コンクリートの膨張により損傷した鉄塔基礎の 内部応力推定と健全性評価

岡崎 慎一郎* 片岡 洋輝** 松島 学***

Development of Deterioration Evaluation Method for ASR Damaged Concrete Foundation of Steel Tower

by

Shinichiro OKAZAKI*, Hiroki KATAOKA** and Manabu MATSUSHIMA***

Recent research has focused on the potential loss in structural performance of reinforced concrete members with ASR related damage. In this research, deterioration and remained pulling shear stress evaluation method for ASR damaged concrete foundation of steel tower is developed by aiding finite element method. Expansion strain occurred on site due to ASR was identified by sensitive analysis of ASR model with comparing measurements of cracking pattern, crack width distribution and crack density of crown and body of concrete foundation. This method can evaluate stress state of concrete, rebar in structure and decreasing tendency of pulling shear stress corresponded to concrete expansion by ASR.

Key words:

ASR(Alkali Silica Reaction), Concrete Foundation of Steel Tower, Pulling shear stress, FEM(Finite Element Method)

1 緒 言

アルカリシリカ反応(以下 ASR と呼称する)による、コンクリートの膨張で構造体が損傷する事例が近年多く見られる。鉄筋コンクリート構造物では、鉄筋の曲げ加工部や圧接継手箇所の一部で鋼材が破断する事例が複数報告されている¹⁾。ASR は、コンクリート中に存在する Na_2O と K_2O のアルカリ成分と岩石骨材が化学反応を呈し、反応生成物が吸水膨張してセメントマトリックスに損傷を発生させる現象であり、コンクリートの強度および静弾性係数の低下のみならず、部材中の鉄筋の降伏や破断等により、構造性能を低下させるという特徴がある。

コンクリート構造物の維持管理には、現在の劣化状態の把握が重要である。膨張作用を受けるコンクリート構造物の損傷で致命的なのは、上述の構造物内部の鉄筋の降伏や破断である。しかし、調査で得られるのはコンクリート表面のひび割れ分布性状と開口幅であり、内部鉄筋の情報の取得には非破壊検査によらなければならない。隅角部の破断については磁気法により検知可能になっているものの²⁾、部材内部の応力状態を網羅的に把握し、部材の残存耐力を評価する手法は現在のところ存在しない。

本研究では、コンクリートの膨張作用を考慮した鉄筋コンクリート部材の内部鉄筋の応力状態の推定を、コンクリート表面のひび割れ発生性状と開口幅の分布を出力

Fig.1 Crown of ASR damaged concrete foundation and overview of target structure.

可能な 3 次元非線形数値解析を用いて行うとともに、構造物の健全性評価手法の構築を行うものである。

2 対象構造物および調査概要

対象構造物は、鉄塔基礎構造物であり、この基礎部分を Fig.1 に示す。鉄塔には 1 基につき 4 脚が存在し、その中の 1 脚を対象とする。調査は鉄塔基礎構造物の地上に露出している部分を対象に行い、さらに、地面を基礎に沿って掘削し地中埋設部分の劣化状況の観察を行った。また、天端部より $\phi 100$ のコアを 1 本採取し、コアの切断面の観察と、圧縮強度の測定を実施した。

3 調査結果

採取コアの切断面を Fig.2 に示す。骨材周囲に反応リム

† 原稿受理 平成27年12月16日 Received Dec.16, 2015 ©2016 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 香川大学工学部 〒761-0396 高松市林町
Faculty of Engineering, Kagawa University, Hayashi-cho, Takamatsu, Kagawa, 761-0396

** 香川大学大学院工学研究科 〒761-0396 高松市林町
Department of Safety Systems Construction Engineering, Hayashi-cho, Kagawa University, Takamatsu, Kagawa, 761-0396

*** 香川大学工学部 〒761-0396 高松市林町
Faculty of Engineering, Kagawa University, Hayashi-cho, Takamatsu, Kagawa, 761-0396

Fig.2 Section of concrete core.

