腐食した円筒殻の曲げ座屈耐力に関する実験的検討 EXPERIMENTS ON BENDING BUCKLING STRENGTH OF CORRODED CYLINDRICAL SHELLS

藤井 堅*,中村秀治**,近藤恒樹***,橋本和朗***,沖元浩見****,中村剛裕***** Katashi Fujii, Hideharu Nakamura, Tsuneki Kondo, Kazuaki Hashimoto, Hiromi Okimoto and Takehiro Nakamura

*工博,広島大学助教授,大学院工学研究科(〒739-8527 広島県東広島市鏡山1・4・1) ** 工博,広島大学教授,大学院工学研究科(〒739-8527 広島県東広島市鏡山1・4・1) *** 広島大学大学院工学研究科,博士課程前期(〒739-8527 広島県東広島市鏡山1・4・1) **** 中電技術コンサルタント株式会社 管理技術部(〒734-8510 広島県広島市南区出汐2・3・30) ***** 中国電力株式会社 販売事業本部(〒730-8701 広島県広島市中区小町4・33)

In order to investigate the strength deterioration of thin cylindrical shell structures caused by corrosion, bending buckling tests were conducted on electric power poles. Before the loading tests, surface irregularities were measured using a 3-dimensional portable measurement system. The following findings were obtained from the test results: (1) The remaining strength of corroded thin cylindrical shells depends on the corroded area, and the remaining strength decreases remarkably when the corroded area is larger than buckling region. (2) It is appropriate to evaluate the remaining bending buckling strength of corroded thin cylindrical shells by examining the remaining thickness in the region of buckling.

Key Words: cylindrical shell, corrosion, deterioration, bending buckling, buckling strength キーワード: 円筒殻, 腐食, 経年劣化、曲げ座屈, 座屈耐力

1.序 論

本研究で対象とした構造物は,管状の構成部材(長さ 2m,直径 270~390mm,板厚 2mm 程度,半径対板厚比 R/t = 80 ~ 98)を継ぎ合わせて,一本の柱にした鋼製組 立配電柱である.溶融亜鉛メッキは施されているが,既 に 20~30年間供用されたものが多数あり,一部に耐力低 下が懸念されるケースも見受けられるようになってきて いる.

組立柱の耐荷力評価を行うにあたり,腐食がなく,か つ形状不整が小さく,材料物性が把握できている条件下 においては,過去の実験データなどに基づいて,合理的 な耐荷力曲線を設定することは可能である.しかしなが ら腐食した鋼構造物に関しては実験的資料及び研究例が 十分ではない^{11,-5)}.特に腐食し経年劣化の顕著な円筒殻 に関しては検討された事例がほとんど無く³⁾ 残存耐力評 価に適用可能でかつ参照できるような資料は少ない.

コンピュータおよび解析技術が向上し,弾塑性大変形 解析が容易に行える状況にあることは事実であるが,全 く耐荷力実験なしに,腐食した円筒殻の曲げ座屈荷重な らびに座屈後の耐荷力低下特性を,十分な精度をもって 示すことは難しく,維持管理に活用できるデータを整備 するには,腐食状態が正確に把握された実物円筒殻に対 する曲げ座屈実験が不可欠である.

そこで本研究では,経過年数30年程度の実物の組立柱 を検討対象とし,合計25体の供試体を作成して材料試験 及び表面形状計測を行った上で曲げ座屈試験を行い,腐 食状態と曲げ座屈耐力低下の関係を明らかにすることに した.

また,著者らは,これまで腐食鋼部材の耐力評価につ いて,腐食していない部材の耐力評価式に等価板厚など を導入することにより,簡易かつ実用上十分な精度を有 する耐力評価法を提案している.それは,FEM解析な どにより精度の高い強度評価は可能であっても,実務面 で要求される作業性,容易性を鑑みれば,精度は多少犠 牲にしても早急な対応が可能な簡易計算法が要求されて いるとの考えによる.本研究においても,実験結果を基 に,曲げを受ける薄肉円筒殻の簡易耐荷力評価法につい て検討するが,円筒殻が曲げを受ける場合,精度のよい 曲げ耐力を得るためには,どの程度の範囲の表面形状計 測が必要かという問題がある.そこで,弾塑性大変位有 限要素解析を実行して,腐食円筒殻の耐力低下を推定す るために必要な腐食測定領域を明らかにした.

