
高炉建設・改修における構造計算システム

Structural Analysis System for Construction and Relining of Blast Furnace

岩田 光司(Koshi Iwata) 森本 照明(Teruaki Morimoto) 金谷 弘(Hiroshi Kanaya)
市原 勲(Isao Ichihara) 藤田 昌男(Masao Fujita) 清原 庄三(Shozo Kiyohara)

要旨：

高炉建設・改修における構造計算システムとして、入力データ作成の省力化、解析結果の効率的な評価、汎用構造解析プログラム MASTRAN の有効利用等を目的としたシステム (KBSD System) を構築した。その特徴は、次の通りである。(1)本システムは、骨組構造入力データ作成、炉体・支柱荷重入力データ作成、骨組部材強度の判定、高炉鉄皮板厚決定、のための各サブシステムより構成されている。(2)構造計算データを、ファイルへ系統的に蓄積できる。(3)コンピュータ・アウトプット・ジャーナルにより、標準化した計算書の作成ができる。(4)会話型であるため、即時対応性のある効率的なシステムである。本システムを運用することにより、従来に比べ構造計算に費やす時間の約 70%が削減できた。

Synopsis：

A Structural analysis system (KBSD System) for construction and relining of blast furnaces was established in order to save input data generating, judge speedily results of structural analysis and use effectively structural analysis program NASTRAN. Characteristics of this system are as follows: (1) The system is constituted by sub-systems for generating input data, judging strength of framed structure member and deciding shell thickness of blast furnaces. (2) Structural analysis data is systematically stored in data-file. (3) Standard calculation sheet is made by computer output journal. (4) As this system is interactive, it is an efficient system with immediate correspondence. The system reduced about 70% of time conventionally required for structural analysis.

(c)JFE Steel Corporation, 2003

本文は次のページから閲覧できます。

岩田 光司*2 森本 照明*2 金谷 弘*3 市原 勲*4 藤田 昌男*5 清原 庄三*6

Structural Analysis System for Construction and Relining of Blast Furnace

Koshi Iwata, Teruaki Morimoto, Hiroshi Kanaya, Isao Ichihara, Masao Fujita, Shozo Kiyohara

要旨

高炉建設・改修における構造計算システムとして、入力データ作成の省力化、解析結果の効率的な評価、汎用構造解析プログラム NASTRAN の有効利用等を目的としたシステム (KBSD System) を構築した。その特徴は、次の通りである。

- (1) 本システムは、骨組構造入力データ作成、炉体・支柱荷重入力データ作成、骨組部材強度の判定、高炉鉄皮板厚決定、のための各サブシステムより構成されている。
- (2) 構造計算データを、ファイルへ系統的に蓄積できる。
- (3) コンピュータ・アウトプット・ジャーナルにより、標準化した計算書の作成ができる。
- (4) 会話型であるため、即時対応性のある効率的なシステムである。

本システムを運用することにより、従来に比べ構造計算に費やす時間の約70%が削減できた。

Synopsis:

A Structural analysis system (KBSD System) for construction and relining of blast furnaces was established in order to save input data generating, judge speedily results of structural analysis and use effectively structural analysis program NASTRAN.

Characteristics of this system are as follows:

- (1) The system is constituted by sub-systems for generating input data, judging strength of framed structure member and deciding shell thickness of blast furnaces.
- (2) Structural analysis data is systematically stored in data-file.
- (3) Standard calculation sheet is made by computer output journal.
- (4) As this system is interactive, it is an efficient system with immediate correspondence.

The system reduced about 70% of time conventionally required for structural analysis.

1. 緒 言

当社は、水島第2高炉(3次)、水島第4高炉(2次)改修以来、自社中心の設計・製作・施工による改修を進めている。

我々は、今後の自社改修技術の拡充のため改修設計システム構築の一環として高炉建設・改修における構造計算のシステム化を図った。

高炉建設・改修における構造計算は、主に高炉本体、支柱、荒ガス管、除塵器を連成モデルとした骨組構造解析と高炉鉄皮をシェルモデルとした有限要素法 (FEM) 応力解析があり、これらの計算を NASTRAN 等の汎用構造解析プログラムを利用して行っている。

従来、これら構造計算は計算モデルが膨大であるため、構造データ、荷重データ等入力データの作成及びチェック、また解析結果の処理及び評価に大きな負荷がかかっていた。一方では、今後高炉の建設・改修を行う上で、業務のラップ時に熟練した解析技術者の不足が生ずる懸念があった。

これらの問題点を解決し、今後の高炉建設・改修において効率的な構造計算を行い、安全で経済的な設計を図ることを目的に本構造計算システムを構築した。

本システムは、入力データ作成の省力化、解析結果の効率的な評価及び計算内容のドキュメント化等に多くの特徴を有して

おり、また各サブシステムと NASTRAN を有機的に結合した高炉建設・改修におけるトータル構造計算システムである。以下に、本構造計算システム (KBSD System : Kawasaki Steel Blast Furnace Structure Design System) の概要を述べる。

