施工過程を考慮した構造設計手法の研究：施工条件が部材応力に及ぼす影響の考察と設計手法の試行

RESEARCH ON STRUCTURAL DESIGN CONSIDERING CONSTRUCTION PROCESS: ANALYSIS OF STRESSES UNDER CONSTRUCTION AND DESIGN TRIAL

兼光知巳——* 1

キーワード：
構造設計，施工方法，設計施工一貫の生産，遺伝的アルゴリズム，知識

Keywords：
Structural design, Construction method, Design-build system, Genetic algorithms, Knowledge

Tomomi KANEMITSU——* 1

Building constructions by dividing the members need structural designs considering construction processes. In this paper, the reasons for doing the designs are analyzed by structural analysis and arranged from the view-points of construction procedures, building shapes, building stiffnesses and modeling of construction conditions. And a structural design system considering construction processes for structural engineers is suggested. In the system, templates of construction processes separated from building information and searching construction procedures by genetic algorithms help structural engineers to consider construction processes.

1. はじめに

建物は、人のスケールに比べ極めて大きいことおよび複数材料で構成されることから、分割して現場で組み立てる必要がある。従って、構造設計に当っては、構造安全性を、①完成建物に設計荷重を与え検証するだけでなく、②施工過程の構造に逐次荷重を与え検証する必要がある。しかし、請負契約上の制約等により、①に関する設計を行い、必要に応じて、施工計画時に、②を検証する場合がほとんどである。施工計画では、①の設計を満足させるため、品質、コスト・工期・環境面において困難な部分も発生する。同困難部分を解決するために①の設計を変更する場合は、再度の構造安全性検証作業が発生し、生産性低下の要因になっている。施工時には、例えば、設計で想定したローラー支持という理想的な支持条件を実現できない場合があり、建物によっては、この条件差が①の検討だけでは危険側の判断になる場合がある。また、環境側面からは、社会ストックの有効利用のための構造モニタリングを実施するに当って、モニタリング結果を担保するために施工過程の構造と荷重を考慮した構造性能を把握する必要がある。

これまで、施工過程の構造と荷重を考慮した構造安全性については多くの工事報告はあるが、体系的に整理された報告はほとんどない。そのため施工過程を考慮するための設計上のポイントが不明確である。施工時の検討は、設計者と施工計画者の共同作業となることおよび多様な検討が必要であることから、構造設計として実施するためには情報化技術の活用等の工夫が求められる¹⁾²⁾。現状、施工計画案を構造解析によって検証するに留まり、構造特性から施工計画案を導き出すまでには至っていない。そのため、設計主体者で

ある設計者単独では施工過程を考慮することが困難である。

本報告では、構造解析シミュレーションによって、施工手順、建物形状、建物剛性および施工条件のモデル化の観点から、施工過程の構造と荷重を考慮した構造安全性について、部材応力を中心に、例示にて整理を試みる。また、構造設計における施工過程の構造と荷重を考慮した構造安全性の検証を、構工法のテンプレート化、並びに遺伝的アルゴリズムによる設計要求を目的関数とした手順探索を組み合わせたシステムを用いて行うことを提案する。

2. 施工手順が完成時構造特性に及ぼす影響

2.1 積層工法の場合

図1に示す地上 n 階建ての鉄骨骨組、鉄筋コンクリート床および金属系外壁を有する建物を対象とする。施工手順は、図2に示す手順を $i=n$ 回繰り返す工法（積層工法）とする。床仕上は n 階の外壁取付け後載荷する。パラメータは、スパン長 L （5～15 m, 5 mピッチ）、階数 n （5～15階, 5階ピッチ）、設計クライテリア（表1）とする。以下本論文において、固定荷重を施工過程の構造に載荷する設計を施工を考慮する設計、完成時の構造に固定荷重を載荷する設計を施工を考慮しない設計という。図3に各パラメータに関して、施工を考慮する設計時の各階の柱の最大縁応力度 σ_{max} の施工を考慮しない設計時の最大縁応力度 σ_{max} に対する比を示す。最大縁応力度は、表1の設計荷重時の $\sigma = |N/A + M_x/Z_x + M_y/Z_y|$ の部材中の最大値である。 N, M_x, M_y は各々、軸力、 X, Y 軸回りの曲げモーメント、 A, Z_x, Z_y は各々、断面積、 X, Y 軸回りの断面係数である。施工過程後の固定荷重時応力度 σ_d は、各施工ステップの応力の線形重ね合

*1 清水建設技術研究所 主任研究員・博士(工学)
(〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17)

*1 Senior Engineer, Institute of Technology, Shimizu Corporation, Dr. Eng.

