

論文 鉄筋コンクリート構造物のフルモデルによる乾燥収縮ひび割れ解析

渡部 嗣道*1・張 殿宇*2・富田 耕司*3

要旨：本研究は、乾燥収縮ひずみによって生じる鉄筋コンクリート構造物について、ラーメン構造の部材間の拘束によって柱および梁に生じるひび割れに伴う塑性ひずみを取り扱い、高層多スパン骨組のフルモデルにおける FEM 解析によって評価することを目的としている。ここでは、コンクリートの引張破壊後の塑性ひずみをひび割れひずみとして取り扱うほか、梁および柱の主筋に生じる応力度を算定した。その結果、ひび割れひずみが生じる箇所やその大きさ、さらに主筋に生じる圧縮応力の大きさなどを評価した。

キーワード：FEM, 乾燥収縮, ひび割れ, クリーブ, Step-by-step 法, 分散ひび割れモデル, フルモデル

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物にひび割れが発生すると、耐久性や構造性能に支障を生じることがある。そのため、鉄筋コンクリート構造物の乾燥収縮ひび割れを防止する材料的な方法として、単位水量の低減や収縮低減材あるいは膨張材などの混和材料技術が採用されている。しかし、同構造物のひび割れの発生は、鉄筋や部材間の拘束度によっても大きく影響を受けるため、より詳細なひび割れ防止設計を行うには、コンクリートの材料的な特性だけではなく、骨組みの拘束効果などの構造的な影響を考慮できるフルモデルに対応した設計システムによる評価も重要となる。しかし、鉄筋コンクリート造ラーメン構造のフルモデルにおける解析の実施例はほとんど見られない。そこで、著者の一人は、前報¹⁾において同構造物のフルモデルにおける弾性解析によって乾燥収縮ひずみが生じた場合の発生応力やひび割れ指数などの評価を行った。本研究では、それに続いて、構造物全体におけるひび割れ進展の状況の評価するために、著者らが開発した時間依存性を考慮した3次元弾塑性構造解析用ソフトウェア²⁾によって、鉄筋コンクリート構造物の乾燥収縮によるひび割れ解析をフルモデルで行い、乾燥収縮が構造体(柱・梁)の性能に与える影響を検討するために、同部材に生じるひび割れの進展や鉄筋応力についての考察を行った。

2. 解析概要

2.1 対象建物とモデル化

本解析で対象とした建物は、前報¹⁾と同様に実際に建設された鉄筋コンクリート造の純ラーメン構造の集合住宅を参考としたもので、地上10階・桁行方向10スパンとした構造体モデルを作成した。部材は、柱・梁・スラブ・基礎からなり、その寸法は、設計図書における構造

図とほぼ同じとした。表-1に構造部材の諸仕様を示す。部材断面、設計基準強度および主筋の鉄筋比は、階数ごとに異なる。せん断補強筋についても、構造設計で求められた値を採用し、それらと同じ値を後述する3次元分散鉄筋モデルとして挿入した。

図-1に本解析モデルを示す。本モデルは、平面計画の対称性により、図中のZ軸方向の対称軸を中心にXZ

表-1 構造部材の諸仕様

階数	断面寸法 (cm ²)		設計基準強度 (N/mm ²)		主筋の鉄筋比※ (%)	
	柱	梁	柱	梁・床	柱 Z方向	梁 Y方向
R	—	30.0	—	27	—	1.182
10	80.0	37.5	27	27	0.697	1.351
9	80.0	37.5	27	27	0.697	1.713
8	80.0	40.0	27	27	0.760	2.088
7	80.0	40.0	27	30	0.964	2.484
6	85.0	40.0	30	30	0.982	2.484
5	85.0	40.0	30	30	0.982	2.866
4	85.0	40.0	30	30	1.215	2.866
3	85.0	40.0	30	33	1.308	2.866
2	85.0	40.0	33	36	1.402	2.866
1	100.0	160.0	36	33	1.430	0.893
基礎	41.0		33		0.02	