2. 高炉建設・改修における設計フロー

Fig. 1 に高炉本体、支柱の設計フローを示す。設計は、計画、構造計算、図面化の各ステップに大別される。主な内容は以下の通りである。

- (1) 基本構想では、高炉の操業条件を基にして、炉体プロフィール、炉体支持方式等の基本仕様を決定する。
- (2) 構造計画では、基本構想を基に耐震性、設備配置、据付、重量等を考慮して部材断面を設定する。
- (3) 骨組構造解析では、骨組図を作成し、それを基に構造解析入力データを作成して構造解析を行う。ここでは、構造物部材の強度上の判定を行い、問題がある場合は構造計画を修正して再度構造解析を行い、最適設計を図る。
- (4) 鉄皮応力解析では、骨組構造解析結果を基に鉄皮板厚、構造を決定するための FEM によるシェル応力解析を行う。
- (5) 骨組構造解析を行い支柱部材の強度チェックが完了すると、支柱の詳細計画を行う。

*1 昭和58年2月1日原稿受付

*2 技術本部製鉄技術部高炉改修計画室主査(課長)

*3 技術本部製鉄技術部高炉改修計画室

*4 千葉製鉄所システム部主査(掛長)

*5 水島製鉄所企画部設計室主査(掛長)

*6 水島製鉄所システム部システム室

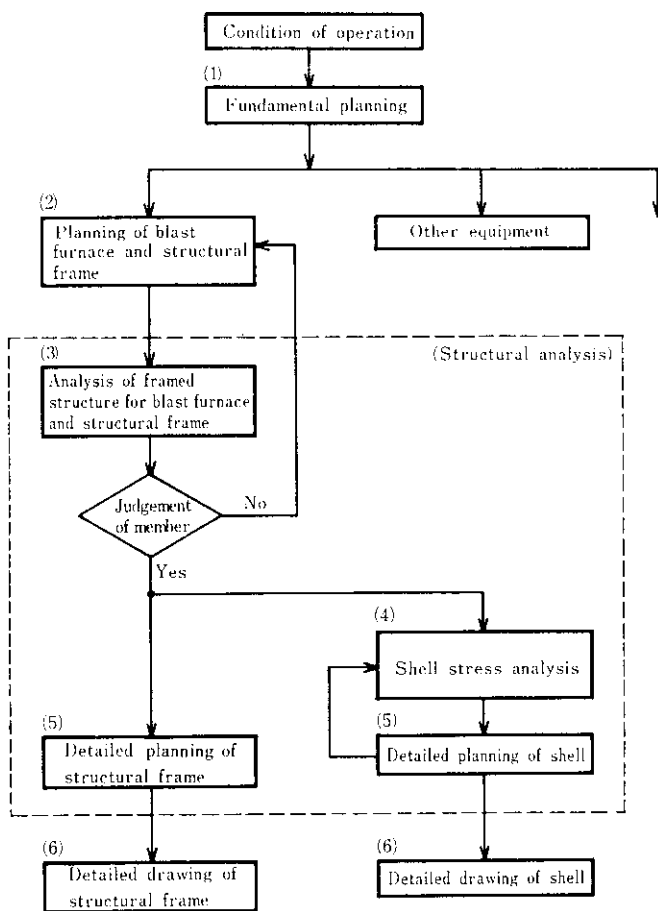


Fig. 1 Design flow of blast furnace

また、鉄皮の詳細計画を行うとともに、鉄皮応力解析を行い、強度上問題がある場合は、詳細計画を修正して最適設計を図る。

(6) 詳細計画を基に詳細図を作成する。

以上の設計フローの中で、構造計算は高炉本体、支柱の基本構造を決定する重要な業務であり、膨大なデータ量を取扱うため設計業務の中でも最も負荷を必要とした。

3. KBSD システムの構成と特徴

KBSD システムでは、シェル構造物である高炉鉄皮と、骨組構造物である支柱、荒ガス管、除塵器架台を、互いに連成したモデルとして解析し、それぞれの構造が決定される。

3.1 システムの構成

KBSD システムのフローを Fig. 2 に示す。本システムは、機能上入力データの作成、構造解析、解析結果の処理の各部分に分けられる。

システム構成上の特徴としては、サブシステム化を図っているため、今後部分的な計算手法・条件の変更及びレベルアップがあっても、全体構成に影響を及ぼさずに変更のあるサブシステムを修正するだけで良いことが挙げられる。

また、各サブシステムおよび NASTRAN の間のデータ伝達はデータファイルを介して行われ、データの一部変更はデータファイルに登録されているデータに修正を加えるだけで可能である。

また、構造計算完了後の最終的な入力データは、長期保存用データファイルに蓄積され、次期改修時にも利用できると同時に、当社における高炉のデータベースの情報として使用できる。

3.2 入力データ作成機能

Fig. 2 に示したように、入力データ作成機能は、主に骨組構造入力データ作成サブシステム、炉体荷重計算サブシステム及び支柱荷重計算サブシステムにより構成されている。各サブシステムについては、第 4 章にて説明する。

3.3 解析結果の処理機能

Fig. 2 に示したように、解析結果の処理機能は、主に部材応力極値選択サブシステムと高炉鉄皮板厚計算サブシステムにより構成されている。各サブシステムについては、第 4 章にて説明する。

