

鉄筋腐食によるコンクリートの表面ひび割れ発生予測モデルの

開発に関する研究

梶田 幸秀¹

九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門

本研究では、鉄筋腐食により発生するコンクリートのひび割れに対し、二種類の鉄筋腐食モデルを用い、コンクリート内部のひび割れ挙動について数値解析を実施した。本解析の結果、鉄筋腐食モデルの違いにより、コンクリート内部のひび割れの発生状況が異なることがわかった。また、鉄筋膨張量とコンクリート表面の最大主ひずみは二次関数で近似できることを明らかにした。

1. はじめに

近年、高度経済成長期に大量に構築された RC 構造物の経年劣化による構造性能及び耐久性能の低下が深刻な問題となっている。例えば、中性化や塩害により鉄筋が腐食するとその体積が増し、その膨張圧でかぶりコンクリートにひび割れが生じ、かぶりコンクリートの剥離・剥落へと進行し、耐久性は急速に低下する。そのため、コンクリート中の鉄筋腐食が RC 構造物の耐久性能を低下させる要因の一つとされている。

RC 構造物中の鉄筋腐食が進行した場合のコンクリートのひび割れに関する研究は、これまでも実施されている。例えば、下西らは鉄筋の腐食膨張の圧力に起因するコンクリートのひび割れに対し、TNO（オランダ応用科学研究機関）が開発した汎用解析プログラムを用いて、鉄筋の半径方向に強制変位を与えて非線形解析を行い、鉄筋の腐食速度とひび割れ幅の関係を検討している¹⁾。路・関は離散ひび割れモデルを用いて、鉄筋を膨張させるかわりに、鉄筋周囲のコンクリートに強制変位を与える変位制御型の増分解析を行い、鉄筋腐食の進行に伴うひび割れの進行の状況やひび割れ幅と鉄筋膨張量の関係を検討している²⁾。さらに、三浦・富田は鉄筋腐食によるコンクリート部材のひび割れ形状について、鉄筋径、かぶり厚さを解析パラメータとし、剛体-バネモデルを用いて解析を行い、鉄筋径とかぶり厚さの関係によるひび割れ形状について検討している³⁾。このように、鉄筋腐食によるコンクリートのひび割れ進展の解析は多く行われているが、これまでの研究では、ひび割れ

の形状やひび割れ幅と鉄筋膨張量の関係について論じている論文が多い。

本研究では、目視ではコンクリート表面ひび割れが確認できない RC 構造物に対して、コンクリート表面の主ひずみを計測し、その結果を用いて、鉄筋の膨張量を推定するため、コンクリート表面にひび割れが到達するまでに着眼をおき、異なる鉄筋腐食膨張モデルを用いて、コンクリート内部のひび割れの分布状況ならびに鉄筋膨張量とコンクリート表面の主ひずみの関係を把握することを目的として検討を行った。

鉄筋膨張量とコンクリート表面の最大主ひずみの関係式を推定することができ、かつ、非破壊検査でコンクリート表面のひずみの大きさや内部のひび割れ状況を把握できる技術も併せて確立できれば、内部の鉄筋腐食状況を数値解析技術により推測（診断）することが可能となり、コンクリート表面にひび割れが到達するまでの時間や、かぶりコンクリートの剥落といった損傷にいたるまでの時間的余裕度をある程度把握できることにより、損傷を未然に防ぐことができると考えられる。

2. 数値解析条件

2.1 解析対象供試体

解析対象としては、過去、コンクリート中に鉄筋を配置し、電食により発生した表面ひび割れ性状について検討した研究⁴⁾を参考とした。図-1 に供試体の形状寸法を示す。図-1 中の黒い部分が鉄筋を表している。供試体の大きさは、 $370 \times 470 \times 240\text{mm}$ となっており、図-1 に示すとおり、鉄筋は 1 本として、鉄筋径

