

論文 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

森井 万葉*1・渡部 嗣道*2

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のひび割れについて、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危険性を、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、解析パラメータを、単位水量の違いによる乾燥収縮量、建物のスパン、施工工程の考慮の有無、自重の有無とし、10年後の推定値によって比較検討した。その結果、ひび割れが生じる危険性のある建物の部位やその条件を把握することができた。

キーワード: 有限要素法、ひび割れ、乾燥収縮、クリープ、フルモデル解析

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の乾燥収縮によるひび割れは、耐久性や構造性能を著しく低下させる要因となる。したがって、これまでコンクリートの乾燥収縮ひずみやひび割れ幅などの算定に関して、従来から数多くの実験あるいは解析的な研究が行われている^{例えば, 1)~3)}。ただし、これまでの乾燥収縮ひずみがひび割れに与える影響については、鉄筋に拘束された梁や柱、あるいはこれらに拘束された壁など、部材単体規模のものに限られるものが多く、建物全体の部材間拘束によって柱・梁に作用する不静定応力を求めた研究は少ない。青山の研究⁴⁾では、熱応力や収縮などに起因するラーメン構造の自己ひずみ応力の算出法を提案し、応力算定を行っているが、時刻歴に変化する力学的特性やクリープひずみなどを逐次考慮したものではない。

一方、近年の FEM (有限要素法) 解析技術の進歩は著しく、大規模な要素数のモデルについても高い精度で解析処理を容易に行うことができるようになった。そこで、本研究では、ラーメン構造を有する高層 RC 造集合住宅を対象として、施工工程を考慮した柱・梁・床スラブ・基礎からなるフルモデルを作成し、3次元 FEM による弾性解析を行った。柱と梁の主要構造について、乾燥収縮ひずみに伴って生じる軸方向の垂直ひずみおよび応力を、クリープひずみを有効材齢に応じて逐次算出し、部材間の拘束によってひび割れが発生する危険性をケーススタディによって評価することとした。

2. 解析方法

2.1 対象建物とモデル化

実際に建設された RC 造の純ラーメン構造の集合住宅 (桁行方向: 3 スパン, 梁間方向: 1 スパン, 地上 10 階,

設計基準強度: $24\sim 27\text{N/mm}^2$) を基本モデルとした。そこで、高さ方向はすべて 10 階とし、桁行方向のスパン数を $3\cdot 10\cdot 15$ の 3 種類とした骨組モデルを作成して、建物の縦横比を変化させた。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。図 1 は、そのうち、桁行方向 10 スパンの 1/4 モデルを示したものである。本モデルは、平面計画の対称性により、すべて 1/4 モデルとした。解析モデルは、柱・梁のほか、床スラブも部材要素として盛り込まれ、基礎の下には地盤 (硬質地盤; ヤング係数を 5000N/mm^2) もモデル化している。

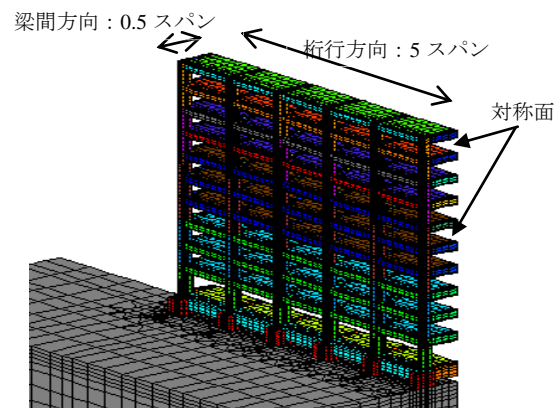


図 1 解析モデル例 (桁行方向 10 スパンの 1/4 モデル)

2.2 検討概要

本解析では、4 つの解析因子についてケーススタディを行う。その概要を表 1 に示す。解析因子は、①乾燥収縮ひずみの量、②自重の考慮の有無、③施工工程、④桁行方向スパン数とし、これらを CASE1~3 に分類した。

