

論文 乾燥収縮を受ける両端固定梁を想定した長期ならびに短期性状に関する FEM 解析

ケイ ショウコ*1・劉 思芸*1・楊 子昂*1・渡部嗣道*2

要旨：両端を固定した梁に長期的な鉛直荷重が作用する場合と乾燥収縮を生じさせた場合の2種類の外力条件を設定し、長期的性状変化がその後の短期的な曲げ性状に及ぼす影響を評価するための非線形 FEM 解析を行った。乾燥収縮が作用する場合には、片方の端部にはバネ要素が取り付けられ、架構を想定して梁の両端が拘束を受けるようなモデルとしている。解析の結果、鉛直荷重が作用する場合には、短期的な性状に対しては大きな影響がないことが分かった。一方、乾燥収縮が生じる場合には、引張軸力が作用するために、短期的な曲げ性状に関して構造的な低下をもたらす可能性があることが分かった。

キーワード：クリープ、乾燥収縮、有限要素法、逐次積分法、梁

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の構造設計では、その断面算定を行う場合、鉄筋とコンクリートとのヤング係数の違いやクリープの影響を考慮する必要がある。著者らは、独自に開発した FEM (有限要素法) 構造解析ソフト¹⁾を用いて、乾燥収縮とクリープ変形を伴う長期間の持続的軸力などの負荷を作用させた後に、地震時を想定した短期的な軸力と曲げモーメントを作用させた柱の曲げ性状を評価し、曲げ剛性などに関して性能低下を生じるおそれがあり、柱の長期性状 (特にクリープ変形) がその後の短期性状に与える影響があることを明らかにした²⁾。

ところで、比較的長大な建築構造物では、基礎や地盤の拘束を受けた低層階の梁部材に乾燥収縮による軸力が生じて梁中央にひび割れが生じることが、上田・森廣らによって報告されている³⁾。著者らも、柱・梁・床・基礎などで構成されたフルモデルを作成し、乾燥収縮によって梁に生じる軸力に関する FEM 解析を行い、ひび割れが生じるほどの大きな引張軸力が生じる結果を導き出した⁴⁾⁵⁾。ただし、ひび割れの発生は、構造性能についても何らかの影響が生じる恐れがあると考えられるものの、乾燥収縮などの長期的な外力が梁あるいは水平材の構造性能に与える影響に関する研究はこれまでほとんど行われていない。そこで、本研究では、両端固定の梁に長期的な乾燥収縮を作用させ、それによって生じる軸方向引張力が梁の曲げ性状に与える影響を評価するために、これまでと同様に長期的ならびに短期的な性状を評価するための FEM による非線形解析を実施し、梁部材の構造性能に及ぼす影響の評価を試みた。

2. 解析方法

(1) FEM 解析

本解析でも、著者らが開発した FEM 解析ソフト¹⁾を使

用した。コンクリート要素は前報²⁾と同様に8節点立体モデルとし、材料構成則は応力ひずみ関係に関連する圧縮破壊エネルギーは中村式⁶⁾を、引張強度ほか各種力学的性質は(公社)土木学会式⁷⁾に準拠した。また、鉄筋は離散鉄筋モデルとし、バイリニア型の完全弾塑性とした。ただし、鉄筋とコンクリートとの節点間は剛結とした。

(2) 長期解析

長期解析では乾燥収縮ひずみによるひび割れ解析とクリープ解析においては、前報と同様に²⁾逐次積分法によった。長期解析における設定条件を表-1に示す。長期解析期間は、工事期間を1年間として、それから開始した50年間とした。その期間に生じる乾燥収縮ひずみの最終設定値は、日本建築学会の見解⁸⁾を参考に 300×10^{-6} とした。乾燥収縮ひずみならびに長期クリープひずみの履歴についても、前報²⁾と同様に、今回も実構造物の長期的な性状も実証されている土木学会の算定式⁷⁾に準拠した。乾燥収縮ひずみについては、学会算定式による50年後の値が最終設定値となるように、同標準式の値に対して実数倍した。本解析は逐次積分法を適用しているため、乾燥収縮ひずみが増加するたびに応力が発生し、その都度クリープひずみや塑性ひずみが算定される。

表-1 長期解析における設定条件

解析対象	乾燥収縮ひずみ $\times 10^{-6}$	乾燥開始材齢 日	解析開始材齢 日	長期解析期間 年	クリープ係数 ※1	圧縮強度 N/mm ²
梁	300	365	365	50	3~4	27

