人造黒鉛電極接続部のソケット実効強度に与えるニップル長さの影響

浴永直孝

東海カーボン(株)富士研究所, 410-14 静岡県駿東郡小山町須走 394-1

Influences of Length of Nipple on Effective Strength of Socket at the Joint of Artificial Graphite Electrodes

Naotaka EKINAGA

Fuji Research Laboratory, Tokai Carbon Co., Ltd., 394-1, Subashiri, Oyama-cho, Sunto-gun, Shizuoka 410-14

[Received April 15, 1993; Accepted August 18, 1993]

The effective strength of the socket part (threaded hole at both end of pole) at the joint constructed by two poles and one nipple of artificial graphite electrodes was evaluated by using finite element method (FEM) and measured under the uniaxial tension loading. The stress distribution at the socket was analyzed as a function of length of nipple using FEM. The stress at supposed fracture point of the socket was lower as longer the nipple was. The experiment by bending fracture showed that the socket with a long nipple gave higher effective strength than that with the nipple of the JIS size. The results of FEM analysis agreed with those of experiment. The socket with longer nipple is expected to have higher effective strength in electric arc furnace for steel making.

Key-words : Socket (graphite electrode), Effective strength, Stress concentration, Stress analysis, Finite element method

1. 緒 言

人造黒鉛材は主に電気製鋼炉の電極として使用されている。この電極の実用上の問題点の一つとして溶解時のスクラップ崩れ落ちによる接続部の破壊がある。電気製鋼炉に投入されたスクラップを電極先端に発生するアークで溶解しながらボーリングしていくと、炉壁側に溶解しないで残ったスクラップが電極先端部に向かって崩れ落ちて、ホルダーを支点とした大きな曲げモーメントが加わる。なかでも、接続部が電気製鋼炉の電極ホルダーの直下に位置するときに(新しい電極を継ぎ足した直後)このスクラップの崩れ落ちで発生する事故は、その損失量が大きく電気製鋼炉の操業に与える影響は大きい。

このポールとニップルで構成される接続部は、JISでねじ山の形状、ピッチ、テーパー、最大径、有効径や長さ等、更にそれらの寸法許容差が規定されている¹⁾ので、接続部の強度はその素材の強度に大きく左右されることになる。したがって、電極メーカー各社はその素材の強度を上げることに努力を傾けている。しかし、接続部の形状についても検討する余地が残されている。例えば、ニップルのねじ山形状を変えるとニップルの実効強度が変わることを著者が既に報告している²⁾。JISで規定するピッチラインより小さなテーパーでニップルねじ山を削り落として最大

径側のねじ山接触面積を減ざるとニップルの実効強度が上昇した。しかしながら、このようなねじ山形状の変更も多様な局面をもつ電極接続部の破壊事故対策としては十分なものと言えず、なお形状の改善が必要である。

本研究では、ホルダー直下の接続部におけるソケットの実効強度(破壊曲げモーメント)に着目した。ポールの両端にねじ加工されてニップルと接続部を構成する部分をソケットと呼んでいる。従来からニップルの長さをJIS規定より長くするとソケットの実効強度が上昇すると言われているが、この機構について十分に解明されてはいない。本研究では、最終的に20インチ接続部ソケットの実効強度向上を目指している。そのためまず4インチ接続部の引っ張り負荷における応力分布を有限要素法(FEM)で数値解析し、ニップルの長さがソケット実効強度に与える影響を調査した。次に、その数値解析結果を参考にして、ソケットの実効強度上昇が予想される長さのニップルを使って実際に20インチ接続部を破壊し、ソケットの実効強度を確認した。

