一葉双曲面 RC 造冷却塔の構造特性に及ぼす形状不整の影響の分析

—実測された形状の再現モデルを用いた損傷・耐力評価—

ANALYSIS OF THE EFFECT OF GEOMETRIC IMPERFECTIONS ON THE STRUCTURAL PROPERTIES OF HYPERBOLOID RC COOLING TOWERS

—Evaluation of the limit state of the observed imperfect system—

武藤 厚^{*1}, 花井建吾^{*2}, 舟崎孝介^{*3}, 加藤史郎^{*4}

Atsushi MUTOH, Kengo HANAI, Takayuki FUNASAKI

and Shiro KATO

In this paper, the three-dimensional distribution of the geometric error based on the reported measured data in the RC cooling tower shell surface is reproduced numerically in detail for the tower which caused the collapse accident in a past, and the spatial distribution characteristic is analyzed. Next, the effect of the geometric imperfection of reproduced shape on elastic stress distribution due to dead weight is examined, and the effect on the wind resistance performance is examined by the elasto-plastic analysis. In addition, the evaluation on the performance of the tower by the thermal stress is made, and the numerical examination on the reinforcing method of the tower is tried.

Keywords: reinforced concrete shell, cooling tower, initial imperfection, wind load, elasto-plastic analysis

鉄筋コンクリートシェル、冷却塔、初期不整、風荷重、弾塑性解析

1. はじめに

欧米においては、内陸部に立地し、大量の冷却水を利用し難い発電所等を中心として、多くのRC造冷却塔の建設事例が存在する。これらの歴史は長く、40～70年代に建設されたものの多くは現在も使用中であり、また、その大型化が進んでいると同時に、中国および印度等においては、発電や各種プラントでの適用が増加している。

一方、英・仏では過去に突風による倒壊事故が繰返し報告されているが(表1)、原因究明と対策検討はその途上であり、既存施設の安全性の評価も大きな課題となっている。この種の薄肉RC回転シェルの力学的特性に関しては、座屈や振動問題のほか、初期不整が応力分布や座屈荷重に与える影響に関する多くの研究がなされてきた。まず、軸対称及び非軸対称で理想化された分布の初期不整に関する基本的な解析手法や現象に関する多くの知見が得られている^{1,2,3,4,5,6)}。いくつかの先駆的な研究成果により、自重および風荷重に対して、初期不整による経線方向面内応力の変動は殻厚に反比例し、円周方向の曲率誤差に対しては経線方向面内応力と周方向曲げ応力が大きく影響を受け、経線方向および周方向応力ともに、振幅が小さい局所的な初期不整によっても大きな変動を示すことが明らかにされた⁷⁾。これらの研究成果は、関連する設計指針に順次適用されているが、いずれも弾性範囲内の検討によるものである^{8,9,10,11,12)}。

上述のように、単純化した初期不整が弾性範囲の現象に与える影響の評価は進んでいるが、現実的な初期不整がタワーの弾塑性挙動

に与える影響の検討は重要であるにも関わらず、分析は進んでいない(初期不整の空間的な分布性状を模擬し、応力や座屈荷重に与える影響の統計的な解析手法の提案や^{13,14)}、材料非線形性が冷却塔の耐力に与える影響の検討事例はいくつか報告されている^{15,16,17,18)}。

本論では、突風による倒壊事故を起したタワーに於いて、事故以前の形状誤差に関して詳細に測定されたデータを入手し、シェル面に対して3次元で再現し、その空間分布特性を詳細に分析した¹⁹⁾。次いで、再現した形状誤差を全体3次元解析モデルにより直接表現し、RCシェルの複合非線形解析手法を用いて、耐風性能に与える形状誤差の影響の定量的な予測を試みた。また、分析が進んでいない熱応力による影響の概略検討や、補強方法についても総合的に評価を試みた。これらにより、事故原因の解明を進め、同様の構造物の設計や既存の構造物の安全性評価の一助とすることを目的とする。

表1 RC造冷却塔の崩壊事故の報告事例の要約^{22,23)}

	事故概要	想定破壊モード	事故後の対応
(1) Ferrybridge 英/1965	H=114m 円錐形の8タワー 中3基が強風により崩壊	風上側の母線方 向引張破壊	タワーの座屈/振 動の研究が促進
(2) Ardeer at Ayrshire 英/1973	(1)の事故を受け、直後に 完成した H=106m H P タワ ーが強風(3秒平均で推定 31m/sec~36m/sec)で崩壊	強風による周方 向筋の引張破壊	強風が直接の原因 であるが、初期不 整の影響が大きい との報告
(3) Fiddlers Ferry 英/1984	(1)の事故後、ダブル配筋 に変更されたが、H=115m H P タワーが強風(3秒平均 で推定 36m/sec 超)で崩壊	崩壊形は(2)と 同様	強風が直接の原因 であるが、初期不 整の影響が大きい との報告
(4) Bouchain 仏/1979	低風速でタワーが崩壊 (詳細は不明)	—	—

本論文の一部は学会大会^{19), 20), 21)}で発表している。^{*1} 名城大学 助教授・工博^{*2} (株)BPA 工修^{*3} (株)野口建築事務所 工修^{*4} 豊橋技術科学大学 教授・工博

Assoc. Prof., Dept. of Architecture, Meijo Univ., Dr. Eng.