3.4 会話型システム

骨組構造入力データ作成サブシステムおよび NASTRAN の入力データ作成部分には、会話型インプットシステムが結合されており、このシステムにより構造物形状、荷重条件、拘束条件をグラフィック・ディスプレイ上に図化し、視覚により NASTRAN 入力データの作成及びチェックができる。また、NASTRAN 及び部材応力極値選択サブシステムには会話型アウトプットシステムが結合されており、このシステムによりディスプレイ上で NASTRAN 解析結果のチェック、支柱部材の最大応力選択結果のチェックと部材断面形状の修正を行うことができる。また、本システムの運用は、全て端末機にてコントロールされる。

3.5 計算結果のドキュメント化

各サブシステムの計算結果リスト及びプロッター図は、全てそのまま計算書として使用可能なようにアウトプット・フォーマットが作成されている。出力リストの項目は、① 支柱骨組部材データリスト及び部材断面形状プロッター図、② 炉体荷重計算結果リスト、炉体断面図及び炉体荷重分布図、③ 支柱荷重計算結果リスト、④ 骨組部材応力の極値選択リスト、⑤ 高炉鉄皮板厚計算結果リスト等、である。

4. 各サブシステムの特徴

ここでは、各サブシステムの特徴を述べる。

4.1 骨組構造入力データ作成サブシステム

(1) 入力データ作成機能

本サブシステムは、NASTRAN にて骨組構造解析を行う場合に骨組解析に必要な機能だけを揃えた、入力データを効率良く作成するためのものである。特徴として、固定フォーマットによる基礎骨組解析データを NASTRAN 入力データに自動変換するので、NASTRAN を熟知しなくても利用できることが挙げられる。

(2) 骨組部材断面性能計算機能²⁾

高炉支柱では、Fig. 3 に示すような断面形状の骨組部材がある。本サブシステムでは、各骨組部材の断面形状を入力すれば、骨組解析に必要な部材の断面性能が計算され、NAST-

