

建築鋼構造設計初学者のための教育支援システムに関する研究

Training Tools for Newcomers in Steel Structural Design

○原田 幸一* 江口 翔** 山成 實***
 Kouichi HARADA Sho EGUCHI Minoru YAMANARI

ABSTRACT Almost all structural engineers work for structural design with some computer software as useful tools. However, it is concerned that such programs would not be good training tools for the beginners on structural design in spite that those have very high performance in the practical design field. This paper describes a new design tool of steel deck concrete slab system for the beginners in structural design field. The introduced system was developed using a popular spreadsheet application Excel employing VBA and DSP, which is data flow language. It is demonstrated that the system is useful for the stage of preliminary design.

Keywords: 鋼構造, 建築構造設計, 教育支援, 設計システム
Steel Structure, Structural Design, Education, Design Tool

1. はじめに

近年, 建築構造設計においてコンピュータ・構造計算プログラムは設計熟練者にとって省力化できる便利な道具となっている。そのため, 新人教育も商用の構造計算ソフトを用いて行われることが常態化している。一貫構造計算ソフトに代表される商用ソフトは, ソフトの中身が初学者にとってブラックボックスになっていることや設計解がある条件下における解でしかないことから, それらのソフトは設計初学者を育てるのにはあまり適していない。商用ソフトは構造設計の仕組みを深く理解できていない初学者に対しても設計解を提供したり, 入力仮定値が解として適か不適かを判定する。そのため, 設計初学者の多くは, 商用ソフトに頼りすぎて解をすぐ求めたがる傾向にあり, 設計方法と設計全体の流れを理解できず, 解の検証ができないまま設計を終えてしまう事態を生む懸念がある。少子高齢社会・大量定年時代を迎え, 構造設計初学者の育成に有効な機能を有した新たな構造計算ソフトが必要であることがアンケート調査から得られている⁽¹⁾。その解決案として, 設計プロセスが透明化されること

により, 初学者にとって設計の流れと仕組みの理解が深まり, 複数解を得て様々な観点から吟味することで設計感覚が養われ, これにより短時間に構造計画と構造計算の技量が向上することが期待できる。本論文は設計者特に初学者にとって設計感覚を養うことを目的とした処理系のシステム構築を試み, その検討と考察を行うものである。

2. 研究目的

構造設計初学者が初めに行うことが多い二次部材の設計の中から鉄骨構造骨組で用いられるデッキプレート床版を支える鉄骨小梁の設計(図1)をとりあげる。鉄骨小梁の設計は設計解を得るまでに短時間で行え, 計算自体は単純で多くの知識を必要としない。一般的な設計では意匠設計者によってなされた柱割を元に床版と小梁の配置計画がなされる。床版の設計が構造計算や法規等を満足した後に, 床版の設計条件を満足するように鉄骨小梁の配置方向・配置本数を仮定することから始まるが, この小梁の配置計画が構造設計初学者にとっては容易ではない。商用ソフトや表

* 熊本大学大学院自然科学研究科博士後期課程 (860-8555 熊本市黒髪 2-39-1) 準会員 (学生)
 ** 熊本大学大学院自然科学研究科博士前期課程 建築学専攻 (同上) 準会員 (学生)
 *** 工博 熊本大学大学院自然科学研究科 准教授 (同上) 第2種正会員
 本論文の一部は日本建築学会大会学術講演梗概集 (構造), 2010 に発表

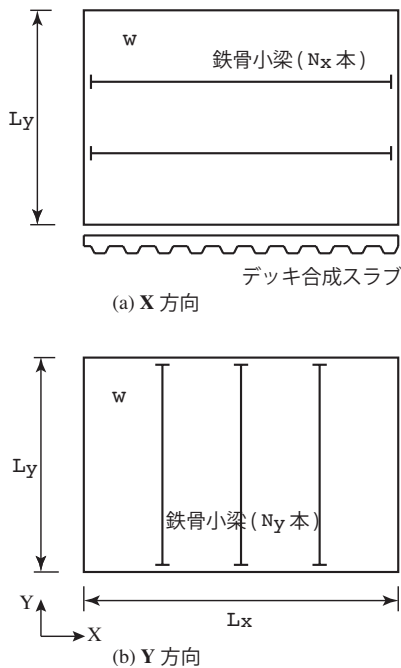


図1 デッキ合成スラブ床組

するために、本システムは複数の条件下における複数の設計解の候補を提供することで^(2,3)小梁の配置計画のための情報を提示する仕組みをもつ。また、小梁の配置計画は周辺の大梁の設計に影響を及ぼすので、文献(3)で紹介した平面骨組の構造部材断面算定支援システムを共用して大梁の断面に関する情報も提示する。