Table 1 Compressive strength, static elastic modules and Poisson's ratio.

Compressive Strength (N/mm ²)	Young's modules (N/mm ²)	Poisson's ratio
17.5	6600	0.171

Fig.3 Crack distribution of member.

が形成され、骨材のひび割れが観察された。採取コアの圧縮強度、静弾性係数およびポアソン比を Table 1 に示す。コンクリート標準示方書³⁾に示された圧縮強度と静弾性係数の関係によると、普通コンクリートの場合、圧縮強度が 18N/mm² の場合に静弾性係数は 22000 N/mm² 程度であり、本試験結果はこの値の 1/3 程度であることが確認された。対象構造物の柱体部および天端部における 0.5mm 以上のひび割れのスケッチを Fig.3 に示す。全体として、天端部には、ASR による損傷の典型例である亀甲状のひび割れが観察された。柱体部には、主鉄筋に沿っていると思われる鉛直方向に卓越したひび割れが観察された。

以上、骨材周囲の反応リムの存在、静弾性係数の低下性状、構造体のひび割れパターンから、対象構造物は、ASR による損傷を受けていると強く推察された。

次に、ひび割れ密度とひび割れ幅分布を算出した。ひび割れ密度は、式(1)に示すひび割れ密度 D_{cr} により、対象領

Fig.4 Crack density of concrete foundation.

Fig.5 Crack appearance probability of concrete foundation.

域の 0.1mm 以上のひび割れの総延長を評価対象領域の面積で除したものと定義した。

$$D_{cr} = \frac{\sum L}{A} \quad (1)$$

ここで、 $\sum L$: ひび割れの総延長、 A : 対象領域面積である。

各領域におけるひび割れ密度を Fig.4 に示す。天端部は地上に露出しているため、乾燥収縮による影響のためか、ひび割れ密度が特に大きいことが確認できる。

各観察部位それぞれに対し、各部位に存在するひび割れ総数に対する、ひび割れ幅ごとの出現確率を算出した。ひび割れ幅ごとの出現確率を Fig.5 に示す。

ひび割れ幅は 1.4mm 程度までに概ね分布されているが、2.0mm 以上の比較的大きいひび割れの存在も散見される。これは、一度導入されたひび割れに、収縮や外力の影響が加わることで、より大きなひび割れ幅となっていると考えられる。底面付近である 2.0~3.4m 部分は、ひび割れ幅の平均が最も小さい。これは、床板部によって横方向に拘束されているため、主筋による縦方向のひび割れが拘束されたと考えられる。

4 数値モデル

4・1 数値モデルの概要

ASR によるコンクリートの変形挙動は、主に骨材の膨張による。数値計算での膨張現象の再現では、コンクリートを均質とせず、少なくとも粗骨材とモルタルを別個に取扱う必要がある。均質化法でモルタル、粗骨材、アルカリシリカゲルの3相でモデル化した例⁴⁾、FEMによる構造全体での検討例⁵⁾があるが、これらは主としてひずみ分布による検証であり、ひび割れ幅では検討していない。

X線CTによりコンクリートの内部画像を構成し、細密な3次元数値モデルを構築した例⁶⁾があるが、要素数が非常に多くなり、実構造物を解析対象としたときに、解析時間が莫大となり、感度解析を多く行うのに不向きである。そこで、著者を含む研究グループ⁷⁾は、等価ひび割れ要素と呼ばれる、コンクリートを粗骨材の集合体から成る膨張する要素と、モルタルの集合体から成る膨張しない要素により、簡易にモデル化する手法を提案した。この手法は、ASR という現象において、コンクリート中に膨張する領域と膨張しない領域の相互作用で引張ひび割れが発生することから、等価ひび割れ要素の導入により、解析における要素数および節点数を減少させ、かつASRによりコンクリート表面に生じるひび割れの成長という挙動を再現することを達成している。本研究においてもこの手法に基づき、有限要素モデルを構築する。

