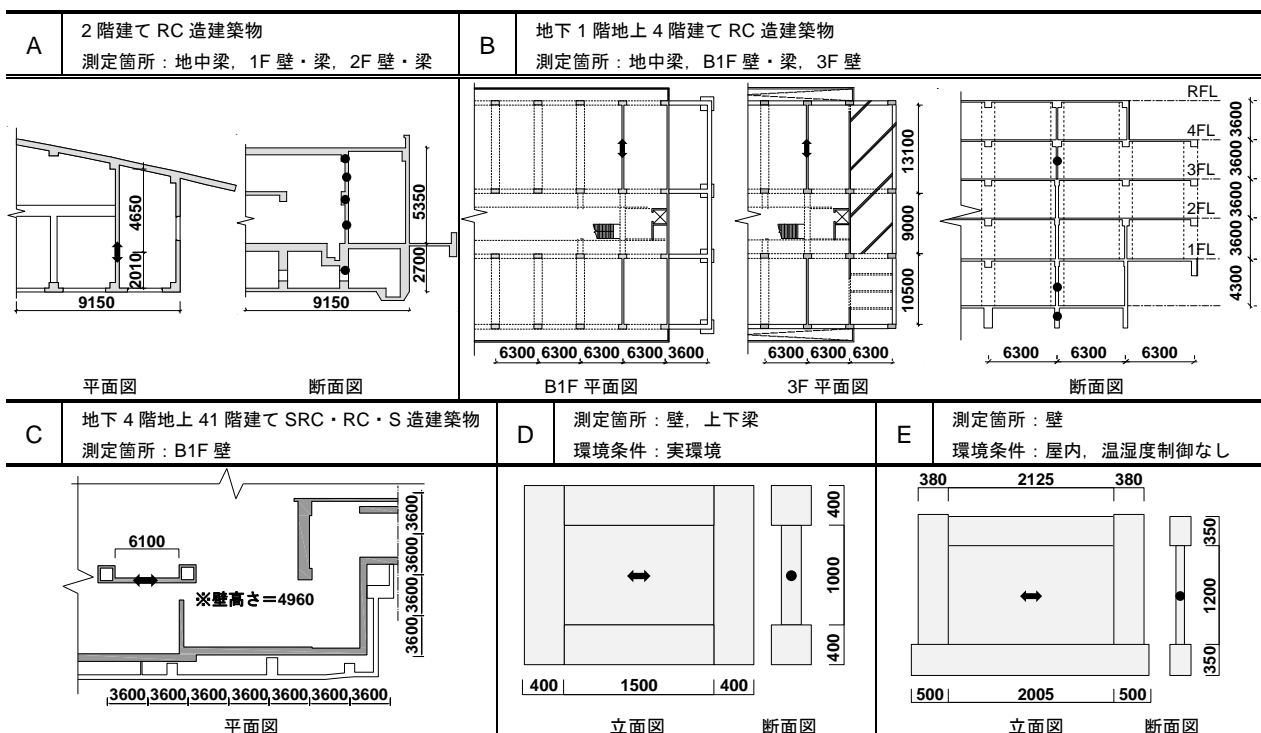


図-1 測定対象の建物の概要および図面(単位：mm, ● ←→ : ひずみゲージ設置箇所)

*1 (株)フローリック(元東京理科大学大学院工学研究科建築学専攻) 修士(工学) (正会員)
 *2 東京理科大学工学部建築学科 教授・博士(工学) (正会員)
 *3 東京理科大学工学部建築学科 補手・博士(工学) (正会員)