ここで提案する設計支援システムは、初学者にとって鉄骨小梁の設計検討において有用な鉄骨

計算ソフト(Excel等)は仮定した小梁の配置方向・配置本数における解を提供することはできるが、それは一つの条件下に対する一つの解に過ぎない。小梁の合理的な設計計算と設計解の選

択を容易にするために、本システムは複数の条件下における複数の設計解の候補を提供することで^(2,3)小梁の配置計画のための情報を提示する仕組みをもつ。また、小梁の配置計画は周辺の大梁の設計に影響を及ぼすので、文献(3)で紹介した平面骨組の構造部材断面算定支援システムを共用して大梁の断面に関する情報も提示する。

小梁の配置計画の情報を得て、小梁の設計に関する教育支援となることを目指している。

3. 鉄骨小梁設計システムの構成

3.1 設計計算処理の記述

本システムは、データフロー言語 DSP⁽⁴⁾によって構築した。DSPは、個々のプログラムをモジュールという単位で表現しており、小梁を求めるのに必要な諸量は個々のモジュールで計算した結果を集約して解を求めることができる。すなわち、分割された仕事を統合することで計算処理が行われる。Fortranもサブルーチンという副プログラムでシステムを階層化や並列化できるが、DSPでは一つのモジュールが独立したプログラムとして成立しており、プログラム開発の省力化が図られている。

モジュールは設計規準の書法に則って記述することができる。手続き処理型の言語では処理順序が明示されなければならないため、記述に労力を要する。それに対し、DSPに代表されるデータフロー言語では、処理手続き順序を気にせずに設計仕様を記述可能である。このことで、ユーザーはモジュール内部を容易に把握でき、自らの用途に合わせてその記述を変更することも容易となる。

これまでの著者等の一連の研究において、データの透明性の必要性を唱えているが^(2,3)、データ

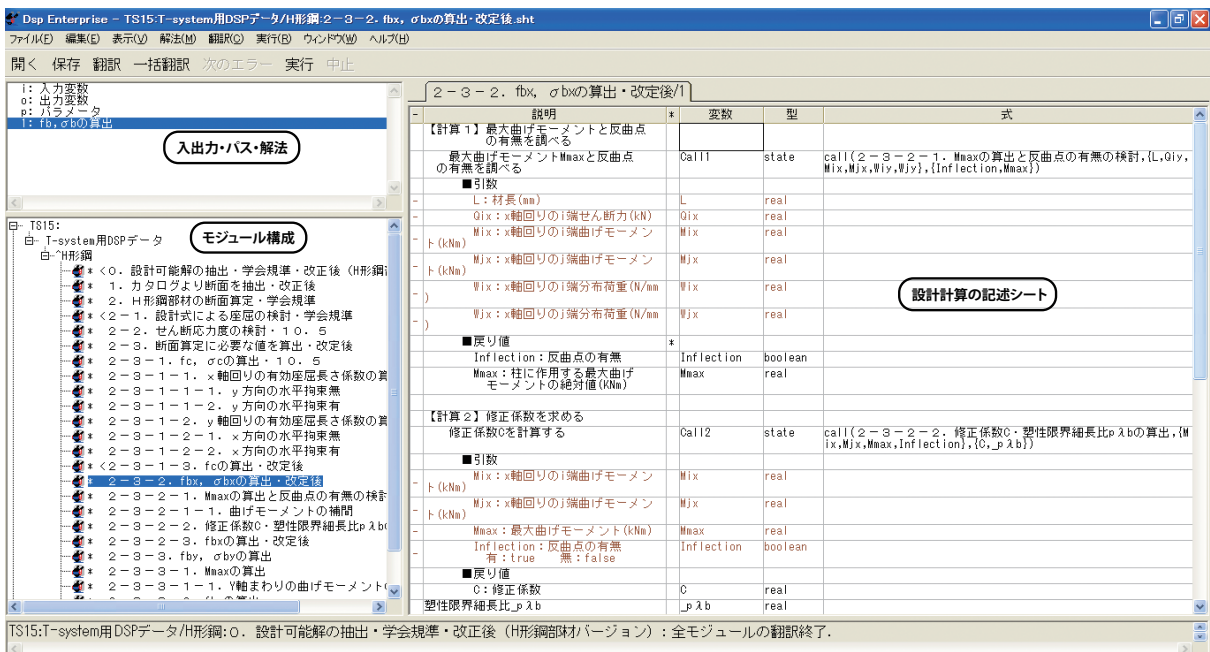
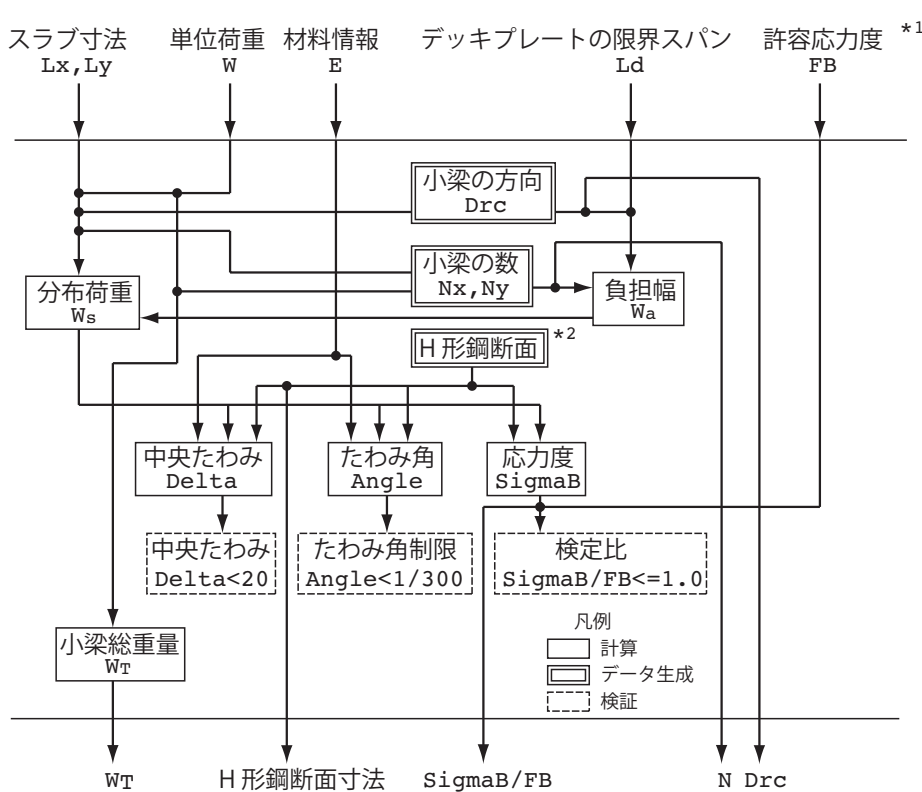