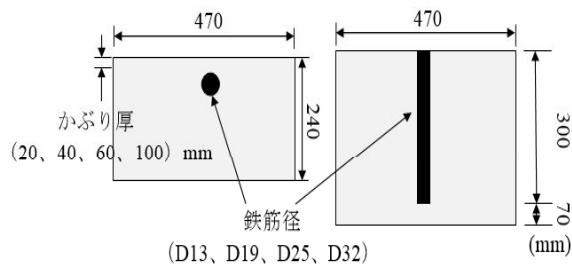


図-1 供試体の形状

表-1 解析モデルケース

	かぶり 20mm	かぶり 40mm	かぶり 60mm	かぶり 100mm
D13	K(T)11	K(T)12	K(T)13	K(T)14
D19	K(T)21	K(T)22	K(T)23	K(T)24
D25	K(T)31	K(T)32	K(T)33	K(T)34
D32	K(T)41	K(T)42	K(T)43	K(T)44

は 13mm, 19mm, 25mm, 32mm の 4 種類, かぶり厚さは 20mm, 40mm, 60mm, 100mm の 4 種類の計 16 種類を解析対象とした。鉄筋の腐食を模擬するモデルとして 2.3 節で詳述する均一載荷モデルと富田載荷モデル³⁾の 2 種類を用意し, 総計 32 ケースについて数値解析を行っている。解析ケースを表-1 に示す。表-1 に示す解析ケースに対して K は均一載荷モデル, T は富田載荷モデル, 十の位が鉄筋径, 一の位がかぶり厚さを表している。なお, 解析モデル作成にあたって, 実験は異形鉄筋であるが, 解析では丸鋼(鉄筋)としている。また奥行き方向(鉄筋軸方向)の要素分割数は 1 分割であり, 奥行き方向長さは 3mm とした。鉄筋は, 半径方向に 3 分割, 円周方向に 90 分割し, 中心まわり(最内周)は 6 節点ソリッド要素(三角柱要素)で, 外周は 8 節点ソリッド要素(四角柱要素)で分割を行い, コンクリートに関しては, 鉄筋のまわりは細かく分割し, 鉄筋から半径 20mm までの円の中に, 半径方向に 10 分割, 円周方向に 90 分割し, 残ったコンクリートの部分は概ね 2mm 立方の 8 節点ソリッド要素(直方体要素)となっている。

なお, 鉄筋周辺部のコンクリートの要素分割の方法について, すなわち, 放射状に四角柱要素を並べるのか, 直方体要素で縦・横に分割していくのかについては, 放射状の四角柱要素で分割する範囲を大きくしてもコンクリート表面にひび割れが最初に発生したときの鉄筋膨張量が変化しないところまで, 放射状の

O 点 (コンクリート表面中央)

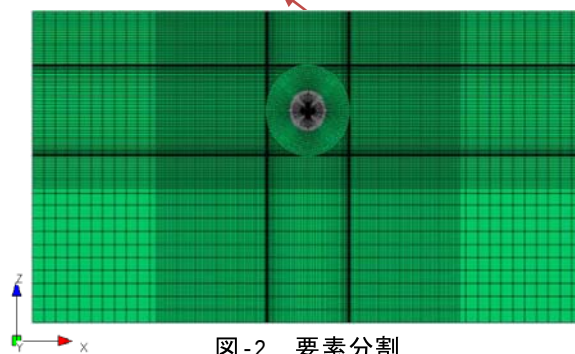
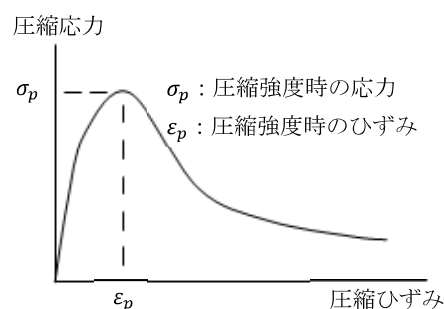
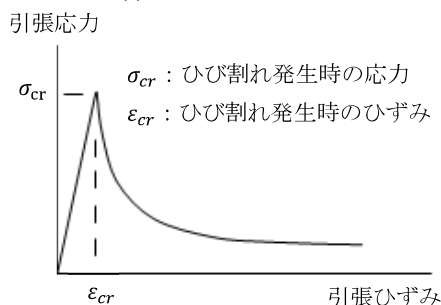