図1 解析モデル

(a) CASE-1.1

(b) CASE-1.1 (L=10m)

(c) CASE-1.1 と 1.2 の比較 (n=15, L=10m)

図3 施工過程完了後の柱の最大縁応力度

わせ $c\sigma_d = \sum_{j=1}^m \sigma_j$ とする。ここに、 j ($=1, 2, \dots, m$) は施工ステップ、

σ_j は j ステップの解析モデルによる構造解析から得られた部材応力度である。図3(a)より、施工を考慮する場合は、しない場合に比べ柱の応力度が増大する。スパンが長いほど増大率は大きい。これは、スパンが長いと柱の剛比が大きく、軸応力度に対する曲げ応力度が大きくなるためである。図3(b)より、上階ほど応力度の増大率が上昇する。これは、上階ほど柱軸力が小さく断面係数も小さくなり、床荷重は下階とほぼ同じであることから、相対的に下階よりも柱の曲げ応力度の影響が大きくなるためである。図3(c)より、CASE-1.2 は CASE-1.1 に比べ、施工考慮の有無による柱の応力度の差異が大きく、上階では施工を考慮した場合のしない場合に対する応力度増大率が大きい傾向にある。これは、CASE-1.2 が CASE-1.1 に比べ、また、上階は下階に比べ軸応力度の卓越した柱の設計となり、施工による柱の曲げ応力の増減の影響が顕著になるためである。

2.2 複合構造の骨組を有する場合

図4に示す地上10階建ての鉄骨鉄筋コンクリート (SRC) と鉄骨 (S) の骨組および鉄筋コンクリート (RC) 床を有する建物を対象とする。パラメータは施工手順とし、図5に示す3ケースとする。CASE-2.1は鉄骨を最上階まで建方後、柱・梁・床のコンクリートを順次打設する方法、CASE-2.2は柱・梁の鉄骨建方および柱・梁・床のコンクリート打設を下階から1階毎に行う方法、CASE-2.3は鉄骨を最上階まで建方後、1~5階の柱・梁・床のコンクリート打設と6~R階の床のコンクリート打設を同時に行う方法である。図6に各パラメータに関して、施工を考慮する設計時の1~5階の柱 (SRC)

図2 積層工法

表1 設計クライテリア

解析ケース	設計荷重	設計クライテリア
CASE-1.1	DL+LL	長期許容応力度以下
	DL+LL+WL	短期許容応力度以下
	DL+LL+KL	短期許容応力度以下
CASE-1.2	DL+LL	長期許容応力度以下

* 設計応力度の許容応力度に対する比は概ね 0.9 とする。

図4 解析モデル

の最大縁応力度 $c\sigma_{max}$ の施工を考慮しない設計時の最大縁応力度 $d\sigma_{max}$ に対する比を示す。 $c\sigma_{max}$ と $d\sigma_{max}$ は 2.1 節と同様とする。いずれのケースも S 部の応力度が増大する。これは、鉄骨骨組を、RC 骨組、RC 床よりも先に施工するためである。特に、上階の RC 床を先行施工すると、S 部の応力度増大率は大きくなる。しかし、工程に制約がある等、CASE-2.3の施工手順の方が合理的である場合は、施工過程を考慮する構造設計が必須となる。

2.3 部材の接合時期が異なる場合

図7に示す3つのトラスで床組を受ける地上11階建ての鉄骨骨組と鉄筋コンクリート床を有する建物を対象とする。パラメータは柱、梁、斜材および床の施工手順とする。施工手順は以下の制約条件を満足する手順をランダムに50ケース生成する。

図5 施工手順のケース

図6 施工過程完了後の柱の最大縁応力度

図9 解析モデル

- ① 柱、梁、斜材および床は1層分毎に、②～④の条件を満足するように任意の順序で施工する。
- ② 柱、梁、斜材の施工は、当該階未満の柱、梁、斜材の施工後行う。
- ③ 床の施工は、当該階以下の柱、梁、斜材、床の施工後行う。
- ④ 図7中の○印の柱（トラス直下の柱）の柱頭の接合は、当該階上下の柱、梁、斜材の施工後行う。
- ⑤ 施工中は図7に示す仮支柱にて鉛直支持し、仮支柱反力の解放は任意の時期に可能とする。