BPA Corporation, M. Eng.

Noguchi Architectural & Engineering Firm, M. Eng.

Prof., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Toyohashi Univ. of Technology,
Dr. Eng.

2. シェルの形状データの再現と分析

図1に示すような、一葉双曲面形状の冷却塔に対する形状測定値（文献22より再作成）の等高線データから、シェルの高さ方向および周方向に対して等間隔なメッシュ上における、シェルの法線方向の値に補間した（図中“+”はシェル外側へのはらみ出しを示し、補間方法は付録-1を参照）。図2には、補間した法線方向の形状の不整を示す。図3にはその値を用いて全体形状を表示した（変位は10倍で表示）。同図より、再現形状は、周方向および母線方向に繰返す波形がシェル全面に広範囲に存在し、周期的に繰返す成分と部分的に突出する成分が重なる複雑な形状である様子が示される。

図1 形状測定の報告事例²²⁾による等高線（再作成図）

図2 シェルの法線方向変位として等間隔に補間した分布

図3 タワー上に再現した形状不整（初期変位は10倍で表示）

形状不整成分に関する空間方向のスペクトル特性を分析するために、高さ方向および周方向に2重フーリエ変換を行い（式(1)）、その振幅スペクトルを正規化したものを図4に示す。同図より、周方

向には軸対称（ $N=0$ ）～ $N=5$ 程度で、高さ方向には約0～10cycle/100m付近の領域において形状不整成分のピークが存在することが示され、同時に周方向には $N=10$ 以上の高次波数までの成分の存在が示される。この分布特性は、施工時の支持フレームの剛性に基づいた形状不整の発生モデル¹³⁾による結果と比較すると、周方向に関しては、やや低い波数成分に限定されるものの、高さ方向の波数成分のピークには類似性が認められた。

なお、本分析対象に関しては、①建設直後から指摘された形状の乱れは、最大で20m程度の繰返し（周方向と高さ方向の双方）であり、シェル面全体のはらみ出しは報告されていない、②建設から約7年で強風による破壊が発生し、一般的にはクリープによる影響は小さいと判断される、③コンクリート表面のひび割れが確認されているが、非常に限定的な範囲である（図1の周方向で記号“F”位置・高さ30m近傍）、ことが挙げられる。これらから、自重やクリープ変形による全体変形やひび割れの影響も僅かであると判断され、本論では、観測された形状の乱れを形状初期不整（以下、初期不整と示す）として仮定した。

図4 形状不整の空間におけるスペクトル分布性状

$$s(f_z, f_\theta) = \int_0^{2\pi} \int_0^H \omega(z, \theta) \exp[-2\pi i(f_z z + f_\theta \theta)] dz d\theta \quad (1)$$

3. 弾性応力分布に与える影響^{20, 21)}

図5に示すArdeer Tower再現モデル²²⁾を解析対象として、図6に示すような8節点退化シェル要素（付録-2参照）による要素分割を用いて、再現した形状不整が自重時の応力分布に与える影響を分析する（以後、この再現した形状不整を含むモデルを単に、“再現形状”と表示）²⁴⁾。表2には設定した材料物性値、図7には配筋の設定について、後述の弾塑性解析時に設定する数値を含めて示す。

図5 解析対象の形状

図6 要素分割

図7 配筋の設定

表2 解析における物性値の設定

コンクリート			鉄筋		
ヤング係数	2.1×10^4	N/mm ²	ヤング係数	2.1×10^5	N/mm ²
ポアソン比	0.167		ポアソン比	0.3	
引張強度	1.05	N/mm ²	降伏強度	3.5×10^2	N/mm ²
圧縮強度	30	N/mm ²			

母線方向および円周方向軸力分布を、鉛直の3断面で代表して図8、9に示す(図中の記号(A), (C), (E)は、図1・2の回転方向A, C, E断面での軸力分布を示す)。双方共に、形状不整による軸力分布への顕著な影響が示される。シェルの自重時のフープ応力が形状不整の影響により、広範囲に圧縮から引張に転じる可能性が示される。

図8 母線方向軸力分布に与える形状不整の影響

図9 周方向軸力分布に与える形状不整の影響

4. 風荷重に対する弾塑性性状の評価

形状不整が風荷重に対する損傷や耐力に与える影響を分析するために、自重作用後に風荷重分布に対する増分で弾塑性解析を行った。本論では風圧分布として、式(2)、図10に示すIASS基準⁸⁾によるものを設定した(本解析例では、周方向の分布は表3に示すもので、基準の風速は39m/s、立地としては郊外・樹木が多い地形、また突風要因係数 C_g としては、既往の事故時を想定することとして2.0と設定した)。