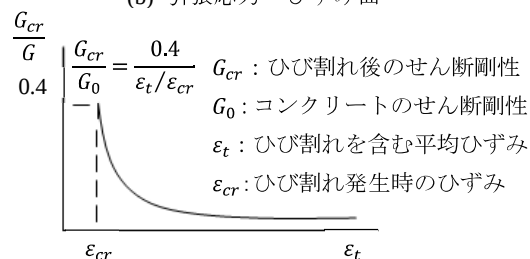
図-2 要素分割



(a) 圧縮応力-ひずみ関



(b) 引張応力-ひずみ曲



(c) ひび割れ後のせん断伝達特性(Al-Mahaidi モデル)

図-3 コンクリートの応力-ひずみ

四角柱要素で分割している。図-2 には鉄筋 D32 のかぶり厚さが 60mm (K43) のモデル図を示している。

2.2. 応力-ひずみ関係

解析に使用したソフトは, コンクリート構

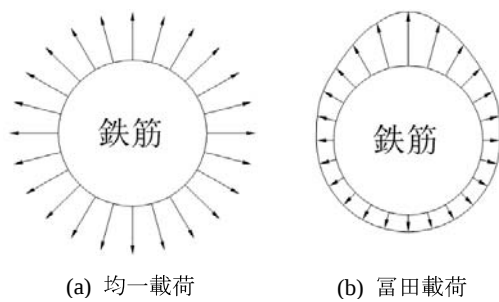


図-4 荷重モデル

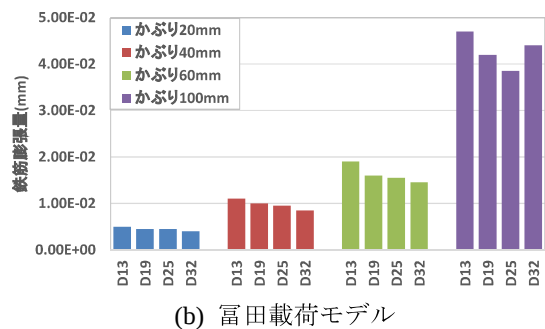
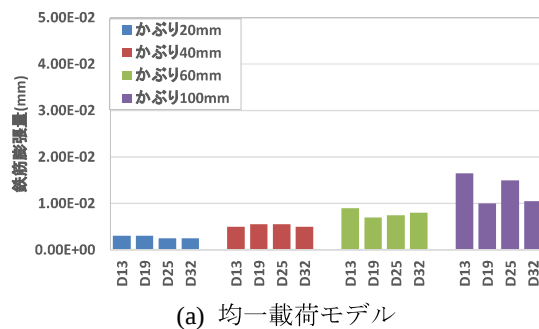


図-5 コンクリート表面にひび割れが達した時の鉄筋膨張量

造物非線形 FEM 解析プログラム「FINAL」である⁵⁾。鉄筋の応力-ひずみ関係に関しては、降伏応力を折れ曲がり点とするバイリニア型の応力-ひずみ関係を用いた。二次勾配は初期勾配（鋼のヤング率）の 0.01 倍とし、降伏条件は von-Mises の降伏条件に従い、移動硬化則を用いた。コンクリートの応力-ひずみ関係を図-3 に示す。コンクリートの圧縮応力とひずみ関係及び圧縮軟化特性は修正 Ahmad モデルを用いた⁶⁾。引張に関しては、ひび割れ発生までを線形とし、ひび割れ発生後は出雲らのモデル ($c=0.6$) によりモデル化を行った⁷⁾。また、コンクリートのひび割れ後のせん断伝達特性に関して Al-Mahaidi モデルを考慮してモデル化を行った⁸⁾。Al-mahaidi モデルでは、ひび割れ直交方向の引張ひずみの関数としてせん断剛性の低下を表現するが、除荷後の対応を定義しておらず、解析では荷重時と除荷時で同じせん断剛性式を用いて計算を行っている。コンクリートの材料特性値は文献⁴⁾に記されている材料試験結果を用い、鉄筋(SD490)の材料特性値は道路橋示方書⁹⁾に従い、表-2 に示す値を用いた。