図8に、各ケースに関して、施工を考慮する固定荷重時の○印部材のA端の最大縁応力度 $c\sigma_{max}$ の施工を考慮しない固定荷重時の最大縁応力度 $d\sigma_{max}$ に対する比を示す。 $c\sigma_{max}$ と $d\sigma_{max}$ は、2.1節と同様

図7 解析モデル

図8 施工過程完了後の最大縁応力度

(a) 仮支柱反力解放時の床打設完了階

(a) 仮支柱反力解放時の床打設完了階の影響

(b) 仮支柱の軸剛性の影響

図10 施工過程完了後の最大縁応力度

とする（ただし、柱は梁と読み替える）。施工を考慮する場合は考慮しない場合に比べ、1～2倍程度の増大がみられる。同幅は、本構

図11 解析モデル

図12 施工過程完了後の柱の最大縁応力度

造では施工手順に制約があり、設計時に施工過程を考慮する必要があることを示唆している。

2.4 仮設材の撤去時期が異なる場合

図9に示す地上7階建ての鉄骨骨組と鉄筋コンクリート床を有する建物を対象とする。施工手順は2.1節の積層工法とし、フィーレンディール架構部は図9に示す仮支柱にて鉛直支持することによって建方し、任意時期に仮支柱反力を解放する。パラメータは、仮支柱反力の解放時期および仮支柱の軸剛性 K (無限大, 100kN/mm/ヶ所, 50kN/mm/ヶ所) とする。図10に、各パラメータに関して、応力比 $c\sigma_{max}/d\sigma_{max}$ 、変形比 $c\delta/d\delta$ および反力比 cR/dR を示す。ここに、 $c\sigma_{max}$ 、 $c\delta$ 、 cR は各々、施工を考慮する固定荷重時の○印部材のA端の最大縁応力度、B点の鉛直変位、仮支柱の最大合計反力を、 $d\sigma_{max}$ 、 $d\delta$ 、 dR は各々、施工を考慮しない場合の応力度、変位、反力で、 dR は R 階のコンクリート打設まで仮支柱を設置した場合の反力を示す。図10(a)は、仮支柱軸剛性 $K=\infty$ の場合の仮支柱反力解放時における床打設完了階毎の値である。図10(b)は、5階床打設の完了後仮支柱反力を解放した場合の仮支柱の軸剛性毎の値である。図10(a)より、仮支柱の存置期間が長いと応力と変形は施工を考慮しない場合の値に近づくが、仮支柱の反力は増大する。図10(b)より、仮支柱の軸剛性が小さいと変形は大きくなるが、部材応力と仮支柱の反力は小さくなる。以上の結果は、施工を考慮しない設計では、仮支柱の耐荷重と剛性に制約ができることを示唆している。

3. 建物形状が完成時構造特性に及ぼす影響

図11に示す地上5階建ての鉄骨骨組と鉄筋コンクリート床を有する建物を対象とする。パラメータは角度 θ (0, 20度) とする。施工手順は2.1節に示す積層工法とする。図12に各パラメータに関して、施工を考慮する設計時の各階の柱の最大縁応力度 $c\sigma_{max}$ の施工を考慮しない設計時の最大縁応力度 $d\sigma_{max}$ に対する比を示す。 $c\sigma_{max}$

図13 解析モデル

図14 部材の最大縁応力度

図15 解析モデル

図16 変位とストリング張力の関係

と $d\sigma_{max}$ は2.1節と同様とする。柱に角度を有する場合、柱の部位によって、施工を考慮した場合の応力度は考慮しない場合に比べ大きくなる場合がある。これは、柱の角度成分による付加曲げによって、軸応力度に対する曲げ応力度の割合が増大するためである。

4. 建物剛性が完成時構造特性に及ぼす影響

図13に示すフィーレンディール架構が2つの鉄骨鉄筋コンクリート構造体間に接合されている建物を対象とする。SRC構造体は、S骨組、RC骨組およびRC床から構成されている。例えば、S骨組だけの場合とSRC骨組の場合では、X方向の荷重に対する剛性は異なる。本章では、SRC構造体の水平剛性がフィーレンディール架構に及ぼす影響を調べる。図13に示すようにSRC構造体の水平剛性をX方向の線形パネにてモデル化する。パラメータは、パネ定数 $k=\alpha k_0$ ($\alpha=0.1, 0.2, 0.33, 1$) とする。ここに、 $k_0=N1$ (kN/mm)、すなわち、パ