$$p = q_{10} C_h C_{\theta} C_g \quad (2)$$

$$q_{10} = \frac{v_{10}^2}{1.6} \quad \text{: 地盤面より10m上の動圧 (N/m}^2\text{)}$$

$$C_h = \left(\frac{h}{10} \right)^{0.28} \quad \text{: 地形の粗さ係数}$$

郊外・樹木が多い地形

$$v_{10} \quad \text{: 地上から10mでの1時間平均風速 (m/sec)}$$

$$h \quad \text{: 地上からの高さ (m)}$$

$$C_g \quad \text{: 突風要因係数 2.0}$$

$$C_{\theta} \quad \text{: 風方向分配係数}$$

図10 風圧分布の仮定

表3 シェルの周方向の風力分布

	ゾーン分け	C_{θ}
Zone1	$0^\circ \leq \theta < 70^\circ$	$1 - 2.0 \left(\sin \frac{90}{70} \theta \right)^{2.267}$
Zone2	$70^\circ \leq \theta < 90^\circ$	$-1 - 0.5 \left(\sin \frac{90}{21} (\theta - 70) \right)^{2.395}$
Zone3	$90^\circ \leq \theta < 180^\circ$	-0.5

図11には、完全形状と再現形状に対する各方向の風荷重に対する荷重-変位関係を、荷重係数 f と61m地点での半径方向変位で示す。なお、3次元での初期不整の再現形状モデルでは、風向による特性も異なる為、図1に示す記号A~Hからシェルの回転中心方向に45度間隔の風向に対する解析を実施した(図11中の風向A-H)。本解析結果からは、形状不整による影響は比較的大きく、完全形状のシェルに対して最大で約18%の耐力力の低下(風向A)が予測される結果となった。また、風向の違いによる影響も顕著に見られる結果となった。本数値解析結果は単一の条件設定であり、解析対象のタワーの事故時風速(3秒平均で、推定31m/sec~36m/sec; 表1参照)との直接の比較は困難ではあるものの、両者の整合性を否定出来ないと考えられる。

図11 風荷重に対する荷重-変位関係

図12~14には、完全形状および再現形状におけるシェル面全体の断面力の分布状況を、母線方向軸力、円周方向軸力、母線方向合モーメントについてそれぞれ示す(以後、“風向A”に対する結果を示す)。図15~17には、風上側から72度、高さ61mで切断した断面力を示す。弾性時と同様に、形状不整を再現したモデルでは顕著な断面力の乱れが存在し、大きな領域でフープ応力に引張領域の拡大が確認され、約70度付近では、フープ応力によるひび割れ発生が確認できる。

完全形状 最大荷重時($f=1.12$) 再現形状 最大荷重時($f=0.92$)

図12 母線方向軸力分布に与える影響(最大荷重時)

完全形状 最大荷重時($f=1.12$) 再現形状 最大荷重時($f=0.92$)

図13 周方向軸力分布に与える影響(最大荷重時)

完全形状 最大荷重時 ($f=1.12$) 再現形状 最大荷重時 ($f=0.92$)
図 14 母線方向合モーメント分布に与える影響 (最大荷重時)

72 度切断面 61m 切断面
図 15 母線方向軸力に与える影響 (最大荷重時)

72 度切断面 61m 切断面
図 16 円周方向軸力に与える影響 (最大荷重時)

72 度切断面 61m 切断面
図 17 母線方向合モーメントに与える影響 (最大荷重時)

図 18 には、完全形状および再現形状に対する、降伏時および最大荷重時の変形 (200 倍で表示) と、中央面におけるひび割れ分布を示す。初期不整の有無に関わらず、荷重の増加に従って、のど部から変形が進行し、両者とも水平クラックが進展する様子が示される。次に、母線方向の曲げ引張によりひび割れが進展し、最大荷重に至る様子が確認される。再現した形状不整の存在による変形モードへの影響と、縦クラックの進展の促進が見られる。

5. 熱応力による影響の予測解析

一般的には、100℃を超える程度の高温の温度荷重を受ける RC 部材においては、剛性低下や変形、熱応力やひび割れ発生は問題となるものの、耐力に与える影響は小さいものと評価されることが多い。

図 18 変形図・ひび割れ分布の概要

一方、本論で取扱う冷却塔は、非常に薄肉でひび割れが問題となる構造物であり、複数要因で温度荷重が作用するものの、その研究事例は非常に少ないのが現状である^{25, 26)}。

ここでは、比較的単純な温度荷重の設定ではあるが、温度荷重を受けた場合の風荷重に対する性能を推定することとする。冷却等の温度荷重としては、稼動時のシェル内表面と外表面の温度差 (軸対称)、および日射による温度差 (非軸対称) が想定される。冷却等の設計指針における温度と風荷重の組合せに関する事例としては、厳冬時期の運転温度を対象として、シェル内-外面の温度差で 45℃と設定されている例があるが¹²⁾、現時点で存在する実測データは建設途上の日射による温度変化のみであり (約 10℃の温度差)²⁵⁾、推定の域を出ない状況である。