表-1 使用材料

記号	材料・物性(密度: g/cm ³ , 粗粒率 or 実積率: %)
A	地中梁 W: 上水道・地下水 (密度 1.00) C: 中庸熟ポルトランドセメント (密度 3.21) S1: 石灰砕砂 (表乾密度 2.71, 粗粒率 2.70) S2: 石灰砕砂 (表乾密度 2.69, 粗粒率 2.50) G1: 石灰碎石 (表乾密度 2.69, 実積率 60.0) Ad: AE 減水剤 (遅延形 I 種)
	1F 2F W: 工業用水 (密度 1.00) C: 普通ポルトランドセメント (密度 3.15) S1: 陸砂 (表乾密度 2.60, 粗粒率 2.15) S2: 砕砂 (表乾密度 2.63, 粗粒率 3.05) G1: 砕石 (表乾密度 2.70, 実積率 61.0) G2: 砕石 (表乾密度 2.70, 実積率 61.0) Ad: 高性能 AE 減水剤 (標準形 I 種)
B	地中梁 W: 地下水 (密度 1.00) C: 普通ポルトランドセメント (密度: 3.16) S1: 山砂 (表乾密度 2.64, 粗粒率 2.50) S2: 砕砂 (表乾密度 2.65, 粗粒率 3.00) G1: 砕石 (表乾密度 2.66, 実積率 60.0) G2: 砕石 (表乾密度 2.66, 実積率 60.0) Ad: 高性能 AE 減水剤 (標準形 I 種)
	B1F 3F W: 地下水 (密度 1.00) C: 普通ポルトランドセメント (密度 3.16) S1: 山砂 (表乾密度 2.64, 粗粒率 2.50) S2: 砕砂 (表乾密度 2.65 粗粒率 3.00) G1: 砕石 (表乾密度 2.66, 実積率 60.0) G2: 砕石 (表乾密度 2.70, 実積率 60.0) Ad: 高性能 AE 減水剤 (標準形 I 種)
C	B1F W: 工業用水 (密度 1.00) C: 普通ポルトランドセメント (密度 3.15) S1: 海砂 (密度: 2.57, 粗粒率 2.70) G1: 砕石 (表乾密度 2.70, 実積率 58.0) Ad: 高性能 AE 減水剤 (標準形 I 種)
D	W: 水道水 (密度 1.00) C: 普通ポルトランドセメント (密度 3.15) S1: 砕砂 (表乾密度 2.58, 粗粒率 3.02) S2: 石灰砕砂 (表乾密度 2.67, 粗粒率 3.57) S3: 山砂 (表乾密度 2.60, 粗粒率 1.58) G1: 砕石 (表乾密度 2.61, 実積率 60.4) G2: 石灰砕石 (表乾密度 2.69, 実積率 61.0) Ad: AE 減水剤
	E W: 地下水 (密度 1.00) C: 普通ポルトランドセメント (密度 3.15) S1: 山砂 (表乾密度 2.56, 粗粒率 2.80) G1: 砂利 (表乾密度 2.61, 実積率 62.0) Ad: 高性能 AE 減水剤 (標準形 I 種)

2. 測定概要

測温機能付き埋め込み型ひずみゲージを部材の中心部に水平方向に埋設することにより、打設直後からのコンクリートの収縮ひずみを測定した。本研究では、3 件の実構造物 (A,B,C) および 2 件の壁試験体 (D,E) を測定対象とした。図-1 に測定対象の実構造物・壁試験体の概要および図面、表-1 に打設したコンクリートの使用材料、表-2 に計画調合、フレッシュ性状および材齢 28 日の圧縮強度、表-3 に部材の断面形状および配筋を示す。実構造物および壁試験体の測定に併せて、壁部材については周辺部材からの拘束を受けない状態でのコンクリートの自由収縮ひずみを測定するため、壁部材と同一の断面形状および配筋のダミー試験体を作製した。同一のコンクリートを打設し、型枠脱型時期も合わせた。さらに、壁部材と同様の乾燥条件にするために乾燥面以外の 4 面をアルミ箔テープでシールした。壁部材付近に静置し、収縮ひずみを測定した。

表-3 (a) 断面形状および配筋(壁)

記号	壁厚 (mm)	配筋	
		縦筋	横筋
A	1F 壁	200	D13@200 ダブル D13@200 ダブル
	2F 壁	200	D13@200 ダブル D13@200 ダブル
B	B1F 壁	300	D16@150 D16@150
	3F 壁	200	D13@150 D13@150
C	B1F 壁	400	D16@150 ダブル D16@150 ダブル
D	壁	200	D10@200 ダブル D10@200 ダブル
E	壁	100	D6@150 ダブル D6@150 ダブル

表-3 (b) 断面形状および配筋(梁)

記号	梁せい (mm)	梁幅 (mm)	配筋			
			主筋	腹筋	スターラップ	
A	地中梁	2500	500	12-D29	16-D13	D13@200
	1F 梁	800	350	6-D22	4-D13	D13@200
	2F 梁	800	350	6-D22	4-D13	D13@200
B	地中梁	2000	450	8-D29	8-D13	2-D13@200
	B1F 梁	650	400	6-D29	2-D13	2-D13@200
	3F 梁	650	800	8-D29	2-D13	2-D13@150
C	B1F 梁	1500	1000	8-D29	8-D10	D13@200 BH-900×600×16×36mm
D	上下梁	400	400	8-D19	—	D10@200
E	上下梁	350	250	8-D22	—	D10@100