図2 鋼部材の許容応力度設計システムのモジュール構成とプログラムコード(一部分)



*1 スラブの拘束により横座屈は起こらない条件下とする。
 *2 断面カタログ記載の寸法、単位長さ重量、断面性能情報

図3 データフロー図

フロー言語によってプログラムを記述することは、処理及びデータの透明性を保証しており、DSPによる設計支援システムは初学者の教育において有効であると考えられる。図2は鋼部材

の配置方向と配置本数を生成することで、小梁のスパンと小梁が負担する床版からの等分布荷重を計算し、H形鋼の断面情報を含むデザインカタログから曲げ応力度検定比と最大たわみの

の許容応力度設計のために記述されたDSPによるモジュール構成とプログラムコードである。公開されたモジュールや自作のモジュールは設計計算処理を保守することができ、規準の改正に伴う改訂が可能である。

3.2 実装

OSをWindowsとするパーソナルコンピュータを計算機環境とし、DSPを用いてこれらのシステムを実装する。

床組の平面寸法および床荷重、床版の架け渡すことができる限界スパン等を入力情報とした鉄骨小梁の設計を行う。システムが小梁

デッキ合成スラブ床組の設計システム (Ver.1.0) copyright(c) Kumamoto Univ. 2010

荷重状態	長期
符号	B1
鋼材種類	SS400
X方向スパン長(m)	LX = 8 m
Y方向スパン長(m)	LY = 5.8 m
デッキ許容スパン長(m)	LD = 3 m
積載荷重(N/m ²)	WP1 = 1800 N/m ²
仕上荷重(N/m ²)	WP2 = 1000 N/m ²
スラブ自重(N/m ²)	WS = 2000 N/m ²
	W = 4800 N/m ²
梁のヤング係数(N/mm ²)	E = 205800 N/mm ²
検定比 (上限)	$\sigma/f_b \leq 0.99$
(下限)	$\sigma/f_b \geq 0.55$
たわみ制限	$\delta/L \leq 1/300$
	$\delta_{max} \leq 20 \text{ mm}$

小梁の符号 B1 小梁の断面寸法

小梁の配置

X方向 Y方向

図4 設計情報入力画面

制限を満たす複数の断面を抽出する。それらは設計者にとって設計解決の判断材料となる。設計の指標は小梁総重量の大小や小梁のせいで代表される部材の納まりである。これに基づいて設計者は唯一解を決定することになる。

