実測調査と構造計算による初期 軽量鉄骨プレハブ住宅の構造的 性能に関する検討

MEASUREMENT SURVEY AND STRUCTURAL ANALYSIS ON LIGHT- GAUGE STEEL PREFABRICATED HOUSES IN EARLY PERIOD

松本由香 — * 1 江口 亨 — * 2
加藤淳一郎 — * 3 東原佳佑 — * 4

Yuka MATSUMOTO — * 1 Toru EGUCHI — * 2
Junichiro KATO — * 3 Keisuke HIGASHIHARA — * 4

キーワード：
軽量鉄骨, プレハブ住宅, 構造骨組, 実測調査, 構造計算

Keywords:
Light-gauge steel, Prefabricated houses, Structural frame,
Measurement survey, Structural analysis

In Japan, early models of light-gauge steel prefabricated houses were developed in 1960's. This study aims to investigate the structural properties of those two models: one is "style-A" and the other is "style-B" which is an improved version of style-A. A series of on-site survey was carried out to measure the dimensions of structural frames and the obtained information was summarized as structural drawings. An elastic structural analysis was carried out to compute stresses, deflections and story drifts in structural frames subject to the design loads, and the structural property of each model was discussed.

1. 序

わが国では、戦後の深刻な住宅不足を解消するため、軽量鉄骨、合板、プレキャストコンクリートなどを用いたプレハブ住宅の開発が行われてきた。初期プレハブ住宅の技術開発は、主要構造部材として活用されていなかった材料に対する設計法を確立し、部品生産や工事現場施工における課題を解決していく過程であり、その後のプレハブ住宅の発展に多大な影響を与えている。

軽量鉄骨造プレハブ住宅の構造技術・生産技術は、1960年代以降に急速な発展を遂げるが、開発初期の経過を調査・記録することは、技術の進化と変遷を理解する上で有意義である。「山崎家及び臼井家別荘」は日本初の本格的なプレハブ住宅「セキスイハウスA型」(1960年発売、以降A型と表記)であり、その歴史的価値が評価され、2016年に国の有形文化財(建造物)に登録された。また、松村ら¹⁾などの既往研究は、開発体制や仕様の変遷に着目し、各住宅メーカーが最新の要素技術を積極的に取り入れていたことを明らかにしている。一方、それら要素技術の総体として構造骨組に注目し、初期プレハブ住宅の性能を評価した研究は報告されていない。

本研究では、A型とその改良型である「セキスイハウスB型」(1961年発売、以降B型と表記)の実物件の現地調査を行い、構造骨組を構成する部材の寸法・接合詳細等を実測し、図面化する。更に、実物件を参考に設定した仮想建物について、荷重・外力の算定と軸組構面の弾性応力解析、許容応力度の検定などの構造計算を行う。ブレース端接合部については許容耐力の検定と最大耐力の計算を行う。構造計算から得られた耐力・剛性に基づき、初期プレハブ住宅の構造性能について考察する。

2. 構造骨組の実測調査

2.1 予備調査及び実測調査概要

住宅メーカー技術研究所において、1960年引渡し of A型実物件、1964年引渡し of B型実物件の構造骨組が保管されている。写真1及び写真2に保管状況を示す。住宅メーカー社内資料を参照し、A型及びB型の構造骨組の構成を確認した後、現地にて部材断面、接合部の板要素寸法・ボルト配置・溶接箇所等を実測し、構造図面を作成した。なお、ボルト径やピッチなどの実測が困難な箇所については、写真や施工要領書の記述から類推している。

写真1 A型構造骨組

写真2 B型構造骨組

2.2 A型の構造骨組

A型は平屋の切妻屋根形式で、梁間方向はスリーヒンジラーメン、桁行方向はブレース構造である。平面グリッドモジュールは900mmである。図1に梁間方向構面軸組図および屋根伏図を示す。図2に桁行方向構面のブレース付耐力壁を示す。

