

論文 RC 造壁の乾燥収縮ひび割れ本数算定のための拘束度評価

尹 重建^{*1}・岸本 一蔵^{*2}・大野 義照^{*3}

要旨：文献 1 で提案されている RC 造壁を対象とした収縮ひび割れ算定式に用いる拘束度を求めることを目的に、スパン長、壁高さ、壁厚さ、階数、スパン数をパラメータとした弾性 FEM 解析を行った。さらに、解析結果から上記の諸要因をパラメータとした拘束度算定式を提案した。同拘束度算定式から求めた拘束度と、同拘束度を用いて求めた収縮ひび割れ本数や幅を弾性 FEM 解析結果と比較し、同拘束度算定式が RC 造壁の拘束度を精度よく評価していることを確認した。

キーワード：RC 造壁の拘束度，乾燥収縮，弾性 FEM 解析，拘束度算定式，収縮ひび割れ算定式

1. はじめに

地球環境保全，とりわけ CO₂ 削減という社会的要請から，建築物のスクラップ・アンド・ビルドを見直し，より長期にわたって建物を使用することが要求されている。鉄筋コンクリート(以下 RC)構造物の場合，構造的寿命はひび割れと，それに伴う鉄筋腐食に大きく影響されるが，地震被害を除けばひび割れの主要因は一般的にコンクリートの乾燥収縮である。従って，収縮ひび割れを予測し，制御しようとする様々な研究が行われており，筆者等は RC 壁の乾燥収縮ひび割れ幅や本数を簡易に算定できる算定式を提案した¹⁾。

同算定式は鉄筋比，拘束度，鉄筋径，コンクリート強度，収縮量，クリープ係数及び部材長などの多くの要因の影響を評価することが可能であり，従来の収縮ひび割れ予測式に比べ計算量が極めて少ない特長を有している。しかしながら，同式中に用いられる拘束度(収縮しようとする RC 壁が周りの梁や柱により拘束される程度：論文中に解説)については明確な値が定められていない。

本研究では RC 造壁を対象として FEM 解析を行うことで，コンクリート強度，スパン長，壁高さ，壁厚さ，階数，スパン数の拘束度に及ぼす影響を検討し，そこからひび割れ本数算定式に用いる RC 造壁の拘束度算定式を提案する。

2. 収縮ひび割れ算定式と拘束度の定義

筆者等が文献 1 において提案したコンクリート部材の収縮ひび割れ幅(W)と本数(n)の算定式を以下に示す。同算定式では，鉄筋比，鉄筋径，コンクリート強度，拘束度，乾燥収縮，クリープ係数及び壁長が収縮ひび割れ本数に影響を及ぼす因子として考慮されている。

$$W = (0.0018f_c + 0.048) \cdot P_t^{-1.79} \cdot K \quad (1)$$

$$n = K_{P_t} \cdot K_L \cdot K_{f_c} \cdot K_{sh} \cdot K_{\phi} \cdot K_R \cdot K_D \cdot n_0 \quad (2)$$

K：1.00(D10 の場合) / 1.33(D13 の場合)

n₀：乾燥収縮 600 μ のときのひび割れ本数(n₀=2.1)