システムのデータフロー図を図3で示す。利用者の入力による設計情報に基づき、鋼構造設計規準⁽⁵⁾を満足するように知識ベースとして蓄えているデザイ

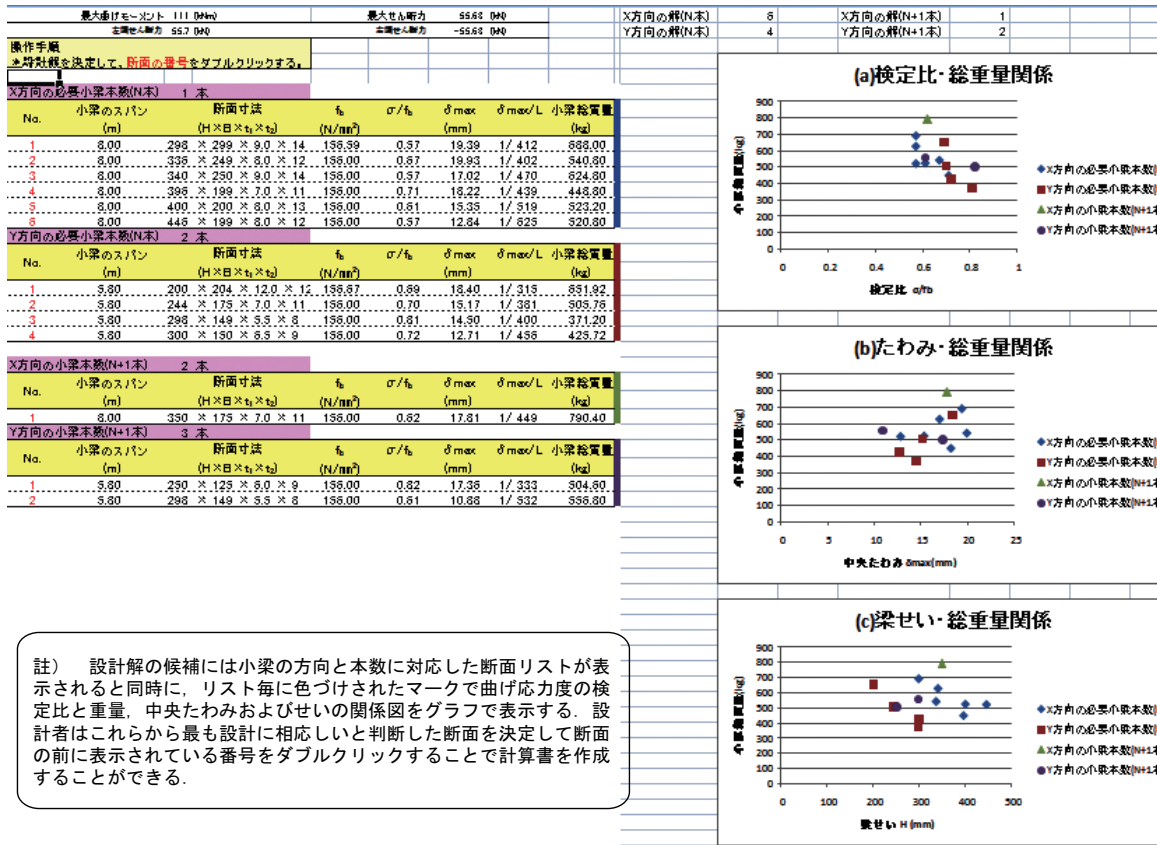


図5 設計解候補リストと評価図(実行例)

表1 デッキ合成スラブ床組の設計情報

大梁によって囲まれた床組の平面寸法	X方向スパン	Lx (m)	8.0
	Y方向スパン	Ly (m)	5.8
床荷重	w (kN/m ²)	4.8	
デッキプレートの架け渡せる限界スパン	Ld (m)	3.0	
小梁の許容曲げ応力度	f _b (N/mm ²)	156	
使用材料	小梁	SS400	
構造形式	小梁	単純支持梁	
	デッキプレート	デッキ合成スラブ構造	

ンカタログの情報から設計解の候補をシステムが一度に複数得る。すなわち、システムは生成検証法による設計要件を満足する集合を抽出する仕組みをもつ。DSPによるプログラミングにおいては、その言語体系の特長であるループを指示するコマンドを記述する必要がないということはシステム構築の労力削減に貢献している。

3.3 ユーザーインターフェイス

本システムでは設計者に視覚的に入力し易く、複数の出力結果に対する設計解の選択のし易い、入出力インターフェイスを用意した。入出力シートはプログラミング言語VBAをもつ一般的に良