ここでは、主として冷却塔の稼動時の断面内の温度勾配を想定し、軸対称の温度差を設定してひび割れ解析を実施し、その後に風荷重を組合せて弾塑性解析を行った (コンクリートの熱膨張係数は標準的と考えられる、 1.0×10^{-5} と設定)。表 4 に解析ケースを示す。設定した温度差としては、シェルの内表面の温度をそれぞれ、10℃、20℃、40℃ (外部温度は全て 0℃) の線形分布と設定した (断面内の平均温度上昇は、シェル下部の拘束による応力にのみ影響を与えるため、本論では温度差のみとした)。

表 4 温度勾配を考慮した解析ケース

解析ケース名	解析形状	温度分布 (内部-外部) (℃)
温度 10-完全形状	完全形状	10-0
温度 10-再現形状	再現形状	10-0
温度 20-完全形状	完全形状	20-0
温度 20-再現形状	再現形状	20-0
温度 40-完全形状	完全形状	40-0
温度 40-再現形状	再現形状	40-0

図 19 には、各ケースの荷重-変位関係を示す (温度荷重による初期変位を原点として表示)。表 5 には各ケースの最大耐力を、温度荷重の無い完全形状シェルモデルに対する比で示す。解析結果により、小さい温度荷重によっても構造物全体の剛性と耐力低下に与える影響が顕著であることが示される。温度勾配はシェル全体に渡り、シェル面の 2 方向の曲げ応力を発生し、ひび割れが進行することによ

と考えられるが、耐力に影響を与えることは通常のRC部材の挙動とは異なる点であり、非常に薄肉の冷却塔の場合、温度ひび割れが耐力に与える影響が大きいことによると考えられる。なお、関連して、温度応力や経年変化によるひび割れが耐力に与える影響を概略で評価するために、コンクリートの引張強度をパラメータとした数値解析結果を付録3に参考として示す。

表 5. 温度荷重を含む場合の最大耐力

解析ケース名	最大耐力比
温度 0-完全形状	1.00
温度 0-再現形状	0.82
温度 10-完全形状	0.98
温度 10-再現形状	0.81
温度 20-完全形状	0.95
温度 20-再現形状	0.75
温度 40-完全形状	0.88
温度 40-再現形状	0.61

図 19 温度荷重を含む場合の荷重-変位関係

図 20 には、温度差 10 度の場合の変形（200 倍で表示）と中央面におけるひび割れを、完全形状と形状不整モデルについて示す。

図 20 温度荷重を含む場合の変形・ひび割れ性状

6. 既存タワーに関する補強案の試験検討

前節までの結果により分析した対象構造形式のは風荷重時の構造特性に対して、主として(1)母線方向の曲げ変形の抑制を目的とした縦リブの設置と、(2)フープストレスの抑制を目的とした水平リングの設置による補強を想定して、数値解析により効果の検証を試みる。なお、ここでは概略の補強効果を検討することを目的しており、全て北からの 1 方向の風荷重を想定し、接合部は単純に剛接とモデル化している。図 21～図 23 に想定補強案を模式的に示す。

図 21 リブ 4 本による補強案と解析モデル

図 22 リブ 8 本による補強案と解析モデル

図 23 リング 3 本による補強案と解析モデル

図 24 には補強案を含むモデルに対する荷重-変位関係を示し、表 6 には完全形状に対する耐力比と再現した形状不整に関する耐力比を示す。

図 24 想定補強案を含む場合の荷重-変位関係

表 6 最大耐力比

解析ケース名	完全形状に対する最大耐力比	再現形状に対する最大耐力比
完全形状	1.00	1.00
リブ 4 本	1.02	1.01
リブ 8 本	1.08	1.14
リング 3 本	1.13	1.30

縦リブの補強はスライディング工法等で現実性が高いものの、今回設定した 4 本の補強効果は小さく、明確な補強効果のためには 8 本程度必要な結果となった。縦リブ 8 本、および水平リング 3 本の双方に関しては、剛性および最大耐力の明確増加が見られる結果となった。また、完全形状に対する耐力向上よりも、実際に形状不整のある場合の補強効果が高いことが示される。

表 7 には、補強案を含むモデルに対する最大耐力時の補強部材内の鉄筋の応力度を降伏強度に対する比で示す（数値は、図 22, 23 に示す縦リブの P1、P2、P3 点（母線方向軸力の大きな領域）、水平リングの P4、P5 点の代表位置で表示）。降伏強度比は最大約 50% 程度

となっており、補強部材を先行破壊させない数値としては妥当な値と考えられるが、今後さらに詳細な検討が必要である。

表 7 鉄筋降伏強度に対する補強鉄筋の応力比(σ/σ_y)

解析ケース名	P1 点	P2 点	P3 点
リブ 8 本-完全形状	0.29	0.10	0.18
リブ 8 本-再現形状	0.49	0.31	0.16

解析ケース名	P4 点	P5 点
リング 3 本-完全形状	0.18	0.18
リング 3 本-再現形状	0.22	0.28

7. まとめ

本論では、倒壊事故以前の形状誤差の実測値を元に、その 3 次元的な分布を再現し、空間分布特性を分析した。再現した形状の不整が、自重作用時の弾性応力分布や耐風性能に与える影響を弾塑性解析により検討した。また、熱応力による影響を概略予測し、想定補強案に対する検討を試み、以下の知見を得た。