K_{P_t}：鉄筋比(P_t)のひび割れ本数への影響を表す係数

$$(K_{P_t}=4.69P_t-0.787)$$

K_L：壁長(L)のひび割れ本数への影響を表す係数

$$(K_L=0.16L+0.027)$$

K_{f_c}：コンクリート強度(f_c)のひび割れ本数への影響を表す

$$\text{係数 } (K_{f_c}=-0.02f_c+1.53)$$

K_{sh}：乾燥収縮(sh)のひび割れ本数への影響を表す係数

$$(K_{sh}=0.003 \text{ sh}-0.82)$$

K：クリープ係数()のひび割れ本数への影響を表す

$$\text{係数 } (K = -0.36 \text{ +} 1.52)$$

K_R：拘束度(R)のひび割れ本数への影響を表す係数

$$(K_R=3.62R-0.82)$$

K_D：鉄筋径(D)のひび割れ本数への影響を表す係数

$$(D10 \text{ の場合 } 1.00 \quad D13 \text{ の場合 } 0.76)$$

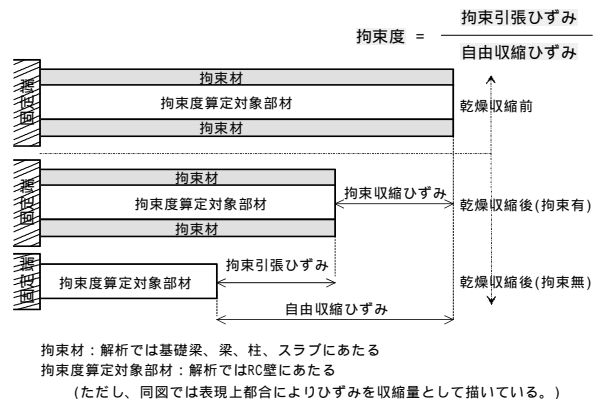


図 - 1 拘束度の定義

*1 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 大学院生 (正会員)

*2 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 准教授 工博 (正会員)

*3 大阪大学先端科学イノベーションセンター 特任教授 工博

ここで拘束度とは、自由に収縮しようとする部材が外部から受ける拘束の程度を表し、図-1のように拘束度 = 「対象物が拘束を受ける場合に発生するひずみ（以下拘束収縮ひずみ）」 / 「拘束を受けない場合に発生するひずみ（以下自由収縮ひずみ）」と定義される。従って、対象物に作用する拘束が大きい程その値は1に、逆に拘束程度が弱いほど0に近づく。

3. 解析手法および解析条件

3.1 検討方針

RC 壁の収縮ひび割れは、壁、柱、梁、基礎梁、スラブなどの各部材の収縮量の差が原因で発生する。つまり相対的に収縮量の小さい部材は、収縮量の大きい部材を拘束することになる（収縮量の大きい部材では引張力が、小さい部材では圧縮力が発生する）。そこで乾燥収縮による縮みが発生する状況を弾性 FEM 解析により求め、壁に発生する拘束度の値を求めた。

検討の対象は、柱、梁（基礎梁を含む）、スラブと壁で構成される RC 構造体(図-2)である。拘束度に影響を及ぼす要因としてスパン長、壁高さ、壁厚さ、階数及びスパン数を採用した。なお、壁に発生するひび割れは壁の壁面縦方向のものが主であることから、拘束度（乾燥収縮量）は壁面の水平方向の値について検討している。

解析は汎用 FEM 解析ソフト FINAL³⁾により行った。なお同ソフトでは、直接乾燥収縮ひずみを解析することができないことから、各部材の温度を変化させることにより、乾燥収縮により発生するひずみ（縦方向のひび割れを対象としているため、横方向の乾燥収縮ひずみのみを考慮した値）と同等量のひずみを発生させて解析した。

3.2 解析条件

(1) 各部材の乾燥収縮の条件

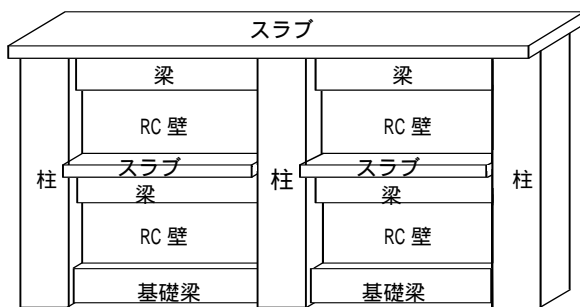


図-2 RC 構造体 2階・1スパンの例

表-1 コンクリート調合条件

W/C	単位質量(kg/mm ³)			
	W	C	S	G
55%	180	327	803	982

記号については式(3)中の説明参照

表-2 乾燥収縮量算定対象モデルの諸条件と算定値

	h(%)	V(mm ³)	S(mm ²)	t(日)	1, 2, 3	sh(μ)
壁	60	2.48 × 10 ⁹	3.30 × 10 ⁷	3650	1	788
梁	60	1.25 × 10 ⁹	8.25 × 10 ⁶	3650	1	703
スラブ	60	1.86 × 10 ⁹	1.64 × 10 ⁷	3650	1	746