表-2 計画調合, フレッシュ性状および材齢 28 日圧縮強度

記号	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)									SL (cm)	Air (%)	F _{C28} (N/mm ²)
			W	C	S1	S2	S3	G1	G2	Ad				
A	地中梁	54.5	50.1	176	323	275	643	—	912	—	2.91	17.5	4.1	27.0*
	1F/2F	60.0	48.0	175	292	429	434	—	675	289	2.92	18.8	3.6	32.0
B	地中梁	50.7	47.0	170	336	674	168	—	483	482	3.02	18.0*	4.5*	33.3
	B1F/3F	44.1	49.1	174	395	680	170	—	448	447	4.15	21.0*	4.5*	48.4
C	B1F	44.0	49.0	185	420	802	—	—	878	—	3.61	21.0	4.7	42.9
D		61.0	48.4	182	298	427	141	255	459	471	3.28	18.0	5.3	28.7
E		50.5	50.8	185	366	850	—	—	840	—	3.29	20.5	5.1	41.2

W: 水
C: セメント
S: 細骨材
G: 粗骨材
Ad: 混和剤
*は目標値

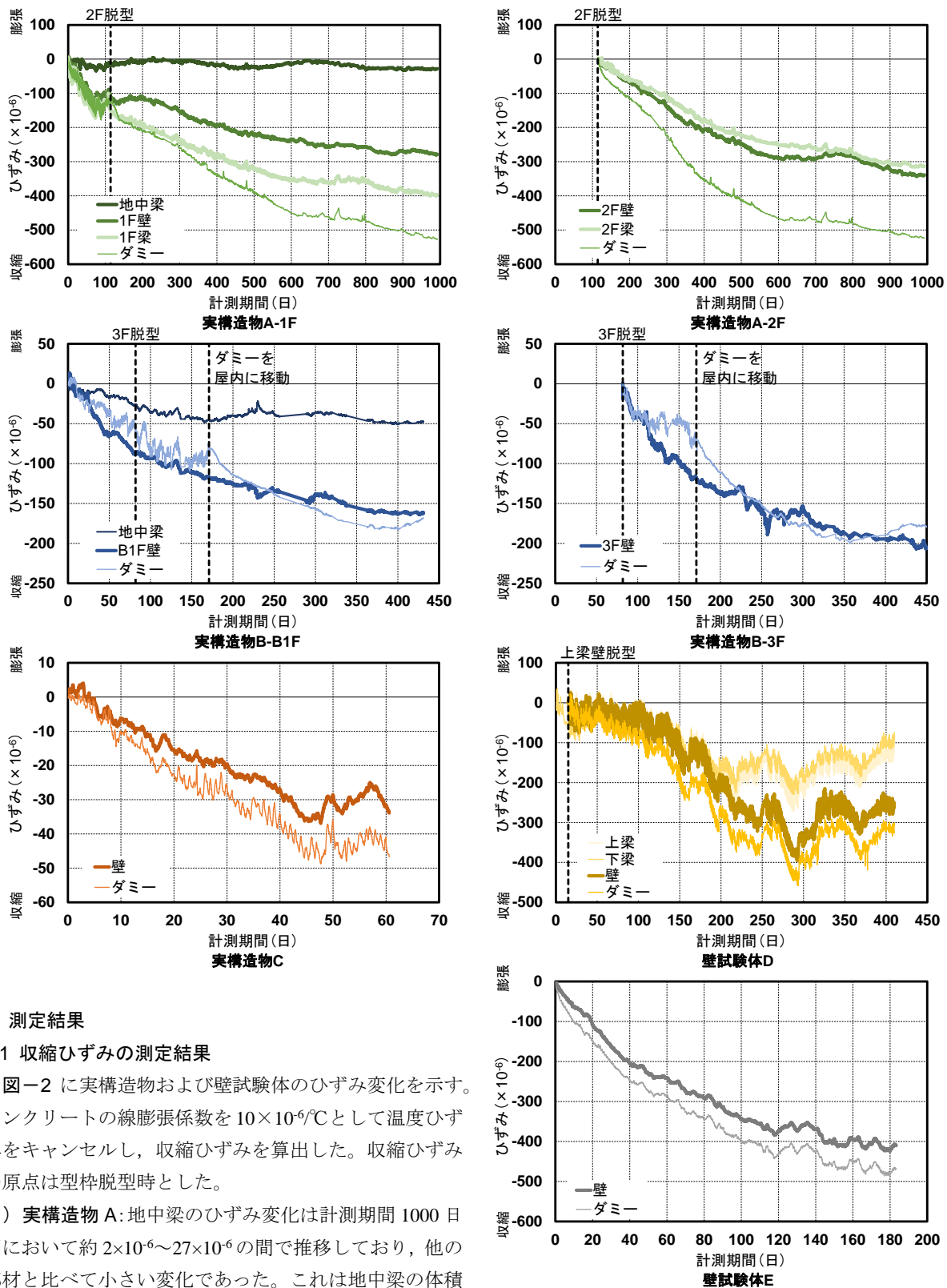


図-2 実構造物および壁試験体のひずみ変化

3. 測定結果

3.1 収縮ひずみの測定結果

図-2 に実構造物および壁試験体のひずみ変化を示す。コンクリートの線膨張係数を $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ として温度ひずみをキャンセルし、収縮ひずみを算出した。収縮ひずみの原点は型枠脱型時とした。

- (1) 実構造物 A: 地中梁のひずみ変化は計測期間 1000 日間において約 2×10^{-6} ~ 27×10^{-6} の間で推移しており、他の部材と比べて小さい変化であった。これは地中梁の体積表面積比が大きいことによるものと考えられるが、これによって 1F 壁は拘束され、2F 壁と比べて小さい収縮量であった。1F 壁については、型枠脱型後は降雨の影響を受け、一日のひずみ変化が大きく変動しているが、上層階打設以降は緩やかに収縮ひずみが進行している。