※主筋はSD345を使用

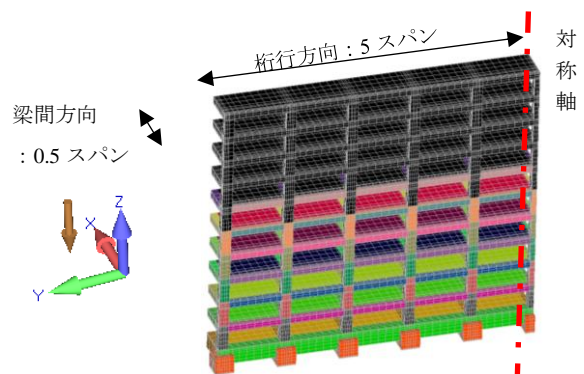


図-1 解析モデル (1/4モデル)

*1 大阪市立大学 生活科学部居住環境学科教授 工(博) (正会員)

*2 大阪市立大学 生活科学部居住環境学科 (非会員)

*3 ソフトエボリューション(株) (正会員)

面ならびに YZ 面の各断面を対象とした 1/4 モデルとした。基礎下部の固定については、地盤との拘束がほとんど生じないように、基礎下部にヤング係数を低く設定したダミー要素を設け、それは固定端とした。

2.2 解析ソフト

本ひび割れ解析で使用した解析ソフトは、著書らが開発した時間に依存するひび割れに伴う剛性低下を考慮した弾塑性構造解析用 3 次元 FEM ソフトウェア「Soft-OCU」²⁾を用いた。要素は 8 節点アイソパラメトリックソリッド要素である。同ソフトは、乾燥収縮ひずみによるひび割れ発生に伴う弾塑性解析を、クリープひずみの発生も含めた逐次積分法 (Step-by-step 法) を用いて時間ステップで離散化して、以下のように計算した。

ここで、 $\varepsilon_{total}(t)$: 全ひずみ、 $\varepsilon_e(t)$: 弾性ひずみ、 $\varepsilon_p(t)$: 塑性ひずみ、 $\varepsilon_{cr}(t)$: クリープひずみ、 $\varepsilon_{sh}(t)$: 乾燥収縮ひずみ、 $\Delta\sigma(t)$: 増分応力、 $\phi(t_{i+1/2}, t_j)$: クリープ係数、 $E(t_i)$: ヤング係数

$$\begin{aligned} \varepsilon_{total}\left(t_{i+\frac{1}{2}}\right) &= \varepsilon_e\left(t_{i+\frac{1}{2}}\right) + \varepsilon_{cr}\left(t_{i+\frac{1}{2}}\right) + \varepsilon_p\left(t_{i+\frac{1}{2}}\right) + \varepsilon_{sh}\left(t_{i+\frac{1}{2}}, 0\right) \\ &+ \sum_{j=1}^{i-1} \left\{ \Delta\sigma(t_j) \cdot J\left(t_{i+\frac{1}{2}}, t_j\right) + \varepsilon_p\left(t_{i+\frac{1}{2}}\right) \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\Delta\sigma(t_i) = \frac{1}{J\left(t_{i+\frac{1}{2}}, t_i\right)} \left\{ \varepsilon_e\left(t_{i+\frac{1}{2}}\right) + \varepsilon_{cr}\left(t_{i+\frac{1}{2}}\right) \right\} \quad (2)$$

$$J\left(t_{i+\frac{1}{2}}, t_j\right) = \frac{1+\phi\left(t_{i+\frac{1}{2}}, t_j\right)}{E\left(t_i\right)} \quad (3)$$

また、ひずみの適合条件として、以下のように各ひずみの重ね合わせが成立するものとした。

$$\varepsilon_{total}(t) = \varepsilon_e(t) + \varepsilon_{cr}(t) + \varepsilon_p(t) + \varepsilon_{sh}(t) \quad (4)$$

コンクリートのひび割れモデルは、分散ひび割れモデル³⁾(ひび割れ面での応力伝達は回転ひび割れモデル)、鉄筋は分散鉄筋モデルとし、コンクリートとの付着は完全一体とした。また、弾塑性計算における反復計算法は修正ニュートンラプソン法を適用した。本ひび割れ解析では、架設ステップごとに架構の新設による初期弾性応力に応じてクリープひずみの増分計算し、この架構の乾燥収縮ひずみの増加に伴って生じる弾性ひずみならびにクリープひずみを同様に増分解析し、ひび割れが発生する場合には塑性ひずみの増分解析も行った。