4・2 材料構成則とひび割れ幅の評価

本研究では鉄筋と引張側コンクリートの構成則に、それぞれひずみ軟化モデル⁷⁾、バイリニアモデル⁷⁾を採用した。コンクリートの弾性係数は、ASRの時間依存の変形挙動がクリープ挙動と相似し、文献⁷⁾に従って、コンクリートの弾性係数を3.5だけ除して、28.6%程度に低減させた。なお、ASR膨張によるマクロなコンクリート強度の低下は、局所的に引張力を受けるコンクリートの軟化の影響で加味されており、5・2節で設定した無膨張時の強度は5・2節で設定した無膨張時の強度に一致し、4・8節で仮定した膨張時には、Table 1の実測値と概ね整合していた。

本研究では、感度解析によるひび割れ分布が、実際の観察結果と整合した時に、構造体の内部応力状態が評価できるとした。本数値モデルでは、変位に関する出力はすべてひずみであることから、ひび割れ幅に換算する手法が必要である。本研究では、式(2)でひび割れ幅を定義した。

$$w_{cr} = (\varepsilon_{all} - \varepsilon_e) \cdot l_{cr} \quad (2)$$

ここで、 w_{cr} は解析でのひび割れ幅、 ε_{all} は全ひずみ、 ε_e は弾性ひずみ、 l_{cr} は有効長さであり、これらの値は1要素内の値ではなく、主応力方向に沿って複数要素にまたがって発生した格子状のひび割れ発生部における、格子サイズ領域を形成する複数要素での平均値を採用しており、本対象構造物の実測から得られた平均ひび割れ間隔 l_{cr} の平均値(17.3cm)を本研究では適用した。

4・3 等価ひび割れ要素の最適寸法

膨張要素の寸法を粗骨材寸法にまで小さくすると、実際のコンクリートに近いモデルとなる一方で解析上変形

Fig.6 Relation between expansion element ratio crack and crack appearance frequency.

の局所化が発生しにくくなる。また、過度に寸法を大きくすると実際のひび割れ分布との乖離が生じる。後述のペシマム現象と要素膨張を含めた、本対象構造物に対する感度解析の結果から、最も実際のひび割れ分布に近くなるメッシュサイズは、80mm~100mm程度であったため、本研究では100mmをメッシュサイズの基準とした。

4・4 ペシマム現象

ASRの膨張速度は、ペシマム現象が示すように、反応性骨材の割合が大きければ膨張速度が増加するのではなく、ある特定の割合で反応性骨材が混合する場合で最大となる。本研究では、このペシマム現象を力学的現象であると捉え、全要素に占める膨張要素と、ひび割れ頻度について、2.0m×2.0mの面部材での平面ひずみ状態下で、要素寸法を100mmとした場合での感度解析を実施した。ここに、ひび割れ頻度とは、以下の式で計算される量である。

$$F_{cr} = \frac{N}{A} \quad (3)$$

ここで F_{cr} : ひび割れ頻度、 N : 重心位置にひび割れが生じたメッシュの数、 A : 全要素の面積である。結果をFig.6に示す。膨張要素が60%で F_{cr} が最大となった。膨張要素が少ないと膨張要素の増加で系全体も膨張するが、60%を超えると応力状態が引張場から圧縮場に移行し、ひび割れが抑制されている。この感度解析で設定した条件は、3次元でも同様の傾向を呈した⁷⁾。したがって、本手法は、ペシマム現象に類似した特徴をシミュレートできており、ASRの特徴を妥当に再現していると考えている。