乾燥収縮ひずみの大きさは、単位水量によって決定することとし、表 1 のように $165\sim 200\text{kg/m}^3$ の範囲につい

*1 大阪市立大学大学院 生活科学研究科居住環境学コース (学生会員)

*2 大阪市立大学 生活科学部居住環境学科教授 博士 (工学) (正会員)

での3水準とした。また、本解析では、乾燥収縮ひずみによる弾性ひずみの発生の程度を評価するために、乾燥収縮ひずみのみを入力した場合と、これに自重（要素の密度(2400kg/m³)×重力加速度)によるひずみを考慮した場合について解析を行った。

一方、建築構造物は、一般に階ごとに積層工法で施工されるために、各階の乾燥開始時期は異なる。そのため、脱型後に乾燥する施工直後の階のコンクリートは、硬化が進行している下層階の拘束を受けることになる。したがって、クリープひずみや弾性ひずみの発生の程度は、下層階の影響を受けることも想定されなければならない。そのため、本解析では、建物全体が同時に一括して乾燥を開始する場合と、施工工程を考慮して、階層ごとに乾燥を開始する場合について検討することとした。

そして、算出する解析結果は、①部材軸方向の弾性ひずみ、②同引張弾性応力に対するひび割れ指数、③自由収縮ひずみに対する拘束率とし、柱・梁に生じる部材断面における平均的な値を抽出した。

表1 検討概要

CASE	単位水量 (kg/m ³)	自重	施工 工程	スパン数
1	200	×	考慮 する	3, 10, 15 の3種類
	185			
	165			
2	200	○		
	185			
	165			
3	200	×	考慮 しない	
	185			
	165			

2.3 施工工程を考慮する場合の工程モデル

本研究では、コンクリートの施工期間中に乾燥収縮ひずみによって変形することを考慮した解析も行うこととした。そのため、打設リフト間隔と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する必要がある。そこで、コンクリートの1打設リフトは、一般的に行われている部材打設の工程とし、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。それぞれの工程の間隔日数は15日とした。また、型枠における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。

なお、施工工程を考慮しない場合には、1打設リフトとし、打設後3日で同時乾燥させた。

2.4 解析方法

①解析ソフト

市販の3次元有限要素法解析ソフト⁹⁾を使用し、要素はすべて6面体8節点のソリッド要素とした。

②コンクリートの力学的性質

コンクリートの弾性係数は、圧縮強度から推定する日本建築学会式⁶⁾を適用し、圧縮強度の発現式も同学会式を適用した。乾燥収縮ひずみおよびクリープ係数も同学会式により、乾燥収縮ひずみの大きさは、単位水量を変えることによって調整した。その単位水量は、200・185・165kg/m³の3種類とした。クリープ変形における応力増分解析は「step by step 法」によった。引張強度の推定についても日本建築学会式を適用し、持続的応力による引張強度の低減係数は「0.75」とした。各要素の弾性係数は、主筋方向のみコンクリートと主筋の鉄筋比分とを単位体積当たりに均等に換算した値とし、その他の方向についてはコンクリートのみの弾性係数の値とした。

③ひび割れ指数および拘束率

コンクリートのひび割れ指数は、引張強度に対する引張応力度の比(引張強度/引張応力)とした。実ひずみ(要素に生じるすべてのひずみ⁷⁾)と自由収縮ひずみから、柱および梁の拘束率(=(自由収縮ひずみ-実ひずみ)/自由収縮ひずみ)を算定した。

④温湿度環境および材齢

解析対象とする温湿度環境は、20℃・65%RHの一定として自由乾燥収縮ひずみを入力した。この場合、乾燥収縮ひずみの速度は、建築学会式に従って部材寸法ごとに算定した。