く知られた表計算ソフトExcelを用いて作成した。

図4は鉄骨小梁設計システムの設計情報入力シートである。設計者は床組の決められた寸法や材種等を入力するのみならず、ある許容幅をもたせた応力度検定比を入力する。これは大まかな許容範囲を与えることで複数の設計解の候補を設計者に提示し、その中から解の決定を促す仕組みをもつ。従って、最適解を自動計算で行う手法とは異なる。

図5は断面決定のための複数解を抽出した一例である。同図に見られる情報は、設計解の候補群を表およびグラフで表示したものである。その床組に対して、XおよびY方向と小梁の本数に応じた断面リストと設計評価するための小梁の曲げ応力度検定比、中央たわみおよび小梁のせいと床組全体の小梁総重量の関係を図示したものである。設計者はこれらの設計解候補の中から、設計者自身が目標とするものに最も相応しい解を1つ選ぶことで設計を完了する。このように、一度に複数の設計解候補を取得することができるので、試行錯誤の労力を省くことができ、設計

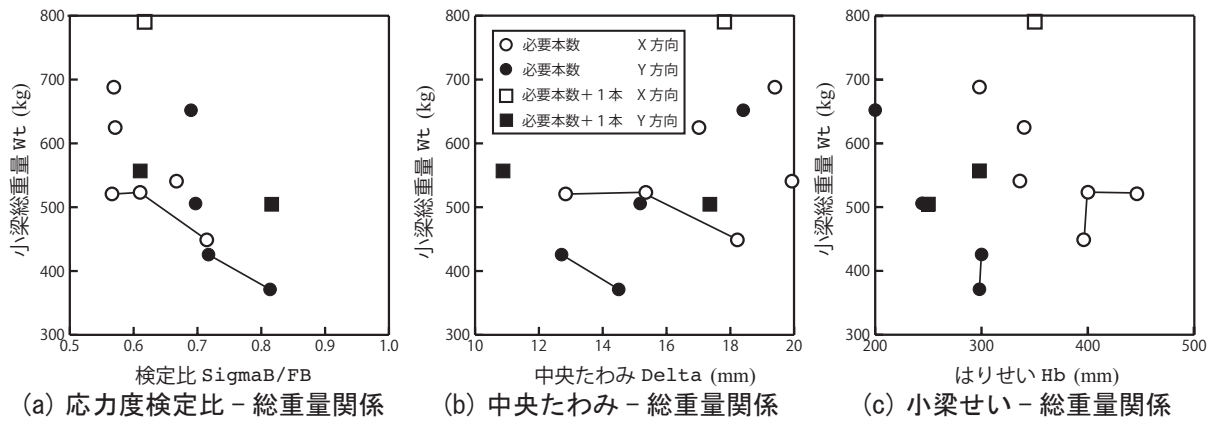


図6 鉄骨小梁設計の検討情報

の吟味に時間を振り分けることが可能になる。

の数は少なくなり設計判断は困難ではない。

4. 鉄骨小梁の設計と評価

4.1 小梁の設計条件

小梁の配置本数は、床版の架け渡すことができる限界スパンから求められる小梁の必要本数の場合と、小梁の負担荷重低減の影響を検討するために必要本数に1本加えた場合を想定し、XY両方向について設計検討を行う。

計算条件として鉄骨小梁の許容曲げ応力度 f_b は一般的に用いられるデッキ合成スラブ床版⁽⁶⁾を想定し、横座屈を考慮しない $f_b = 156 \text{ N/mm}^2$ を用いる。

制約条件として曲げ応力度検定比 σ_b / f_b の設計許容値の範囲を0.55～0.99とし、過度の余裕がある断面は設計候補としない。最大たわみの許容値は一般的な上限値として用いられるスパンの1/300かつ20mmとした。

例題に用いた数値や諸条件を表1にまとめる。小梁をX方向に架けた場合に1本、Y方向に架けた場合に2本が必要となった。参考のために、それぞれの必要本数に1本を加えた場合も設計解を得ることとし、設計解の候補はX方向で7種類、Y方向で6種類の合わせて13種類のH形鋼の断面を得た。

設計を可とする曲げ応力度検定比の範囲を比較的広くとったため、設計解の候補は、広幅系H形鋼から細幅系H形鋼までをカバーし、小梁せいも200～446mmまでと広い範囲の解を得た。小梁総重量も370～790kgと2倍を超える大きな範囲となった。これらは設計解の評価を分析するため十分な候補数である。実務では許容範囲を狭く取ることになるであろうから、設計解の候補