2.3 材料モデル

コンクリートの応力-ひずみ関係を図-2 に示す。引張域については、引張強度までは直線とし、そのヤング係

数 E_c を圧縮強度から推定する日本建築学会式⁴⁾を適用し、引張強度も同学会式を適用し、持続的応力による低減係数を「0.75」とした。塑性域における引張軟化則は直線で表現した。ひび割れ発生は、引張主応力が引張強度に達した時点とした。一方、圧縮域については、道路橋示方書・同解説 (V 耐震設計編) に準拠し、圧縮破壊の判定は、暫定的に圧縮主応力が圧縮強度に達した時点とした (ただし、本解析における最大圧縮応力は 10N/mm^2 程度であり、破壊する応力レベルには達していない)。

図-3 に引張域の弾性ひずみと塑性ひずみの定義を示す。そして、この弾塑性解析で求めた塑性ひずみ ε_p を「ひび割れひずみ : ε_p 」、引張軟化領域の大きさを「軟化ひずみ : ε_u 」として定義した。

図-4 に引張域におけるひずみ減少時の応力ひずみ関係を示す。弾性域および塑性域ともに、図-3 の応力ひずみ関係の途中で、ひずみが減少する場合の応力-ひずみ関係は原点を結ぶ直線の履歴を経るものとした。

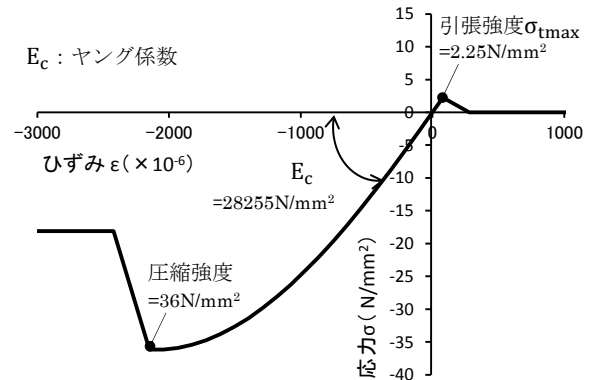


図-2 コンクリートの応力ひずみ関係 (設計基準強度 36N/mm² の場合)

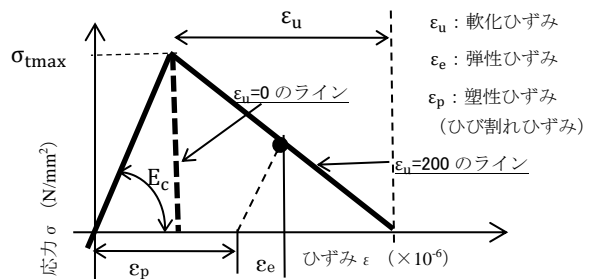


図-3 コンクリート引張域における塑性ひずみ

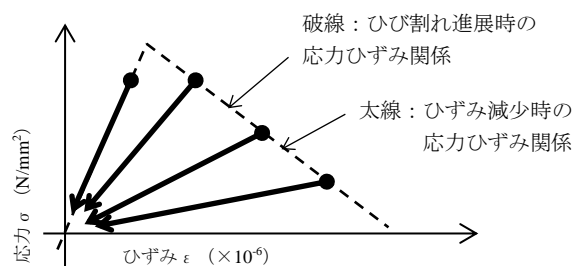


図-4 ひずみ減少時における応力ひずみ関係

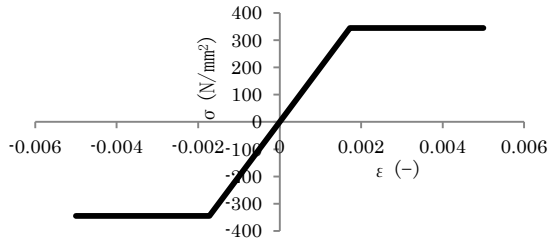


図-5 鉄筋モデル (SD345)

乾燥収縮ひずみおよびクリープ係数は、日本建築学会式⁴⁾により、乾燥収縮ひずみの大きさは、単位水量を 185kg/m^3 とした値を用いた。

柱・梁の主筋はSD345、せん断補強筋およびスラブの鉄筋はSD295とし、応力-ひずみ関係については図-5に示すようにバイリニア型とした。

2.4 架構ステップと材料モデル

前報²⁾の弾性解析と同様に、本解析でも部材の架構工程を考慮したうえで、新設架構による初期弾性ひずみと乾燥収縮ひずみが発生するものとし、部材の打設リフト時期と間隔、コンクリート打設後の脱型時期すなわち乾燥開始時期とを設定した。