	供試体名	下部直径D				上部直径D				公称板厚	3.0√ <i>Rt</i> 長さ	2.0√ <i>Rt</i> 長さ		±+++ \-
		平均(mm)	$D_{l}(mm)$	$D_s(mm)$	(度)	平均(mm)	$D_{/}(mm)$	$D_s(mm)$	(度)	(mm)	(mm)	(mm)	シーム位置	軋何力法
蜝	Case1	310.0	310.1	308.9	-18.6	283.0	286.6	281.5	86.5	1.9	51.5	34.3	西	単調
本	Case2	304.6	306.4	302.9	-52.3	282.7	285.1	282.2	-20.7	1.9	51.0	34.0	東	単調
実	Case3	378.8	380.4	371.6	81.7	349.2	353.4	341.4	66.3	2.1	59.8	39.9	北	単調
験	Case4	375.7	378.0	374.9	-47.5	349.5	354.7	346.5	49.5	2.1	59.6	39.7	北東	単調
	A01	371.5	372.5	362.6	-85.3	350.3	352.3	343.6	8.0	2.1	59.3	39.5	北	単調
	A02	369.5	373.9	366.5	-77.0	344.7	347.0	340.1	-70.0	2.1	59.1	39.4	北	単調
	A03	369.2	372.0	361.6	81.2	342.3	343.9	340.9	61.8	2.1	59.1	39.4	北	単調
	A04	358.1	360.0	357.7	24.7	337.3	340.0	334.3	-13.3	2.1	58.2	38.8	北東	単調
	A05	382.0	387.4	379.3	19.3	350.4	358.2	346.4	-11.3	2.1	60.1	40.1	東北東	単調
	A06	375.5	377.0	374.3	85.3	348.6	351.4	348.0	4.7	2.1	59.6	39.7	北東	単調
	A07	369.6	373.1	363.9	52.7	343.7	347.4	341.5	-40.3	2.1	59.1	39.4	北東	繰り返し
腐	A08	307.5	308.6	306.5	-31.7	282.0	283.6	281.6	-86.0	1.9	51.3	34.2	南東	単調
食	A09	302.7	304.3	302.4	-58.0	278.2	280.7	276.9	89.0	1.9	50.9	33.9	北	単調
供	A10	309.6	309.8	309.2	-41.0	284.2	286.2	283.2	-68.0	1.9	51.5	34.3	北	単調
試	A11	371.4	372.7	369.2	67.6	346.0	347.7	345.2	62.0	1.9	56.4	37.6	南	単調
体	A12	306.2	312.8	296.9	5.0	279.6	282.3	274.2	-40.0	1.9	51.2	34.1	南	単調
実	A13	379.4	380.4	375.5	-56.7	348.8	350.3	348.7	-61.0	2.1	59.9	39.9	南東	単調
験	A14	342.6	345.3	340.2	-50.0	314.5	320.3	314.4	-52.7	2.0	55.5	37.0	南東	繰り返し
	A15	301.3	302.1	301.3	-50.7	277.9	281.2	275.1	85.3	1.9	50.8	33.8	南東	繰り返し
	A16	308.2	310.6	308.1	-45.0	282.3	284.1	281.5	-5.7	1.9	51.3	34.2	南	繰り返し
	B01	347.9	348.0	345.6	-28.0	322.8	324.7	319.1	15.7	2.0	56.0	37.3	東南東	繰り返し
	B02	344.4	346.1	344.3	-80.3	318.3	319.3	317.7	49.0	2.0	55.7	37.1	南	繰り返し
	B03	373.7	375.8	373.2	-75.0	347.3	349.2	345.4	-70.7	2.1	59.4	39.6	南東·北西	単調
	C01	325.7	329.6	321.1	-39.5	303.0	307.2	299.0	-48.8	1.9	52.8	35.2	北東	単調
	C02	346.2	347.0	345.0	-8.7	321.8	323.3	317.9	-84.0	2.0	55.8	37.2	北東	繰り返し
	* 単調載荷時に圧縮縁となる方角が西										る方角が西			

表·1 供試体一覧

2.供試体の概要と腐食状況

供試体に用いた薄肉円筒殻は,長期間にわたり使用され,腐食損傷の理由で撤去されたものである.この薄肉 円筒殻は高張力鋼を材料とした管状の構成部材を組み立 てて1本の柱にする鋼製組立柱である.各部材は,板厚 約2mm,長さ2mで,1箇所に約20mmのシーム(写真・ 1)を持つ円錐管で,少し径の小さい部材を積み重ねてゆ くことによって柱状に組み上げることができる.(厳密に は円錐殻であるがわずかな径変化であるため,強度評価 上は円筒殻と見なしえる.)本供試体として使用した部材 は,元口径約322~391mm,末口径約275~341mmであ る.腐食は地中もしくは地際付近で著しく,実験供試体 の多くはこの部分から採取した.

本研究のために,腐食のない未使用の部材から基本実 験用として4体,長期間使用され腐食の発生している部 材から腐食供試体実験用として21体の部材を入手した.

入手した薄肉円筒殻は,そのままの状態ではアクチュ エータによる載荷が不可能であるため,水平・上下方向 2軸載荷装置で加力できるように供試体を加工した.