記号については式(3)中の説明参照

以下に解析に用いた各部材の乾燥収縮量（部材が自由体である場合の乾燥収縮量）について示す。表-1はコンクリートの調合条件であり、この条件および表-2中の条件を用いて式(3)により乾燥収縮量を求める。表-2に1階・1スパンの基準モデルの算定例を示す。

- ・ 周囲の相対湿度(60%)、部材断面形状・寸法、コンクリートの材料調合や材齢等の影響を考慮して、次式により求める値とした。ここで材齢は10年とした。

$$\varepsilon_{sh}(t, t_0) = K \cdot t_0^{-0.08} \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{h}{100} \right)^3 \right\} \cdot \left\{ \frac{t - t_0}{0.16 \cdot \left(\frac{V}{S} \right)^{1.8} + (t - t_0)} \right\}^{1.4 \left(\frac{V}{S} \right)^{-0.18}} \quad (3)$$

$$K = (11 \cdot W - 1.0 \cdot C - 0.82 \cdot G + 404) \cdot \gamma_1 \cdot \gamma_2 \cdot \gamma_3$$

($\varepsilon_{sh}(t, t_0)$: 乾燥開始材齢 t_0 日における材齢 t 日の収縮ひずみ(×10⁻⁶), W: 単位水量(kg/m³), C: 単位セメント量(kg/m³), G: 単位粗骨材量(kg/m³), h: 相対湿度(%), V: 体積(mm³), S: 外気に接する表面積(mm²), $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3$: それぞれ、骨材の種類の影響, セメントの種類の影響, 混和材の種類の影響を表す修正係数²⁾)

- ・ 柱：柱は壁に比べ横幅が小さくその横方向の乾燥収縮量は無視できる程度である。また本研究では RC 壁の縦方向の収縮ひび割れを対象としたため、柱の縦方向での乾燥収縮は拘束度に影響が少ない。従って柱の乾燥収縮は無いと仮定した。
- ・ 基礎梁：基礎梁は大気に接する面積が極めて小さいため、乾燥収縮はないとした。また基礎梁には杭が接続することから基礎梁底面は不動とした。

(2) パラメータ

解析対象は通常の RC 造共同住宅を想定しており、各パラメータの水準を表-3のように設定した。また、鉄筋比、ヤング係数、クリープ係数、梁の断面、スラブ厚さについては全てのモデルで共通とし、同じく表-3に示すものとした。1階、1スパンで同表の網掛けの値を用いたものを基準モデル(図-3に示す)とした。解析時の壁要素寸法は、弾性 FEM 解析結果に寸法による影響が無いことを確認したうえで 500mm とした。

- ・ 鉄筋比：壁断面に較べ鉄筋の剛性は小さいことから解析では無視した。
- ・ ヤング係数、クリープ係数：既往の研究⁴⁾から時間変化に伴う拘束度の変化はないことが示されている

表 - 3 解析モデル条件

パラメータ	記号	水準	
スパン数	n	1, 2, 3, 4, 5, 6	
スパン長		6, 6.5, 7, 7.5, 8, 8.5, 9 (m)	
層数	s	1, 2, 3, 4, 5	
壁	壁高さ	h	3, 3.2, 3.4, 3.6, 3.8, 4 (m)
	壁厚さ	t	15, 16, 17, 18, 19, 20 (cm)
共通事項		水準	
拘束材断面 (mm × mm)	柱	500 × 500	
	梁	350 × 650	
	基礎梁	400 × 1000	
	スラブ	(スパン長 × 0.2 + 350) × 200 ⁴⁾	
鉄筋比	壁	0.25%	
	柱	1.5%	
	梁	1.4%	
	基礎梁	1%	
	スラブ	0.25%	
コンクリート	ヤング係数	2.1×10^4	
	強度	21N/mm ²	
鉄筋	ヤング係数	2.1×10^5	
	種類	SD295	