コンクリートの打設リフトは一般的に行われている部材打設工程とし、工事中的階の柱とその上階の梁および床スラブの打設を1リフトとして計13リフトで解析を行った。基準階における工程のリフト間隔日数は15日とした。また、せき板の取り外し日はコンクリート打設日の3日後とし、コンクリートの乾燥収縮はこれ以降から生じるものとした。ただし、骨組全体に部材の架構によって初期応力が生じる時期は、コンクリートが打設される時期ではなく、支保工が取り外れる時期とし、それを28日（この時期に設計基準強度が保持されるものとする）した。そのため、これまでの初期材齢における支保工を通した初期応力の発生や乾燥収縮ひずみ、および力学的性質の時間依存性は無視し、あくまでも架構後に支保工が取り外れる時期からの初期応力と乾燥収縮ひずみの影響を解析することとした。そこで、乾燥収縮ひずみは、脱型3日として、28日経過時を初期値とした。基礎および基礎梁については、地中にあることから乾燥ひずみが生じないものとした。図-6に乾燥収縮ひずみの履歴例を示す。本解析期間の範囲の乾燥収縮ひずみの最終値は、 $657\sim 713\times 10^{-6}$ 程度である。部材断面の大きさによって乾燥収縮ひずみの増加速度は異なり、これが部材間の拘束の発生の一つになるものと考えられる。

2.5 検討内容

本研究での解析内容を表-2に示す。本解析でのひび割れ解析では、図-3におけるコンクリートの引張域の軟化ひずみについて、長期的な特性が明確でないので、長期的には温度ひずみなどの繰り返し応力によって靱性

を無視できると仮定した $\epsilon_u = 0$ を基本とし、それと比較するために $\epsilon_u = 200\times 10^{-6}$ とした場合の2タイプについて行った。また、これらのひび割れ解析と比較するために、自重のみ作用させた場合の弾塑性解析ならびに前報²⁾と同様な弾性解析も実施した。

また、本解析では、前報¹⁾と同様に、ラーメン構造の主要な骨組みである柱と梁についてのみ、ひび割れひずみおよび主筋応力の評価を20年間の解析期間で行った。

表-2 解析内容

	乾燥収縮	自重	引張軟化域： ϵ_u
弾塑性解析 (ひび割れ解析)	有	有	0と 200×10^{-6} の2タイプ
	無		0
弾性解析	有		—

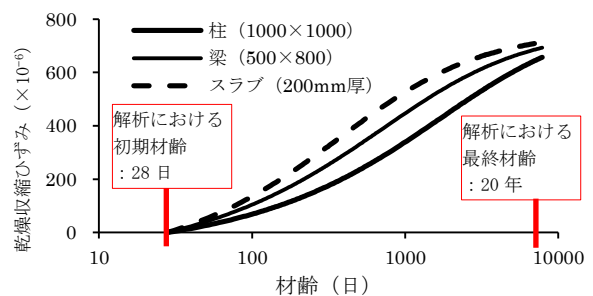


図-6 乾燥収縮ひずみの履歴例

3. 解析結果と考察

3.1 弾性解析結果

弾性解析の結果として、最大主応力に関するコンター図を図-7に示す。2～3階までの低層部の梁や床スラブに比較的大きな引張応力が生じるのに対し、4階以上の中・上層部では、それよりも低い値を示すとともに、部材の違いによる応力分布の変化の小さな応力状態を示した。これらの結果は、前報¹⁾（前報では10年後の値）の結果と同様な傾向を示している。

3.2 自重のみによる場合のひび割れ解析結果

自重のみの場合の弾塑性解析の結果は、どの箇所についてもひび割れ強度以下に収まり、自重のみではひび割れの危険性はないことが分かった。

3.3 乾燥収縮による場合のひび割れ解析結果

(1) ひび割れひずみの分布

図-8～10に各経過時間におけるひび割れひずみ（3方向ひずみベクトルの絶対値）のコンター図を示す。まず低層階の床スラブから徐々にひび割れが進展し、その後が梁にも発生すると、経過年数とともに梁のひび割れが上層階に進展している様子が見られた。低層階のひび割れひずみは、高層階よりも概ね大きな値を示した。これは、基礎梁の拘束による影響が大きいと考えられる。一方、柱は、いずれの経過年数ともに、低層階においてひび割れひずみが生じた。