組立柱が実際に設置されている状態で最も強度が低く なる状態を検討対象とするため,供試体の座屈発生予想 部に最も腐食の激しい部位が位置するように薄肉円筒殻 を切断する.このとき,腐食部分が部材上部に偏りすぎ て供試体高さを確保できない円筒殻では,実際の組立柱 を模するように上部に径の小さい部材を継ぎ合わせるこ とによって高さを確保した.次に,上下方向載荷装置に 接続するための鋼板を溶接する.この状態で下部を固定 し,上部に水平載荷を行うと,下部フランジの溶接部付

表·2 材料試験結果

	ヤング係数	ポアソン	降伏応力	引張強度
	(kN/mm^2)	比	(N/mm^2)	(N/mm^2)
T1	207	0.30	541	599
T2	205	0.28	532	590
T3	206	0.29	539	600
T4	207	0.31	551	618
平均值	206	0.30	541	602





近で局部座屈が発生して崩壊する.下フランジ溶接部の 局部座屈崩壊では,溶接による初期不整などの影響が大 きく,実際の組立柱曲げ耐荷力とは異なり,かなり低い 荷重で座屈崩壊することが予想された.そこで,下部フ ランジの上にコンクリートを打設してこの問題を回避し, コンクリート上面より上の位置にて座屈が発生するよう にした.なお,供試体の全高は1,398m であり,下部フラ ンジより 300mm の位置がコンクリート上面である.また, ここで水平荷重を加えたときに圧縮縁となる位置を西, 引張縁となる位置を東と定義し,コンクリート打設後の 供試体を写真.2に示す.

表・1 に,供試体の寸法諸元を示す.また,表中の D,, D。などの記号について図・1 に示す.表中,基本実験 (Case1~Case4)は腐食供試体実験においての強度の基準 を得るとともに,シーム位置による曲げ耐荷力への影響 を調べるために行った.シーム部分では板が重なり,板厚 が標準部の2倍となっており,強度に影響すると予想さ れる.また,変形が進みシームが剥離することにより変 形性状に影響することも考えられる.このため,基本実 験では,シーム位置が圧縮縁(西),引張縁(東),それ らの中間(北)および45°ずれた位置(北東)になるよ うに供試体を作成した.

一方,表·1の腐食供試体は,基本実験の結果を参考として,最も腐食した部位が座屈発生位置となるように供 試体(A01~A16,B01~B03,C01~C02)を作製した.なお, 腐食供試体名の頭文字は,目視により腐食損傷度を判断 し,A:外観状態もよく,顕著な腐食がみられないもの, B:腐食が認められるが,軽微で強度低下は起こしていな いと思われるもの,C:明らかに腐食が認められ,強度低 下を起こしていると思われるもの,の3段階の腐食状態 に区分した結果を示す.

さらに,本供試体の材料特性を知るために,基本実験 供試体を作成した部材の一部を用いて引張試験を行った. 試験片は,採集した薄肉円筒殻より4枚の鋼片を切り出 し,JIS12号試験片に加工し作製した.表·2に材料試験 結果を示す.なお,腐食した供試体については,表面を 平滑化して材料特性試験を行った例があるが,本実験で は,円筒殻の板厚が2mmと薄く,表面を平滑化した供試 体を作成することは困難であった.そこで,腐食のない 基本実験供試体を作成した部材を用いて材料特性を求め たが,実験での円筒殻は概ねSM570材レベルであった.

3.供試体の腐食表面計測

腐食表面形状計測装置は、写真・3に示すように3本の 腕と3つの関節から構成されており、その先端に非接触式 レーザー変位計を取り付けたものである.プローブによ る測定原理は,レーザー光の反射によって表面の座標値 を計測するもので,約5cmの幅でスキャニングでき,測 点間隔はレーザーライン方向に約0.1mm間隔,データラ イン間隔は約0.5~1mmである.これを動かすことによっ て高密度に腐食面の座標を計測できる.本計測器は任意 に設定した3次元座標系に基づいて広範囲の腐食表面の 座標値を直接計測でき,また,比較的手軽で携帯可能で もあるので,実務での現場計測にもある程度対応できる. なお,本測定器による3次元座標測定結果の誤差は± 0.1mm以下であることを確認している¹⁾.

鋼管の腐食表面座標計測は,コンクリートを打設する 前に行い,鋼管の外面は供試体全体について計測したが, 内面については,底面に溶接したプレートの穴からプロ ーブが入る測定可能な範囲(底板から50cm以上の長さ)を 計測した.座屈発生箇所は底板から30cm~40cmの範囲で ある.なお,内面はほとんど腐食しておらず亜鉛メッキ も残っている状態であった.

測定された腐食表面の3次元デカルト座標の値は,円 筒座標系へ変換した.