※1: 載荷開始から50年間におけるクリープ係数を示す。

表-2 コンクリート調査表⁵⁾

呼び強度	粗骨材最大寸法	スラブ厚	単位水量	水セメント比	細骨材率	単位粗骨材量
—	mm	cm	kg/m ³	%	%	kg/m ³
27	20	18	180	54	48.4	913

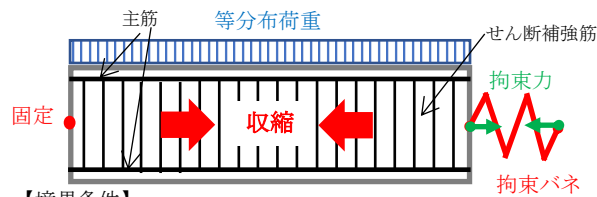
*1 大阪公立大学大学院 生活科学研究科居住環境学専攻 (学生会員)

*2 大阪公立大学大学院 生活科学研究科居住環境学専攻 教授 博士 (工学) (正会員)

コンクリートの圧縮強度は 27N/mm^2 とした。想定するコンクリートは、単位水量の小さな高性能 AE 減水剤による実用的なコンクリートを適用することとした。その調合（標準調合表⁹⁾）を表-2に示す。なお、鉄筋は主筋およびせん断補強筋ともにSD345とした。

(3) 長期解析での解析モデルの概要

図-1に解析モデルの概要を示す。梁は曲げ破壊が先行する梁部材とし、乾燥収縮による影響を受けたとしてもせん断破壊に移行しないように十分なせん断余裕度 α を設けた（今回では、せん断余裕度 α は「4」程度）。



【境界条件】

- ・端部断面は同一平面で鉛直維持、片端拘束ばね固定、片端固定
- ・端面の面内方向は自由変形
- ・端部の軸方向変形は、拘束ばね（線形）を付与

図-1 解析モデルの概要

梁端部は、両端固定と同等な境界条件とするため、両端面は絶えず同一鉛直面を維持するようにした。ただし、鉛直端面の面内方向については、乾燥収縮ひずみや応力発生時の変形に対して自由変形となるようにした。さらに、梁の片方の端面には拘束バネ（弾性）を設けて、両端が完全固定となるのではなく、梁の軸方向に対して、柱など鉛直部材によるせん断剛性（梁の軸方向反力剛性）に相当するような拘束剛性 K を付与させた。

梁上面に作用させる鉛直荷重については、等分布荷重とし、梁端部に作用する曲げモーメントが、梁のひび割れ発生曲げモーメント M_{cr} に対して $1/2$ 倍あるいは 1 倍となるように作用させた。

なお、せん断余裕度 α 、梁の拘束剛性 K 、ひび割れ発生曲げモーメント M_{cr} は、次式で算定した。

$$\alpha = Q_{su} / Q_{mu} \quad (1)$$

$$Q_{mu} = 2 \cdot M_u / L \quad (2)$$

$$M_u = 0.9 \cdot \sigma_y \cdot a_t \cdot d \quad (3)$$

$$K = \beta \cdot 12 \cdot E \cdot I / h^3 \quad (4)$$

$$M_{cr} = 0.56 \cdot (F_c)^{0.5} \cdot Z_e \quad (5)$$

ここで、 α :せん断余裕度、 Q_{su} :せん断耐力¹⁰⁾、 Q_{mu} :曲げ終局時のせん断耐力、 M_u :梁の曲げ終局モーメント、 L :梁長、 σ_y :鉄筋の降伏点、 a_t :引張鉄筋の断面積、 d :梁の有効せい、 K :拘束剛性、 β :拘束剛性の割増し係数（本解析では0,1,2の3種）、 E :コンクリートのヤング係数、 I :柱の断面2次モーメント（ここでは、断面を60cm正方形とした）、 h :鉛直部材長（ここでは、柱長を3mとし

た）、 M_{cr} :ひび割れ発生曲げモーメント、 F_c :コンクリートの圧縮強度、 Z_e :鉄筋も考慮した梁の断面係数

図-2に、長期解析において梁に作用する軸力の概要を示す。梁には、鉛直荷重によって曲げモーメントが生じる場合、あるいは乾燥収縮ひずみによって軸方向引張力が生じる場合の2つの荷重を設定した。