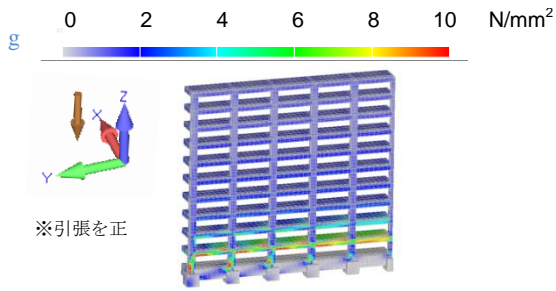


図-7 弾性解析結果（最大主応力：約 20 年後）

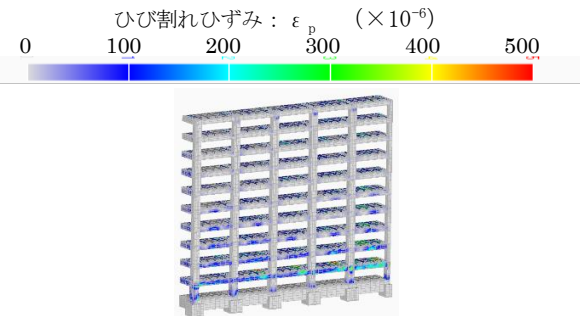


図-8 ひび割れひずみの分布（約 5 年後）

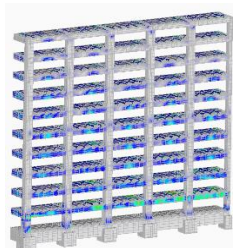


図-9 ひび割れひずみの分布（約 10 年後）

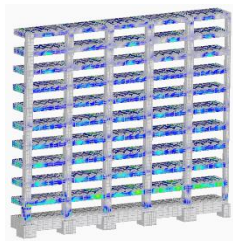


図-10 ひび割れひずみの分布（約 20 年後）

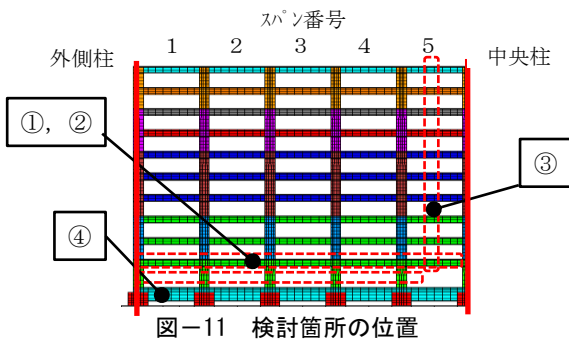


図-11 検討箇所の位置

(2) ひび割れひずみの経時変化

ひび割れひずみを定量的に評価する箇所を、図-11に示す。検討箇所は、梁については、①2 階梁における部

材内の軸方向左端部（x 軸の正の方向を向いて）の要素群，②2 階梁における部材内の軸方向中央部の要素群，③中央柱近傍梁における部材内の軸方向中央部の要素群とし、柱については、④1 階柱の柱脚部の要素群とした。

図-12 に、①2 階梁における部材内の軸方向左端部の要素群の同一断面内の平均値の経時変化を示す。いずれの場合も、ひび割れひずみが増大した後に減少し、さらに再び増大する傾向を示した。これは、ひび割れが進行した後、他の部材にもひび割れが進行して拘束が緩和されたために除荷の作用が生じたことによるものと考えられる。また、2 階梁の端部では、最終的に 1 部を除いて 100×10^{-6} 程度の値を示し、中央スパン（5 スパン）が最も大きな値を示した。

図-13 に、②2 階梁における部材内の軸方向中央部の要素群の同一断面内の平均値の経時変化を示す。2 階梁の中央部では、最終的に $100 \sim 250 \times 10^{-6}$ 程度の値を示し、中央柱に近い位置（5 スパン）の値が最も大きい値を示した。この位置の値を除いた他はほとんど同等の値を示したが、外側柱に近い位置のものがやや小さな値を示す傾向となった。このひび割れひずみに関する傾向は、前報¹⁾の弾性解における弾性ひずみについても同様の結果となっている。

図-14 に、③中央柱近傍梁（5 スパン）における部材内の軸方向中央部の要素群の同一断面内の平均値の経時変化を、2～R 階について示す。最終的に $100 \sim 250 \times 10^{-6}$ 程度の値を示し、2 階梁の値が最も大きかった。