- ・再現形状は、周方向および母線方向に繰返す波形がシェル全面に広範囲に存在し、周期的に繰返す成分と部分的に突出する成分が重なる複雑な形状を示す。また、周方向には軸対称 ($N=0$) ～ $N=5$ 程度で、高さ方向には約 $0\sim 10\text{cycle}/100\text{m}$ 付近の領域において形状不整成分のピークが存在する。
- ・シェルの自重時のフープストレスが形状不整の影響により、広範囲に圧縮から引張に転じる可能性が存在する。
- ・再現形状モデルでは、風上側の曲げひび割れが進展し、母線方向の曲げ引張により、タワーの崩壊に至る状況を示すが、これは完全形状のものと類似する。
- ・完全形状のシェルに対し、形状不整を再現したモデルでは顕著な断面力の乱れが存在し、最大で約 18% の耐力力の低下が予測される結果が得られた。なお、風向の違いによる影響も大きい。
- ・小さい温度荷重も剛性と耐力低下に与える影響が顕著である可能性がある。このことは一般的な RC 部材の挙動とは異なる点であり、非常に薄肉な冷却塔の場合、温度ひび割れが耐力低下の要因となる可能性があり、慎重に検討する必要があると考えられる。
- ・現在の設計基準では、温度荷重の組合せ条件は設定されているものの、構造性能の確認方法については記述されておらず、容器構造の一部に関して線形解析時の剛性低下の概略評価手法が提示されているのみであり²⁷⁾、HP 冷却塔のような非常に薄肉で引張破壊が問題となる場合は要注意であると考えられる。このことは、冷却塔以外にも、類似の構造形式においては、温度条件やその評価法に対して何らかの方策が必要と考えられる。
- ・既存の補強案として、今回設定した縦リブ 8 本、および水平リング 3 本による補強は、ある程度有効である結果を示し、形状不整のある場合の補強効果も期待出来る結果を示した。
- ・非常に薄肉であり、中央部は膜力が支配的で、温度荷重を併せても、均一な温度変化では 2 方向の軸力は影響を受けず、既往のタワーではシングル配筋の事例が多いものの、温度勾配による曲げに対してはひび割れ進行を促進する可能性も否定出来ず、この構造形式では結果的に耐力低下を誘発する可能性があり、ダブル配

筋が望ましいと考えられる。

- ・設計時や既存のタワーの安全性評価に際して、RC の弾塑性解析の必要性は高いと考えられる。

今回の解析に用いた形状測定値は、ひび割れが生じた部分も局所的には含まれているが、限定された領域の小さなものであり、自重によるクリープ変形の程度も小さい為、初期不整としてのモデル化は、事故原因の主要な分析に有効と考えられる。但し、繰り返しの風荷重や熱応力による影響もある程度複合している可能性もあると考えられ、これらの詳細な検討に関しては、今後の課題としたい。

謝辞

研究に関し幅広く御指導頂きました、名古屋大学名誉教授・松岡理博士、大阪市立大学名誉教授・日置興一郎博士並びに名城大学・村田賢博士、同・松井徹哉博士、に感謝致します。

本研究の一部は、H15年度・科学研究費補助金・基盤研究C2(研究代表者・武藤厚)、およびH15年度・(財)前田記念工学振興財団・研究助成(同上)による補助を受け実施しました。