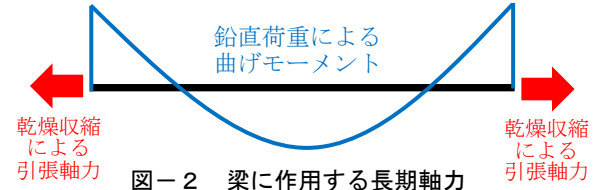


図-2 梁に作用する長期軸力

(4) 短期解析と長期解析との連成

本解析については、前報²⁾と同様に、長期解析用（非線形逐次積分法(Step by step法)）と短期解析用（静的非線形増分解析(Pushover)）の2つの解析ツールを有するプログラムを連成して実施する。長期解析と短期解析との連成は、長期解析による変形や応力をそのまま残した状態で短期解析に移行する。解析プロセスを図-3に示す。また、短期解析の概要を図-4に示す。この場合、梁両端面は同一平面状態を維持し、長期時の乾燥収縮に

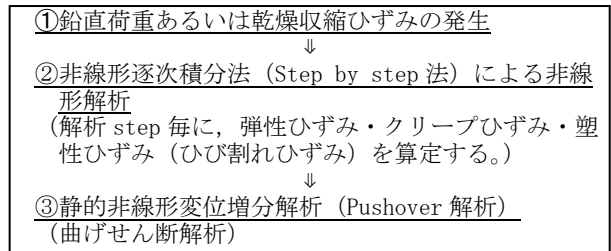


図-3 解析プロセス

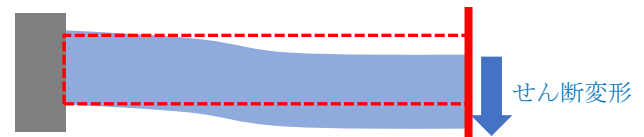


図-4 短期解析概要

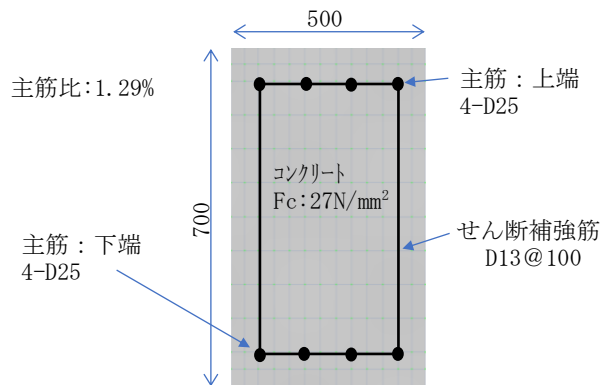


図-5 FEMモデル（梁断面）

よる軸方向の拘束力を保持したまま、ラーメン構造における水平加力時を想定したためにせん断変形を加える加力とした。

(5) 梁の FEM モデル

図-5および図-6に FEM モデルを示す。梁寸法は幅 500×せい 700×長さ 6000mm とし、主筋は D25 で上端・下端とも各 4 本・計 8 本設置し、せん断補強筋は D13 を 100mm 間隔で設置した。コンクリート表面と主筋中心との距離は梁幅あるいは梁せいの 0.1 倍とした。

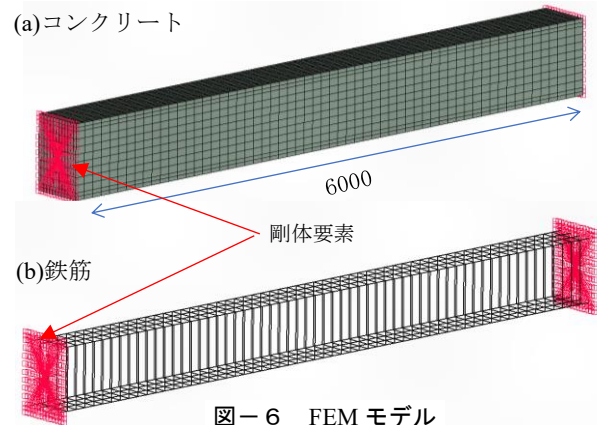


図-6 FEM モデル

3. 解析モデルの種類

本解析におけるモデルの種類を表-3に示す。解析モデルは9種類である。これらは、5シリーズに分けられており、シリーズ1は負荷がない基本モデルである。その他のシリーズは、鉛直荷重の有無、乾燥収縮の有無、長期解析におけるバネ剛性の大きさ、およびクリープの有無などを解析因子としている。