る。従って、ヤング係数はすべての部材で一定と仮定した。また、弾性解析であるため、クリープ係数は考慮しなかった。

4 解析結果と拘束度算定式の誘導

4.1 拘束度の算定方法について

図 - 3 に基準モデルの解析結果（壁を分割した要素毎の値）を示す。

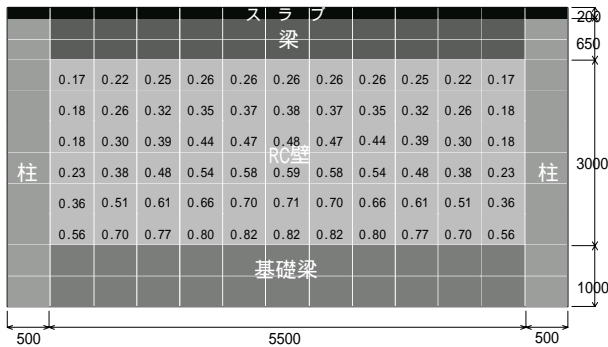


図 - 3 基準 RC 壁モデル形状と拘束度分布

これによると拘束度の垂直方向の分布は、乾燥収縮がなくかつ大断面である基礎梁の存在する壁の下側位置で高く、壁の上方向に向かうほど小さくなっている。また、水平方向の分布では壁の両側では小さく、中央部で高くなっていることが分かる。このように、拘束度は1枚の壁内の各所で異なるが、これらの値からどのように式(1)に用いる拘束度を定めるのかについては知見がない。そこで本論文ではこれらの値の総和・平均の値を該当壁の拘束度とした。これは、(1) 壁にひび割れが入ることにより、壁全体の水平方向の拘束度は平均化されていくこと、(2) 鉛直方向でみると拘束度の最も高い基礎

梁直上の壁では（通常最も拘束度の高い箇所ではひび割れが発生すると考えるが）、ひび割れが発生できず、同箇所よりも拘束度の小さい上部に存在する箇所ではひび割れが発生すること等を考えると、同算定法（総和・平均による算定）で壁の拘束度を表すことが実際の状態を大きく逸脱することはないと考える。