解析材齢は、基礎の打設から有効材齢10年とした。

2.5 算定値の抽出

本解析では、柱および梁ともに、材軸方向の垂直弾性ひずみ(以下、弾性ひずみ)、垂直応力および実ひずみを求めた。この場合、各材軸方向の中央位置における要素を選定し、それらの要素群の平均値を部材単位の値とした。図2に示すように、梁は部材中央の要素(梁は軸方向で8分割されており、そのうち中央の2分割部分)の水平方向(=軸方向)のひずみ度の平均値を算定した。これと同様に、柱については部材中央の要素(柱は軸方向で4分割されており、そのうちの中央の1分割部分)の鉛直方向(=軸方向)のひずみ度の平均値を算定した。

このように、本研究で評価するひび割れの危険性について、あくまで部材断面に生じる平均的な引張応力を対象としており、曲げひび割れやせん断ひび割れについて

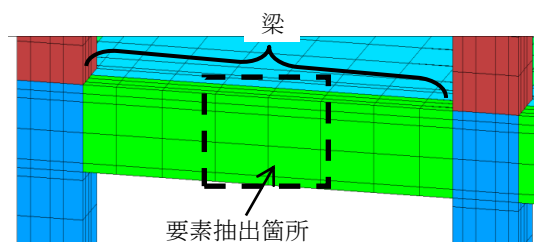


図2 弾性ひずみ算定のための要素抽出

は取り扱っていない。これは、断面内において応力分布が異なる場合に、十分に適切な評価を得られない可能性があることを示しているが、要素単体でひび割れの評価を行うことは、要素分割の粗密の程度によってその評価値も異なる結果となることから、より確実にひび割れの危険性の評価ができる方法として、本研究では部材の平均引張応力による判定を採用した。

拘束率については、弾性ひずみと同様に部材単位で実ひずみを求め、これと自由乾燥収縮ひずみから算定した。

3. 解析結果と考察

3.1 部材位置における弾性ひずみの違いの検討

フルモデルにおける柱・梁の位置の違いが、弾性ひずみの算定値に与える影響について検討した。評価に供した部材の位置は、高さについては階数ごとに、桁行方向については、最端部（隅柱）・最端部から3本目・中央部の3か所とした。検討した解析モデルは、桁行方向10スパンの建物で、表1のCASE2の条件（自重あり・施工工程を考慮・単位水量を185kg/m³）としたもので、算定値はすべて最終の10年経過した値である。

弾性ひずみの算定結果を、柱については図3に、梁については図4にそれぞれ示す。柱については、上層階になるほど、自重による圧縮ひずみの大きさが減少するため圧縮ひずみから徐々に引張ひずみに移行する傾向を示した。また、桁行方向の位置の違いでは、最端部の柱のほうが中央部のもよりも小さな圧縮ひずみを示す傾向を示した。これは、柱1本分に作用する自重の大きさが中央部よりも小さいことが原因であると思われる。したがって、最端部の柱は、隅柱であるので桁行方向の中ではひび割れが発生する危険性が高くなるものと思われる。

一方、梁については低層階では大きな引張ひずみが生じているものの、中層階から高層階ではほぼ一定の値を示す傾向を示した。さらに低層階では中央部の梁が桁行方向では最も大きな値を示した。

ひび割れ指数の算定結果を、柱については図5に、梁については図6にそれぞれ示す。柱については、中央柱を除いて、低層階および最上階でのひび割れ指数が低い値を示した。梁については、低層階および高層階においてひび割れ指数が低い値を示す傾向を示した。特に、梁については、ひび割れ指数が1.0を下回る箇所が見られた。

以上の結果から、図7に示すように、本研究で行う各種条件に関するケーススタディは、ひび割れの危険性の高い位置の部材について検討することとし、柱については最端部について、梁については中央部について、要素選定を行った。