図3に柱・梁断面を示す。柱と梁には共通してリップ溝形鋼つづり合わせ材が使用されている。つづり材はM6ボルトであり、500mmピッチでつづられている。

本稿の一部は2017年日本建築学会大会(広島)にて発表済である²⁾。

¹⁾ 横浜国立大学大学院都市イノベーション研究院 教授・博士(工学)
(〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台79-5)

²⁾ 横浜国立大学大学院都市イノベーション研究院 准教授・博士(工学)

³⁾ 横浜国立大学大学院都市イノベーション学府

⁴⁾ 東洋エンジニアリング(株)

¹⁾ Prof., Institute of Urban Innovation, Yokohama National Univ., Dr. Eng.

²⁾ Assoc. Prof., Institute of Urban Innovation, Yokohama National Univ., Dr. Eng.

³⁾ Graduate School of Urban Innovation, Yokohama National Univ.

⁴⁾ Toyo Engineering Corporation

図4にスリーヒンジラーメンの柱梁接合部を示す。柱・梁を構成するリップ溝形鋼で板厚6mmのガセットプレート(以降GPと表記)を挟み込み、ボルトで固定して接合部を構成している。柱-GP間及び梁-GP間は、各々25mm幅の山形鋼を当てて溶接し、柱及び梁の曲げモーメントをGPに伝達できるように補強している。

図5に柱脚-軸組ブレース接合部を示す。軸組ブレースには丸鋼φ9が使用されており、折り曲げたGPを介して柱に接合されている。柱脚は、カッティのウェブと柱材をボルトで接合し、フランジを延長してM12アンカーボルトで基礎に固定する形式である。図6

にアンカーボルト位置(図5のA-A矢視)を示す。柱中心からボルト中心までの距離は約50mmであり、柱に対して1軸偏心となっている。但し、図5及び図6は技術研究所に移築した後の状況であり、実物件での基礎との接合方法はこれらと異なる可能性がある。

図7に屋根ブレース端接合部を示す。軸組ブレースと同様に、屋根ブレースには丸鋼φ9が使用されており、折り曲げたGPを介してつなぎ梁に接合されている。

図8にラーメン頂部接合部を示す。梁を構成する溝形鋼でGPを挟み込み、ボルトで固定している。

図1 A型 梁間方向構面軸組図及び屋根伏図

図2 A型ブレース付耐力壁

図3 柱・梁の断面

図4 A型柱梁接合部

図5 A型柱脚-軸組ブレース接合部

図6 A型柱脚(A-A矢視)

図7 A型屋根ブレース端接合部

図8 A型ラーメン頂部接合部

部材の接合方法の特徴として、ガセットプレートやカットティを溝形鋼で挟み、ボルトで固定している箇所が多いことが挙げられる。溶接は、補強用の添板の隅肉溶接などで補助的に使用されている。

2.3 B 型骨組の構成

B 型は平屋の切妻屋根形式で、小屋組にトラスを用いた両方向ブレース構造である。平面グリッドモジュールは 1m である。図 9 に梁間構面軸組図および屋根伏図を示す。軸組構面にはブレース付耐力壁が用いられているが、ブレースの軸径や接合部詳細が A 型とは異なる。また、軸組図の右側のように、軸組ブレースを 2 モジュールに亘って架け渡し、水平方向に対する材軸の角度が A 型に比べて低くなっている。柱には A 型と同一のつづり合わせ材（図 3 参照）が用いられており、トラスには柱と同一のリップ溝形鋼が用いられている。また、軒レベルで水平ブレースが張られている。

図 10 に柱・トラス接合部を、図 11 に柱脚・軸組ブレース接合部を示す。柱頭・柱脚は A 型の柱脚と類似しており、カットティのウェブと柱をボルトで接合し、フランジをトラスまたは基礎と接合する形式となっている。

図 10 中の柱頭において、カットティフランジに板厚 2.8mm のプレートに溶接し、このプレートにトラス上弦材および下弦材を溶接し、柱とトラスを接合している。いずれの構面においても、トラスはスパン両端（図 9 中 X1、X2 構面の柱頭）でのみ支持されている。図 9 中の A 部を拡大して図 12 に示す。耐力壁横架材とトラス下弦材は接続されておらず、ブレースの軸力はトラスには伝達しない。