鉄骨小梁の複数の設計解候補について、小梁の総重量と(a)曲げ応力度検定比、(b)中央たわみおよび(c)梁せいの3つの要素との関係を図6に示す。ここでは、工事費に関係が深い総重量を縦軸に取り、評価の基本尺度と考えた。13の設計解の候補のうち、合理的な解と考えられる細幅系H形鋼を必要本数だけ配置した解は、X方向に架けた場合で3つ、Y方向に架けた場合で2つである。これらを小梁の方向別に解を線で結ぶと、XY両方向共に総重量の小さい方からの値を結ぶことが分かる。これらにより3つの横軸要素との傾向がわかり易くなる。

4.2 曲げ応力度検定比と小梁総重量

スパンの長いX方向に小梁を架けた場合で検定比は設計許容値下限の0.55～0.65に多くみられた。このことから本報告の例題では、X方向は最大たわみによって鉄骨小梁の設計が決定したためと考えられる。また、Y方向に架けた場合の検定比は最大値で0.8程度にとどまったもののX方向の場合に比べて大きな値となった。Y方向ではたわみの制限ではなく検定比の方で設計解の候補が決定したためと考えられる。

検定比が大きいほど総重量が低くなると予想され、図6(a)で示されるようにそのとおりの結果が得られた。小梁スパンの短いY方向に必要本数(最小本数)を架けた細幅系H形鋼で板厚が薄い断面が合理的であるため、この問題では小梁の総重量は最も小さくなる。

4.3 中央たわみと小梁総重量

図6(b)で示す結果から小梁スパンの長いX方向の場合にはたわみの制限値に近い傾向がみられ、Y方向では余裕のある結果を得た。小梁スパンが

短くなる Y 方向に架けた方が中央たわみは小さくなり、小梁の設計は容易となる。同じ梁せいのシリーズでは板厚の厚い断面の方がたわみ量は抑制されるが、必然的に総重量は増大する。また、せいは大きい板厚が薄い断面の方が、せいが小さく板厚が厚い断面に対して小梁の総重量はあまり変わらない。しかし、検定比に比べてたわみ量はかなり抑制される。その関係が図示されて、視覚的に分かり易くなるのが設計判断の支援となる。

4.4 小梁せいと小梁総重量

意匠設計や設備設計を進める上で重要な梁せいは、小梁スパンが 5.8 m の Y 方向で 300 mm、小梁スパン 8.0m の X 方向で 400 mm 程度であれば、総重量が小さくなるのが分かり、標準値となり得る (図 6 (c))。

梁せいと総重量の関係から一度に XY 両方向の梁せいの標準値が分かり、小梁配置計画が進め易くなる。最も総重量が小さい設計解の候補においては、検定比や中央たわみの他の解との関係から設計支援となり得る。

5. 周辺大梁の設計

5.1 大梁の設計

前章では小梁の配置に関する検討が行われ、設計者の意図に応じた小梁の配置と断面選択を可能とするシステム実行を示した。ここでは床組周

辺に配置される大梁の検討のために文献 (3) で紹介した平面骨組の構造部材断面算定支援システムを共用して検討した例を示す。

小梁の配置方向により、床組周辺の大梁には小梁からの集中荷重もしくはスラブからの等分布荷重が作用する場合の 2 ケースがある。小梁が大梁に荷重を集中荷重として作用する場合には大梁のせいは増大する結果となり、一方、小梁に平行な大梁のせいは減少する結果が得られることが想像される。このことから小梁のみの重量やせいの検討では床組全体の検討に最良の結果をもたらすとは限らない。従って、小梁を X 方向および Y 方向に配置した場合毎に 2 方向の大梁の算定結果を吟味する必要がある。

図 7 は既に開発した構造部材の設計可能空間抽出システムの実行例である。柱および梁断面のバリエーションの中で大梁に注目した大梁重量およびせいの情報を抽出し、与えられた床組の設計検討を行う。

例題として図 8 に示す 2 層 2 スパンの平面をもつラーメン骨組を仮定し、内側の骨組の大梁の断面を長期荷重時において検討する。柱脚は固定とする平面骨組を小梁の配置方向に合わせて XY 両方向について設計する。1 層分の大梁と小梁の総重量および大梁同士の間隔や大梁と小梁との寸法の納まりについて検討を 2 つのシステムを用いて行う。