- (2) 実構造物 B: 実構造物 B も同様に地中梁のひずみ変化は小さい。さらに B1F 壁と比べて地中梁からの拘束

- が小さく、体積表面積比が小さい 3F 壁の収縮ひずみが大きい。これは実構造物 A と同様の傾向であった。
- (3) 実構造物 C: 逆打ち工法であるため、上層階が既に打設されている。そのため、降雨の影響を受けない比較的安定した環境下であることから収縮ひずみが緩やかに

進行している。また、その収縮量は体積表面積比が大きいため非常に小さい。壁の一日のひずみ変化は周辺部材からの拘束を受け、ダミー試験体と比べて小さいものとなっている。

(4) 壁試験体 D：雨がかかる実環境に曝露されているため、一日の気温変化や降雨などに強く影響を受けていることが収縮ひずみの変動の大きさから分かる。さらに、計測期間 200 日以前は体積表面積比の大きさにかかわらず、壁のひずみ変化は上下梁とほぼ同程度である。しかし、それ以降は壁の収縮がダミー試験体のひずみ変化と似た変化をしている。壁に貫通ひび割れが同時期に確認できたことから、ひび割れによって周辺部材からの拘束が緩和されたと考えられる。

(5) 壁試験体 E：雨がかからない屋内に曝露されているため、緩やかに収縮ひずみが進行している。さらに、壁の体積表面積比が他の壁と比べて小さいため収縮量が大きい。

3.2 拘束度の算出

拘束度は以下の 2 つの式により算出した。

$$\text{実測拘束度} = \frac{\text{自由ひずみ} - \text{実ひずみ}}{\text{自由ひずみ}} \quad (1)$$

$$\text{計算拘束度} = \frac{\text{拘束材の断面積(上下梁)}}{\text{全部材の断面積(上下梁+壁)}} \quad (2)$$

式(1)は実構造物のひずみの測定結果に基づく拘束度(実測値)であり、式(2)は対象とする部材とその収縮を拘束する上下梁部材の諸元から拘束度(計算値)を算出するものである³⁾。一例として図-3に実構造物 A の拘束度の算出結果を示す。式(1)より求められる実測拘束度は計測期間 150 日までは大きく変動するが、それ以降は収束し、計測期間 200 日以降の 1F 壁および 2F 壁の拘束度はそれぞれ 0.42, 0.39 であった。一方、式(2)より求められる計算拘束度は、それぞれ 0.78, 0.62 であり、実測値よりも大きい値を示した。その理由として、壁部材を拘束する梁部材に取りつくスラブや壁部材の収縮の影響によって実測拘束度が小さい値を示したと考えられる。他の