表-3 解析モデルの種類

シリーズ	モデル名	乾燥収縮	長期時外部拘束	鉛直荷重*	クリープ解析
1	MODEL1	無	$\beta = 0$	無	無
2	MODEL2-1	無	$\beta = 0$	$1/2M_{cr}$	無
	MODEL2-2	無	$\beta = 0$	M_{cr}	無
3	MODEL3-1	無	$\beta = 0$	$1/2M_{cr}$	有
	MODEL3-2	無	$\beta = 0$	M_{cr}	有
4	MODEL4	有	$\beta = 0$	無	有
5	MODEL5-1	有	$\beta = 1$	無	有
	MODEL5-2	有	$\beta = 2$	無	有
	MODEL5-3	有	$\beta = 3$	無	有

*鉛直荷重の大きさは、梁端の曲げモーメントが、ひび割れ発生曲げモーメント (M_{cr}) あるいはその 1/2 に達するかの条件とした。

4. 解析結果

(1) シリーズ 1 : MODEL1

図-7に、MODEL1のせん断変位とせん断力との関係を示す。MODEL1は、本解析モデルの無負荷における梁のせん断曲げ耐力を評価するための基本モデルである。解析

の結果、コンクリートのひび割れによる曲げ剛性の低下の後、主筋の引張降伏による曲げ破壊が生じ、せん断力の最大値は 159kN となった。これは、(3)式より求めた曲げ終局モーメントによる最大せん断力 132kN よりも大きな値を示した。なお、このモデルのほかのすべてのモデルにおいて、引張鉄筋の降伏が生じる曲げ破壊時ににおいて最大せん断力を示す結果となった。

(2) シリーズ 2 : MODEL2-1, 2-2

図-8に、シリーズ2のMODEL2-1と2-2のせん断変位とせん断力との関係を示す。このモデルは、シリーズ1のMODEL1に鉛直荷重を作用させ、短期的な性状についてのみ評価したものである。鉛直荷重が作用すると、曲げ破壊による最大せん断力はやや低下し、ひび割れ発生曲げモーメント相当分の 1/2 倍の場合 (MODEL2-1) は 156kN、1 倍の場合 (MODEL2-2) は 149kN であった。これは、鉛直荷重によって引張鉄筋により大きな引張力が負担されたためである。なお、MODEL2-2は2-1に比べて、剛性がやや低下する結果となった。

(3) シリーズ 3 : MODEL3-1, 3-2

図-9に、シリーズ3のMODEL3-1と3-2のせん断変

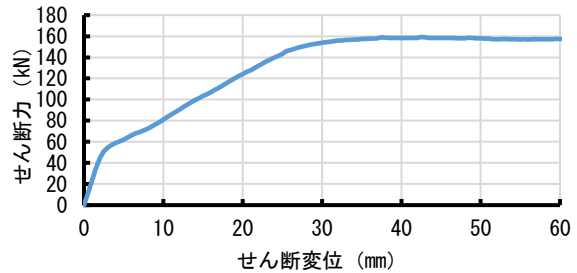


図-7 せん断変位とせん断力との関係 (MODEL1)

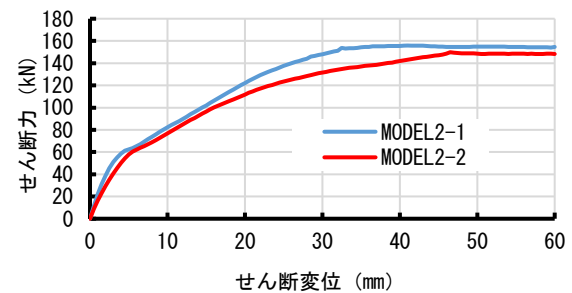


図-8 せん断変位とせん断力との関係 (MODEL2-1, 2-2)

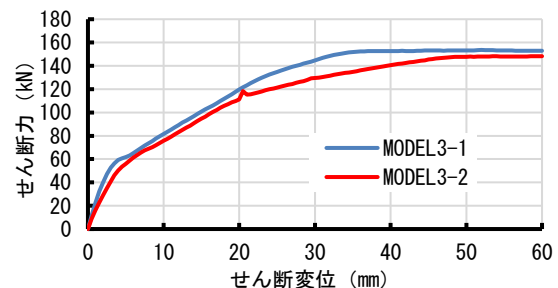


図-9 せん断変位とせん断力との関係 (MODEL3-1, 3-2)