3.2 弾性ひずみ

図8に、CASE2の場合（自重あり）の梁の弾性ひずみ

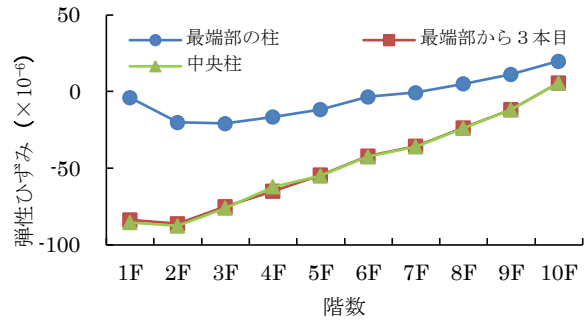


図3 柱における弾性ひずみの分布

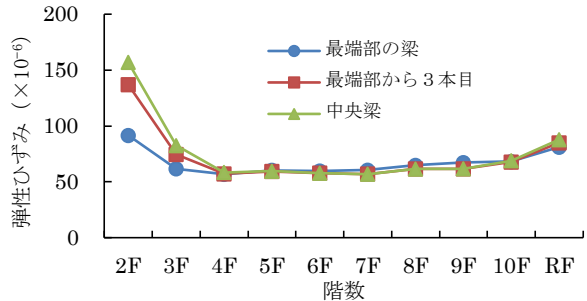


図4 梁における弾性ひずみの分布

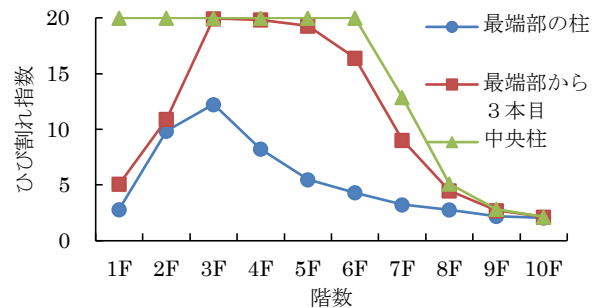


図5 柱におけるひび割れ指数の分布

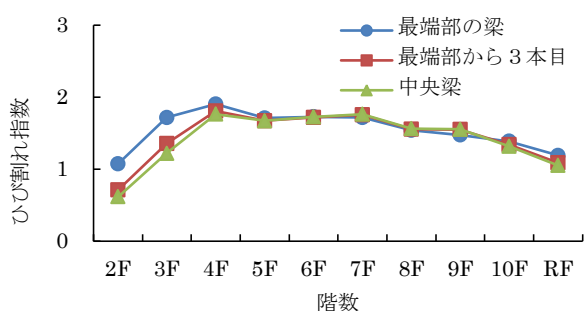


図6 梁におけるひび割れ指数の分布

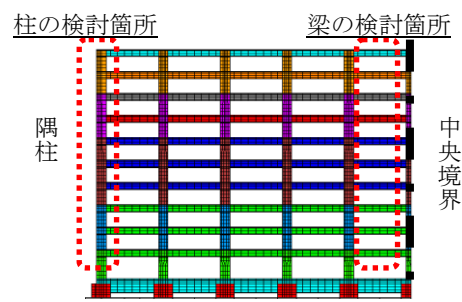


図7 ケーススタディの検討箇所

の分布図を示す。スパン数が3の場合には、弾性ひずみは階数の違いに大きな影響を受けないが、スパン数が10および15の場合では、特に低層階で大きな引張ひずみを示し、スパン数が大きくなるほど、すなわち建物の縦横比が大きくなるほど、低層部において地盤あるいは基礎梁の拘束による引張ひずみが大きくなる傾向を示した。ただし、5階以上では概ね階数に関わらず同等な値（50～60 μ ）を示している。

図9に、梁の場合のCASE1（自重なし）とCASE2との比較を示す。自重を考慮したものは、しない場合よりも僅かながら大きな値を示すものの両者はほぼ同じ値を示した。