4.2 各種要因の拘束度に及ぼす影響

図 - 4 ~ 10 に、スパン長、壁高さ、壁厚さ、階数及びスパン数の拘束度に及ぼす影響程度を示す。これらは、同図によれば各影響要因は次のようになる。

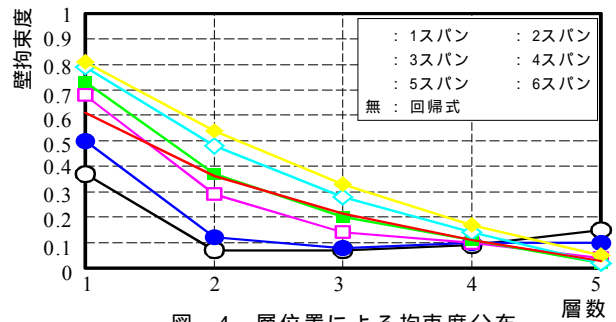


図 - 4 層位置による拘束度分布

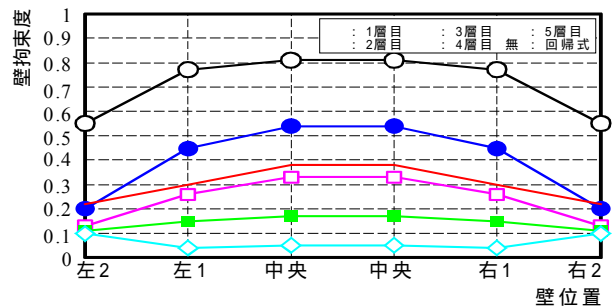


図 - 5 スパン位置による拘束度分布

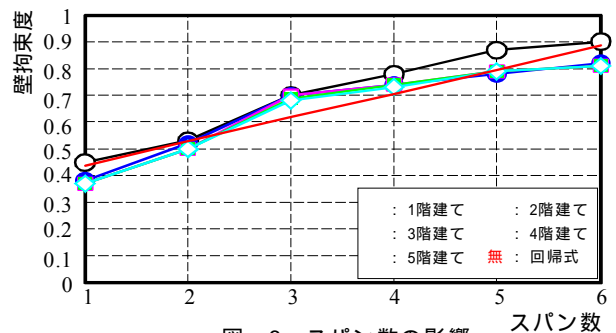


図 - 6 スパン数の影響

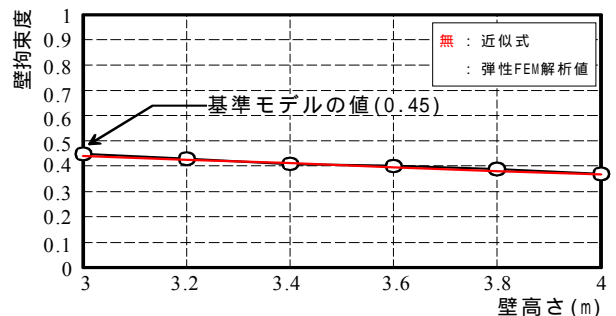


図 - 7 壁高さの影響

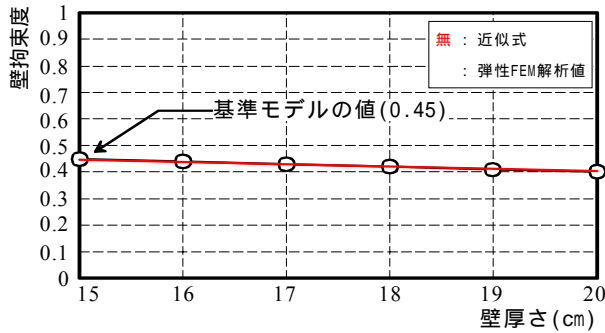


図 - 8 壁厚さの影響

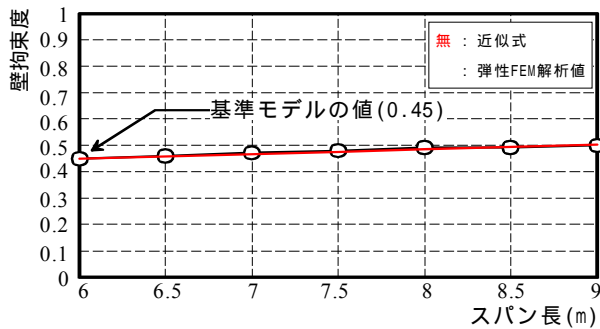


図 - 9 スパン長の影響

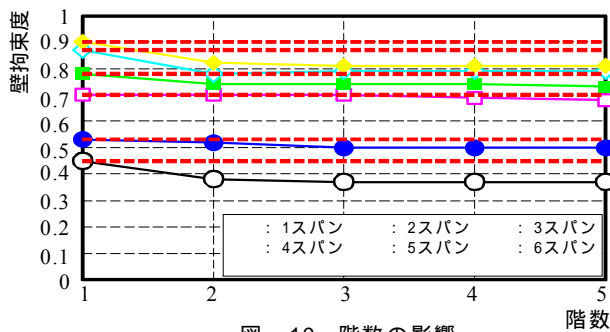


図 - 10 階数の影響

(1) 層位置による違い

図 - 4 に同じ階数をもつ建物内 (5 階建て 1~6 スパンをもつモデル) での層位置が違う場合の拘束度を示す (建物中央位置のスパンの壁の値)。同図より、いずれのスパン数の建物でも上層ほど拘束度は小さくなる傾向にある。拘束度はスパン数が多いモデルほど大きい。上層へ行くほど小さくなる程度 (例えば、1 層 2 層での傾き) はいずれのモデルでもほぼ等しいと見なすことができる。従って、この傾向を次式で表した。

$$K(s) = -0.361 \cdot \ln(s) + Y \quad (4)$$

Y の値は、スパン数により異なる。

(K: RC 壁の拘束度, s: 層数)

