(様式第３号)

論　文　要　旨

論　文　題　目　：　超大型石炭サイロの実用化開発に関する研究

石炭火力発電所の貯炭場には、屋外に貯炭される野積み方式、および屋内に貯炭される長尺建屋方式、ドーム方式、サイロ方式がある。

屋内貯炭方式の中で最も貯炭効率が高く、自動運転が可能という利点から、サイロ方式は早くから着目されてきたが、払出時の目詰まりの危険性、粉粒体の圧力変動、地震時の特性に問題があることから、大型化へは慎重な姿勢であった。しかし、最も問題とされた払出時の目詰まりについては、払出方式の工夫、目詰り解消設備の設置により、ほぼ解決の目途が立ったことから、設計上曖昧な点は残しつつも、1983年初めて本格的な石炭サイロ1.3万トン×3基が竣工し、更に1986年当時世界最大の石炭サイロ3.1万トン×４基が沖縄県石川市で竣工した。

徳島県阿南市で出力210万ｋＷの大規模石炭火力発電所プロジェクト（2000年運転開始）が浮上し、超大型の石炭サイロ７万トン×8基を計画することになった。サイロ規模が大きくなり、高さが60mを超えることから、改めて超大型石炭サイロの実用化に関する研究が必要になった。

大型サイロの実績は石川市にある石炭サイロ以上のものはどこにもなく、知見も乏しいといわざるを得ない。大型化することによって、設計だけでなく、施工についても何らかの課題が生じることが懸念された。

本研究は超大型の石炭サイロを実用化することをテーマに、企画、設計、施工、設計の検証という時系列の流れの中で、課題を把握し、課題解決のために行った実証研究である。但し、論文構成上は、設計の検証を設計よりも前章にしている。

本研究の内容は次のとおりである。

第１章では、企画上の課題として、屋外貯炭、他の屋内貯炭方式と比較して、石炭サイロの特徴を整理すると共に、石炭サイロの実績については海外に大きなものはなく、国内の実績が世界最大であることを示している。また、サイロの形状、すなわち、高さ径比、規模、払出条数が及ぼす経済性への影響についてケーススタディを行い、高さ径比１前後、払出条数４条、規模７万トンは経済的に合理性があることを明らかにしている。

第２章では、設計上の課題を明らかにすることを目的として、サイロ内の粉体の流れと粉体圧の関係を整理すると共に、粉体圧のシミュレーション手法として個別要素法があるものの、実験室レベルのものであることを示している。

次に、石炭の圧力評価に関係する静的物性、地震力評価に関係する動的物性を調査している。石炭の動的物性と地震力の評価の関係については、まず既往の研究成果を概観するとともに、地震応答解析により７万ｔサイロを想定した基本検討を行っている。その結果、石炭の動的物性、すなわち剛性及び減衰の歪依存性を考慮しなければ、サイロの固有周期が地震波の強振動域にあるため、地震応答最大層せん断力は非常に大きくなることを明らかにしている。更に、石炭の動的物性が地震力低減に大きく寄与し、上部の石炭の歪が大きくなることが明らかになり、地震応答せん断力の低減にはそのモデル化が重要であることを示している。

第３章では、設計の検証をするために、超大型石炭サイロで計測された石炭圧および鉄筋ひずみから常時荷重に対する応力－ひずみ関係を把握し、本サイロの設計において採用された石炭荷重との比較を行っている。一部において、設計荷重を上回る計測値はあるものの、鉄筋応力の変

（様式第３号）

動は比較的小さく、石炭圧の変動による変形は弾性応答の範囲内にあり、基本的には、計測結果は設計の妥当性を示している。また、払出時の石炭圧の急激な増減が払出機近傍で局所的に生じるが、全体的に圧力増加は静的なものであり、圧力増加が筒体に大きい影響を与えないことを示すと共に、FEM 解析結果により、払出による圧力減少すなわち除荷側の荷重が筒体に影響を与えることを示している。

第 4 章では、石炭の粒径は流動を阻害しない大きさに設定し、実スケールのサイロを複雑な構造のホッパー部を含めてモデル化して、満載時と払出時の状態を個別要素法により 2 次元シミュレーション解析を実施している。その結果、圧力増加率は静置時粉体圧に対してほぼ 2 倍であり、計測結果と対応している。ホッパー部でのアーチ形成が読み取れ、荷重変動の要因になっていることが分かり、解析により石炭圧の変動を定性的に説明することができた。サイロ内の粉体圧の変動を解析的に示した例はなく、今後解析手法が進歩すれば、3 次元的な解析手法により、定量的な評価方法が可能であることを示している。

第 5 章では、設計レベルとして、実用化研究の対象である石炭サイロの構造設計フローを「容器構造設計指針・同解析」に準拠して設計応力を定め、断面算定を行い、その断面に対し耐震性の確認を行う設計フローを示している。次に石炭の動的物性、すなわち剛性と減衰の歪み依存性については、上載圧による影響を考慮して求めるとともに、初期せん断剛性と上載圧の関係を、実験的手法ではなく、実機の石炭サイロ内における原位置試験により得ている。解析モデルについては、実験によって有効性が確認されているものの、サイロ筒体特性を弾性に限る FEM モデルとサイロ筒体特性を弾塑性にできる質点系モデルの双方で解析している。筒体が弾性であれば、２つのモデルのモードはほぼ一致しており、固有振動数も近く、FEM モデルと質点系モデルの対応はよいことを示している。また、地震入力に対しては、石炭の塑性化が進行し、石炭のひずみの増大とともに減衰も増大して、応力も弾性範囲内に収まっていることを示している。尚、補足として、個別要素法解析により、地震時における石炭山の挙動をシミュレーションした結果、石炭山は徐々に山の高さを低くするものの、地震によって非常に大きな圧力を筒体に及ぼさないことを明らかにしている。