表-2 材料特性

鉄筋のヤング率	$2.0 \times 10^5 \text{MPa}$
鉄筋の降伏点	490MPa
鉄筋のポアソン比	0.3
コンクリートのヤング率	$2.84 \times 10^4 \text{MPa}$
コンクリートの圧縮強度	30.8MPa
コンクリートの引張強度	2.7MPa
コンクリートのポアソン比	0.2

2.3. 鉄筋腐食モデル

鉄筋腐食の与え方は図-4 のように、均一荷重モデル及び三浦・富田³⁾が提案した荷重モデルを使用した。なおこれからは、鉄筋が腐食すると鉄筋のみかけの体積が増し膨張すると考え、鉄筋が腐食した量を鉄筋膨張量と呼ぶ。均一荷重モデルは鉄筋全周において、すべて同じ腐食状況と考え、鉄筋周りを均一に膨張させたモデルである。つまり、鉄筋全周に強制変位を均一に与えて解析を実施している。富田荷重モデルは、かぶり側の鉄筋が早く腐食すると考えられ、鉄筋の最頂点（コンクリート表面に一番近い点）の膨張量を 1mm とすると、鉄筋の円周の上半分は強制変位を 1mm から 0.1mm に、最頂点から遠ざかるにつれ徐々に減少させ、鉄筋の下半分の膨張量は一律に 0.1mm を与えている。今回の解析では、均一荷重モデルの膨張量、富田荷重モデルにおける最頂点の膨張量を $5 \times 10^{-4} \text{mm}$ ずつ増加させて解析を実施している。

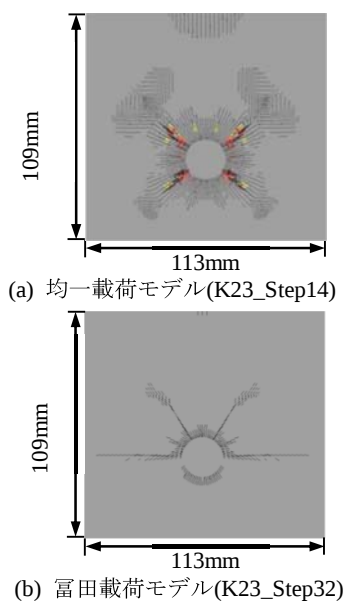


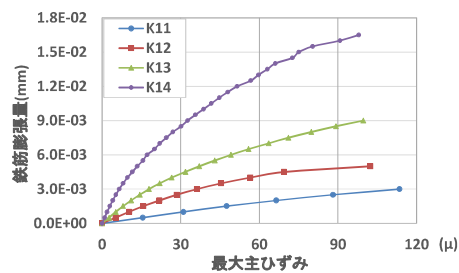
図-6 内部ひび割れ拡大図

3. 解析結果

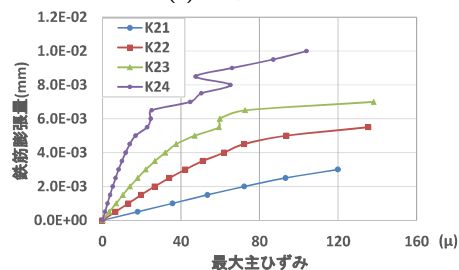
3.1 鉄筋膨張量とコンクリート表面の最大主ひずみの関係

図-5 にはコンクリート表面中央（図-2 の O 点）に初めてひび割れが発生したとき各モデルの鉄筋膨張量を示す。横軸はすべてのモデルケースを示す。図-5 より均一载荷モデルでは、かぶり厚さが同一の場合、鉄筋径の違いによる鉄筋膨張量の大小について明確な傾向は現れなかったが、富田载荷モデルの場合は、かぶり厚さ 100mm 以外では、鉄筋径が大きくなれば、徐々に鉄筋膨張量が小さくなることがわかった。この理由については現在、検討中である。また、かぶり厚さ 100mm 以外のモデルでは、富田载荷モデルによる鉄筋膨張量は、均一载荷モデルによる鉄筋膨張量の約 2 倍になった。