測定対象の壁も同様に実測値および計算値の拘束度を算出し、比較したものを図-4 に示す。図中には既往の研究^{4)~10)}の拘束度も併せて載せている。すべての測定結果で計算値は実測値よりも大きい拘束度を示しており、両者の関係は以下のように概ね示すことができる。

$$\text{平均値： 実測値} = 0.44 \times \text{計算値} \quad (3)$$

$$\text{上限値： 実測値} = 0.66 \times \text{計算値} \quad (4)$$

4. 拘束応力による検証

4.1 算定方法

Step-by-step 法および有効ヤング係数法により壁に生じる拘束応力を算定した。

(1) Step-by-step 法¹¹⁾

$$\sigma(t_{i+1/2}) = \frac{1}{J(t_{i+1/2}, t_i)} \{ \varepsilon(t_{i+1/2}) - \varepsilon_e(t_{i-1/2}) - \varepsilon_f(t_{i+1/2}) \} \quad (5)$$

$$J(t_{i+1/2}, t_i) = \frac{1}{E(t_i)} + \frac{\phi(t_{i+1/2}, t_i)}{E_{28}} \quad (6)$$

$$\varepsilon_e(t_{i-1/2}) = \sum_{j=1}^i \Delta\sigma(t_j) J(t_{i+1/2}, t_j) - J(t_{i+1/2}, t_i) \sigma(t_{i-1/2}) \quad (7)$$

(2) 有効ヤング係数法¹⁾

$$\sigma(t_{i+1/2}) = \sum_{j=1}^i \frac{E(t_j)}{1 + \phi(t_{i+1/2}, t_j)} \lambda(t_j) \Delta\varepsilon_f(t_j) \quad (8)$$