図-15 に、④1 階柱の柱脚部の同一断面内の要素群における軸方向ひび割れひずみの平均値の経時変化を示す。いずれも最終的に 50×10^{-6} 以下であり、ひび割れは生じるものの非常に小さな値を示した。

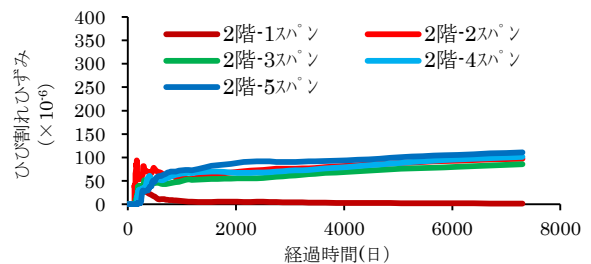


図-12 ひび割れひずみの経時変化（①2 階梁・左端部）

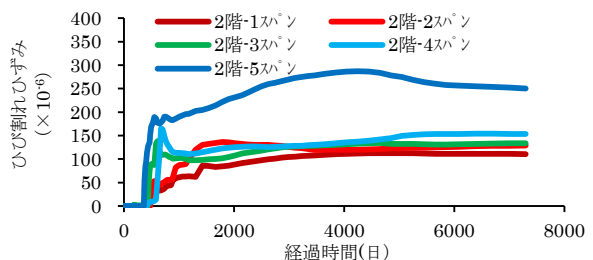


図-13 ひび割れひずみの経時変化（②2 階梁・中央部）

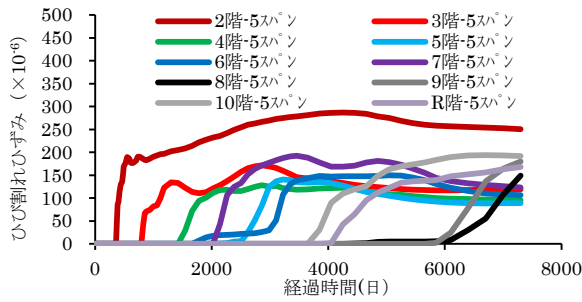


図-14 ひび割れひずみの経時変化 (③5スパン梁・中央部)

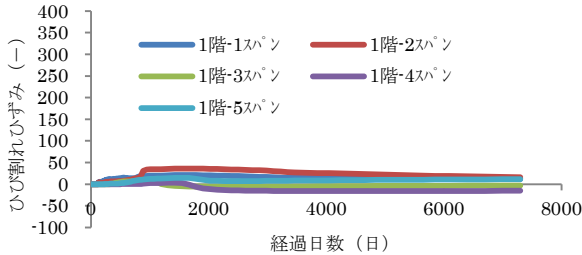


図-15 ひび割れひずみの経時変化 (④1階柱)

なお、上記に示した図中の梁の要素の長さは、最大値で500mmである。この場合、計算されたひび割れひずみが、すべてひび割れ幅に換算されるとした場合のひび割れ幅は、ひび割れひずみが 300×10^{-6} の場合で、0.15mm程度となるため、本解析の範囲では耐久性上大きな損傷はないものと判断される。

(4)主筋応力

図-16に、①2階梁における軸方向左端部の要素群の主筋応力の平均値の経時変化を示す。本解析モデルは分散鉄筋モデルであるため、図中の主筋応力は、同モデルにおける鉄筋要素の応力算定値に要素面積を乗じた値の合計をその断面の鉄筋比に応じた値に換算した値を示してある。2階梁の軸方向端部の要素群では、梁の位置に影響せず、最終的に $-70 \sim -80 \text{ N/mm}^2$ 程度の圧縮値を示した。自重のみの場合について、図-16と同位置①における要素群の鉄筋比に応じて換算した主筋応力の平均値の経時変化を図-17に示す。乾燥収縮ひずみが作用する場合に比べてほとんど応力が生じていないことから、図-16の主筋応力は乾燥収縮ひずみによるものと考えられる。

図-18に、図-13と同様に、②2階梁における中央部の要素群の平均値の経時変化を示す。2階梁の中央部では、最終的に $-60 \sim -80 \text{ N/mm}^2$ 程度の値を示した。また、単調に増加するのではなく、急激に減少する時期が確認できた。これは、図-13のひび割れひずみが急激に増大する時期である。コンクリートのひび割れによって主筋の圧縮ひずみの増加が緩和されたことによると考えられる。また、この現象によって、同一梁における最終的な鉄筋応力の大きさは、全体として中央部よりも端部の方がやや大きな値を示した。そこで、図-19に、③中央柱