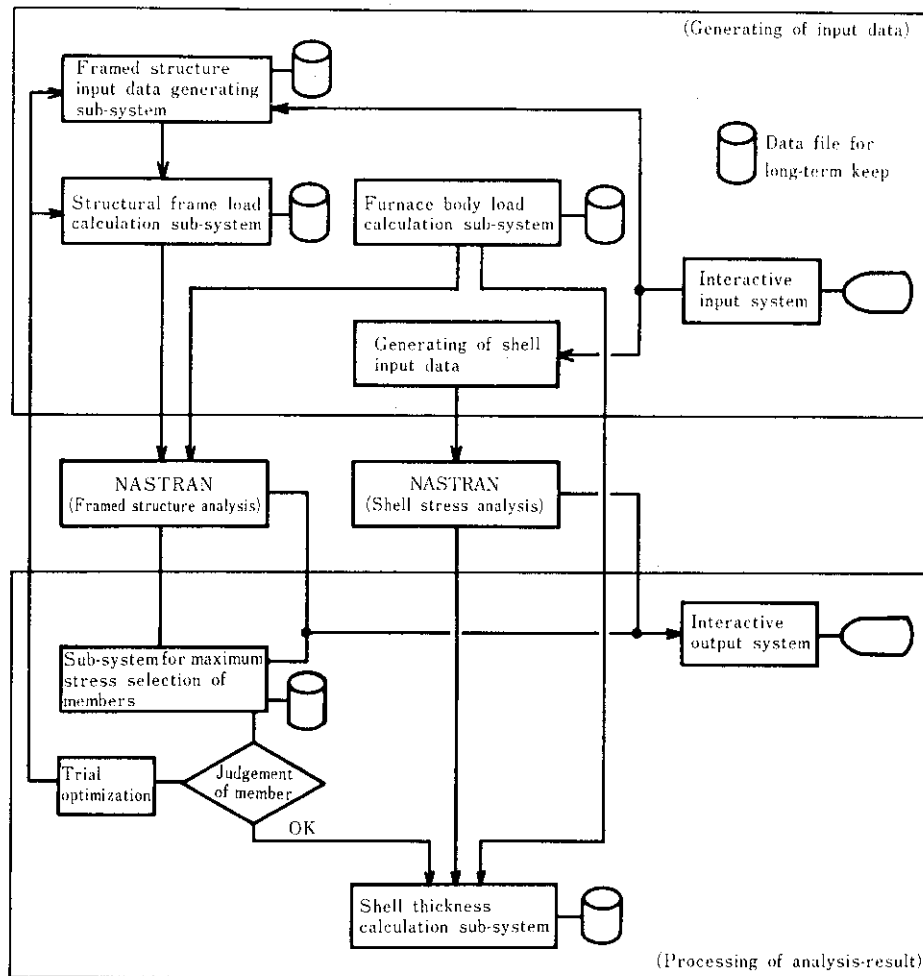


Fig.2 Flow of KBSD system

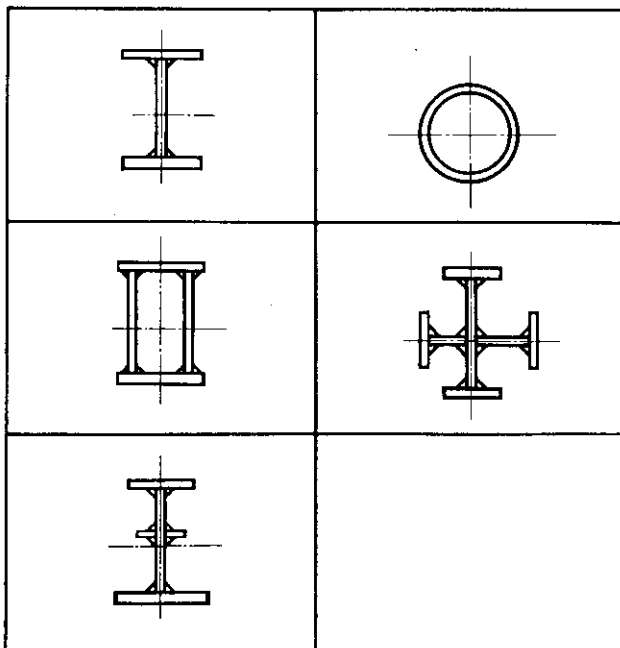


Fig.3 Cross section of framed structure member

RAN 用入力データが作成される。また、各部材断面について、各種応力を算出するための断面係数が計算され、部材応

力極値選択サブシステムにそのデータが伝達される。Fig. 4 は、H 形部材の断面性能計算リストの 1 例である。

4.2 炉体荷重計算サブシステム

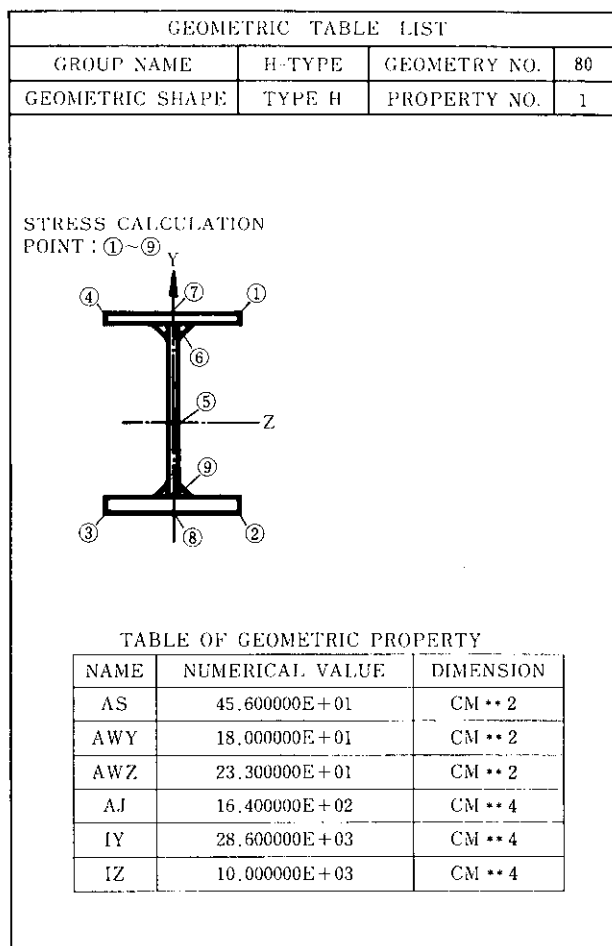
本サブシステムの計算フローを Fig. 5 に示す。本サブシステムでは、鉄皮・ステープ・耐火物より構成される炉体断面プロフィール、各部の比重、基準炉内圧力、炉内内容物の性状等を入力することにより、鉄皮に作用する側圧及び鉛直荷重、短期時荷重が計算される。

Fig. 6 は、炉体断面プロフィールと鉄皮側圧分布のプロッター図の 1 例である。側圧は、炉体の各ブロックごとに平均値が出力される。

4.3 支柱荷重計算サブシステム

本サブシステムの計算フローを Fig. 7 に示す。本サブシステムでは、高炉支柱各段の床積載荷重および機器荷重の基礎データ、各設備の部材グループ等を入力することにより、床積載荷重および機器荷重の部材および節点への配分計算、部材の自重計算、短期時荷重の計算が行われる。

計算された各荷重は、各設備ごとに集計計算が行われ、荷重計算リストが作成される。Fig. 8 は、支柱荷重計算リストの 1 例を示している。このリストでは、梁各層ごとに柱・大梁およびデッキの自重、積載荷重、機器荷重、およびそれらの荷重集計がアウトプットされている。



AS : Cross sectional area
 AWY : Effective sectional area against y-direction shear
 AWZ : Effective sectional area against z-direction shear
 AJ : Effective polar moment of inertia of area
 IY : Second moment of inertia around y-axis
 IZ : Second moment of inertia around z-axis