位とせん断力との関係を示す。このモデルは、シリーズ2の鉛直荷重時の応力状態のまま、長期的にクリープ変形を生じさせたものである。最大せん断力は、それぞれ154kNと148kNであり、クリープのないシリーズ2のモデルとほぼ同じ値を示した。これは、ひび割れが発生しない曲げモーメントが生じるような鉛直荷重の範囲内であれば、クリープによってせん断耐力に与える影響はほとんどないことを示している。

(4) シリーズ4 : MODEL4

シリーズ4のMODEL4は、MODEL1に対して、長期的な乾燥収縮ひずみとそれに応じたクリープ変形を生じさせたものである。ただし、拘束バネによる拘束はなく、コンクリートに対する主筋による拘束のみを有する条件となる。図-10に、梁の長さ方向の収縮量の経時変化を示す。最終的には1.24mmとなり、鉄筋のないものは1.8mmであるから、主筋の拘束によって約69%の収縮量となった。

図-11に、MODEL4のせん断変位とせん断力との関係を示す。せん断耐力は155kNとなり、MODEL1よりもやや低い値を示した。また、第一折れ点（コンクリートのひび割れによる剛性低下の始点）についてもMODEL1よりも低い値を示した。これは、乾燥収縮ひずみが生じた場合、鉄筋の内部拘束によってコンクリートに引張応力が生じ、見かけ上のひび割れ強度および引張軟化領域が低下することによるものと考えられる。

(5) シリーズ5 : MODEL5-1, 5-2, 5-3

MODEL5-1~5-3は、MODEL4に対して、外部拘束を設置し、長期的に乾燥収縮ひずみとそれに応じたクリープ変形を生じさせたものである。図-12に、梁の長さ方向の収縮量の経時変化を示す。MODEL5-1~5-3は、それぞれ

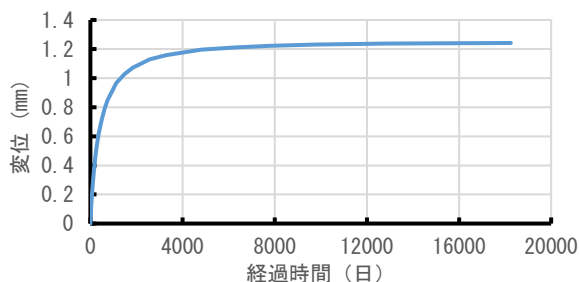


図-10 梁の収縮量 (MODEL4)

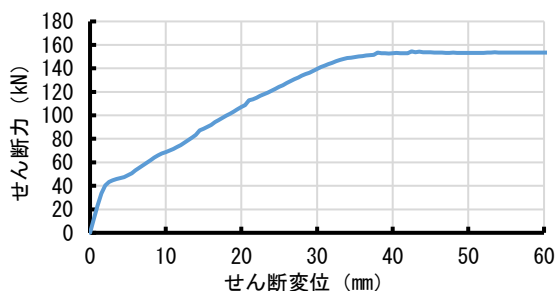


図-11 せん断変位とせん断力との関係 (MODEL4)

れ、最終的に、0.95mm（無筋の収縮値に対して、53%）、0.79mm（44%）、0.67mm（37%）となり、MODEL4よりもさらに小さな値となった。

図-13に、梁の軸方向力（拘束力）の経時変化を示す。この軸方向力は、図-1に示す拘束バネに作用する応力（節点応力）から求めた。MODEL5-1~5-3は、それぞれ、最終的に、119kN、194kN、247kNとなり、外部拘束バネの剛性が大きくなるほど、その値は大きくなった。ただし、拘束力は最終値まで単調増加した後、一定値を示し低下しなかった。これは、本解析期間中においてはひび割れが発生していないことを示している。

図-14に、MODEL5-1~5-3のせん断変位とせん断力との関係を示す。それぞれ、最大値は、141kN、135kN、129kNとなり、外部拘束バネの剛性が大きくなるほど、その値は低下した。この低下の現象は、柱に引張力が作用する場合に曲げ耐力が低下する現象と同じで¹¹⁾、梁に乾燥収縮によって引張力が作用することで、同様な現象が生じたものと考えられる。最も低い値を示したMODEL5-3では、(3)式の設定式による曲げ終局モーメン