なお式(4)では、スパン数の少ないモデルでは、上層での値 (傾きの大きさ) を過小評価することになるが、拘束程度が小さい領域ではひび割れ発生の可能性がないため、同式による評価での誤差は問題とならない。

(2) スパン位置による違い

図 - 5 に同じ建物内 (5 階 6 スパンモデル) での各層

の全てのスパンの拘束度を比較したものである。同図より、中央に位置するスパンで拘束度は最も高く、外側へいくに従いその値は小さくなるのがわかる。中央位置と最外位置の値の差は上層ほど小さく、拘束度の値そのものも上層で小さくなっている。従って、“(1) 層位置による違い” で述べた理由と同様の理由で、下層での値に良く適合するように、拘束度とスパン位置との関係を次式で表した。(中央壁から順番を壁位置とする。中央壁: 0, 左右 1 番目の壁: 1, 但し偶数スパンの場合中央の二つの壁を中央壁 (0) と見なす。)

$$K(I) = -0.080 \cdot I + K_{\max} \quad (5)$$

(K: RC 壁の拘束度, K_{\max} : 中央壁の拘束度, I: 中央壁からの位置を示す数値)

(3) スパン数の影響

図 - 6 にスパン数が変わる場合の拘束度の変化を示す (拘束度が最大となる最下階・最下層の中央壁での値)。同図より、スパン数が多くなるに従い拘束度は大きくなるのがわかる。その値は階数によらず同じ層数の建物では、ほぼ同じ値となっており平均的にスパン数が 1 スパンから 6 スパンになる場合でその変化はおよそ 0.45 である。従ってこの傾向を次式で表した。

$$K(n) = 0.090 \cdot n + 0.348 \quad (6)$$

(K: RC 壁の拘束度, n: スパン数)

壁 (壁とその周辺の梁、柱等を含む) は、自身以外の壁に対しては拘束材として作用する。従って、スパン数の増加は拘束度を増大させる。特に拘束度が最も高くなる中央位置付近の壁 (1 つの建物の各スパンのうち、中央に近い位置に存在するスパンの壁) では、その傾向が最も強く表れる。

(4) 壁高さの影響

図 - 7 に壁高さが変わる場合の拘束度の変化を示す。同図より、壁高さが高くなるに従い拘束度は小さくなるのがわかる。その値は壁高さが 3.0m から 4.0m になる場合でその変化はおよそ 0.1 である。また、この傾向を次式で表した。

$$K(h) = -0.074 \cdot h + 0.666 \quad (7)$$

(K: RC 壁の拘束度, h: 壁高さ)

壁高さの増加による拘束度への影響は、壁高さが高くなるに従い壁の断面積が大きくなるため、壁を拘束しようとする他の部材材 (基礎梁、柱、梁、スラブ) からの拘束に対する抵抗力は大きくなる。結果、相対的に拘束度は小さくなる。一方、壁高さが変化しても、乾燥収縮量に一定である (式(3)より)。従って、壁高さが高くなるに従い拘束度は小さくなる。

(5) 壁厚さの影響

図 - 8 に壁厚さが変わる場合の拘束度の変化を示す。同図より、壁厚さが厚くなるに従い拘束度は小さくなる

ことがわかる。その値は壁厚さが15cmから20cmになる場合でその変化はおよそ0.05である。また、この傾向を次式で表した。

$$K(t) = -0.009 \cdot t + 0.573 \quad (8)$$

(K: RC壁の拘束度, t: 壁厚さ)

壁厚さの増加による拘束度への影響は、壁高さが増大する場合と同じく、壁の断面積が大きくなるため相対的に拘束度は小さくなる。また、壁厚さが厚くなると、乾燥収縮量は少なくなるため(式(3)より)、拘束引張りずみは小さくなるため、相対的に他部材からの拘束度は小さくなる。