ここに、

$\sigma(t_{i+1/2})$: ステップ $t_{i+1/2}$ における拘束応力

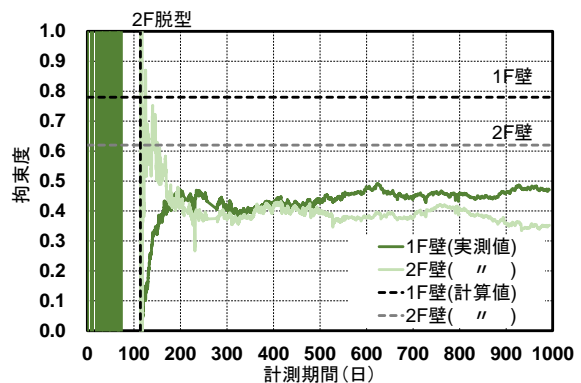


図-3 実構造物 A の拘束度の変化

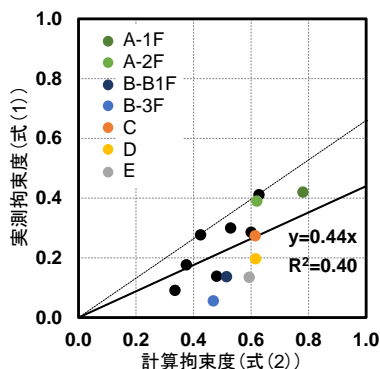


図-4 計算値と実測値の比較

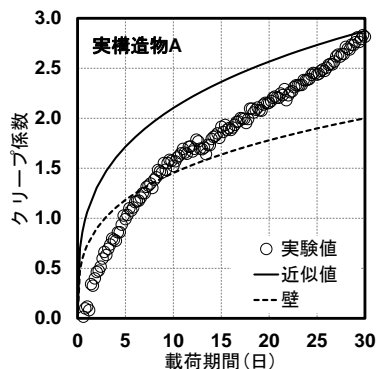


図-5 クリープ係数の近似

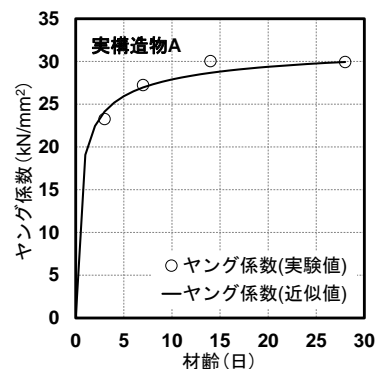
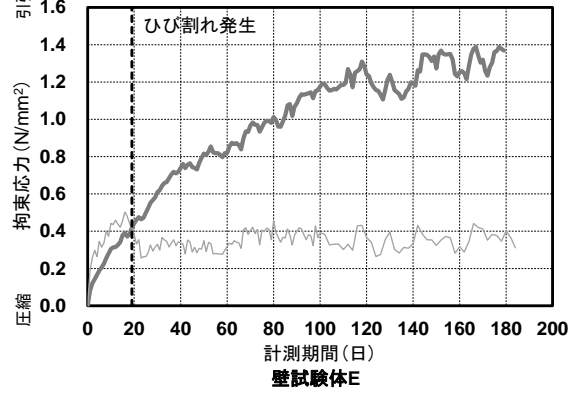
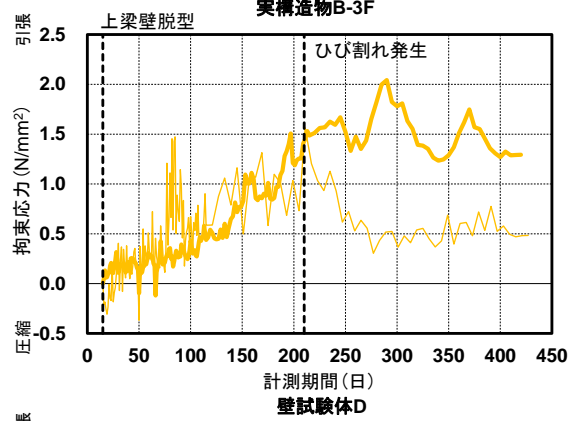
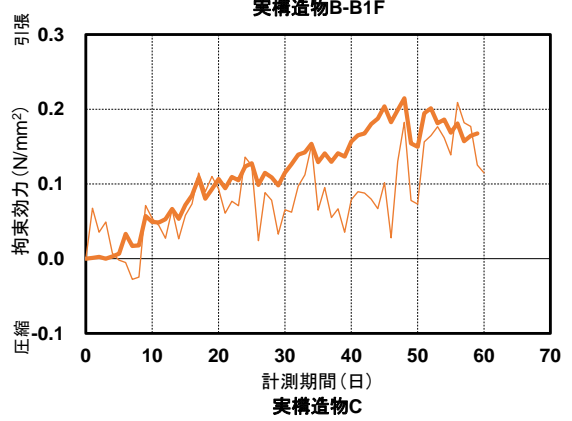
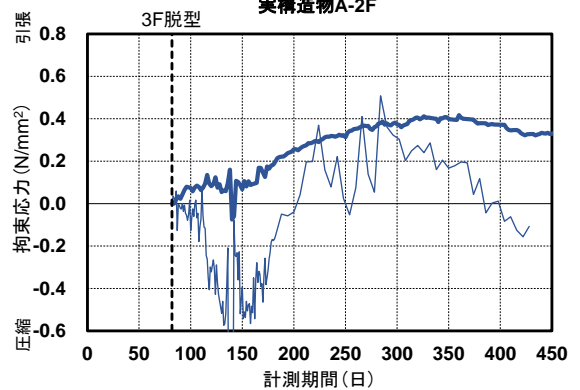
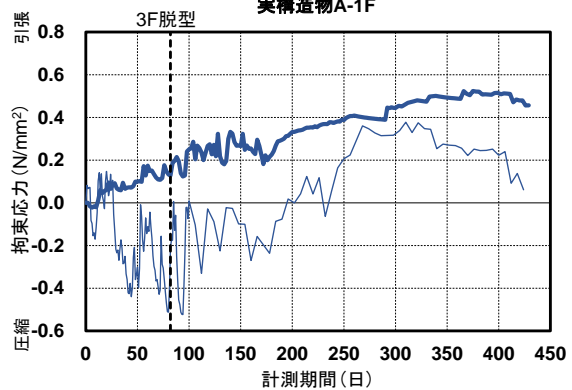
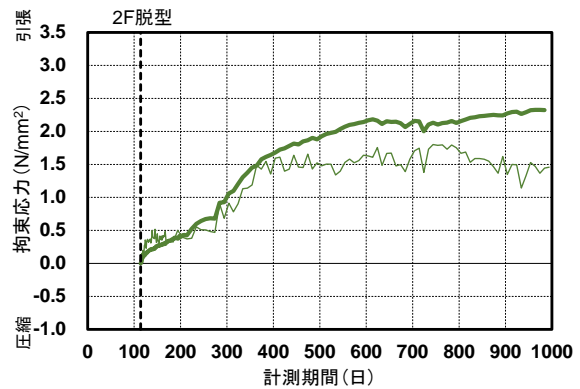
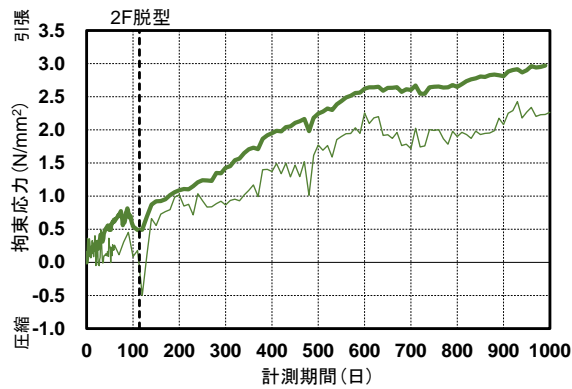