Fig.4 An example of geometric property list of framed member

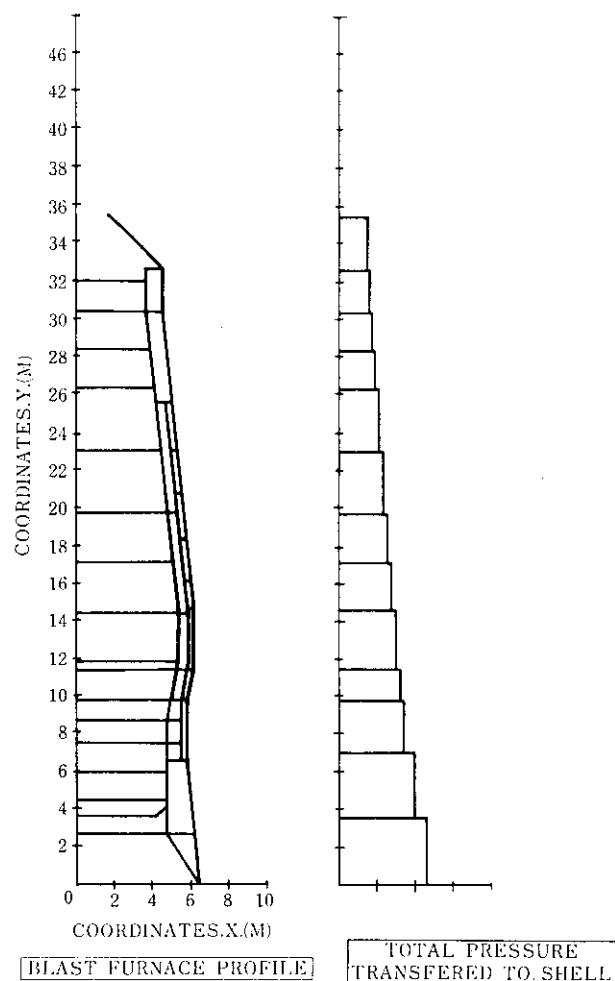


Fig.6 An example of blast furnace profile and shell pressure drawing by plotter

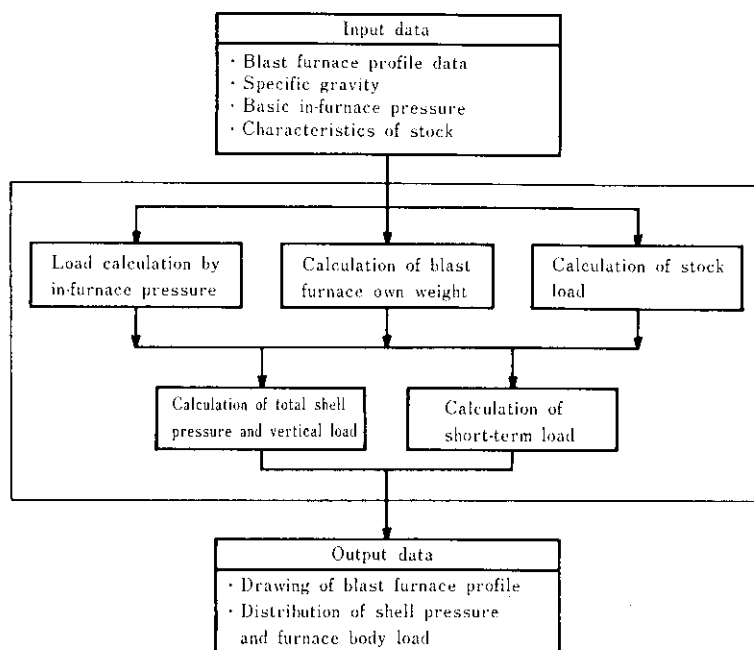


Fig.5 Flow of furnace body load calculation sub-system

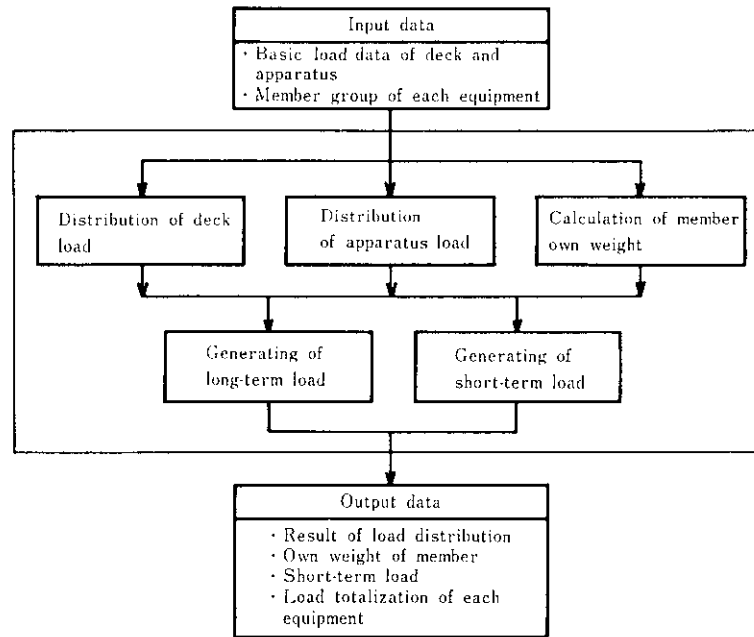


Fig.7 Flow of structural frame load calculation sub-system

		LONG-TERM LOAD											
		DEAD LOAD			CHARGE LOAD			APPARATUS					
G-NO.	F-NO.	COLUMN	GIRDER	FLOOR	LONG-TERM (FLOOR)	SHORT-TERM (FLOOR)	LOAD (T/M ² ×2)	LOAD (T/M ² ×2)	LOAD (TON)	SUBTOTAL	SUBTOTAL	VERTICAL	HORIZONTAL
		(TON)	(TON)	(TON)	(TON)	(TON)	(TON)	(TON)	(TON)	(TON)	(TON)	(TON)	(TON)
		69.1	0.0	0.0	(0.0)	(0.0)		0.0:(+Z)	0.0:(+X)	0.0	0.0	0.0	0.0
						0.0	0.0	0.0:(-Z)	69.1:(-X)	0.0	0.0	0.0	0.0
								0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
								0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0	0	0.0	21.3	184.7	(3.10)	(2.05)		0.0:(+Z)	0.0:(+X)	0.0	0.0	0.0	0.0
					1174.9	775.4		0.0:(-Z)	1380.3:(-X)	0.0	0.0	0.0	0.0
								0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