4・5 膨張要素に与える膨張ひずみ

本研究では、温度荷重により熱ひずみを生じさせる手法を応用し、膨張要素の膨張ひずみ $\Delta\varepsilon$ に応じた仮想的な温度 T を作用させることでASRを再現した。この膨張ひずみは、膨張要素のみのひずみを指す。

$$\Delta\varepsilon = \alpha \cdot \Delta t \cdot T \quad (4)$$

ここで、 α : 熱膨張係数、 Δt : ステップの増分である。

4・6 コンクリートの含水率の影響

ASRの膨張速度および膨張ひずみに影響を与える因子は、温度、コンクリートの含水率、アルカリ量である。ASRでは骨材部の膨張によるセメントマトリックスの損傷に加え、骨材の膨張量が局所的に異なることによる損傷も該当する。温度、アルカリ量については、部材中で概ね一

Fig.7 Finite element model of concrete foundation.

様とみなせるものの、水分量については、表層と深部で大きく異なり、これにより膨張量も異なると考えられる。

筆者ら⁸⁾は、コンクリートの含水率と ASR による膨張量には相関があることに着目し、膨張ひずみに関する含水率依存モデルを提案した。含水率と膨張ひずみの関係性が定かではないため、対象構造物の地上部を含む地中部地下水位置よりも上部で、乾燥を受けうる表層部の要素のうち、膨張要素となるメッシュの膨張係数をその他の膨張要素の 1/10 と設定した。

4・7 対象構造物のモデル化

対象構造物を 3 次元の有限要素により離散化した。コンクリート要素は 6 面体のソリッド要素で、鉄筋要素は 1 次元のトラス要素とした。対象構造物のモデルを Fig.7 に示す。対称性を考慮し 1/4 モデルとした。4・6 節で検討した 1/10 膨張要素、通常膨張要素および非膨張要素の分布も同図に示した。天端から 300mm 以深は地中であるが、土圧の影響は無視し、天端から 600mm の領域では一部地中ではあるが地下水位よりも上部にあり乾燥の影響を受けるとして、この箇所の膨張要素を 1/10 膨張要素とした。

4・8 膨張要素に与える膨張量

解析の実施にあたって、膨張要素の膨張量を決定しなくてはならない。本研究では、対象構造物の天端での平均的なひび割れ幅を対象に、膨張要素の膨張ひずみを変数とした感度解析を実施し、実測値との比較を行い、数値解析に用いる膨張要素の膨張量を決定した。膨張要素に与えた膨張ひずみと構造体天端の平均的なひび割れ幅の関係を Fig.8 に示す。なお、幅が 0.2mm 未満のひび割れは、測定者による計測誤差が生じやすいため除外することとした。また、1.0mm を超過したひび割れは、ASR の膨張挙動により発生したひび割れに乾燥収縮の影響が加わることで過度にひび割れが進行したと考えたため、ひび割れ幅の評価対象は 0.2mm～1.0mm とした。膨張ひずみの増加に伴い、概ねひび割れ幅の平均値は増加する傾向にあり、実測値と概ね整合するのは、膨張ひずみが 2750 μ であった。数値計算上、実構造物の応力状態を整合させるために、膨張要素に与える膨張ひずみを 2750 μ と設定した。

5 解析結果

5・1 ひび割れ分布およびひび割れ密度

対象構造物におけるひび割れ分布の実測と、数値解析結果を比較する。解析結果と実測のひび割れ分布を併記

Fig.8 Relation between expansion strain and mean crack width.

Fig.9 Crack distribution by numerical model.

したものを Fig.9 に示す。なお、実測結果は、対象領域を 1 辺 10cm のグリッドで分割したときのものであり、単一のひび割れであってもグリッドをまたがるひび割れは複数本と記録し、解析結果も同様に行って比較を行っている。解析結果は、実測のひび割れの様相と同様に、縦方向のひび割れの卓越を的確に再現している。次に、ひび割れの度数分布の実測値と数値解析結果を比較する。検討にあたり 0.2mm 未満のひび割れの実測は、クラックスケールを用いているため観測誤差が生じやすいことから、比較対象とするひび割れ幅は 0.2mm 以上とした。幅が 1.0mm より大きいひび割れは、前述のとおり、ASR の膨張により発生したひび割れに乾燥収縮等の加わり過度にひび割れ幅が開いたと考え、ひび割れ幅の評価対象は 0.2mm～1.0mm とした。各部位ごとのひび割れ幅に関する相対度数分布を Fig.10 に示す。概ね解析値の度数分布は概ね実測値の再現に至っている。