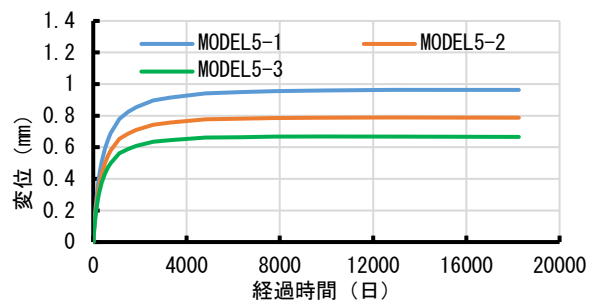


図-12 梁の収縮量 (MODEL5-1~5-3)

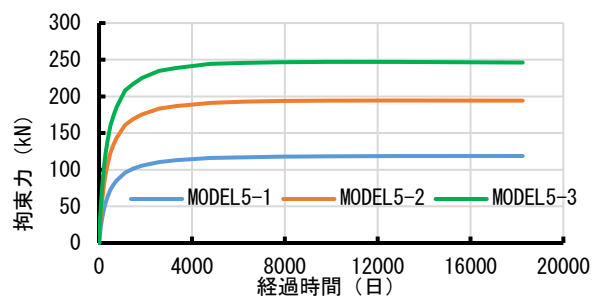


図-13 梁の拘束力 (MODEL5-1~5-3)

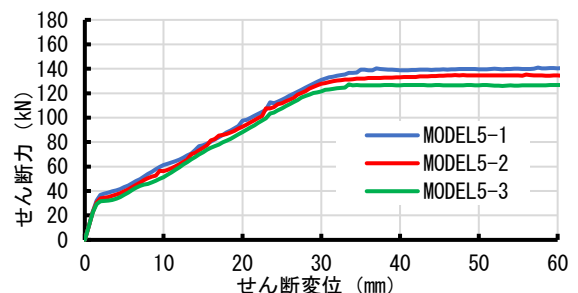


図-14 せん断変位とせん断力との関係 (MODEL5-1~5-3)

トから求められたせん断力よりも小さな値にまで低下した。また、MODEL1と比較すると、一定値に達するまでの初期の剛性はやや低下する傾向を示した。

5. 考察

本報では、曲げひび割れが生じる鉛直荷重の範囲内では、クリープが曲げ耐力に与える影響は小さいので、本章における考察では、乾燥収縮を生じる場合の解析結果について報告する。

(1) 引張拘束力

表-4に、乾燥収縮によって拘束パネに生じた引張力すなわち梁に生じた引張拘束力の発生状況を示す。平均応力度は最大で0.7N/mm²程度で、引張強度推定値⁷⁾に比べて1/3程度であり、コンクリートにひび割れが生じるような大きさではなかった。また、軸力比は最大で2.6%程度であり概ね小さな値であると評価できる。

表-4 引張拘束力

MODEL	拘束力 (kN)	平均応力度*1 (N/mm ²)	応力度比*2 (%)	軸力比*3 (%)
MODEL5-1	118.7	0.339	16.4	1.26
MODEL5-2	194.3	0.555	26.8	2.06
MODEL5-3	247.1	0.706	34.1	2.61

*1 梁の断面積で除した値、*2 平均応力度を引張強度の推定値(2.07N/mm²)⁷⁾で除した値、*3 文献11)

表-5 曲げひび割れ強度と推定結果

MODEL	M _{cr} (kNm)	σ _{cr} (N/mm ²)	σ _{cr1} *1 (N/mm ²) (σ _{cr1} /σ _{cr})	σ _{cr2} *1 (N/mm ²) (σ _{cr2} /σ _{cr})
MODEL1	153.2	3.25	2.91 (0.90)	2.91 (0.90)
MODEL4	121.2	2.57	2.91 (1.13)	2.57 (1.00)
MODEL5-1	110.2	2.34	2.91 (1.25)	2.28 (0.97)
MODEL5-2	101.8	2.16	2.91 (1.35)	2.09 (0.97)
MODEL5-3	88.1	1.87	2.91 (1.56)	1.96 (1.05)

ここで、M_{cr}: 解析で求められた曲げひび割れモーメント、σ_{cr}: 曲げひび割れ強度 (=M_{cr}/Z_e, Z_e: 鉄筋を考慮した柱の断面係数)

*1 建築学会式による梁のひび割れ曲げモーメントから求めた推定値

*2 建築学会式による柱のひび割れ曲げモーメントから求めた推定値、ただし、鉄筋の内部拘束による曲げ強度差も考慮した。

(2) 第1折れ点(曲げひび割れ強度)