本計測器では,腐食表面の座標を密に計測できるが,測 定された座標は所定のメッシュ点上の座標と異なってお り,また平均板厚や標準偏差などの統計量を求めるため には,測定点の場所的な偏りをなくす必要がある.そこで 測定された座標データを用いて,表面で1mm間隔のメッ シュ点上の座標値を求めた.この時,1mm間隔メッシュ 点での座標値は,図・2に示すようにその格子点に最も近 い測定点の座標値とした.また,円筒殻各点の残存板厚 は表裏の座標データの差から求めた.

図・3 に, 一例として,供試体 CO2 の半径方向座標分布 を示す.図・3 (a),(b)では横軸に周方向位置[rad],縦 軸に半径座標[mm]を示している.また,周方向座標は, 供試体東向き(引張縁)が0であり,圧縮縁は となる. 図中では /2(南)から3 /2(北)までを表示している. 全周にわたって半径が均一ではなく,約3.2 rad に極大値, 約2.0rad に極小値があり,円筒殻は僅かながら東西方向 に長径を持つ楕円に近い形状を持っていることがわかる.

図・4 (a)に,供試体 CO2 の基部から 200 mm の幅の圧 縮側(1/2 円周区間)の板厚分布を示す.図は円筒殻を平 面に展開した形で表している.図に示すように,供試体 CO2 の腐食形態は,孔食や局部的な減肉は無く,ほぼー 様に腐食している形態である.このような特徴はほぼす べての供試体について確認された.



写真·3 表面形状測定状況







図・4(b) 供試体 CO2 の板厚ヒストグラム

板厚(mm)

円筒殻の座屈変形は軸方向に約 $3\sqrt{Rt}$ の幅(R:半径, t:板厚)以内で発生するとされていることを考慮して^{6,7)}, 図·4(a) に示す領域の基部から軸方向に約 $3\sqrt{Rt}$ の幅(基 部から約50mm~約60mm), 圧縮側の1/4 円周区間を取り出 して板厚ヒストグラムを示すと,図·4(b)のようになる.

基部から約3√Rt あるいは2√Rt の幅で圧縮縁側の 1/4 円周区間の領域での平均板厚を表・3 に示す.表中, 供試体 A01 などは平均板厚が円筒殻の公称板厚を超えて いるのがわかる.これについては,初期板厚は不明であ るが初期板厚が公称板厚よりも大きかったこと,円筒殻 の内外面に施された亜鉛メッキやタールエポキシ塗料に よる防錆処理がサンドプラストによる除錆処理では十分 に除去できなかったこと,などが考えられるが,明確に はわからなかった.なお,腐食していない健全な場合の 亜鉛メッキとタールエポキシ塗料の平均厚さはそれぞれ 0.11mm および0.12mm であった.

4.曲げ座屈実験

4.1 曲げ座屈実験概要

腐食円筒殻の曲げ座屈耐荷力を調べるために,以下の 要領で実験を行った.

写真・4 に載荷状況を,図・5 に載荷装置の模式図を示 す.反力床に固定した底板に供試体をアンカーボルトに より接合する.供試体上部に設置した載荷板を介し,鉛 直アクチュエータにより一定軸力(2kN)を作用させ,これ を保持したまま水平アクチュエータにより水平方向力を 作用させる.供試体基部は固定,供試体上部は自由であ る.載荷位置は供試体基部より1,134mmの位置とし,供 試体の圧縮縁基部(コンクリート部の上面)付近に座屈が 発生するようにする.このとき,供試体は腐食が最も激 しい部分が圧縮縁基部に位置するように作成している. なお,本実験では,上記のように,作用させた一定軸力 は小さいので,結果の整理に際しては,軸力による P-8 効果や中立軸の移動の影響は無視した.

腐食供試体 21 体のうち 14 体については単調載荷,残 りは繰り返し載荷とした.繰り返し載荷では,腐食供試 体基部の引張縁に貼り付けたひずみゲージの値が降伏ひ ずみに達したときの円筒殻頂部水平変位 ,を基準とし て,±,,±2 ,と漸増させた.このとき,第1サイク ルでの荷重-たわみ関係はほぼ線形であり,第2サイクル 目±2 ,に最高荷重が現れた.単調載荷と繰り返し載荷 を比較すると,腐食しているので直接比較はできないも のの,最高荷重については両載荷方法の違いは明確には 現れなかった.したがって,次節で示す実験結果では, 繰り返し載荷実験の結果については包絡線を示すことと する.