参考文献

- 1) Kemp, K.O. and Croll, J.G.A.: The Role of Geometric Imperfections in the Collapse of a Cooling Tower, The Structural Engineer, Vol. 54, No. 1, pp. 33-37, 1976.1
- 2) Croll, J.G.A., Kaleli, F. and Kemp, K.O.: Meridionally Imperfect Cooling Towers, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, No. EM5, Vol. 105, ASCE, pp. 761-777, 1979. 10
- 3) Al-Dabbagh, A. and Gupta, A.K.: Meridional Imperfection in Cooling Tower Design, Journal of the Structural Division, ASCE, No. ST6, Vol. 105, pp. 1089-1102, 1979. 6
- 4) Ellinas, C.P., Croll, J.G.A. and Kemp, K.O.: Cooling Towers with Circumferential Imperfections, Journal of the Structural Division, ASCE, No. ST12, Vol. 106, pp. 2405-2423, 1980. 12
- 5) Kato, S. and Yokoo, Y.: Effects of Geometric Imperfections on Stress Distributions in Cooling Towers, Engineering Structures, Vol. 2, pp. 150-156, 1980, 7
- 6) 加藤史郎、武藤厚、村田賢、宮村篤典: 形状初期不整のるシェル構造物の設計に関する考察、日本建築学会構造系論文報告集、No. 359 号、pp. 74 ～83, 1986.1
- 7) Gould, P.L., Han, K.J. and Tong, G.S.: Analysis of Hyperbolic Cooling Towers with Local Imperfections, Proc. Of the 2nd Int' l Symp. IASS, Natural Draught Cooling Towers, Springer-Verlag, pp. 397-411, 1984
- 8) IASS Working Group No. 3: Recommendations for the Design of Hyperbolic or Other Similarly Shaped Cooling Towers, 1977
- 9) The Working Group on Recommendations of IASS: Recommendations for Reinforced Concrete Shells and Folded Plates, 1979
- 10) ACI-ASCE Committee 334: Reinforced Concrete Cooling Tower Shells - Practice and Commentary. ACI Journal, Vol. 74, pp. 22-31, 1977
- 11) British Standards Institution: Specification for Water Cooling Towers, Part 4, Structural Design of Cooling Towers, 1975
- 12) VGB-Technical Committee "Civil Engineering Technique of Cooling Towers": VGB-BTR Guideline - Structural Design of Cooling Towers, Essen, 1990
- 13) 加藤史郎、武藤厚、村田賢、宮村篤典: 回転殻の初期不整のエントロピーモデルによる統計的解析、日本建築学会構造系論文報告集、No. 355, pp. 70～79, 1985. 9
- 14) 武藤厚、村田賢、松岡理、加藤史郎: 不規則な形状初期不整を考慮した回転シェルの応力分布と分岐座屈荷重の統計的解析、日本建築学会構造系論文報告集、No. 394, pp. 105～117, 1988. 12
- 15) Hofstetter, G., and Mang, H.A.: Computational Mechanics of Reinforced Concrete Structures, pp. 283-290, Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft, 1995
- 16) Mang, H.A., Floegl, H. and Walter, H.: Wind-Loaded Reinforced-Concrete Cooling Towers: Buckling or Ultimate Load?, Engineering Structures, Vol. 5, pp. 163-180, 1983
- 17) 原隆、加藤史郎、中村博志: 風荷重を受ける鉄筋コンクリート冷却塔の耐力特性、日本建築学会構造系論文報告集、No. 434, pp. 97～106, 1992. 4
- 18) Wittek, U. and Anmin Ji: Nonlinear Behavior of RC Cooling Towers and Its Effects on Strains, Stresses, Reinforcement and Cracks, Worldwide Advances in Structural Concrete and Masonry (Proc. CCMS Symp.), ASCE, pp. 287-297, 1996
- 19) 関山太一、武藤厚、加藤史郎、舟崎孝介: 鉄筋コンクリート冷却塔の構造特性に及ぼす初期不整の影響について(その 1 実機における形状測定公表値からの 3 次元形状の復元)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 745 ～746, 2001. 9
- 20) 花井建吾、武藤厚、関山太一、前川武洋: 鉄筋コンクリート冷却塔の構造特性に及ぼす初期不整の影響について(その 2 復元した 3 次元モデルによる弾塑性性状の分析)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp. 415～416、

2002. 8

- 21) 花井建吾、武藤 厚、坂井田成臣、鎌谷真理：鉄筋コンクリート冷却塔の構造特性に及ぼす初期不整の影響について(その3 復元した初期不整を考慮した風荷重時の損傷評価の試み)、日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 735~736, 2003. 9
- 22) Report of the Committee of Industry into the Collapse of the Cooling Tower at Ardeer Nylon Works, 27th, Sept., 1973, Imperial Chemical Industries Limited Petrochemicals Division, 1974
- 23) Godoy, L. A. (Ed.): Thin-Walled Structures with Structural Imperfections, Univ. of Puerto Rico at Mayaguez, Pergamon, 1996
- 24) 武藤 厚、小山信夫、村田 賢、加藤史郎：上載圧を受ける鉄筋コンクリート球形シェルの非線形振動性状に関する検討—複合非線形性を考慮した数値解析手法と基本的な応答性状について—、日本建築学会構造系論文集, No. 549, pp. 83~90, 2001. 11
- 25) Larrabee, R. D., Billington, D. P. and Abel, J. F.: Thermal Loading of Thin-Shell Concrete Cooling Towers, ST12, ASCE, pp. 2367-2383, 1974. 12
- 26) Kratzig, W. B.: Dynamic Fatigue of High-Rise Natural Draught Cooling Towers, Worldwide Advances in Structural Concrete and Masonry (Proc. CCMS Symp.), ASCE, pp. 298-309, 1996
- 27) 土木学会エネルギー土木委員会：LNG タンク躯体の構造性能照査指針, 1999
- 28) 市田浩三、吉本富士市：スプライン関数とその応用、教育出版、1978
- 29) Ahmad, S., Irons, B. M. and Zienkiewicz, O. C.: Analysis of Thick and Thin Shell Structures by Curved Finite Elements, Int. J. Numerical Methods in Engineering, Vol. 2, pp. 419-451, 1970
- 30) Zienkiewicz, O. C.: The Finite Element in Engineering, Mc Graw-Hill, 1971
- 31) Hughes, T. J. R. and Hinton, E.: Finite Element Methods for Plates and Shell Structures-Vol. 1 Element Technology, Pineridge Press, 1986
- 32) Kupfer, H., Hilsdorf, H. K. and Rush, H.: Behavior of Concrete under Biaxial Stresses, ACI Journal, Vol. 66, No. 8, pp. 656-666, 1969

付録-1. 形状の再現と詳細検討(3次元立体視システムによる目視)