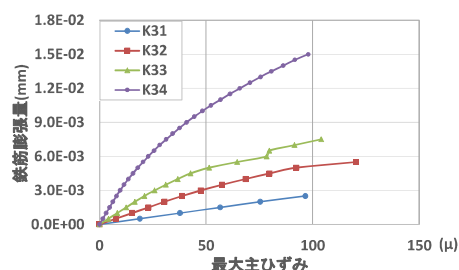
図-6 にコンクリート表面にひび割れが発生する時のひび割れの分布図を示す。なお、図-6 はひび割れている範囲（鉄筋周辺部）のみを切り出している。黒線はひび割れ、赤は圧縮軟化経験要素、黄色は圧縮軟化要素を示す。均一载荷モデルでは、鉄筋周辺全体にひび割れが発生するのに対し、富田载荷モデルでは、主に横軸及び斜め方向にひび割れが集中し、ひび割れの数も均一载荷モデルより少ないため、均一载荷モデルの方が小さい鉄筋膨張量でコンクリート表面にひび割れが現れたものと考えられる。以上より、鉄筋全周の腐食の進行の



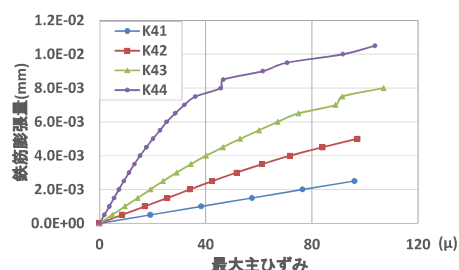
(a) 鉄筋 D13



(b) 鉄筋 D19



(c) 鉄筋 D25



(d) 鉄筋 D32

図-7 鉄筋膨張量と最大主ひずみの関係
(均一载荷)

仕方がコンクリート表面ひずみに与える影響は大きいといえる。また、松島らの論文¹⁰⁾によるとかぶり厚 t_p と鉄筋径 ϕ から、 $(2t_p + \phi)/\phi$ の値が 3 以上なら鉄筋軸に沿うようにひび割れが生じ、3 未満ならはく離につながる斜め方向のひび割れが卓越して生じるとされている。本解析の検討では、かぶり厚が 20mm で鉄筋径 25mm と 32mm の場合以外はすべて鉄筋軸に沿うひび割れが生じるモードとなる。図-6 に示すとおり、本解析では、すべてのケースで、均一载荷の場合は、鉄筋周辺では斜め方向の

表-3 近似関数（均一載荷）

ケース	多項式近似関数 ($y = ax^2 + bx$)	ケース	多項式近似関数 ($y = ax^2 + bx$)
K11	$y = -73854x^2 + 34.861x$ $R^2 = 0.9999$	K31	$y = -12379x^2 + 27.194x$ $R^2 = 0.9998$
K12	$y = -508793x^2 + 100.64x$ $R^2 = 0.9995$	K32	$y = -228000x^2 + 73.89x$ $R^2 = 0.9988$
K13	$y = -767316x^2 + 163.23x$ $R^2 = 0.9939$	K33	$y = -528356 + 124.2x$ $R^2 = 0.9936$
K14	$y = -2 \times 10^6x^2 + 333.87x$ $R^2 = 0.9873$	K34	$y = -1 \times 10^6x^2 + 276.63x$ $R^2 = 0.9943$
K21	$y = -44074x^2 + 30.528x$ $R^2 = 0.9993$	K41	$y = -1833.9x^2 + 26.218x$ $R^2 = 1$
K22	$y = -324987x^2 + 84.58x$ $R^2 = 0.9994$	K42	$y = -123642x^2 + 63.933x$ $R^2 = 0.9994$
K23	$y = -646791x^2 + 139.21x$ $R^2 = 0.9916$	K43	$y = -361124x^2 + 113.33x$ $R^2 = 0.9992$
K24	$y = -2 \times 10^6x^2 + 256.31x$ $R^2 = 0.9069$	K44	$y = -2 \times 10^6x^2 + 261.1x$ $R^2 = 0.9814$