図·6 荷重 変位曲線

図.7 無次元化した荷重 変位曲線

表·3 実験結果

	供試体名	最大曲げ モーメント(正側)	最大曲げ モーメント(負側)	降伏曲げ モーメント M _v (kNm)	M_u/M_y	最大荷重時 の頂部変位	"/ y	強度低下 率(%) ^{*2}	平均板厚 (3.0√Rt 区間)	平均板厚 (2.0√ <i>Rt</i> 区間)	算定曲げモーメント (3.0√Rt 区間板厚)	算定曲げモーメント (2.0√RT 区間板厚)
		M _u (KNM)	$T_{\rm u}(\rm KNM) = M_{\rm u}(\rm KNM)$			"(mm)		1 (/-)	(mm)	(mm)	(kNm)	(kNm)
基	Case1	59.6	-	76.4	0.78	12.0	0.65	-	-	-	-	-
本	Case2	97.9	-	75.9	1.29	19.3	1.16	-	-	-	-	-
実	Case3	131.3	-	125.0	1.05	16.5	0.94	-	-	-	-	-
験	Case4	133.7	-	125.0	1.07	21.0	0.90	-	-	-	-	-
	A01	121.4	-	121.4	1.00	16.2	0.93	4.53	2.17	2.17	106.5	106.5
	A02	112.7	-	118.1	0.95	13.2	0.83	8.91	1.72	1.72	72.7	72.7
	A03	117.6	-	119.9	0.98	16.5	0.92	6.34	-	-	-	-
	A04	117.9	-	111.4	1.06	19.0	1.10	-1.03	2.29	2.29	107.6	107.6
	A05	130.8	-	128.4	1.02	14.1	0.78	2.72	2.00	2.00	98.3	98.3
	A06	123.4	-	117.7	1.05	14.4	0.92	-0.10	2.18	2.18	104.7	104.7
	A07	128.2	121.1	130.4	0.98	16.8	0.94	6.13	-	-	-	-
腐	A08	84.9	-	76.3	1.11	16.8	1.07	-6.08	1.95	1.95	67.9	67.9
食	A09	74.1	-	73.9	1.00	14.4	0.90	4.42	1.59	1.59	48.5	48.5
供	A10	75.8	-	78.2	0.97	14.9	0.89	7.51	1.80	1.81	61.4	61.9
試	A11	121.0	-	122.9	0.98	16.1	1.09	6.09	2.28	2.27	115.5	114.8
体	A12	78.6	-	74.7	1.05	15.1	0.89	-0.33	1.95	1.95	66.7	66.7
実	A13	127.8	-	127.0	1.01	14.5	0.89	4.00	2.18	2.19	110.9	111.7
験	A14	105.1	117.1	102.4	1.03	15.5	1.03	2.06	2.24	2.26	101.0	102.3
	A15	82.7	82.1	73.2	1.14	17.0	0.99	-8.88	2.05	2.03	70.5	69.5
	A16	69.1	76.1	76.9	0.91	13.6	0.80	13.21	1.64	1.66	52.5	53.5
	B01	58.7	87.4	98.9	0.59	11.1	0.57	43.37	1.86	1.80	76.1	72.3
	B02	98.6	105.2	101.4	0.97	14.8	0.92	7.29	2.11	2.12	91.9	92.6
	B03	95.2	-	119.4	0.80	11.3	0.83	23.92	2.38	2.39	120.0	120.8
	C01	72.0	-	83.5	0.86	11.6	0.68	17.69	1.25	1.25	34.1	34.1
	C02	93.5	104.3	101.8	0.92	13.1	0.75	12.45	2.07	2.07	89.6	89.6

89.6 *1 公称値より計算 *2 Case3を基準値として比較した値



4.2 実験結果

4.2.1 基本実験結果

図・5 に基準供試体の荷重・変位曲線を示し,降伏モ ーメント My および降伏変位 、で無次元化して荷重・変 位曲線を図・6 に示す.

図・5 および 図・6 に示すように,腐食がない場合, 曲げを受ける薄肉円筒殻では,最大荷重到達後,耐力が 急に低下し,下に凸の,ある一定値に収斂するような曲 線を描くのが特徴である.

図·5 に示すように,供試体 Case1 と Case2 は, Case3 や Case4 よりも断面が小さいので,最大荷重や曲げ剛性 は小さくなるが,無次元化表示した図・6では,ほぼ同じ 曲線の傾きとなっている.また,図.6で,Casel~Case4 の M₁/M₂ を比較するとシーム位置が引張縁にある Case1 では値は小さく,圧縮縁にある Case2 では値が大きくな っているのがわかる、本薄肉円筒殻のように板の一部を 重ねてシームとする場合,載荷方向とシーム位置によっ て強度が大きく変化することがわかる 表3に示すよう に、シームが圧縮縁にある場合、曲げ強度は最も大きく、 逆に引張縁にある場合には最も低くなる.これは,シー ムが圧縮側にあるときには,シームが鋼管の座屈の発生 およびその後の座屈変形に抵抗するために耐力が上昇し, 逆に引張側にある場合には , その抵抗がないために圧縮 側で座屈しやすくなるためと考えられる.このことを考 慮して,次節で示す腐食薄肉円筒殻の実験では,シーム 位置が載荷軸線上に一致しないように配慮した.