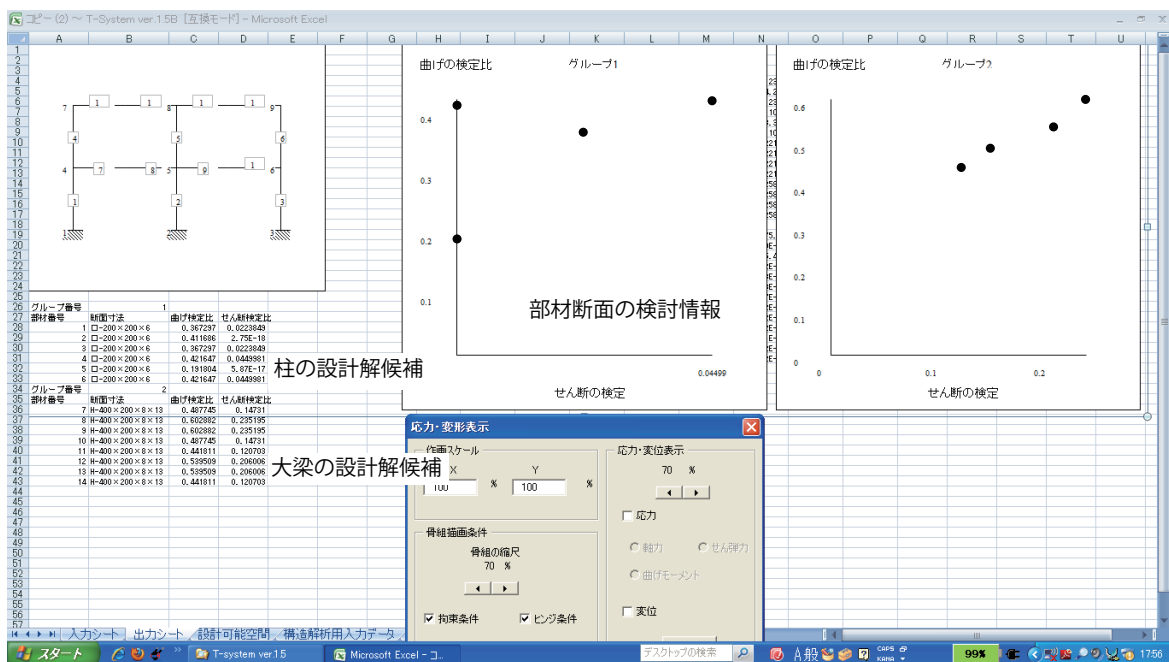
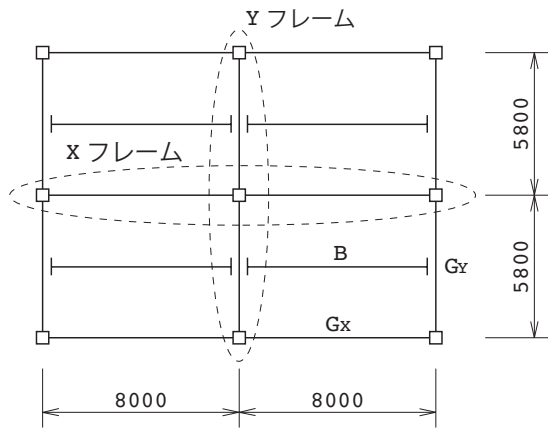
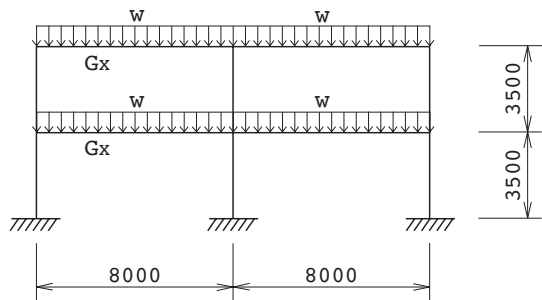


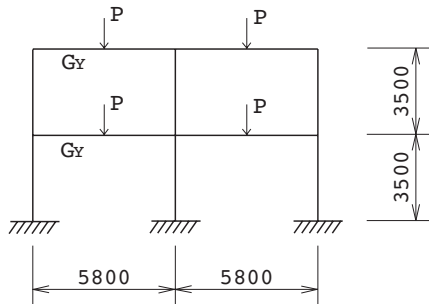
図 7 平面骨組の構造解析から得られる構造部材の設計可能空間抽出 (文献 (3))



(a) 伏図 (小梁を x 方向に配置した場合)



(b) X フレーム軸組図



(c) Y フレーム軸組図

図 8 大梁検討の伏図・軸組図

5.2 設計解の評価

ここでは、大梁や小梁は一般的に梁に用いられる細幅系および中幅系 H 形鋼とし、先で得られた小梁の設計解の候補に基づいて大梁の断面を仮定した。平面骨組の構造部材断面算定支援システムにより得た大梁の複数の設計解候補の中から、大梁と小梁の納まりを考慮した結果、表 2 に示す小梁方向別の大梁断面 $G_x \cdot G_y$ と 1 層の梁総重量を得た。