図 17 システム構成

図 18 施工ブロック番号

図 19 基本テンプレート

ネ定数無限大のときの部材1の軸力 N_1 をバネに作用させた場合のバネの伸びが1mmとなるバネ定数である。図14に各パラメータに関して、各部材の最大縁応力度($\alpha=1$ の場合を1とする)を示す。同図より、フィレンディール架構の応力度はSRC構造体の施工状態による水平剛性の違いに影響を受けるため、施工を考慮しない設計の場合、施工方法に制約を及ぼすといえる。

5. 施工条件のモデル化が完成時構造特性に及ぼす影響

図15に示す張弦梁構造を対象とする。施工手順は、2つの仮支柱上に大梁を架設・接合後、ストリングに張力を導入する。パラメータは大梁の架設・接合時(STEP1)の両端支持点の支持条件(ピンローラー、ピンーピン)とする。なお、STEP2以降はピンーローラー支持とする。ストリング張力導入時はピンーローラー支持とする。図16にA点のZ方向変位、B点のX方向変位とストリング張力の関係を示す。同図の変位が急変する点は、仮支柱の反力が解放する時点である。大梁の架設・接合時(STEP1)においてピンーピン支持の場合、ピンーローラー支持の場合に比べ早く仮支柱の反力が解放し、完成時の変位は大きくなる。これは、ピンーピン支持の場合、ピンーローラー支持に比べ仮支柱の反力が小さいためである。実施工では、支時点の状態は不確実な場合が多く、施工条件と解析モデル化の相違点を考慮し設計する必要があるといえる。

6. 施工方法を考慮した構造設計システム

6.1 システムの概要

施工方法を考慮した構造設計は、構造設計者と施工計画者との共同作業になる。建築生産上の手順は構造設計が施工計画よりも先行して検討した方が人の思考過程を考えた場合、合理的である。一方、2～5章で示したように施工を考慮した場合、設計作業が煩雑になる

施工順序	1	2	3	4	5	...	41	42
遺伝子	5	21	32	6	15	...	25	40

図 20 設計変数のコーディング

図 21 各世代の適応度

可能性がある。ここでは、構造設計者が主に本システムを活用し、効率よく施工を考慮した設計が実施できる方法を考える。

図17にシステム構成を示す。建物データ、構工法テンプレート、工法計画エンジン、工法計画結果出力、構造解析エンジン、構造解析結果出力からなる。構工法テンプレート、工法計画エンジン、工法計画結果出力は文献3)を活用し、本報告ではその概要を述べる。建物データは、柱、梁、床、外壁などの建物構成要素の種別、形状および位置のデータである。構工法テンプレートは、建物構成要素の構造・材料の定義、構成要素の分割方法、分割後の施工部品の接合方法、施工部品の取付け手順、取付けるための仮設・揚重機械、作業の歩掛、施工部品・作業のコスト等を記述したデジタルデータである。構工法テンプレートは、構造安全性が建物データに依存せず、かつ明確な場合の構工法ルールを意味し、一般的に施工計画担当者の知識を集約したものである。2～5章に示したように、構造安

図 22 最大適応度を有する施工手順

全性が建物データに依存するあるいは明確でない場合は、6.2 節で示す方法で、構工法テンプレートの施工部品の取付け手順を別途作成する。工法計画結果出力は、入力された建物データを構工法テンプレートの記述したルールによって解析した結果で、施工部品の構成（建物構成要素の分割、構造、材料）、施工部品の取付け手順（工程表）、仮設・揚重機械・労務の山積みおよびコスト等からなる。構造解析エンジンは、施工部品の構成と取付け手順を入力とし、部材の断面特性、材料特性、荷重条件および境界条件の入力、施工を考慮した固定荷重時、積載荷重時、地震荷重時、風荷重時等の構造解析を行い、断面検定を実施する。構造解析結果出力は、断面検定結果である。工法計画エンジンと構造解析エンジンをコンピュータ上で連携すること、工法計画の知識を構工法テンプレートとして規格化することおよび構造安全性が明確でない場合の施工部品の取付け手順は別途解析できることにより、構造設計者が施工過程を考慮した構造設計を容易に行えと考えられる。

6.2 構造安全性を考慮した構工法テンプレートの作成

構造安全性を考慮した構工法テンプレートの作成は、基本となる構工法テンプレートを制約条件として、施工部品の取付け手順を設計変数とした遺伝的アルゴリズム（GA）によって求めた施工部品の取付け手順を、基本となる構工法テンプレートに追記することによる。本節では、同作成を 2.3 節に示した例で示す。基本となる構工法テンプレートの施工部品の取付け手順は、図 19 とする。