4.2.2 腐食供試体実験結果

表·3 に腐食供試体の載荷実験結果をまとめて示す.また,図·7 に荷重·変位曲線,図·8 に無次元化した荷重·変位曲線を示す. A ランク供試体は最も体数が多いので,代表的な例(A5,A12,A14)のみを示した.



各供試体の荷重・変位曲線をみると,あまり腐食して いない供試体(主としてAシリーズ)の荷重・変位曲線 は,腐食のない場合の基本実験と同様に,最高荷重時で 尖った明確なピークが現れている.これに対し,腐食が 顕著なB01,B03,C01供試体では,最高荷重付近で曲線 がなだらかで,最高荷重もほかに比べて低く,また, 最高荷重後の耐力低下も緩やかである.同様な結果は腐 食円筒殻の圧縮耐荷力実験³でも得られており,腐食進展 にともなって,最高荷重は顕著に低下するが,座屈後の ポストピークにおける耐力低下については,腐食の影響 は幾分小さいと判断できる.

4.2.3 変形モード

円筒殻には,最大荷重付近で圧縮部基部に象脚型の座 屈変形がみられた.さらに載荷するとほぼすべての供試 体が,象脚型の変形様式から写真.5のような座屈形状へ と移行した.最高荷重までは,基部においてコンクリー トと鋼管の剥離は確認できなかった.しかし,最高荷重

写真·5 座屈形 状 (供試体 A01)

写真·6 座屈形 状 (供試体 B01)



後,座屈変形が進行すると,鋼管の引張側基部でコンク リートと鋼管が剥離し,隙間が確認された.一方,写真 -5に示す圧縮側では,コンクリート内部の鋼管が座屈に よって内部へ変形することによって剥離するような現象 は,目視では認められなかった.

今回の実験で,ほとんどの供試体が写真・5 のように 基部で座屈崩壊を起こしたが,供試体 B01 だけは座屈発 生箇所が異なった.すなわち供試体 B01 では,基部より 高さ約 200~250mm の位置で凹形の座屈変形となった (写真・6 参照).これは,当初の目視でターゲットとし た腐食部位よりもさらに腐食の進展した部位が基部より 離れて存在していたためである.そこで,供試体 B01 に ついては,基部より 200mm の高さの諸量(半径,板厚, 曲げモーメント)を用いて結果を整理することとした.

5. 腐食が腐食円筒殻の曲げ座屈強度に及ぼす影響

5.1 腐食していない円筒殻の曲げ座屈評価式

ここでは,円筒殻の曲げ座屈評価式として,文献 6)に 示された下記のNASAの弾性曲げ座屈評価式を用いること にする.

$$\sigma_{b,cr}^{e} = 0.6 \left[1 - 0.731 \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{1}{16}\sqrt{\frac{R}{t}}\right) \right\} \right] \frac{Et}{R}$$
(1)

ここに, $\sigma^{e}_{b.cr}$:弾性曲げ座屈応力

E:ヤング係数

である.

弾塑性域における曲げ座屈応力 $\sigma_{b,cr}^{p}$ については,次式によって求める⁶.

$$\frac{\sigma_{b,cr}^{p}}{\sigma_{b,cr}^{e}} + \left(\frac{\sigma_{b,cr}^{p}}{1.27\sigma_{y}}\right)^{2} = 1$$
(2)

ここに,σ,:降伏応力,1.27は円筒の形状係数である.

設計時の弾塑性座屈時の部材力 M_{cr} は弾性ばりの応力 状態を仮定して,

$$M_{cr} = \sigma_{b,cr}^{p} \cdot \pi R^{2} t \tag{3}$$

を用いることによって求まる.

5.2 腐食領域の取り方に関する考察

曲げ座屈評価式(1)において 板厚 tは一つの値 即ち, 一様板厚を前提にしたものである.したがって,腐食円 筒殻の座屈評価に既往の座屈研究の成果を活用するため には,平均腐食量を算出するための領域を適切に設定す ることが何より重要である.

半径対板厚比 R/t = 80 ~ 98 程度の円筒殻の曲げ座屈であ れば,基部に象脚型の座屈変形が生じることは過去の知 見から明らかであり,平均板厚を求めるための測定領域 として,軸方向には $2\sqrt{Rt} ~ 3\sqrt{Rt}$ 程度,周方向には /2 ~ [rad]程度が予想される.ここでは,過去の座屈実験 に基づく知見を再確認すると同時に,より的確に座屈耐 力評価に必要な腐食領域の設定方法の確立を目指して, 解析的検討を行った.