図10に、CASE2の場合の柱の弾性ひずみの分布図を示す。低層階では圧縮ひずみを生じているが、高層階になると徐々に引張ひずみに移行する傾向を示した。

図11に、柱の場合のCASE1とCASE2との比較を示す。CASE2の場合は-50～50 μ 程度を示しているのに対し、CASE1の場合には20～100 μ 程度の引張ひずみを示しており、自重によって大きく圧縮側に移行することが分かる。

図12に、梁の場合のCASE2とCASE3との比較（施工工程の有無）を示す。施工工程を考慮しない全体同時乾燥のCASE3では、概ねスパンの影響なく同一の値を示し、施工工程を考慮したCASE2の場合には、施工工程を考慮しないCASE3の場合よりも大きな値を示した。なお、全体同時乾燥の場合には、弾性ひずみが低層階に関係なくほぼ一定値を示していることから、本解析において地盤による上層階への拘束は小さいものと考えられる。そこ

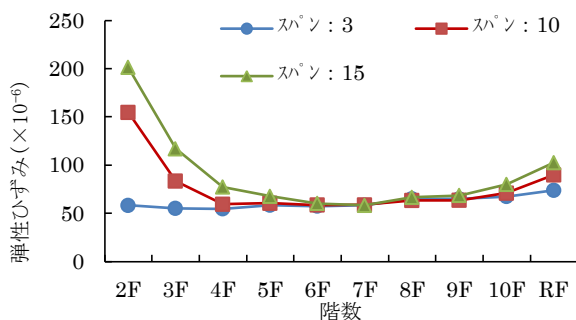


図8 梁の弾性ひずみ算定例（CASE2・W185）

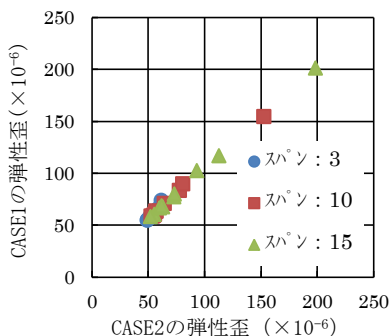


図9 梁の弾性ひずみの比較（CASE1とCASE2）

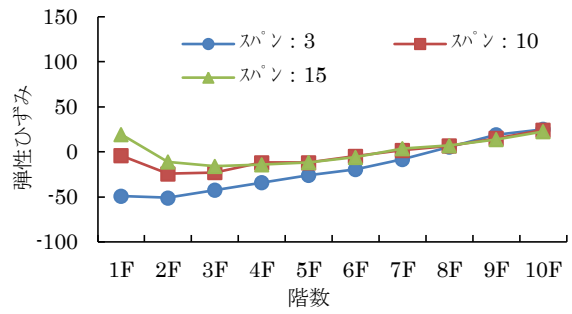


図10 柱の弾性ひずみ算定例（CASE2・W185）

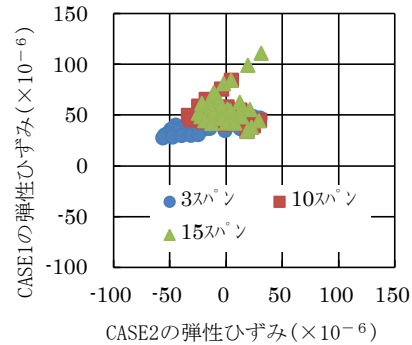


図11 柱の弾性ひずみの比較（CASE1とCASE2）

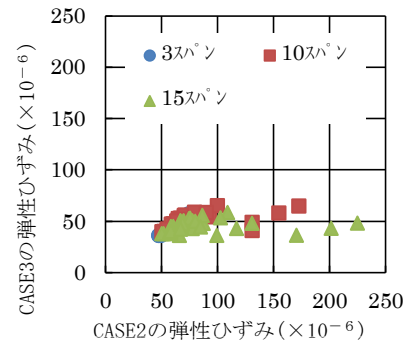


図12 梁の弾性ひずみの比較（CASE2とCASE3）

で、施工工程を考慮した場合に低層階の弾性ひずみが大きくなるのは、主に施工期間中に硬化した基礎梁の拘束によるものと推定される。

3.3 ひび割れ指数

図13に、柱および梁のひび割れ指数の経時変化の例を示す。打設初期は引張応力が小さいので、ひび割れ指数は大きな値を示すが、乾燥が進むにしたがって徐々にその値は減少する結果となった。この減少は10年以降も継続する。これは、建築学会式による乾燥収縮ひずみは、10年以後も増大する推定式となっているためである。