図-6 ヤング係数の近似



- $\varepsilon(t_{i+1/2})$: ステップ $t_{i+1/2}$ における実ひずみ
- $\varepsilon_e(t_{i+1/2})$: ステップ $t_{i+1/2}$ における弾性ひずみ
- $\varepsilon_f(t_{i+1/2})$: ステップ $t_{i+1/2}$ における自由ひずみ
- $\phi(t_{i+1/2}, t_j)$: ステップ t_j で荷したステップ $t_{i+1/2}$ におけるクリープ係数
- $E(t_i)$: ステップ $t_{i+1/2}$ におけるヤング係数
- E_{28} : 材齢 28 日のヤング係数
- $\lambda(t_j)$: ステップ t_j における拘束度

4.2 材料物性

上記の適用にあたり、前提条件は以下のとおりとした。

- (1) 実ひずみ : 図-2 中の壁のひずみ
- (2) 自由ひずみ : 図-2 中のダミー試験体のひずみ
- (3) クリープ係数 : 一軸拘束試験結果より得られたクリープ係数を下式によって抽出した。

$$\phi = \varepsilon_{cr} \cdot E_{28} / \sigma_c \quad (9)$$

$$\varepsilon_{cr} = \varepsilon_f - \varepsilon_a - \varepsilon_e \quad (10)$$

図-7 拘束応力算定結果

(太線 : 有効ヤング係数法, 細線 : Step-by-step 法)

ここに,

- ε_{cr} : クリープひずみ
- ε_f : 乾燥収縮ひずみ
- ε_e : 弾性ひずみ = 拘束応力 / 同材齢のヤング係数
- σ_c : 載荷応力度
- ε_a : 実ひずみ

抽出したクリープ係数を CEB-FIP Model Code 1990¹²⁾を用いて近似し、壁の仮想部材厚 h ($h=2A_c/u$, A_c : 部材断面積, u : 部材の外気に接する部分の長さ) を考慮したものを使用した。一軸拘束試験¹³⁾とは拘束度を 0 から 1 の範囲で継続して制御し、ロードセルより試験体に生じる拘束応力を直接、測定する試験である。一例を図-5 に示す。なお、壁試験体 E に対しては一軸拘束試験を行っていないため、CEB-FIP Model Code 1990¹²⁾によりクリープ係数を予測し、壁の仮想部材厚を考慮した。

(4) ヤング係数: 圧縮強度試験 (JIS A 1108) より得られたヤング係数の経時変化を CEB-FIP Model Code 1990¹²⁾によって近似した結果を用いた。一例を図-6 に示す。

(5) 拘束度: 式(2)より算出した計算値の拘束度を式(3)に適用し予測した。一定値とした。

4.3 算定結果

図-7 に算定結果を示す。有効ヤング係数法によって求めた拘束応力は Step-by-step 法によって求めたものと比べ、過大評価する結果となった。これは、クリープによる各ステップで発生した拘束応力の減少を考慮している Step-by-step 法に対して、有効ヤング係数法は自由ひずみ×拘束度に有効ヤング係数を適用して拘束応力を求めているためである。Step-by-step 法によって算定した拘束応力 (y) と有効ヤング係数法によって算定した拘束応力 (x) を比較したものを図-8 に示す。なお、壁試験体 D および E についてはひび割れ発生までの値を載せている。上述したように、有効ヤング係数法は拘束応力を過大評価するが、両者の間には相関関係が見られた ($y=0.74x$)。この 0.74 という値は、文献 14) ($y=0.78x$) とも概ね整合している。部材の断面積比によって算出した拘束度を適用した有効ヤング係数法は 0.74 倍することで Step-by-step 法による応力算定結果と同程度の拘束応力が得られると考えられる。