本解析で得られた梁部材の変形-せん断力関係における第1折れ点から曲げひび割れ強度を算定した。その結果を表-5に示す。曲げひび割れ強度は、乾燥収縮ひずみが生じると、鉄筋の内部拘束および外部拘束パネによって、コンクリートに引張応力が生じ、その影響が大きくなるほど低下する傾向を示した。

また、解析値と推定値との比較を行った。推定値は、建築学会式¹¹⁾を適用したが、軸方向力を考慮しない梁を対象とした推定値(σ_{cr1})と、軸方向力を考慮する柱を対象とした推定値(σ_{cr2})とを表-5に示す。後者について

は、鉄筋による内部拘束の影響も考慮している。前者の推定値(σ_{cr1})は、解析値との差が大きいが、後者の推定値(σ_{cr2})は、解析値との差は小さく、軸方向力の影響を考慮した柱の推定式の適用が好ましい結果となった。

(3) 降伏点剛性

ここでは建築学会式¹¹⁾による降伏点剛性の適用性について検討した。まず、梁の曲げ終局モーメントと降伏点剛性低下率の建築学会式から算定した降伏点変位を求め(32.8mm)、この変位時における各解析値におけるせん断力を求めた。この結果を図-15に示す。引張拘束力を受けないモデルについては建築学会式による値よりも大きい、拘束力を受けるモデル(MODEL5-2,5-3)については、建築学会式による値よりも小さな値を示し、降伏点剛性の推定値が変形上危険側となる結果となった。

そこで、同様に柱における曲げ終局モーメントと降伏点剛性低下率の建築学会式を適用し、引張拘束力の影響を考慮して、同様な検討を行った。図-16にその結果を示す。軸方向力を考慮した柱の建築学会式を適用すると、解析値は建築学会式による推定値を上回り、せん断変形上において安全側の評価結果となった。

(4) 軸方向力と曲げ終局モーメントの関係について

図-17に、MODEL1、MODEL4とMODEL5のシリーズについて、長期解析による軸方向力の最終値と曲げ終局モーメントとの関係を示す(本図では、軸方向力は、引張

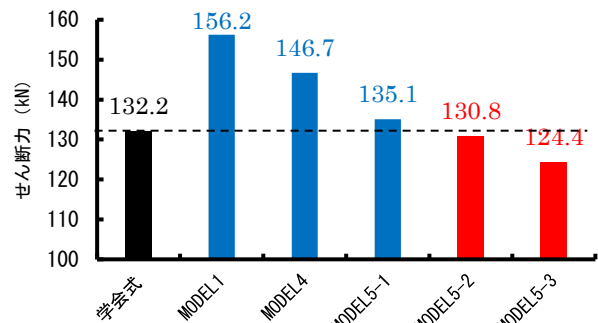


図-15 降伏点せん断変位時のせん断力 (梁適用式による検討)

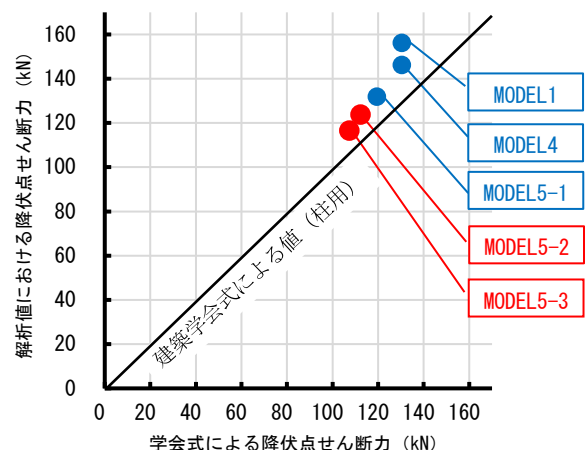


図-16 降伏点せん断変位時のせん断力 (柱適用式による検討)

力を負としている¹¹⁾。最大せん断力を曲げ終局モーメントに換算し、引張力による軸方向力との関係を建築学会式と比較して示した。解析による曲げ終局モーメントは軸方向力が大きくなるほど減少し、本解析の範囲では建築学会式と同じ傾きとなる傾向を示した。ただし、最小二乗法による近似式の軸方向耐力の推定値は、解析値による推定値と建築学会式とはほぼ同じ値を示した(誤差:2.83%)。また、軸方向力によって低下する曲げ終局モーメントは、乾燥収縮によってコンクリートにひび割れが生じないような本解析の範囲内においても、軸方向力を考慮しない梁に適用する場合の建築学会式の値よりも下回る結果も得られた(MODEL5-3)。したがって、乾燥収縮ひずみを生じ、そのひずみに対する外部拘束を受ける梁については、乾燥収縮ひずみによって生じる軸方向力に対して影響する柱などの外部拘束を考慮しなければならない。