側の梁(5スパン)における左端部の要素群の平均値の経時変化を示す。最終的に $-70 \sim -120 \text{ N/mm}^2$ 程度の値を示し、上階ほど大きな値を示した。

一方、柱について、図-20に、図-15と同様に、④1階柱の柱脚部の要素群の平均値の経時変化を示す。いずれも最終的に -150 N/mm^2 程度であった。柱の鉄筋応力がこのように大きな値を示す結果となった理由について、柱の乾燥収縮ひずみが自重方向に作用して他の部材による拘束が小さなこと、鉄筋比が1~2%程度と小さいため鉄筋による拘束も小さなことなどから、コンクリートはほとんど自由収縮のような挙動を示し、これに鉄筋が一体として収縮したためと考えられる。コンクリートの乾燥収縮ひずみは、図-6のように 660×10^{-6} 程度あるので、このまま鉄筋がコンクリートの乾燥収縮と一体で挙動し圧縮ひずみが生じるものとすれば、鉄筋の応力は -130 N/mm^2 程度生じることになる。自重のみによる場合の柱の主筋の応力は、最終的に $-20 \sim -30 \text{ N/mm}^2$ 程度の値であったために、図-20に示された鉄筋応力は、その多くが乾燥収縮ひずみによって生じたものと考えられる。一方、梁の主筋の応力がこれよりも小さな値を示すのは柱などの他部材の拘束を受けるためと考えられる。

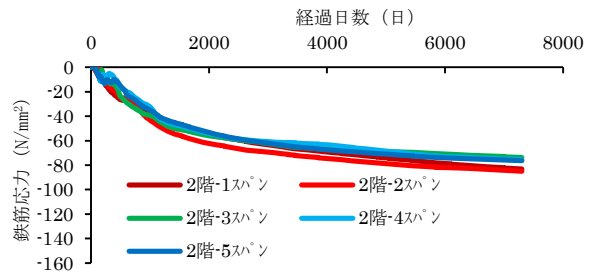


図-16 主筋応力の経時変化 (①2階梁・左端部)

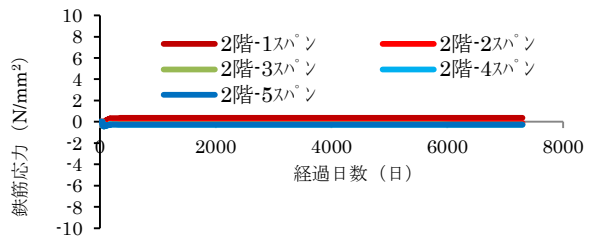


図-17 主筋応力の経時変化 (①2階梁・自重のみ)

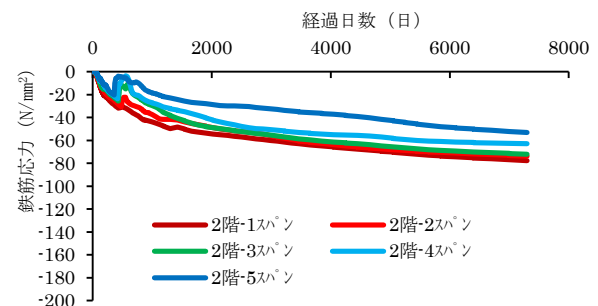


図-18 主筋応力の経時変化 (②2階梁・中央部)

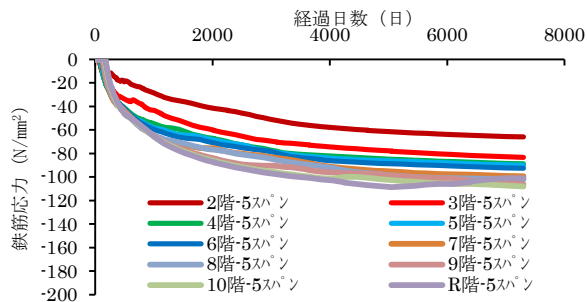


図-19 主筋応力の経時変化 (③2階梁・左端部)