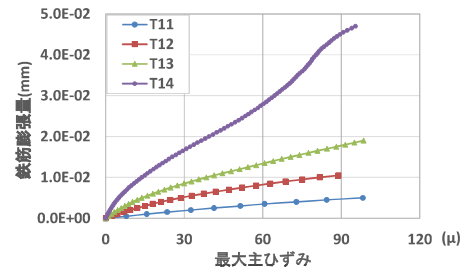
ひび割れが卓越し、コンクリート表面で鉛直方向にひび割れが卓越している。また、富田載荷モデルの場合は、鉄筋周辺では、斜め方向と水平方向に卓越し、少し見づらいが、コンクリート表面では均一載荷の場合と同じく、鉛直方向にひび割れが卓越している。つまり、松島らが定義したように鉄筋軸に沿うひび割れが生じているが、斜め方向にもひび割れが発生しており、鉄筋軸ひび割れと斜め方向のひび割れが混在する状況となっている。

図-7 と図-8 には、コンクリート表面がひび割れるまでの鉄筋膨張量とコンクリート表面中央での最大主ひずみの関係を示す。図-7 は均一載荷モデルの結果、図-8 は富田載荷モデルの結果を示す。第 1 章の最後に述べたとおり、将来的な目標であるコンクリート表面のひずみの大きさから内部の鉄筋腐食状況を推測するには、軸方向ひずみで結果をまとめた方が良いが、本論文では、鉄筋腐食量とひずみの大きさの関係式を推定するにあたり、まずは最大主ひずみの大きさを検討を行うこととした。

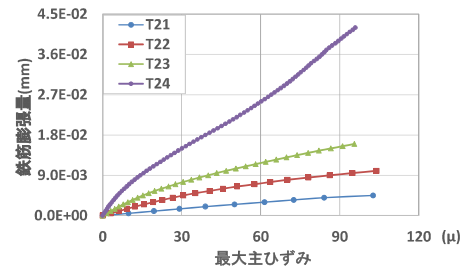
図-7 と図-8 よりかぶり厚さが 60mm より小さければ、鉄筋径によらず鉄筋膨張量が増加するとコンクリート表面の最大主ひずみが一樣に増加することがわかる。また、K22 と K23 以外のモデルはすべてコンクリート表面中央の最大主ひずみが約 100μ の時、ひび割れが発生することがわかった。

表-4 近似関数（富田載荷）

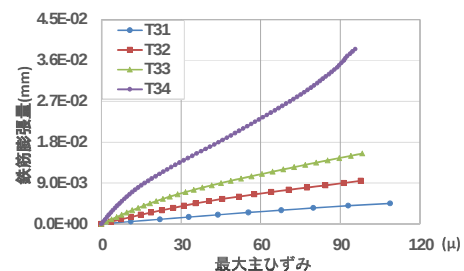
ケース	多項式近似関数 ($y = ax^2 + bx$)	ケース	多項式近似関数 ($y = ax^2 + bx$)
T11	$y = -164750x^2 + 67.15x$ $R^2 = 0.9999$	T31	$y = -60054x^2 + 48.266x$ $R^2 = 0.9997$
T12	$y = -924059x^2 + 196.51x$ $R^2 = 0.9964$	T32	$y = -459760x^2 + 140.32x$ $R^2 = 0.9994$
T13	$y = -10^6x^2 + 312.35x$ $R^2 = 0.9896$	T33	$y = -936747x^2 + 244.28x$ $R^2 = 0.9968$
T14	$y = -458297x^2 + 524.64x$ $R^2 = 0.9842$	T34	$y = -703919x^2 + 446.84x$ $R^2 = 0.9893$
T21	$y = -108056x^2 + 55.568x$ $R^2 = 0.9991$	T41	$y = -26225x^2 + 43.435x$ $R^2 = 0.9999$
T22	$y = -656785x^2 + 162.04x$ $R^2 = 0.9984$	T42	$y = -404455x^2 + 126.33x$ $R^2 = 0.9997$
T23	$y = -10^6x^2 + 276.07x$ $R^2 = 0.9941$	T43	$y = -757329x^2 + 217.24x$ $R^2 = 0.998$
T24	$y = -685622x^2 + 486.47x$ $R^2 = 0.9895$	T44	$y = 10^6x^2 + 305.19x$ $R^2 = 0.9768$