図14に、梁についてのひび割れ指数の分布図を示す。スパン数3を除いて、低層階および高層階で、引張応力が引張強度を上回る値である1.0以下の値を下回る場合が見られ、この箇所における梁については、乾燥収縮によってひび割れる可能性が非常に高いことが示唆された。一方、図15に、柱についてのひび割れ指数の分布図を示す。すべてのスパン数について、1.0を上回った。

図16に、梁について、自重を考慮しないCASE1と考慮

したCASE2の比較を示す。ひび割れ指数が1.0を下回る範囲では、概ね両者の値は等しく、梁においては自重の影響は小さいものと思われる。

図17に、梁について、CASE2の場合における単位水量の違いに関して、W185とW200との比較を示す。W185に対してW200の場合は10%程度小さな値を示し、スパン数に影響なく、よりひび割れの危険性は増す結果となった。一方、同様に、図18にW185とW165との比較を示す。W185に対してW165の場合は15~20%程度大き

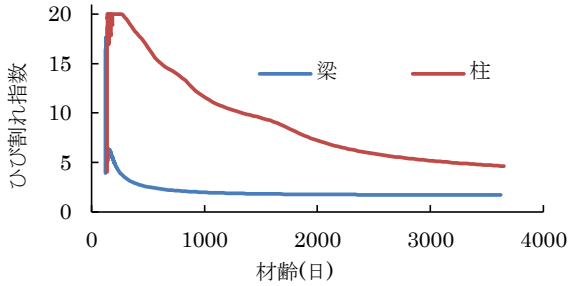


図13 ひび割れ指数の経時変化 (CASE2・W185)

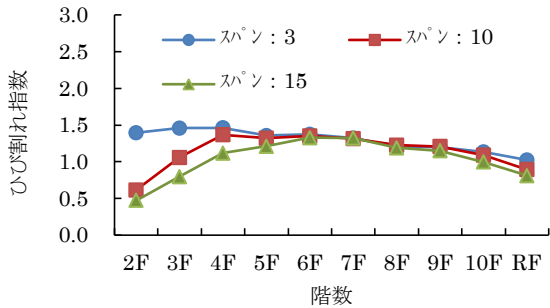


図14 梁のひび割れ指数算定例 (CASE2・W185)

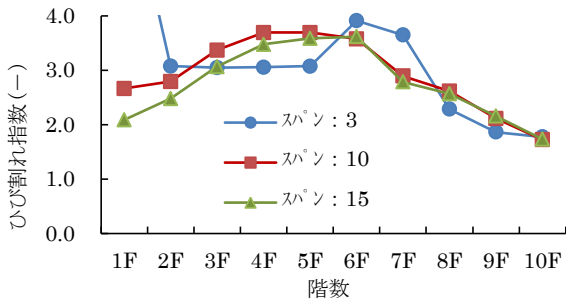


図15 柱のひび割れ指数算定例 (CASE2・W185)

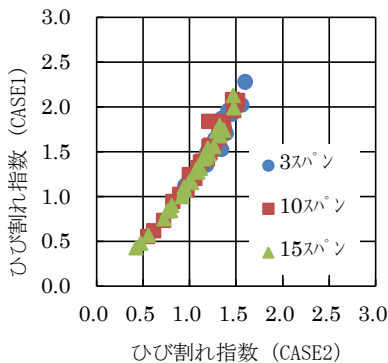


図16 梁のひび割れ指数の比較 (CASE1とCASE2)