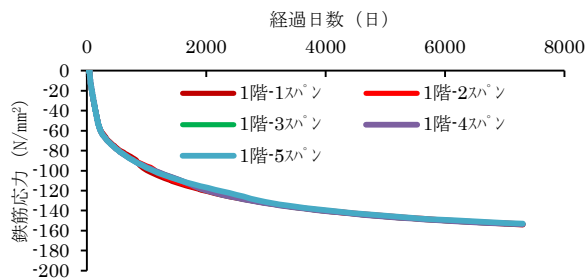


図-20 主筋応力の経時変化 (④1階柱)

(5)引張軟化領域の違い

図-21に、 $\epsilon_u=200 \times 10^{-6}$ とした場合の最終経過時のひび割れひずみのコンター図を図-10と同様に示す。図-10と比較すると、全体的にひび割れひずみは小さくなる傾向を示した。ただし、低層階に大きなひび割れひずみが集中していることは同様であった。

図-22に、2階梁の左端部と中央部の要素群における最終経過時のひび割れひずみの断面内の平均値に関する $\epsilon_u=200 \times 10^{-6}$ (図中では、 ϵ_u200)と $\epsilon_u=0$ (図中では、 ϵ_u0)との比較を示す。両者の関係は、ばらつきはやや大きいものの、ほぼ 250×10^{-6} 以内に収まった。また、図-23に、2階梁の左端部と中央部の要素群における最終経過時の主筋応力度の断面内の平均値に関する $\epsilon_u=200 \times 10^{-6}$ と $\epsilon_u=0$ との比較を示す。柱および梁ともに両者はほぼ同等な値を示した。

4. まとめ

時間依存性を考慮した弾塑性構造解析用ソフトウェアを開発し、乾燥収縮が生じる場合の鉄筋コンクリート造ラーメン構造のフルモデル解析を20年までの解析期間について行った結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 梁に生じるひび割れひずみは、経年とともに低層階から上層階に進展する状況が確認され、主に低層階に近い梁に大きな値を生じた。一方、柱には、低層階においてひび割れひずみが生じた。
- 2) 柱・梁の主筋に作用する応力度は、最終的に圧縮応力となり、梁については降伏点の1/4~1/3程度、柱については降伏点の1/3程度の応力が算定された。しかし、これらの値は、本解析方法の範囲内の値であり、今後は

他の解析方法や実験値との比較を行って、その信憑性を確認する必要がある。

- 3) 引張軟化領域の違いについては、ひび割れひずみについてはややばらつきがあったが、主筋応力についてはほぼ同等な値を示した。

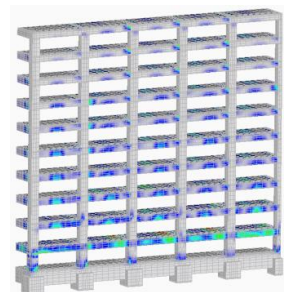


図-21 ひび割れひずみの分布 (約20年後)

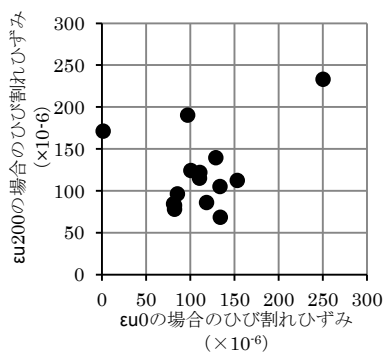


図-22 ひび割れひずみの比較 (約20年後)

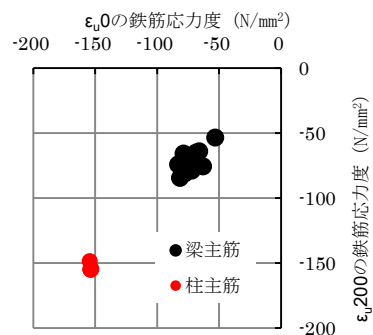


図-23 主筋応力の比較 (約20年後)

[参考文献]

- 1) 森井万葉, 渡部嗣道: RC ラーメン構造の乾燥収縮ひび割れ発生評価に関する施工工程を考慮したフルモデル解析, コンクリート年次論文報告集, 2014, in CD-ROM
- 2) 大阪市立大学・ソフトエボリューション社製: 「Soft OCU (FEM SOFTWARE ORIENTED TO CREEP AND ELASTO-PLASTIC ANALYSIS FOR ULTIMATE PROPERTIES OF CONCRETE STRUCTURES)」, 2014
- 3) 土木学会: コンクリート標準示方書「設計編」, 2012
- 4) 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