5. まとめ

実構造物の壁および実大壁試験体の収縮ひずみの測定により算定した拘束度と部材の断面積比によって算定した計算上の拘束度の関係を示した。さらに、その関係から拘束度を予測し、壁に生じる拘束応力を算定した。得られた知見を以下に示す。

- 1) 部材の断面積比により算定した計算値としての拘束度は収縮ひずみの測定により算定した実測値としての拘束度よりも大きい値であった。平均として、計算値を 0.44 倍すれば概ね実測値になることが分かった。
- 2) 有効ヤング係数法による応力算定の結果は Step-by-step 法によるものよりも拘束応力を大きく評価する結果であったが、両者の間には相関関係が見られ、有効ヤング係数法によって算定した拘束応力に 0.74 倍

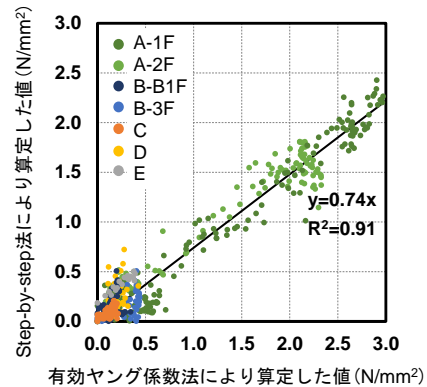


図-8 算定結果の比較

することでより実構造物に近い拘束応力を求めることができる。

謝辞

本研究を実施するにあたり、(株)八洋コンサルタント: 田中章夫氏、(株)浅沼組技術研究所の関係各位に多大なるご助力を賜りました。ここに付して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, 2006.2
- 2) 鈴木計夫・大野義照・清水久博: コンクリートの乾燥収縮ひび割れ発生に関するモデル架構の拘束率, 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.5-8, 1989
- 3) 服部高重, 並木哲, 福島順一, 宮崎直志: RC 壁のひびわれ制御の一設計方法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, 1995.
- 4) 今本啓一: 各種コンクリート壁体の収縮挙動, 日本建築学会構造系論文集, vol.568, pp.15-20, 2003.6
- 5) 鈴木計夫・大野義照・三浦義礼: コンクリートの一軸拘束ひびわれ試験と壁試験体の収縮拘束ひびわれ性状, コンクリート工学年次論文報告集, vol.10 (2), pp.261-266, 1988.6
- 6) 崔亨吉・辻埜真人・野口貴文・北垣亮馬: 膨張コンクリートの実構造物への適用およびひび割れ抑制効果, セメント・コンクリート論文集, vol.67 (1), pp.282-289, 2013
- 7) 小柳光生・武田寿一・中根淳・永井康淑: 外壁に作用する乾燥収縮応力に関する一考察, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.693-694, 1986.8
- 8) 服部高重・山本康弘・最上達雄・根井浩: 鉄筋コンクリート構造物の乾燥収縮量の実測, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.77-78, 1980.9
- 9) 小笠原和博・坪内信朗・渡辺博司・太刀川丈爾・山崎健一: 実大試験体におけるタイル張り壁面の挙動に関する研究その 3, 日本建築学会学術講演梗概集, pp.1051-1052, 1996.9
- 10) 中西正俊: 実大試験体によるコンクリートの長さ変化と気象条件との関係, 日本建築学会論文報告集, vol.183, pp.1-10, 1971.5
- 11) 日本コンクリート工学協会: 自己収縮委員会報告書, 1996
- 12) CEB-FIP Model Code 1990, Thomas Telford
- 13) 濱永康仁, 佐藤嘉昭, 上田賢司, 清原千鶴, 大谷俊浩: ひずみ制御機能を備えたコンクリートの収縮ひび割れ試験装置の開発, 日本建築学会構造系論文集, No.616, pp.1-7, 2007
- 14) 佐藤良一, 丸山一平: 収縮ひび割れの予測と制御のあるべき姿, コンクリート工学, 2005.