図 11 に示すように、中柱柱脚のアンカーボルトは柱図心軸に対して対称に 2 本配置されている。軸組ブレースには $\phi 13$ のターンバックルブレースが用いられている。柱フランジ・横架材フランジに溶接された GP にブレースがフレア溶接されており、ブレース引張力は GP や溝形鋼フランジなどの板要素の面内力によって伝達される。

図 13 に建物隅角部の柱脚を示す。梁間方向構面・桁行方向構面の柱は、柱せいと同程度の幅を持つ山形鋼とボルトでつづることによって一体化されている。

図 14 にトラス頂部接合部を示す。東・トラス上弦材・斜材の側面に添板を溶接し、さらに別の添板を当ててボルトで固定している。

図 9 B 型 梁間方向構面軸組図および屋根伏図

図 10 B 型柱-トラス接合部

図 11 B 型柱脚-軸組ブレース接合部

図 12 B 型耐力壁横架材とトラス下弦材

図 13 B 型隅角部柱脚

図 14 B 型トラス頂部接合部

図 15 B 型水平ブレース端接合部

図 15 に水平ブレース端接合部を示す。軸組ブレースと同様に、水平ブレースには $\phi 13$ のターンバックルブレースが用いられている。トラス下弦材に溶接された GP に M18 ボルトを差し、水平ブレース先端をフック状に折り曲げてボルトを引っ掛ける形で接合している。

部材の接合方法は、柱頭・柱脚のように A 型に類似した箇所もあるが、ブレース端接合部やトラス材接合部のように、溶接を用いて、応力を板要素の面内力で伝達する箇所が多くなっている。

3. 仮想建物の構造計算

3.1 対象とする建物

図 16 に示すように、X 方向 7 モジュール、Y 方向 6 モジュールの長方形プランを持つ平屋住宅を各々 A 型・B 型で構成し、軸組構面の構造計算を行う。A 型の Y1~Y7 構面はスリーヒンジラーメンであり、X1 及び X2 構面には図 2 に示すブレース付耐力壁が配置される。B 型では小屋組トラスが 2 モジュール毎(Y1, Y2, Y3, Y4 構面)に配置され、軸組ブレースが X1, X2, Y1, Y4 構面に配置される。

3.2 設計用外力

長期荷重として固定荷重のみを考慮する。固定荷重は実物件における仕上げ材の実測結果や住宅メーカー組立仕様書、建築物荷重指針・同解説³⁾を参考に、表 1 のように設定する。また構造骨組の自重も考慮する。

短期荷重として長期荷重+地震力(地震時)と長期荷重+風圧力(暴風時)を想定し、建設地を横浜市とする。地震力は平成 12 年告示第 1455 号により、標準層せん断力係数 $C_0=0.2$ として計算する。風圧力は平成 12 年告示第 1454 号により、設計基準風速 34m/s、地表面粗度区分Ⅲとして計算する。

3.3 解析モデル

A 型、B 型のいずれも、各構面を平面骨組としてモデル化し、各々が均等に荷重を分担するものとする。なお、屋根ブレース・水平ブ

レースは構造計算の対象としない。

A 型の力学モデルを図 17 に示す。柱脚はピン支点とする。A 型の軸組ブレースは折り曲げた GP を用いて接合しているため、図 17(b)のようにブレース端部に弾性パネを設ける。GP を片持ち梁としてモデル化し、曲げ変形を考慮して弾性剛性を計算する。

B 型の力学モデルを図 18 に示す。B 型は、先ず小屋組に荷重を作用させ、得られた支点反力が各ブレース架構に均等に伝達されるものと仮定して応力計算を行う。なお、小屋組の地震時応力は十分小さいので、地震時の応力計算はブレース架構のみを対象とする。