各位置におけるひび割れ密度を Fig.11 に示す。解析による標準偏差は実測値と概ね同じであり、平均値は実測値よりも若干小さいものの、本対象問題のばらつきを鑑みると整合性があると判断できる。さらに、天端から 1～2m の部位の柱体部が最もひび割れ密度が大きい傾向は、実測値と同様に再現できている。

Fig.10 Crack appearance probability.

5・2 対象構造物の破壊形式

数値解析で実構造物に生じたひび割れ幅を概ね再現できたので、構造物内部の鉄筋に生じた応力の評価と残存耐力評価を行う。作用力は主に風荷重であり、これによる鉄塔基礎床版部の引拔せん断破壊が、本構造物の主たる破壊要因である。本研究では引拔せん断破壊に対する残存性能評価を行う。Fig.12 に仮定したせん断破壊面を示す。取り付け板の先端から基礎床版部の上端主鉄筋に向けて 45°方向にせん断破壊面が形成されるとした。

5・3 引抜きせん断耐力の評価

引拔せん断耐力 P_u は、コンクリートの分担分 P_c とせん断補強筋の分担分 P_s の累加則が適用できる⁹⁾。

引拔せん断耐力のコンクリート分担分は、文献⁹⁾を参考に、コンクリートの圧縮強度を用いて算出した。膨張ひずみが生じていないコンクリートの圧縮強度は、設計

Fig.11 Crack density on each position.

Fig.12 Shear plane of concrete foundation.

Fig.13 Relation between expansion strain of concrete and strain of rebar.

基準強度で18.0 N/mm²であり、配合強度は21.0 N/mm²であったが、実際のコンクリートは21.0 N/mm²を大きく超過していると考えられるため、実際の強度は、正規分布の+85%管理値の28.0 N/mm²と仮定した。ASR膨張した場合の圧縮強度は、4・2節で述べたとおりであり、基礎床

Fig.14 Relation between expansion strain of concrete and pulling shear capacity.

版部全体の平均的な計算値とした。圧縮強度の減少は、コンクリートのせん断耐力の減少分として反映される。

引拔せん断耐力の補強筋分担分を算出する。柱体部のせん断補強筋に関し、仮定したせん断面内の鉄筋に生じたひずみは一樣ではない。対象領域のすべての鉄筋要素のひずみを対象に、平均値と95%信頼値による評価を行う。数値解析上で膨張要素に与えた膨張ひずみ $\alpha(=2750\mu)$ に加え、膨張ひずみを $\alpha/2$ としたときのひずみの解析値と鉄筋の降伏ひずみをFig.13に示す。

膨張ひずみが $\alpha/2$ の場合は、鉄筋のひずみの平均値および95%信頼値ともに降伏ひずみよりも若干低い値であった。したがって、コンクリートの膨張ひずみが現状の1/2程度の1350 μ 周辺で、鉄筋の5%程度が降伏していると考えられる。また、膨張ひずみが α の場合では、95%信頼値のみならず、平均値も降伏ひずみを超過しており、概ね半数のせん断補強筋が降伏している。なお、鉄筋が分担できる応力は、解析によって求められた鉄筋のひずみより算出される応力を鉄筋の降伏応力から差し引いて求めた。