2. 有限要素法による電極接続部の引っ張り応力解析

2.1 接続部の要素分割と解析条件

電気製鋼炉における電極接続部のソケットは、スクラップ崩れ落ちによる曲げモーメントにより破壊する。したがってこの20インチ接続部の実効強度(曲げモーメント)を数値解析するためには、構造物も負荷も三次元とすべきである。しかしながら断面で片側20山ものねじ山を有する20インチ接続部を三次元で応力解析するには、非常に容量の大きい計算機が必要である。現有の計算機の容量の範囲内で解析可能なように、電極のサイズを4インチとし、軸対称構造物とした。ねじ山はリング状となり、負荷は引っ張りとなる。このようにサイズが小さくなり負荷が引っ張りになっても、20インチ接続部に加わる曲げモーメントの支点間距離が2mくらいあるので、曲げモーメントによる応力分布と大きく異なったものではないと考えている。

図1に示すように、長さ(点線)の異なる4インチ用ニップル(4T-4)が上下4インチポールに無負荷で接続され、上下方向に800 kgfの荷重で引っ張られている状態

Fig. 1. Model for FEM analysis of the joint between pole (socket) and nipple of graphite electrode.

を解析対象とした。この接続部の引っ張り応力解析は、接触（多体）問題である。ソケットが引っ張られ、ソケットねじ山がニップルねじ山面上を滑りながら荷重が加わる。対称性から図1の断面の1/4で解析できる。ねじ山数が片側10山のニップルをソケットに接続した状態の要素分割を図2(a)に示した。ソケット外周は半径50.8 mm (JIS寸法)、ソケット長さは100 mmとした。図2(a)における要素数は1743、節点数2051となった。原点は図2(a)のO点とした。対称性を持たせたことで拘束が必要となるが、ソケットとニップルの z 軸上のすべての節点は r 方向に、ニップルの r 軸上のすべての節点は z 方向に拘束した。

最大径（ r 軸）付近のニップルとソケットのねじ山が嵌合している状態を拡大して図2(b)に示す。ねじはJISで規定されているピッチ6.350 mmのテーパねじとした。ねじ山は片側嵌合し、非接触側には0.25 mmの隙間があるとした。ニップルとソケットのねじ接触面の節点は同じ座標としたが、両端のX, Y位置の節点はプログラムの制約ですこしお互いにずらしている。接触問題における接触判定のためのしきい値は0.001 mmとし、ねじ面の滑りによる摩擦係数は文献値から0.2とした³⁾。

解析に必要な物性値、弾性率とポアソン比は、実用に供している4T-4ニップルとポールから試片を切り出し、引っ張り試験を行って求めた。ポールの弾性率は z 方向883 kgf/mm², r 方向755 kgf/mm²、ニップルは z 方向1300 kgf/mm², r 方向950 kgf/mm²であった。ポアソン比はいずれも0.17であった。引っ張り応力解析における総引っ張り荷重800 kgfは一定とした。実際には圧力9.87 kgf/cm²として、図2(a)のソケット端部STに均一に加わるとした。

以上の諸条件は固定し、ニップルの長さだけをパラメー

Fig. 2. (a) Element division of the joint with 4-inch diameter electrode and (b) detail of element division at contacted threads.

ターとして引っ張り応力解析した。図2(a)に示す4インチ接続部で、ニップルの長さがOA(10山)からOE(6山)まで順次1山ずつ短くなる5とおりのニップルの図形である。長さOC(8山)のニップルがJIS標準である。この解析においてソケットの形状は変化しないとした。すなわち、図1に示すようにニップルは点線の長さに変化するが、ソケットの形状は同一である。なお、以上の解析には、市販の有限要素解析プログラムMARC（日本マーク社）を使用した。

 Fig. 5. σ_z at each S-node as a function of length of nipple.

低くなった。すなわちニップル長さを長くすると、ソケットの破壊応力 (σ_z) は低くなった。したがってニップルを長くすることでソケットの実効強度上昇が期待される。

3. 20インチソケットの曲げモーメント破壊実験

実用時のソケットの破壊は1章で述べたように主に電気炉内のスクラップの崩れ落ちによる曲げモーメントで発生する。この場合、通電加熱してはいるが外周部との温度差はあまり大きくないので、熱応力の影響は小さいと考えられる。したがって、常温での破壊によって模擬できると考え、ソケットの常温の実効強度（破壊曲げモーメント）の測定を行った。測定に用いた装置を図6に示す。JISで規定される20インチボールに20T-3ニップルをはめ込み、もう一つの20インチボールに3140 Nmのトルクで締め付けた。図6に示すように接続部をはずれたところをホルダーで固定し、接続部が破壊するまで引っ張った。この接

Fig. 6. Fracture test of socket.