1 層分の総重量が最も小さくなったのは、小梁スパン

の短い Y 方向に小梁を配置し、大梁と小梁の全てに細幅系 H 形鋼を採用するケースである。同様に Y 方向に小梁を配置し、長いスパンの G_x に中幅系 H 形鋼を用いたケースでは、総重量の増加もわずかで大梁も含めた梁せいは低く抑えられる。

逆に、小梁スパンの長い X 方向に小梁を配置するとスパンの短い方向に配置する場合に比べて、総重量は大きく梁せいも大きな値となる。この小梁配置で梁せいを低く抑えるためには大梁・小梁共に中幅系 H 形鋼断面となり、総重量がかなり大きな値となる。

設計熟練者にとっては経験則から想像される梁の断面の決定が、複数の設計解候補の大梁・小梁断面の組み合わせと総重量から数値で示すことができた。

6. システムの分析

構造設計初学者が行うことの多い計算自体は単純な鉄骨小梁の設計においても 3 つのグラフにプロットされた複数の小梁の設計解の関係を同時に得ることは試行錯誤の労力を省くことができ、周辺の大梁断面も含めた総合的な検討により、小梁の配置方向・配置本数の構造計画支援に有効な役割を果たすこととなる。

ここから見てくる新人教育に関しての計算ソフトの問題点について考察する。計算ソフトは設計の手間を大きく省き、スムーズに構造設計を行うことができる今日の構造設計を支えているツールの 1 つである。しかし、初学者にとってはある条件下における設計解を出すだけのソフトに過ぎず、初学者教育に適しているとはいえない。それはアンケートの結果⁽¹⁾からも窺える。構造設計者に求められる役割が大きくなってきている今、本知識処理システムが初学者教育機能をもつツールとなるのは確かである。

表 2 小梁と大梁の設計解候補

B の方向	B の本数	B の断面 曲げ応力度検定比	G_x の断面 曲げ応力度検定比	G_y の断面 曲げ応力度検定比	1 層の梁の 総重量 (kg)
X	1	H-396 × 199 × 7 × 11 0.71	H-396 × 199 × 7 × 11 0.97	H-396 × 199 × 7 × 11 0.71	6,440
		H-336 × 249 × 8 × 12 0.67	H-336 × 249 × 8 × 12 0.81	H-336 × 249 × 8 × 12 0.60	7,760
Y	2	H-298 × 149 × 5.5 × 8 0.81	H-400 × 200 × 8 × 13 0.87	H-300 × 150 × 6.5 × 9 0.92	5,901
		H-298 × 149 × 5.5 × 8 0.81	H-336 × 249 × 8 × 12 0.91	H-300 × 150 × 6.5 × 9 0.92	6,007

7. おわりに

ここで示した設計支援システムは、その記述性および透明性からブラックボックスとならない設計支援システムであり、初学者教育において有効な機能を有している。設計規準の書法に則って記述されているので設計初学者は解の検討をさかのぼれ、計算の流れや仕組みの理解が深まる。以下に結論する。

構造設計初学者が行うことの多い計算自体は単純な鉄骨小梁の設計においても、複数の条件下における複数の設計候補を一度に得られることで小梁配置計画のための様々な情報が取得でき、大梁も含めた総合的な検討により、設計解を吟味し設計者が決定することができることを示すことができた。

謝辞 本研究の遂行にあたり、システムの検証や改善に協力を頂いた熊本大学工学部建築学科4年の澤原朝美女史に謝意を表します。

参考文献

- (1) 江口翔, 原田幸一, 山成實: 九州地区における建築構造設計技術者のコンピュータ支援設計システムに関する意識調査, 鋼構造年次論文報告集, 第17巻, pp.109-114, 2009.11
- (2) 田中尚生, 山成實, 鋼構造設計における設計可能空間取得技法に関する研究, 鋼構造年次論文報告集, 第14巻, pp.409-414, 2006.11
- (3) M. Yamanari, H. Tanaka: Acquisition of designable space for planar steel frames, Digital Architecture and Construction, WIT Press, pp. 77-84, 2006.9
- (4) 梅田政信, 長澤勲, 樋口達治, 永田良人: 設計計算のプログラム書法, 電子情報学会技術研究報告集, AI 91-60, pp. 25 -32, 1991
- (5) 日本建築学会: 鋼構造設計規準-許容応力度設計法-, 2005
- (6) 合成スラブ工業会, 合成スラブの設計・施工マニュアル, 2005.3