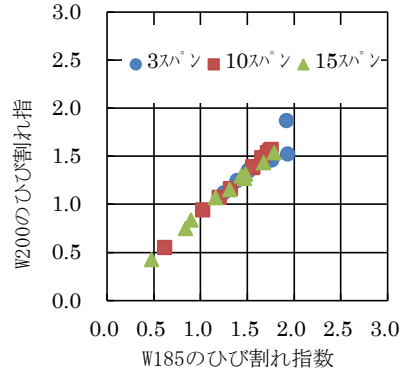


図17 梁のひび割れ指数の比較 (W185とW200)

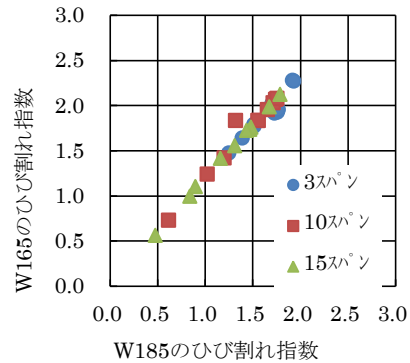


図18 梁のひび割れ指数の比較 (W185とW165)

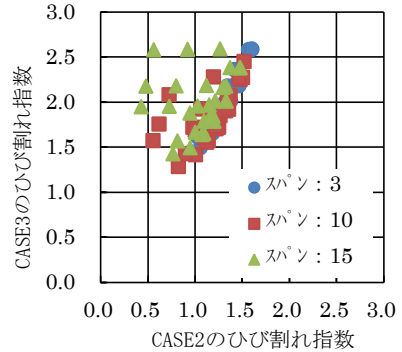


図19 梁のひび割れ指数の比較 (CASE2とCASE3)

な値を示し、ひび割れ低減効果が見られる。図19に、梁の場合のひび割れ指数に関するCASE2とCASE3との比較(施工工程考慮の有無)を示す。施工工程を考慮しない同時乾燥の場合は、考慮する場合よりもスパン数の影響なく大きな値を示し、施工工程を考慮した場合にはしない場合よりもひび割れに対して厳しい評価を行うこととなる。

3.4 拘束率

図20および図21に、梁の拘束率の分布算定例を示す。CASE2で3スパンの場合は、10および15スパンの場合は、5階以上の中高層でこれと同等な値を示したが、低層ではこれよりも大きな値を示した。しかし、施工工程を考慮しないCASE3(建物全体が同時に同時乾燥)では、いずれのスパンとも、階数にかかわらず0.1~0.15のほぼ一定値を示した。

図22に、梁の場合のCASE2とCASE3との比較（施工工程考慮の有無）を示す。CASE3の全体同時乾燥では、概ねスパン数の影響なく一定値を示し、CASE2の施工工程を考慮した場合にはCASE2よりも大きな値を示した。

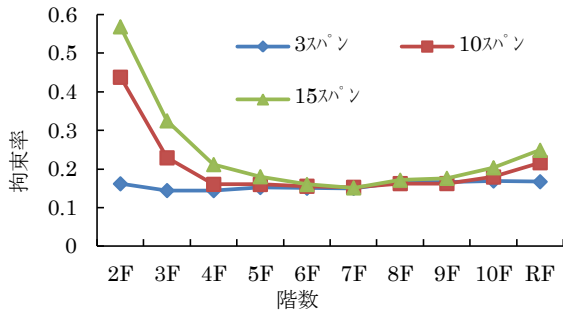


図 20 梁の拘束率の算定結果 (CASE2・W185)