続部の破壊はすべて上側のソケットで、前述のFEM解析により予想された噛み込み位置から発生していた。引っ張り荷重はロードセルで測定した。このソケットの実効強度は、図6に示すように、荷重点と破壊位置との距離 L に破壊荷重 P_f を乗じた破壊曲げモーメントの値で評価した。

前述のFEM解析結果から、ニップルが長いほど、ソケットの実効強度は高くなることが予想された。そこで通常（JIS）より長いニップルのソケットの実効強度を調べた。なお、上記FEM解析の場合、軸対称としたので、引っ張り負荷であるのに対して、図6の破壊実験では曲げモーメントである。しかし、ここで使用した測定法では支点間距離が長く（2 m くらい）、ソケットの破壊側のねじ山には全体として引っ張り力が働いていると考えられる。したがって有限要素解析時の荷重条件と大きく異なっていない状況でソケットが破壊すると考えられる。

JISで規定されている20T-3ニップルをボールに接続し、破壊させた（7試片）。ソケットはすべて瞬時に噛み込み位置から横に割れた。これらの破壊させたソケットから長手（ z ）方向に20φ×100 Lmmの試片をそれぞれ10個切り出し、JIS R 7202「人造黒鉛電極の試験方法」に従って曲げ強度を測定し、平均値をソケットの素材の曲げ強度とした。次に上述のJISニップル（ねじ20山）よりねじが1.5山長いニップルをボールに接続し、同様に破壊した（5試片）。

これらのソケットの曲げ強度と破壊曲げモーメントの関係を図7に示した。ソケットの曲げ強度（素材強度）と破壊曲げモーメント（実効強度）とは比例関係にあるので、それぞれのニップルにおいて座標の原点を通る回帰直線を引いた。図7から明らかなように、JISニップルに対し1.5山長いニップルの方がソケットの破壊曲げモーメントが高い結果となった。すなわちニップルを長くすることによって、同じ強度の素材でも、ソケットの実効強度が高くなることが実証された。本研究では、ねじを1.5山長くすると、ソケット実効強度は約17%上昇した。

Fig. 7. Fracture moment of socket (20T-3) between JIS nipple and 1.5 threads long nipple.

4. 結 言

電気製鋼炉用人造黒鉛電極の接続部において、ニップル長さがソケットの実効強度に与える影響については不明な点が多かった。本研究では、まず FEM で接続部全体の応力解析を行い、ニップルが長い方がソケットの実効強度が高くなることを予想した。次に実炉での破壊様式に近い実験装置にて、通常の長さとし、少し長くしたニップルでソケットを破壊した。長いニップルの方がソケットの実効強度が上昇し、FEM 解析結果と一致した。

しかしながら引っ張り荷重で解析した FEM 解析結果と曲げモーメントによる実用炉での実効強度とは完全に一致しない。曲げモーメントが加わる実用炉においてはあまりニップル長さを長くすることは得策ではない。長くしすぎ

ると曲げモーメントで最小径側でニップルが弱く折れてしまう傾向がある。実用においては 2 山長くする程度が適当と思われる。

謝 辞 本報告をまとめるに当たり、御指導頂きました北海道大学工学部・稲垣道夫教授に、この紙面をお借りして感謝申し上げます。

文 献

- 1) JIS R7201「人造黒鉛電極」.
- 2) N. Ekinaga, *J. Ceram. Soc. Japan*, 100, 803-07 (1992).
- 3) 植田勇二, 炭素製品, 碩学書房 (1950) p. 203.
- 4) 山田嘉昭, コンピュータによる構造工学講座 II-2-A, “塑性・粘弾性”, 培風館 (1977) p. 62.