5.2.1 解析条件

表・2 に示した材料特性試験結果,および腐食表面形状 計測結果より供試体 CO2(直径 384.2mm,公称板厚 2mm) の表面座標値を用いて,汎用構造解析コード ABAQUS を 用いて円筒殻の曲げ耐荷力解析を行った.解析モデルは, 要素数 18,495(周方向 135 分割×軸方向 137 分割)で1 要素の大きさは約8mm×8mmである.使用した要素は, 要素内で板厚変化を考慮できる4節点アイソパラメトリ ックシェル要素である.また円筒殻上端には剛性の高い円 盤を配置し,その中心を載荷方向に変位させる強制変位制 御を用いた.なお,解析には残留応力は考慮していない.

応力・ひずみ関係は材料結構結果の平均をとって公称 応力・公称ひずみ曲線とした.最後の勾配を直線的にの ばし,引張強度に達したところを終点とし,これを真応 力・真ひずみに換算して解析に用いた.非弾性挙動に関 してはミーゼスの降伏条件および等方硬化則を採用した.

境界条件は円筒殻下端を完全固定とし,上端を中心に 強制変位を与えた.

腐食表面の座標値は 1mm間隔の格子点で求められて いるので,耐荷力解析における要素の節点 i の座標値は、 図・9 に示すように,節点 i の周りの影付き領域内に含ま



解析ケース	Н		t	最高荷重(kN)
case1				99.4
case2	56mm		1.9mm	93.8
case3	56mm		1.8mm	87.8
case4	56mm		1.7mm	81.9
case5	16mm		1.7mm	96.7
case6	32mm		1.7mm	86.4
case7	80mm		1.7mm	82.3
case8	56mm	1/2	1.7mm	83.2
case9	16mm	1/2	1.7mm	97.0
case10	32mm	1/2	1.7mm	87.2
case11	80mm	1/2	1.7mm	83.9





図·10 腐食領域

れる腐食表面座標格子点の表面座標の平均値から節点 I の板厚の 1/2 を引いたものとした.なお,供試体 CO2 の 公称板厚は 2.0mm である.

続いて腐食領域の設定方法であるが,供試体 C02 の腐 食領域を,図・10 に示すように下端からの軸方向長さ [mm]をパラメータ H,圧縮側を中心とした周方向角度 [rad]をパラメータ ,腐食領域 H×r の板厚をtとし, これらのパラメータを変化させて腐食領域の検討を行っ た.解析ケースは表・4 に示す11 ケースで Case1 につい ては腐食なしの場合を,Case2 ~ Case4 は腐食領域が軸方 向 $3\sqrt{Rt}$ (およそ H=56mm),圧縮側半円(=)の範囲で 0.1mm ずつ腐食した場合の検討を,Case5 ~ Case7 は腐食 領域の板厚を1.7mm,B= とし,軸方向長さ Hを変化さ せた場合を,そして Case8 ~ Case11 は腐食領域の板厚を 1.7mm とし,周方向長さ を変化させた場合について検 討した.なお,腐食領域以外の板厚は一様板厚2.0mm と した.

5.2.2 解析結果

表・4に,全てのケースの最大荷重を示す.

図・11(a)に腐食領域が軸方向 3√Rt , 圧縮側半円が 0.1mm ずつ腐食した場合の荷重・変位曲線を示す.板厚 が0.1mm 低下する毎に耐荷力が6%程度低下するという 傾向がみられる.

次に,図・11(b)に腐食領域の板厚tを1.7mmとし,軸 方向長さHを変化させた場合の荷重・変位曲線を示して











いる .この結果から H=16mm, 32mm, 56mm のように H が 増加すると最大荷重の低下は進むものの, H=80mm にな ると H=56mm の場合と比べて荷重は変化しない.これは 腐食領域の軸方向長さを $3\sqrt{Rt}$ 以下とすると強度低下に 影響するが, $3\sqrt{Rt}$ 以上になると,軸方向長さは強度低下 に影響しないことを示している.

図・11(c)は周方向長さ を変化させた場合の結果であ

るが H=16mm, 32mm, 56mm, 80mm について圧縮側半 円(=)の場合と圧縮側 1/4 円(=1/2)の場合の最 高荷重を比較すると,最高荷重はほとんど変化しないこ とがわかる.

以上より,腐食円筒殻の曲げ座屈耐力評価に必要な腐 食領域は,軸方向に $3\sqrt{Rt}$,周方向には1/4円(1/2)と すれば,座屈耐力評価を行うに十分であると言える.

5.3 腐食円筒殻の実験結果と評価式の比較

前節では,有限要素解析により,曲げを受ける薄肉円 筒殻の座屈耐荷力を求めるためには,座屈発生位置で, (高さ $3\sqrt{Rt}$)×(幅1/4円)の領域の測定結果を得れば 十分であることを示した.さらにここでは,この領域を 基本として,平均板厚を求め,これを代表板厚として式 (1)~(3)へ代入して残存曲げ強度を求め,実験結果と比 較して,図・12(a)を得た.