設計変数のコーディングを図 20 に示す。図 18 に示すように、A、B 部各々において、1フロアの鉄骨建方および床コンクリート打設を 1ブロックとし、41 ブロックに分け、仮支柱の反力解放を加えた 42 のブロック取付けを任意に並べる。図 7 の○印の柱の柱頭の接合は、同部材のブロック取付け時に行うものとする。本例では、施工後の部材応力が施工過程を考慮しない場合の部材応力に比べ過度に増大せず、仮設材を少なくすることを設計方針とし、目的関数と制約条件を設定する。目的関数は、仮支柱の最大合計反力とし、適応度は目的関数の逆数とする。制約条件は、基本テンプレートおよび構造設計上の制約条件とする。構造設計上の制約条件は、図 7 中の□印の部材の A 端の最大緑応力度が、施工を考慮しない場合の同部の最大緑応力度の 1.5 倍以下とする。制約条件を満足しない部品取付け順序は致死遺伝子とし、適応度をゼロとする。初期世代は、制約条

件を満足するように施工ブロック番号の並びをランダムに発生させ作成する。繁殖は適応度比例戦略およびエリート保存戦略を用いる。交叉および突然変異は、金子ら⁴⁾の方法による。個体数 50、交叉率 0.6、突然変異率 0.05、エリート保存率 0.02 とする。図 21 に適応度の最大値および平均値の世代履歴を示す。150 世代程度で適応度の最大値が収束している。図 22 に 150 世代での最大適応度を有するブロック取付け手順の一部を示す。同図には、構造上ポイントとなる、仮支柱反力解放時および図 7 中の○印の柱の柱頭の接合時の部品取付け状況を示す。図 22 より、A 端の最大緑応力度の構造上の目標を満足するためには、仮支柱は B 部 3 階のトラスを建方後に解放、B 部 6 階の柱は B 部 4 階床打設後に接合、B 部 10 階の柱は B 部 10 階床打設後に接合すればよいことがわかる。

7. まとめ

構造解析シミュレーションによって、完成時の部材の応力と変形に関して、施工過程の構造と荷重を考慮する場合としない場合を比較し、施工手順、建物形状、建物剛性および施工条件のモデル化の観点から整理した。また、施工過程を考慮した構造設計手法を提案した。その結果以下のことが明らかになった。

- (1) 積層工法の場合、施工手順を考慮した柱の応力度は施工を考慮しない応力度よりも大きくなり、スパンが長いほど、その増大率は大きくなる。長期荷重のみで設計する場合は、短期荷重を考慮する設計の場合よりも、同増大率は大きくなる傾向にある。
- (2) 施工手順を考慮する設計をしない場合、短工期や仮設低減などの施工要求を含めた総合的な建築計画の合理化に制約を生じさせる。
- (3) 施工過程が同一でも、柱の傾斜角度など建物形状が異なると、施工過程を考慮する場合としない場合の完成後の応力の関係の傾向が異なる場合がある。
- (4) スパンの長い構造を支持構造に接合するときの支持構造の剛性は、完成後の大スパン部の応力バランスに影響する。
- (5) 施工過程を考慮する設計を行う場合、実施工の支持・接合条件と解析モデル間の誤差を考慮する必要がある。
- (6) 構工法をデジタルデータとして予め記述しておくことにより、構造設計者が施工過程を考慮して構造設計を行うことが容易になると考えられる。
- (7) 構工法テンプレートが建物個々の構造特性に依存する場合、基本となる構工法テンプレートを制約条件、施工部品の取付け手順を設計変数とする遺伝的アルゴリズムによって求めた施工部品の取付け手順を、基本となる構工法テンプレートに追記する手法は、施工過程を考慮する構造設計を行う上で有効である。

参考文献

- 1) 井ノ上、岩下、小林：大規模建物の施工時挙動予測と計測管理、鉄鋼技術、1999. 2, pp. 52~57
- 2) 兼光：建築物の施工における構造解析、建築技術、1999. 7, pp. 156~159
- 3) 片岡：“構工法知識と建物情報との分離による施工シミュレーション手法”，日本建築学会計画系論文集，No. 609, 2006. 11, pp. 99~106
- 4) 金子、兼光、三井、登坂、半谷：遺伝的アルゴリズムによるトラス構造物の施工経路最適化、日本建築学会構造系論文集，No. 508, 1998. 6, pp. 87~92

[2007年4月20日原稿受理 2007年7月26日採用決定]