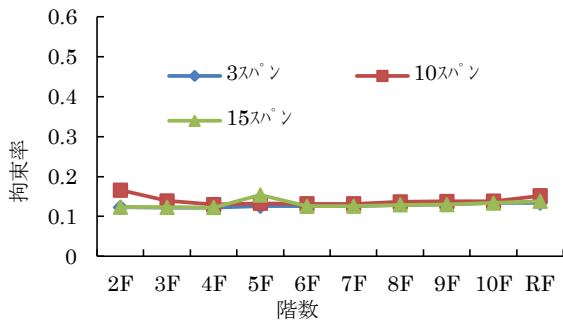


図 21 梁の拘束率の算定結果 (CASE3・W185)

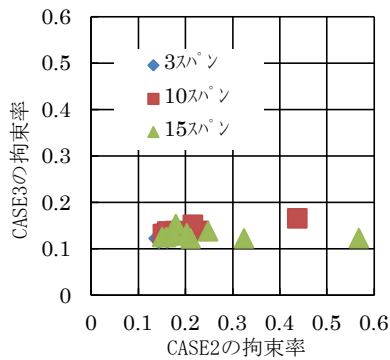


図 22 梁の拘束率の比較 (CASE2 と CASE3)

4. まとめ

本研究結果をまとめると以下のようになる。

- ひび割れの危険性の高い部材の位置を評価した結果、桁行方向については、柱は最端部に、そして梁は中央部に位置するものが、高さ方向については、梁は低層階、そして柱は低層階および高層階に位置するものが、それぞれひび割れの危険性が高くなる傾向を示した。
- スパン数の影響については、施工工程を考慮する場合には、スパン数が大きくなるほど、低層階においてひび割れの危険性が高くなることが分かった。
- 柱についてのひび割れ指数は、自重による圧縮ひずみによって、本解析の範囲内では概ね 1.0 を上回る結果

となった。

- 梁についての引張弾性ひずみおよびひび割れ指数ともに自重考慮の有無に大きく影響を受けない。また、単位水量の影響は、 $165 \sim 200 \text{ kg/m}^3$ の範囲であれば、 185 kg/m^3 を基準とすると $+20 \sim -10\%$ の範囲で変動する。
- 施工工程を考慮する場合としない場合とでは、ひび割れ指数に与える影響は大きく、施工工程を考慮して下層階の拘束を受けることによって、施工工程を考慮しない同時乾燥の場合よりも小さな値となり、ひび割れに対しては厳しい評価結果となった。
- 梁の拘束率は、施工工程を考慮する場合には低層階で大きな値を示すものの、中高層階ではほぼ一定で、0.15 程度であった。
- 本解析研究では、梁についてのみひび割れの危険性が高いことが言及されているが、季節変動における温度ひずみが生じる場合には柱も十分にひび割れる危険性はあること、さらに、ひび割れ指数は部材断面の軸方向ひずみに基づく平均値を抽出したものであり、曲げひび割れやせん断ひび割れについては取り扱っていないために、今後はこれらのひび割れの危険性についても検討する必要がある。

[参考文献]

- 大野義照, 除泰錫, 中川隆夫: 外部拘束を受ける鉄筋コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れ幅の予測, 日本建築学会構造系論文集, No.616, pp.9~16, 2007
- 除泰錫, 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, No.626, pp.497~504, 2008
- 横井謙二・森本博昭・小柳冷: 有限要素法による温度ひび割れ算定法に関する研究, コンクリート構造物の体積変化によるひびわれ幅制御に関する JCI コロキウム論文集, pp.115~122, 1990
- 青山博之: 鉄筋コンクリート造建築物の自己歪応力に関する研究, 東京大学学位論文, 1952.12
- 株式会社 ASTEA-MACS Ver.7, 2013
- 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
- 橋田 浩, ほか: 高強度コンクリートを用いた鉄筋コンクリート構造部材の初期ひび割れに関する実験ならびに応力解析, コンクリート工学論文集, Vol.10, No.1, pp.51~63, 1991

[謝辞]

本研究は、2013年3月に本学生活科学部を卒業した大阪大学施設部整備課の岡嶋里沙氏に多大な協力を得た。ここに謝意を表す。