5・4 作用力に対する安全性評価

鉄塔基礎に作用する引揚力 P_t は、主として風荷重による引揚力と仮定して算定した値に、基礎体柱体部の自重を差し引いた値($P=408.9$ kN)を採用した。

膨張要素に与えた膨張ひずみ α が、コンクリートのせん断耐力 P_c 、せん断補強筋によるせん断耐力 P_s 、基礎体の引拔せん断耐力 $P_u(=P_c+P_s)$ および鉄塔基礎に作用する引揚力 P_t に与える影響をFig.14に示す。コンクリートの膨張ひずみの増加に伴い、コンクリートおよびせん断補強筋のせん断耐力が低下し、引拔せん断耐力が減少している。膨張ひずみが α に達した場合であっても、引拔せん断耐力は、作用力を超過しているものの、安全率は1.66程度であって、今後の膨張の進行を加味すると現状で安全性は低い状態にあるといえ、早急な補修対策が必要であることが、本解析により示された。

本構造物の場合、膨張ひずみが $\alpha/2$ の場合に基礎天端部のひび割れ幅分布の85%信頼値は0.48mmであり、また膨張ひずみが α の場合に基礎天端部のひび割れ幅分布の85%信頼値は0.70mmであった。実測値の85%信頼値

と、これらの値を比較することにより本構造物の引拔せん断耐力を概ね評価することができると考えられる。

6 結 言

ASRにより劣化した鉄塔基礎内部の劣化状態を、3次元有限要素解析を援用して評価した。コンクリートの膨張ひずみに関する感度解析結果により、実測値のひび割れ発生性状、ひび割れ密度を概ね再現できる膨張ひずみを同定した。数値解析により柱体内部の鉄筋応力状態を評価でき、コンクリートの膨張ひずみに対応する引拔せん断耐力の減少を評価することができた。

今回は、せん断破壊に対する安全性をマクロな式により評価したが、今後、数値モデルによるせん断破壊のシミュレーションでの安全性評価スキームの検討や、他の構造物を対象とした検討を行いたい。

なお本研究は、JSPS 科研費 24246078 の助成を受けた。ここに謝意を記す。

参 考 文 献

- 1) Japan society of civil engineers, "State-of-the-art report on the countermeasures for the damage due to Alkali-Silica reaction", (2005).
- 2) M. Hirose, T. Maeda, K. Matsuda, M. Yokota, A. Hattori and T. Miyagawa, "Establishment of the criterion in non-destructive test method for fracture of reinforcing steel bar by measuring magnetic flux density", Journal of structural engineering. A, Vol.58A, pp.231-235 (2012).
- 3) Japan society of civil engineers, "Standard specifications for concrete structures-2012, Design", (2012).
- 4) A. Watanabe, Y. Ohshima, A. Hattori and H. Kawano "Stress analysis and cracking prediction of ASR by homogenization method", IEEE Transaction on Nuclear Science, Vol.51, No.5, pp.2887-2895 (2004).
- 5) N. Ueda, H. Nakamura, M. Kunieda, H. Maeno, N. Morishita and H. Asai, "Evaluations on ASR damage of concrete structure and its structural performance", Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. E2 (Materials and Concrete Structures), Vol. 67, No. 1 P 28-47(2011).
- 6) T. Yamashiro, J. Tomiyama, S. Iraha and Y. Kanda, "Analytical study on crack behavior due to alkali aggregate reaction", Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.28, No.1, pp.77-82 (2006).
- 7) K. Oka, H. Yoshida, M. Matsushima and M. Yokota, "Modeling of crack occurrence in concrete deteriorated by alkali aggregate reaction and proposal of analysis method", Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A, Vol. 63, No.4, pp.744-757(2007).
- 8) R. Miura, H. Yoshida, M. Matsushima and M. Yokota, "Analytical study on concrete degradation and reinforcing steel damage by ASR", Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. A, Vol. 65, No.4, pp.1037-1052(2009).
- 9) S. Tanabe, S. Saito, T. Mishima and X. An, "Study on punching shear capacity of anchorage between power transmission tower leg and four-piles-supported footing or spread foundation under push-in load", Journal of Japan Society of Civil Engineers, Vol. 739, pp.1-13(2003).