								0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	1	99.5	42.5	10.5	(0.17)	(0.06)	(-Z)	340.9:(+Z)	0.0:(+X)	0.0	0.0	0.0	0.0
					5.4	4.3		0.0:(-Z)	507.3:(-X)	0.0	0.0	0.0	0.0
								0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
								0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1	2	0.0	0.0	19.7	(0.10)	(0.06)		0.0:(+Z)	0.0:(+X)	0.0	0.0	0.0	0.0
					15.6	12.5		0.0:(-Z)	35.3:(-X)	0.0	0.0	0.0	0.0
								0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
								0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Fig.8 An example of structural frame load calculation list

4.4 骨組構造解析

骨組構造解析モデルは、Fig.9に示すような高炉本体、支柱、アップテーク、ダウンカマー、除塵器本体、除塵器架台等を作成して、ビーム要素にて構成されている。

骨組解析により得られた各部材の断面力は、データファイルを介して解析結果処理サブシステムへ伝達される。

4.5 シェル応力解析

高炉鉄皮には、冷却装置開口、羽口開口、出鉄口開口等が混在し応力状態が複雑であるため、リガメント部応力状態及び開口縁の応力集中状態を把握するのにシェル応力解析を行っている。

Fig.10は、鉄皮開口部のシェル応力解析モデルの1例である。また、Fig.11は、炉頂鉄皮の解析モデルの1例である。

シェル応力解析を利用して求めたリガメント部応力データおよび応力集中データは、高炉鉄皮板厚計算に利用される。

4.6 部材応力極値選択サブシステム²⁾

本サブシステムでは、各部材の応力照査点について応力計算が行われ、部材グループの中で各応力の最大値が選択され、その時の荷重ケース、部材断面の応力発生照査点が出力される。この結果と許容応力とを比較のうえ、必要の場合はディスプレイを利用して断面形状を修正して再度計算を行い、適正な断面形状を決定する。