ここでは、等高線データからメッシュ上の値のモデル化をする際に、高さおよび周方向に対して高次の振動の少ないなだらかな補間をするために、それぞれの方向に関してBスプライン関数を用いて補間を行った²⁸⁾。また、3次元立体視システムを用い(赤外線エミッタ+電子シャッター眼鏡による)、再現形状を目視により詳細にその変形モードを確認した。

図 A-1 3次元表示システム

付録-2. 弾塑性解析手法について²⁴⁾

ここでは、薄肉RCシェルの非線形問題を取扱うために、幾何学的非線形性と材料非線形性を考慮した複合非線形の釣合式を有限要素法により離散化して数値解析を行なう。具体的には、ひずみと応力はGreen-Lagrange ひずみ、2nd Piola-Kirchhoff 応力とし、幾何学的非線形性はTotal Lagrangeにより定式化し、コンクリート及び鉄筋の材料非線形性は増分の塑性理論により考慮した。なお、弧長増分法による制御により数値解析を実施した。

使用要素は図 A-2 に示すような形状の8節点アイソパラメトリック退化シェル要素を積層分割して用いた^{29,30,31)}。コンクリートは厚さ方向に層分割され、鉄筋は等価な層として表現される。なお、ひずみ成分は(A-1)式に示すように、法線方向変位の一回微分に関する2次項までの非線形項を面内ひずみに考慮することで大変形を表現した。

図 A-2 要素形状と要素の層分割

$$\varepsilon = \left\{ \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y}, \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2, \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2, \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y}, 0, 0 \right\}^T \quad (A-1)$$

要素の各応力成分は

$$\sigma = \left\{ \sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz} \right\}^T = \mathbf{D} \varepsilon$$

と示される。尚、用いた要素に関する座標系、変位場、形状関数及び構成関係

行列 **D** の詳細については文献²⁴⁾を参照されたい。

各断面力については以下のように示される。

$$N_{x(y)} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{x(y)} dz = \frac{h}{2} \sum_{i=1}^n \sigma_{x(y)}^i \Delta \zeta^i$$

$$M_{x(y)} = - \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_{x(y)} z dz = \frac{h^2}{4} \sum_{i=1}^n \sigma_{x(y)}^i \zeta^i \Delta \zeta^i$$

$$Q_{x(y)} = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xz(y)} dz = \frac{h}{2} \sum_{i=1}^n \tau_{xz(y)}^i \Delta \zeta^i$$

材料非線形性に関しては、破壊限界の評価を目的の一つとするために、数値計算の安定性確保を優先し、コンクリートと鉄筋に関して比較的単純な構成則を用いた。コンクリート及び鉄筋の応力-ひずみ関係は図 A-3 に示すようなものを仮定した。コンクリートの破壊曲面は、Kupfer の実験結果³²⁾を塑性論に基づいて近似した(図 A-4)

図 A-3 コンクリート及び鉄筋の1軸応力-ひずみ関係

図 A-4 コンクリートの破壊曲面のモデル化

(2 軸圧縮)

$$f(\sigma) = \left\{ 1.355 \left[(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y) + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2) \right] + 0.355 f_c (\sigma_x + \sigma_y) \right\}^{1/2} = f_c \quad (A-2)$$

(1 軸圧縮 1 軸引張)

$$f(\sigma) = \frac{(f_c - f_{cr})(\sigma_m - \sqrt{J_2} \sin \phi / \sqrt{3})}{f_c + f_{cr}} + \sqrt{J_2} \cos \phi - \frac{f_c f_{cr}}{f_c + f_{cr}}$$

$$\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z), \quad J_2 = \frac{1}{3}(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 - \sigma_x \sigma_y) + \tau_{xy}^2$$

$$\phi = \frac{1}{3} \sin^{-1} \left\{ - \frac{3\sqrt{3}J_3}{2(J_2)^{3/2}} \right\}$$

$$J_3 = - \frac{1}{27}(2\sigma_x - \sigma_y)(2\sigma_y - \sigma_x)(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{3}(\sigma_x + \sigma_y)\tau_{xy}^2 \quad (A-3)$$

ひび割れ発生は、各層内の積分点における応力基準により、2つの主応力に対応して最大2方向のひび割れを想定した(1軸引張1軸圧縮状態においては、式(A-3)によりクライテリアを設定)。なお、ひび割れは直交し、一度発生したひび割れ方向は、当該要素の除荷により再接合しても変化せず、固定して取り扱う。数値計算では、1方向にひび割れが発生したと判定した場合、ひび割れ方向とその直交方向を主軸とする直交異方性材料として扱い、ひび割れ直交方向の主応力 σ_1 と対応する主ひずみ ε_1 間の剛性を零とした。ひび割れ発生による応力再配分は、隣接する要素等価な節点力として開放し、発生する不釣り合いは、増分の各ステップにおける収束計算により解消させる。なお、ひび割れ後のテンションスティフニングは図 A-3 に示すような一部の応力を解放した後、ひずみに関して線形で低下するものとし、せん断剛性低減係数は面内、面外共に0.25とした(ひび割れが閉じればその方向のせん断剛性は回復すると仮定)。なお、繰返しに関して、コンクリートの圧縮側及び鉄筋については弾性の除荷/再載荷、コンクリートの引張側は原点指向とした。