第 6 章では、施工レベルとして、特殊で大型コンクリート構築物である大型石炭サイロの施工手順に及ぼす特徴を屋根、筒体、ホッパーという部位別に分けて考察し、検討すべき課題を整理している。また、実用化研究の対象であるサイロについて、後工程のリフトアップ工法による屋根鉄骨を筒体へ確実に定着させるために、筒体コンクリートのスリップフォーム施工において、筒体の水平面の形状保持精度を確保する工法を採用したこと等、施工上の工夫を具体的な施工手順とともに示している。さらに、スリップフォーム工法で必要になるコンクリート若材齢強度はベース配合を変えることなく、混和剤の種類と量の組合せを変えることによって、気温変動に対応できることを示している。

第 7 章では、本研究の結論と今後の課題について述べている。

氏　名　　石　川　時　雄

（様式第５－３）

平成 17 年 8 月 9 日

琉球大学大学院
理工学研究科長　殿

論文審査委員
主査　氏　名　岡島達雄
副査　氏　名　堤　純一郎　印
副査　氏　名　山川哲雄
副査　氏　名　伊良波繁雄　印

学位（博士）論文審査及び学力確認終了報告書

学位（博士）の申請に対し，学位論文の審査及び学力確認を終了したので，下記のとおり報告します。

記

申請者	氏名 石川時雄			
現住所				
成績評価	学位論文	(合格) 不合格	学力確認	(合格) 不合格
論文題目	超大型石炭サイロの実用化開発に関する研究			
審査要旨（２０００字以内）				

（次頁へ続く）

火力発電所における貯炭方式の１つに、サイロ方式がある。貯炭効率が高く、自動運転も可能なため、早くから着目されていたが、払い出し時の目詰まり、粉流体の圧力変動、地震時の特性に問題があったことから、大型化への移行は遅々としたものであった。しかし、払出し方式や目詰まり解消の工夫により、設計上曖昧な点を残しつつも１９８３年には１.３万トン級３基が、そして１９８６年には論文申請者自身が参加して当時世界最大のコンクリート石炭サイロ３.１万トン級４基が沖縄県石川市に竣工した。

その後、徳島県阿南市の出力２１０万キロワットの火力発電所プロジェクトで、超大型の７万トン級石炭サイロ８基の計画が浮上した。サイロ規模が大きく、高さも６０メートルを超えることから、改めて超大型の石炭サイロの実用化に関する研究が要請された。

本研究は、超大型の石炭サイロの実用化を目的に、企画、設計、施工、設計の検証という流れの中で、課題を把握し、課題解決のために行った実証研究で、７章で構成されている。

第１章 貯炭場の種類と特徴では、 屋内外の貯炭方式と比較して石炭サイロの特徴を整理し、その上でサイロの形状についてケーススタディーを行い、高さ径比１前後、払い出し条数４条、規模７万トン級は、経済的に合理性のあることを明らかにしている。

第２章 石炭サイロ設計上の課題では、サイロ内の粉体の流れと粉体圧の関係、粉体圧のシミュレーション手法、石炭の圧力評価に関係する静的特性、地震力評価に関係する動的特性を調査している。地震応答解析結果の検討から、石炭の剛性および減衰の歪依存性を考慮しなければ、地震応答最大層せん断力が大きくなるため、地震応答せん断力の低減にはそのモデル化が肝要であることを示している。

第３章 石炭サイロの応力測定結果に基づく設計荷重の検討では、計測した石炭圧はほぼ設計荷重範囲内にあるが、一部において設計荷重を上回る値が見られた。しかし、鉄筋応力の変動は比較的小さく、計測結果は、設計の妥当性を示している。また払出時の石炭圧の急激な増減が払出機近傍で局所的に生じるものの、全体的に圧力増加は静的なものであり、圧力増加が筒体に大きな影響を与えていない。

第４章 石炭サイロ内圧力変動の評価では、個別要素法による２次元シミュレーションの結果、圧力増加率は静置時粉体圧のほぼ２倍であり、計測結果とよく対応している。ホッパー部のアーチ形成が読み取れ、荷重変動の要因になっていることが分かり、解析により石炭圧の変動を定性的に説明している。３次元解析による今後の定量的な評価の道筋をつけたものである。

第５章 石炭サイロの設計と解析では、軸対称FEMモデルと、質点系モデルの双方で解析し、両モデルの対応がよいことを示している。また地震入力に対して石炭山形状のモデル化、石炭の動的物性データの採用により、石炭の塑性化が進行し、石炭ひずみの増大とともに減衰も増大して、構造体応力は弾性範囲内におさまり、大地震に対する構造

安全性を確認している。

第６章 石炭サイロの施工に関する考察では、サイロの筒体コンクリートの施工において、リング状水平トラスをスリップフォーム装置に組み込むことにより、筒体の水平面保持精度を確保する工法を提案している。スリップフォーム工法で必要なコンクリートの弱材齢強度は、ベース配合を変えることなく、混和剤の種類と量の組合せを変えることによって、気温変動に対応できることを証明している。

第７章 本研究の結論と今後の課題である。

以上、本研究は、学術上、技術上、経済上の難度の高い課題を克服しながら、７万トン級８基という世界最大規模の発電用石炭サイロを構築するために行った開発研究であり、ここで得られた構造、材料、施工、マネージメントに関する建設工学的知見は、今後この種の大型コンクリート構造物の建設に貢献するところ大である。さらに外国語の筆記試験および、公聴会における論文発表やその質疑応答の結果からも、申請者は充分な学力を有するものと確認した。