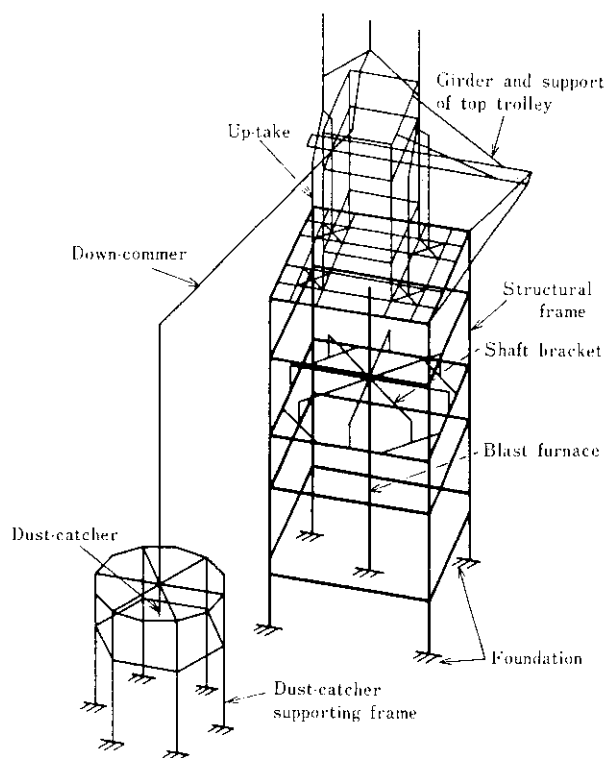


Fig. 9 Model for framed structure analysis

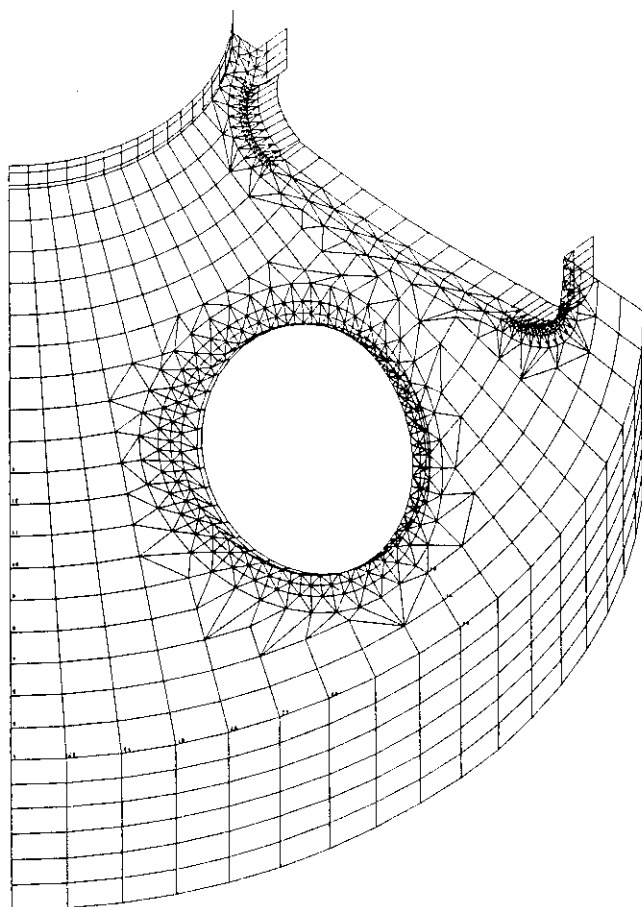


Fig. 11 Model for stress analysis of furnace top shell

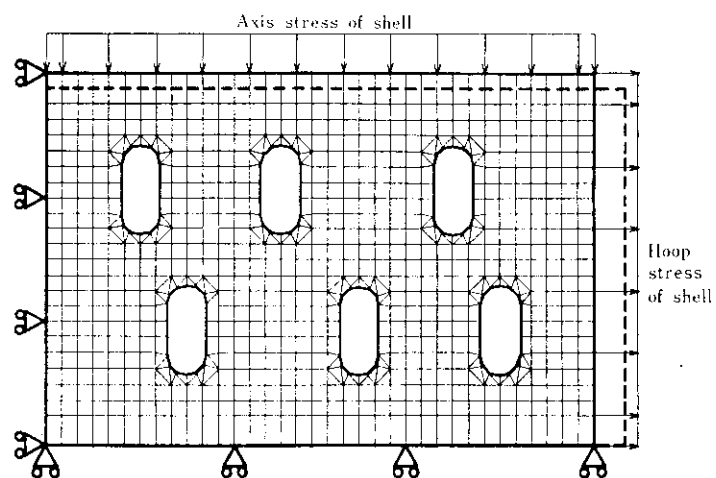


Fig. 10 Model for shell stress analysis

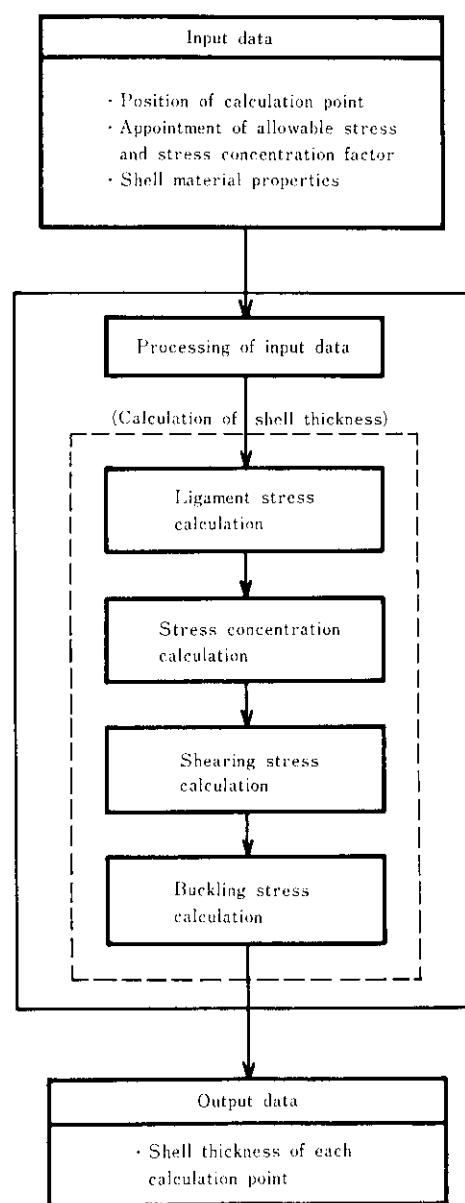


Fig. 12 Flow of shell thickness calculation sub-system

4.7 高炉鉄皮板厚計算サブシステム

本サブシステムのフローを Fig. 12 に示す。本サブシステムでは、鉄皮計算点の位置、リガメント部許容応力及び応力集中係数の指定、鉄皮材料特性等を入力することにより、計算点の鉄皮板厚が計算される。鉄皮各開口部のリガメント部許容応力及び応力集中係数は、データファイルに保存されているデータから必要なものを指定し、計算に使用される。