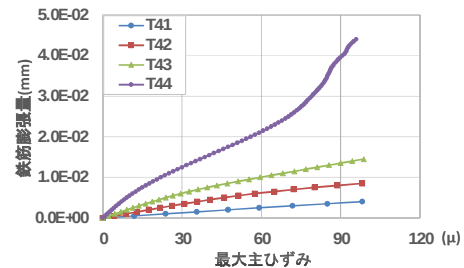
(a) 鉄筋 D13



(b) 鉄筋 D19



(c) 鉄筋 D25



(d) 鉄筋 D32

図-8 鉄筋膨張量と最大主ひずみの関係（富田載荷）

3.2 鉄筋膨張量と最大主ひずみの関係の近似関数

図-7 と図-8 の鉄筋膨張量とコンクリート表面の最大主ひずみ量関係を近似式で表すと、表-3 および表-4 の結果ようになる。ここで、 x が最大主ひずみの値、 y が鉄筋膨張量である。最初は一次式で最小自乗近似したが、決定係数 R^2 が小さいため、二次式で近似した。二次式では決定係数 R^2 が 0.90 から 1 までとなり、二次近似関数 ($y = ax^2 + bx$) で曲線を近似できることがわかった。

続いて、二次近似関数 ($y = ax^2 + bx$) の係数 a 、 b を鉄筋径 D とかぶり厚さ C で表すことができないか、検討を行った。表-3 および表-4 に示した結果より、係数 a が鉄筋径 D あるいはかぶり厚さ C と二次関数の関係となり、係数 b は鉄筋径 D あるいはかぶり厚さ C と線形関係となったため、式(1)で近似することを試みた。式(1)の係数

k_1 から k_8 までの値は表-5 に示す。

$$y = (k_1 \cdot D^2 + k_2 \cdot D + k_3 \cdot C^2 + k_4 \cdot C + k_5) \cdot x^2 + (k_6 \cdot D + k_7 \cdot C + k_8) \cdot x \quad \dots (1)$$

均一載荷モデルの場合、式(1)で近似すると、決定係数 R^2 が 0.98 になり、有意 $F=8.40E-203 < 0.0001$ 、信頼性が 99.99%以上になることがわかった。一方、富田載荷モデルの場合、式(1)で近似すると、決定係数 R^2 が 0.99 になり、有意 $F=0 < 0.0001$ 、信頼性も 99.99%以上になることがわかった。

近似関数式(1)で予測したデータと解析結果とを比較したものを図-9 と図-10 に示す。近似関数式(1)で予測したデータが解析結果とほぼ一致している。しかし、かぶり厚が薄く、鉄筋径が小さい場合 (K11 と T11) では精度良く推定できていない。これは、かぶり厚によるひび割れの進展挙動による影響ではなく、コンクリート表面にひび割れが現れるときの鉄筋膨張量が K11 や T11 では小さく、近似式の係数を少し変えれば、推定値も敏感に変わるためであると考えられる。なお、今回の解析モデルの材料強度はすべて同じに設定したため、近似関数の中に材料強度のパラメータは入れなかった。今後は材料強度も含めて、近似関数

表-5 近似関数の係数

	均一載荷	富田載荷
k_1	769.63	3954.32
k_2	-11490.53	-122489.34
k_3	3.54	468.19
k_4	-22658.68	-58297.60
k_5	465841.59	1512413.09
k_6	-2.98	-7.89
k_7	3.47	4.89
k_8	7.02	132.76

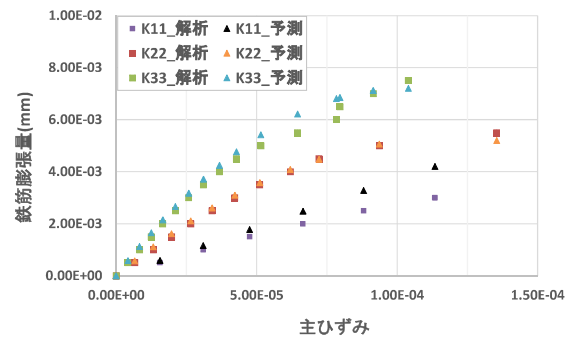


図-9 解析データと予測データの比較(均一載荷)