(6) スパン長(スラブの有効幅)の影響

「スパン長の影響」とは、スパン長に応じて計算されるスラブの有効幅⁵⁾の変化によるものである(スラブが存在しない場合は、スパン長の大小は拘束度に影響しない)。

図-9にスパン長が変わる場合の拘束度の変化を示す。同図より、スパン長が長くなるに従い拘束度は大きくなることわかる。その値はスパン長が1.5倍(6.0mから9.0m)になる場合でその変化はおよそ0.05である。また、この傾向を次式で表した。

$$K(\ell) = 0.018 \cdot \ell + 0.342 \quad (9)$$

(K: RC壁の拘束度, ℓ: スパン長)

先に述べたようにスパン長の増大はスラブ有効幅の増大となるが、拘束度に対しては以下に示す影響がある。

- ・ スラブ有効幅の増大に伴うスラブ断面積増加が壁に対する拘束力を増加させる。
- ・ スラブ有効幅の増大に伴いスラブの体積に対する表面積比率が大きくなり、乾燥収縮量が増大する。これに伴い壁に対する拘束力が小さくなる。

本解析範囲内では、壁に対するスラブ断面積の増大による拘束力の増加量がスラブの乾燥収縮の増大による拘束力の減少量より大きく、スパン長が長くなるに従い拘束度は大きくなる。

(7) 階数の影響

図-10に建物の階数が変わる場合の最下層、中央位置に存在する壁の拘束度を1~6スパンをもつモデルについて示す。同図より、いずれのスパンを持つモデルでも2層以上の建物では拘束度はほぼ一定で、1階建物ではその値はやや大きくなるがその差は最大でもおよそ0.05小さい。従って、階数の影響を同図破線のように一定として考慮することとした。

層位置の影響で示したように、基礎梁は一般階の梁に較べて非常に大きな拘束力を発揮する。1層建物ではこの基礎梁の拘束力が全て1層に全て作用するため、2以上の層数をもつ建物よりも拘束程度が大きくなる。一方、2層以上の階では上下層の条件が同じ(柱・梁フレーム

+壁)であるため、拘束度は殆ど変わらないと考えられる。

4.3 拘束度算定式の誘導

本項では前述の各パラメータの拘束度に及ぼす影響結果をもとに、拘束度算定式を導く。

前述のパラメータの拘束度への影響はそれぞれ独立性が強い。従って、1階・1スパンの基準モデルの拘束度(0.45)に、各影響要因による増減量(パラメータ毎にそれぞれの式を微分した値)を足すことにより求めることとした。

$$K = 0.45 + 0.090 \cdot (n-1) + 0.361 \cdot \ln\left(\frac{1}{s}\right) - 0.080 \cdot l$$

$$+ 0.018 \cdot (\ell - 6) + 0.074(3-h) + 0.009(15-t) \quad (10)$$

{K: RC壁の拘束度, n: スパン数, s: 層数, l: 壁位置, ℓ: スパン長(m), h: 壁高さ(m), t: 壁厚さ(cm)}

5 拘束度算定式の検討

5.1 弾性FEM解析値との比較

RC壁の拘束度算定式を1階・1スパンで、スパン長、壁高さ、壁厚さをそれぞれ変えたもの、1階・3スパン、3階・1スパンの3ケースに対して、弾性FEM解析結果と拘束度算定式の値を比較した。その結果を図-11に示した。

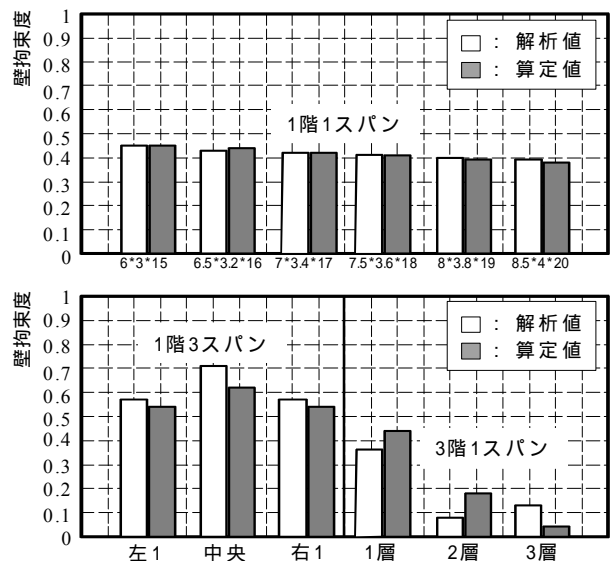


図-11 拘束度算定式の検討

図-11より、拘束度算定式の値は、解析値を概ね良好にトレースしていることがわかる。一部、階数の高いモデルで解析値との誤差が大きくなり、拘束度を過少評価しているが、該当部分の拘束度は0.1程度と小さく、乾燥収縮ひび割れ発生確率低いところであり、影響がないと考えている。