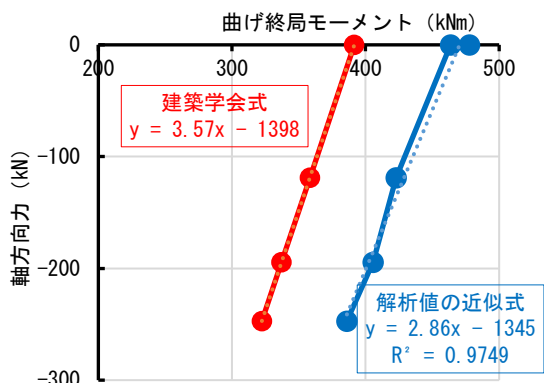


図-17 軸方向力と曲げ終局モーメントとの関係

6. まとめ

- 1) 曲げひび割れモーメントに相当する鉛直荷重を負荷し、クリープを考慮しないモデルでは、基本モデルよりも最大せん断力および剛性はやや低下した。
- 2) 鉛直荷重を負荷してクリープ変形を考慮するモデルを解析した場合、クリープを考慮しないモデルとの差は小さく、その影響はほとんどないことが分かった。
- 3) 鉄筋による内部拘束のみの場合の乾燥収縮ひずみを生じるモデルでは、最大せん断力は基本モデルよりもやや小さな値を示した。
- 4) 一定の乾燥収縮ひずみを生じる場合、部材の拘束率が大きくなると梁の軸方向引張力も大きくなる。
- 5) 乾燥収縮ひずみが拘束を受ける場合の軸方向力によるコンクリートの引張応力については、本解析条件では、ひび割れは生じない範囲であった。
- 6) 外部拘束バネを設けたモデルでは、乾燥収縮の影響が大きく、曲げひび割れ強度、降伏点剛性ならびに曲げ終局モーメントが低下し、梁についても軸方向力の影響を考慮しなければならない結果となった。

7) 乾燥収縮と外部拘束の影響による曲げ終局モーメントの低下の程度は、柱に適用する建築学会式による低下の程度とほぼ同じ結果となった。

7. 今後の課題

本解析における引張拘束条件がコンクリートのひび割れが発生しない条件であったため、本解析よりも幅広い範囲の条件やひび割れが発生する条件、ならびに主筋による拘束による影響などについても同様な検討を行う必要があり、今後の研究課題とする。

【謝辞】

本研究に当たっては、佐藤知明氏(阪神高速技術先進技術研究所)にご指導をいただきました。ここに謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 渡部嗣道ほか: 自己歪が鉄筋コンクリート造建築物の構造性能に与える影響に関する研究 その1. 3次元非線形構造解析用ソフトウェア「Soft-OCU」の開発, 日本建築学会学術講演梗概集・構造IV, pp.667-668, 2016
- 2) 河東宏樹, 渡部嗣道, 富田耕司ほか: 乾燥収縮とクリープを受ける柱の曲げ性状に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.2, pp.1-6, 2020
- 3) 上田弘樹, 森廣和幸, 辻英一, 森田秀喜ほか: コンクリートの乾燥収縮が長大建物に及ぼす影響について その1・その2, 日本建築学会全国大会学術講演梗概集(構造), pp.8184, 1997
- 4) 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.2, pp.49-54, 2014
- 5) 渡部嗣道, 富田耕司ほか: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, pp.85-90, 2015
- 6) Nakamura, H. and Higai, T. :Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Seminar on Post-peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Loads, pp.259-272, 1999, JCI
- 7) 土木学会: コンクリート標準示方書(設計編), 2012
- 8) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 付7「長期荷重時におけるひび割れと変形」, 2018
- 9) 大阪広域生コンクリートホームページ: 普通コンクリート標準調査表(高性能AE減水剤), 2018.3更新 (<https://www.osaka-kouiki.or.jp/>)
- 10) 建築物の構造関係技術基準解説書
- 11) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算規準・同解説, 2021