図-12(a)から,式(1)~(3)を用いた評価値は,実験値 を安全側に評価していることがわかる.

ところで,残存曲げ強度を評価するために必要な計測



範囲は,実際の計測においては狭いほど容易で有利である.そこで,測定範囲の高さを $2\sqrt{Rt}$ に狭めて平均板厚を求め,式(1)~(3)を用いて残存曲げ強度を計算し,実験値と比較して,図-12(b)に示す.図-12(b)では,相関係数は0.79であり, $3\sqrt{Rt}$ ×1/4円の領域の場合とほとんど差がない,むしろ若干高めであることがわかる.このことから,腐食した薄肉円筒殻の残存曲げ耐荷力を求めるための圧縮側の測定領域は, $2\sqrt{Rt}$ ×1/4円で十分と考えられる.

なお,腐食表面の状態が今回の供試体と大きく異なる 場合には,それに応じた対処が必要と思われるが,式(1) ~(3)を用いた評価は可能と推察される.

6. 結論

以上,腐食した円筒殻の曲げ座屈耐力について実験的 に検討し,得られた結果を用いて,曲げを受ける薄肉円 筒殻の簡易残存耐力評価法を提案してその適用性につい て考察した.本論文で得られた知見を要約すると次のよ うになる.

- (1)供試体25体のうち,比較検討用に未使用の組立 柱から作成した4体を除く21体は,供用期間30 年程度の組立柱から作成したものである.組立柱は 溶融亜鉛メッキが施されているが,腐食発生箇所は 曲げモーメントの影響を大きく受ける地際および地 中の浅い部分に集中していた.
- (2)腐食レベルをA, B, Cとし, 仮に「A:外観状 態もよく, 顕著な腐食が見られないもの.B:腐食 が認められるが, 軽微で強度低下は起こしていない と思われるもの.C:明らかに腐食が認められ,強 度低下を起こしていると思われるもの.」のように分 類した.
- (3)曲げ座屈変形の発生する部位は地際を想定したコンクリート上面直上とし,象脚座屈による座屈変形の発生部位として,周方向に圧縮側の半周,軸方向に3√Rtを想定して腐食板厚を計測した結果,平均腐食厚さは,A:0.1mm以下,B:0.2mm以下,C:0.5mm以下程度であった.
- (4)曲げ座屈耐力,および座屈後の耐荷力特性には一 定の傾向が見られた.レベルAの供試体では最高荷 重が高く,最高荷重後の荷重低下が急であり,レベ ルCでは最高荷重が低く最高荷重後の荷重低下は緩 やかであった.
- (5)腐食円筒殻の曲げ耐力評価を行う場合の,腐食領域の取り方を解析的に検討した結果,周方向に圧縮 側最大圧縮応力発生位置を挟んだ /2 領域,軸方向 に2√Rt の領域の平均板厚が座屈耐力に影響するこ とが明らかになった.

 (6)文献のに示された円筒殻の曲げ座屈評価式を用い, 2√Rt ×1/4 円の腐食領域における平均残存板厚を 用いて腐食円筒殻の曲げ座屈耐力を算定した結果, 評価式は実験結果を安全側に評価できることが確認 された.

参考文献

- 海田辰将,藤井堅,中村秀治:腐食したフランジの簡 易な圧縮強度評価法,土木学会論文集,No.766/1-68, pp.59-72,2004.7
- 2) 海田辰将,藤井堅,原考志,中村秀治,上野谷実:腐食 鋼板のせん断耐力とその評価,構造工学論文集, Vol.50A, pp.121-130, 2004.3
- 藤井堅,近藤恒樹,田村功,渡邊英一,伊藤義人,杉浦 征邦,野上邦栄,永田和寿 海洋環境において腐食し た円形鋼管の残存圧縮耐力,構造工学論文集, Vol.52A, pp.721-730, 2006.3
- 4) 藤井堅,海田辰将,中村秀治,有尾一郎:経年変化を 考慮した腐食表面生成モデル,構造工学論文集, Vol.50A, pp.657-665, 2004.3
- 5) 中村秀治,藤井堅,石川智巳: 多次元AR法に基づく 腐食表面形状の生成について,構造工学論文集, Vol.52A, pp.671-678, 2006.3
- 6) 土木学会:座屈設計ガイドライン改訂第2版[2005 年度版],鋼構造シリーズ12, pp.221-251, 2005.
- 7) 松浦真一,中村秀治,小木曾誠太郎,大坪英臣 高速増殖 炉容器の耐震設計法に関する研究(第5報,座屈解 析法の適用性評価)日本機械学会論文集 Vol.61A 編, No.585.1995.5.

(2006年9月11日受付)