付録-3. コンクリートの引張強度の影響に関する検討

コンクリートの引張強度が耐力に与える影響や温度応力によるひび割れ、経年劣化等による影響を概略に検討するために、引張強度を50%低減させ、風荷重に対する弾塑性解析を実施した。図 A-5 に、荷重-変位関係を、表 A-1 には耐力比を示す。コンクリートの引張強度が耐力に与える影響が大きいことが示され、ひび割れ進展の影響が大きい結果となっている。初期不整の存在により、18~36%程度、耐力低下を助長させる可能性が示される。形状不整とコンクリート引張強度の低減の相乗効果が考えられる。

図 A-5 荷重-変位関係

表 A-1 最大耐力比

解析ケース名	最大耐力比
完全形状	1.00
再現形状	0.82
ft50%-完全形状	0.87
ft50%-再現形状	0.66

英文要約 (Summary)

In the inland in Europe and America, construction case of many reinforced concrete cooling towers exists mainly on the power plant which is hard to utilize much cooling water. It is long in the history of such tower construction, and many towers constructed in 40~70's are used at present. In China and India, the construction of towers in the power plants increases. In such situation, it is reported that the collapse accidents by the gust repeatedly arose in United Kingdom and France in a past. Investigation of the cause of those accidents and examination of the countermeasure are developing, and the evaluation of the safety of the existing facilities becomes important problem. On the thin RC shells for these towers, the much research analyzes buckling / vibration problem and effect of initial imperfection on structural properties, and the proposal of design guidelines has been made. To begin with, using the initial imperfection of the distribution idealized axisymmetrically and asymmetrically, a useful knowledge on fundamental phenomenon and analysis method were obtained, and the recommendations for the tolerance limit of the initial imperfection magnitude were proposed. It was analyzed that according to the many leading research results, the fluctuation of meridian direction in-plane stress by initial imperfection was inversely proportional to the shell thickness due to dead weight and wind load within elastic stress analysis, and that it largely affects meridian direction in-plane stress and circumferential direction bending stress for the circumferential curvature error. In addition, partial initial imperfections with small amplitudes play a major role in meridian and circumferential stresses. Concerning the characteristic of initial imperfection itself, the probability-statistical technique for simulating the spatial distribution property is examined, and the statistical analysis procedure to simulate the effect of imperfection on the stress and buckling load is proposed. Recently, the effect of material nonlinearity of RC members on the ultimate strength also became remarkable problem by some researches.

In this study, the three-dimensional distribution of the geometric error based on the reported measured data in the shell surface is reproduced numerically in detail for the tower which caused the collapse accident in a past, and the spatial distribution characteristic is analyzed. Next, the effect of the geometric imperfection of reproduced shape on elastic stress distribution due to dead weight is examined, and the effect on the wind resistance performance is examined by the elasto-plastic analysis. In addition, the evaluation on the performance of the tower by the thermal stress is made, and the numerical examination on the reinforcing method of the tower is tried.

By this study, some results shown below were obtained.

- Reproduced geometric imperfection widely exists for the shell full face, and it becomes a waveform which recurs in circumferential and meridian direction, and the complicated distribution in which the component which recurs periodically overlaps with the local component is shown. The peak of the imperfection component exists from $N=0$ (axisymmetric) to $N=5$ on the circumferential direction and from 0 to 10(cycle/100m) in the height direction.
- The possibility of changing to tension from compression exists on hoop stress due to dead load within large area by the effect of the imperfection.
- Due to wind load, the bending cracks develop in the windward of the imperfect shell, and next, it leads to the failure of the tower by the tension which arises by the bending of the meridian direction. This situation is similar to the thing for the perfect shell.
- From the result shown in the model which reproduced the imperfection, the turbulence of the remarkable section forces existed further than the case of the perfect shell, and the result of predicting the lowering of the load bearing capacity of largest about 18% was obtained. Still, the effect by the difference between the wind direction became a remarkable result.
- The effect of the comparatively small temperature loading on rigidity and ultimate strength lowering may be remarkable, and this fact is different from the behavior of the general RC member. In case of thin shell cooling tower, the temperature crack may become a factor of the ultimate strength lowering very much, and it seems to have to examine it in future prudently. Except for the cooling tower, some measures seem to be also necessity for temperature condition and the evaluation method in structural type of the similarity.
- The reinforcement plan by vertical ribs and level rings assumed in this study showed the effective result, and it showed the result of expecting the effect, when there is the imperfection.
- In design and safety assessment of existing towers, the necessity of the elasto-plastic analysis seems to be high.
- Shape measurement value for present analysis is estimated with that the crack has already developed by part and that it has also combined the accumulation of the creep deformation and the repetition of wind/thermal stresses.

The examination which will be more detailed in future by concerning in respect above, is desired.

(2004年3月9日原稿受理, 2004年7月5日採用決定)