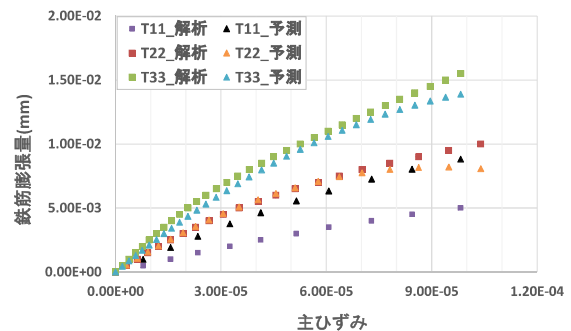


図-10 解析データと予測データの比較(富田載荷)

を検討する予定である。

4. まとめ

コンクリート表面のひずみ分布を計測することにより、内部の鉄筋腐食量の推定を行うことを目的として、鉄筋の腐食を鉄筋の膨張として模擬した解析を実施、鉄筋膨張量とコンクリート表面のひずみの関係式を求めた。以下に、本解析における知見を述べる。

(1) かぶり厚さが 100mm 以外のモデルでは、コンクリート表面にひび割れが発生するときの鉄筋膨張量について、富田載荷モデルの結果が均一載荷モデルの結果の約 2 倍になることがわかり、鉄筋全周の腐食の進行の仕方は

コンクリート表面ひずみに与える影響は大きいといえる。

(2) 鉄筋腐食モデルを変えると、コンクリート内部に広がるひび割れの分布状況も異なることがわかった。すなわち、コンクリート内部のひび割れの拡がり方を非破壊検査で把握できれば、鉄筋全周の腐食の進行の仕方が把握できると考えられる。

(3) 本解析モデルでは、鉄筋膨張量とコンクリート表面の最大主ひずみの大きさの関係は近似関数式(1)が適用できる。コンクリート表面のひずみの大きさやひび割れの分布の状況が把握できれば、鉄筋膨張量の状況を数値解析技術により推測(診断)することが可能といえる。

今後の課題として、ひび割れ進展挙動を把握するにはコンクリートのひび割れ後の引張挙動を表す構成則は重要である。本研究で用いた出雲らのモデルでは、引張応力が0になることがなく、通常のコンクリートより破壊エネルギーを過大に評価する可能性がある。そのため、ひび割れ後の引張挙動を表す構成則を変化させた場合の検討も必要である。また、多項式近似関数の係数をコンクリートの材料強度や鉄筋径やかぶり厚さをパラメータで表せることができるかどうかを引き続き検討する予定である。

参考文献

- 1) 下西勝, 川口和宏, 植木博: 中性化による鋼材の腐食とコンクリートのひび割れ解析モデル, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.2, pp.1855-1860, 2003
- 2) 路寛, 関博: 離散ひび割れモデルに基づく鉄筋腐食によるひび割れ幅に関する解析的検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.1033-1038, 1999
- 3) 三浦幸太, 富田充宏: 鉄筋腐食に伴うコンクリート部材のひび割れ進展に関する解析的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.821-826, 2011
- 4) 志岐和久: 全視野ひずみ計測装置を用いた鉄筋腐食モニタリングに関する研究, 平成25年度佐賀大学大学院修士論文
- 5) <http://www.engineering-eye.com/FINAL/index.html>, 2015年3月22日参照
- 6) 長沼一洋: 三軸応力下のコンクリートの応力～ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文報告集第474号, pp.163-170, 1998.8
- 7) 出雲淳一, 島弘, 岡本甫: 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学, Vol.25, No.9, pp.107-120, 1987
- 8) Al-Mahaidi, R.S.H.: Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members, Report 79-1, Dep. of Structural Engineering, Cornell Univ., Jan. 1979
- 9) (公社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編, P80, 2012
- 10) 松島学, 堤知明, 関博, 松井邦夫: 鉄筋の腐食膨張によるひびわれモード, コンクリート工学年次論文集, Vol.15, No.1, pp.727-732, 1993