鉄皮板厚計算は、Fig. 12 に示すようにリガメント部応力計算、応力集中計算、せん断応力計算、座屈応力計算が行われ、各計算点の鉄皮板厚が決定される。

Fig. 13 は、鉄皮板厚計算リストの 1 例である。

5. 構造計算システム化の効果

Table 1 に 2 000 m³ 級高炉の構造計算を行った場合のシステム化の効果を示している。従来の NASTRAN を使用した構造

計算の解析のための作業時間を 100% として比較すると、KBSD システムを使用した場合 30% に減少する。さらに、各サブシステムの最終的な入力データは、データファイルに長期保存でき次期改修にも一部修正して使用できるので、一層の作業時間の削減が可能である。

システム化の効果の内容としては、次の点が挙げられる。

- (1) 構造計算負荷の低減、計算期間の短縮によって設計工数が削減でき、その結果、高度な技術解析の指向が可能になった。
- (2) 豊富なケーススタディを行い、経済性及び安全性の面で最適設計が可能になった。
- (3) 高炉建設・改修業務のラップ時における解析技術者の不足を補うことが可能になった。
- (4) 解析技術の標準化及び標準化されたドキュメントの作成が可能になった。
- (5) 構造計算データの長期保存とその有効利用が可能になった。

本システムは、他の大型シェル骨組構造物への応用も可能である。

CALCULATION POINT		KIND OF STAVE	QUALITY MATERIAL	LIGAMENT STRESS CALCULATION				STRESS CONCENTRATION CALCULATION		SHEARING STRESS
POINT	SIDE			BLAST LONG-TERM (MM)	BLAST SHORT-TERM (MM)	BLOW-DOWN LONG-TERM (MM)	BLOW-DOWN SHORT-TERM (MM)	BLAST BLOW-DOWN (MM)	EARTHQUAKE (MM)	
1	UPPER	STANDARD	SM411	32.00	22.22	9.82	10.64	5.26	1.69	-
	LOWER	STANDARD	SM411	30.51	21.18	9.36	10.14	5.26	1.69	-
2	UPPER	STANDARD	SM411	33.45	23.71	11.63	14.07	5.76	2.61	-
	LOWER	STANDARD	SM411	32.09	22.55	9.77	11.77	5.77	2.30	-
3	UPPER	STANDARD	SM411	29.45	23.34	14.64	21.10	5.59	4.89	-
	LOWER	STANDARD	SM411	23.43	24.16	16.12	23.32	5.64	5.55	-
4	UPPER	TUYER	SM411	35.71	50.98	33.53	56.25	0.0	0.0	19.93
	LOWER	TUYER	SM411	36.68	49.83	33.00	55.35	0.0	0.0	-
5	UPPER	TAP-HOLE	SM411	39.63	43.60	27.03	45.17	31.25	2.36	-
	LOWER	TAP-HOLE	SM411	39.63	43.60	27.03	45.17	31.25	2.36	-

Fig.13 An example of shell thickness calculation list

Table 1 Effect of KBSD system on working hour reduction in case of 2 000 m³ class blast furnace

Item of calculation	Conventional structural analysis (Proportion of working hour* (%))	KBSD system (Proportion of working hour* (%))
Furnace body load calculation	21	2
Structural frame load calculation	41	11
Generating of framed structure input data and maximum stress selection of member	33	16
Shell thickness calculation	5	1
Total	100	30

* Total working hour for conventional structural analysis is assumed as 100%

6. 結 言

入力データ作成の省力化、解析結果の効率的な評価、NASTRAN の有効利用等を目的に、高炉建設・改修における構造計算システム (KBSD システム) の構築を図った。その特徴は次の通りである。

- (1) KBSD システムは、骨組構造入力データ作成、炉体荷重計算、支柱荷重計算、部材応力極値選択、高炉鉄皮板厚計算の各サブシステムと NASTRAN より構成されている。

- (2) データファイルに構造計算データを系統的に長期保存でき、次期改修にも利用できる。
- (3) 標準化したドキュメントが作成できる。
- (4) 会話型システムであるため、コンピュータの有効利用・即時対応性・確実なデータ処理等により、システムが効率的に運用される。
- (5) 各サブシステムにより構成されているため、計算方法の変更およびレベルアップがあった場合の対処が容易である。
- (6) 本システムを運用することにより、従来に比べ構造計算に

費やす時間の約70%が削減できた。また、計算負荷の低減、最適設計等が図れるようになった。
今後は、高炉改修業務のシステム化として、CAD 化などの設

計システム及び見積り・製作に関するシステムへとつながりを広げていく予定である。

参 考 文 献

- 1) 門元ら：「水島第2高炉（3次）改修について」、川崎製鉄技報, 12 (1980) 2, 231-242
- 2) 平井：「川崎製鉄（株）水島製鉄所における科学技術計算アプ

リケーションパッケージの適用」、FACOM ジャーナル, 4 (1978) 8, 11