5.2 収縮ひび割れ算定式との検討

表-4に示す条件の1階・1スパンモデルに対し、拘束度算定式で求めた拘束度を収縮ひび割れ算定式¹⁾に代

入してひび割れ本数と幅を求め、ひび割れ本数に幅を乗じて RC 壁の総ひび割れ幅を算定した。この値と弾性 FEM 解析から求めた総ひび割れ幅（求め方は後述）を比較し表 - 5 に示す。

弾性 FEM 解析から総ひび割れ幅を求める方法：コンクリート部材は拘束された状態で縮んでいるが、周りからの拘束を受けることによって拘束引張りずみが発生する。そこで拘束引張りずみを「コンクリート部材が伸びていることにより生じている」と仮定すると、ひび割れ幅は拘束引張りずみに部材長さを乗じて求めることができる。

両者の差は 0.1mm 程度の差であり、精度良く評価できたといえる。

表 - 4 検討対象モデルの諸条件

モデル	スパン長	壁高さ	壁厚さ	鉄筋比	f_c
1 階 1 スパン	6m	3m	15cm	0.25%	21N/mm ²
	鉄筋径	壁長さ	s_h		R
	D13	5.5m	788	2	0.45

記号については式(1)、(2)の説明参照

表 - 5 算定値と FEM 解析値の比較結果

収縮ひび割れ幅と本数の算定式		
本数	幅	FEM 解析値
2	1.364	
総ひび割れ幅（本数×幅）		総ひび割れ幅
2.728mm		2.608mm

6 まとめ

RC 造壁を対象として FEM 解析を行うことで、壁拘束度に及ぼすスパン長、壁高さ、壁厚さ、階数、スパン数の影響を検討し、諸条件における RC 造壁の拘束度算定式を提案した。以下に得られた知見をしめす。

- 1) 壁の拘束度に対する影響要因としては、収縮がほとんど生じない基礎梁の場合、基礎梁の影響が非常に大きい。
- 2) 同一建物でみると、上層ほど基礎梁からの影響が弱まるため、拘束度は小さくなる。

- 3) 多スパンの建物では拘束度は中央に位置するスパンで最も高く、外側へいくに従いその値は小さくなる。
- 4) スパン数が多くなるほど拘束度は大きくなる。
- 5) 壁高さが増加すると壁断面が増えるため拘束度は小さくなる。また、壁厚が増すと、壁断面の増加に加えて乾燥収縮量が減少するため拘束度は小さくなる。
- 6) スパン長が長くなるとスラブの協力幅が大きくなるため、拘束材としての断面積が大きくなり拘束度は大きくなる。
- 7) 拘束度算定式から求めた拘束度の算定値は弾性 FEM 解析値とよい一致をみた。また算定値を用いて筆者等の収縮ひび割れ算定式と弾性 FEM 解析値からの総ひび割れ幅を比較した結果、算定値は精度良く拘束度を評価していることがわかった。

参考文献

- 1) 徐泰錫,大野義照:鉄筋コンクリート壁における乾燥収縮ひび割れ算定式,日本建築学会構造系論文集,Vol.73, No.626, pp.497-504, 2008.4
- 2) 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,pp.53-60, 2006.2
- 3) 長沼一洋,米澤健次,江戸宏彰:RC 構造部材の三次元繰返し FEM 解析の精度向上 その3 非直交ひび割れモデルの改良と付着すべりモデルの導入,日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, 構造 IV, pp.427-428, 2003.09
- 4) 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, 1988
- 5) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説 - 許容応力度設計法, pp.61-64, 1999