3.4 許容応力度および検討項目

柱・梁の鋼種を SSC400、ブレース・ガセットプレート・スプライスプレートの鋼種を SS400 と仮定し、F 値はいずれも 235N/mm^2 とする。溶接も同様に F 値= 235N/mm^2 とする。ボルトの強度区分は 4.8 とする。

日本建築学会「軽鋼構造設計施工指針・同解説」⁴⁾に従って許容応力度 f を計算する。柱・梁はつづり合わせ間隔が広いいため、いずれも 2 本のリップ溝形鋼として許容応力度を計算する。また、A 型の梁の許容曲げ応力度を計算する際、1 対の屋根ブレースが設けられている区間を横補剛区間と仮定する。

図 16 仮想建物平面図

表 1 固定荷重の設定

	材料	密度 (kg/m ³)	厚さ(推定) (mm)	単位重量 (N/m ²)
屋根	アルミニウム板	2710	3	79.7
	ペーパーハニカムコア	30	14	4.1
	硬質塩ビ板	1400	3	41.1
天井	スチロールスポンジ	30	10	2.9
	硬質塩ビ板	1400	3	41.2
外壁	アルミニウム板	2710	3	79.7
	ペーパーハニカムコア	30	14	4.1
	硬質塩ビ板	1400	3	41.2
内壁	スチロールスポンジ	30	10	2.9
	エスロンボード	1400	10	137.2

軸組ブレースは引張力のみを負担するものとし、GP、ボルト、溶接継目を考慮して接合部の許容引張力及び最大引張力を計算する。但し、実物件における基礎との接合詳細が不明なため、柱脚の耐力は考慮しない。A型のGPについては、日本建築学会「鋼構造設計標準—許容応力度設計法—」⁵⁾による面外曲げを受ける板の許容曲げ応力度を用いる。B型の軸組ブレースとGPを接合するフレア溶接は、実測値に基づいてサイズ3mmの隅肉溶接として扱う。

3.2節の設計用外力に対して弾性応力解析を行い、骨組に作用する応力度 σ 及び応力度検定値 σ/f を求める。また、長期荷重時のY構面のたわみ、短期荷重時の層間変形角を算出する。軸組ブレースは接合部を考慮して許容耐力の検定を行う。

3.5 A型の検討結果

A型のY構面について、荷重組合せに応じた曲げモーメント分布を図19に示す。図中の括弧内は σ/f 最大値を示す。長期荷重時、X方向地震時およびY方向暴風時の σ/f は1を下回っており、X方向暴風時の σ/f は1.2程度である。応力計算では、ある程度の回転拘束を保有している接合部をピンとして扱う、鋼材の降伏強さをF値と見なすなど、安全側の仮定を用いている。実建物では、応力計算で無視した余力によって耐力の不足が補われている可能性がある。

表2に骨組の変形とブレース接合部許容耐力の計算結果を示す。表中の記号の定義は下記の通りである。

δ : Y構面中央のたわみ δ/L : Y構面スパンに対する δ の比

δ_h : 柱頭水平方向変位 γ : 層間変形角

N : 軸組ブレースに作用する引張力

N_a : 接合部によって決定する軸組ブレースの許容引張力

一般的に骨組に大きな変形が生じており、長期荷重による δ/L は1/100を超え、地震力によるY構面の γ は1/61に達している。特に、長期荷重によって大きなたわみが生じていることから、二次部材の取り付けを調整するなど、施工の段階で骨組のたわみに対応するための工夫があったのではないかと推察される。

軸組ブレースの許容引張力 N_a はGPの曲げ耐力により決定し、短期荷重時の検定値 N/N_a は3~7に達している。接合部の最大耐力もGPの曲げ耐力により決定し、これをブレース軸力 N_u に換算すると2.0kNである。ブレース降伏軸力 N_y は15.0kNであり、 N_u を接合部係数に換算すると $N_u/N_y=0.13$ である。

以上のように、設計で想定される外力が作用すると、ブレースには接合部の許容耐力を上回る軸力が生じ、GPが面外曲げによって損傷する可能性が高い。

3.6 B型の検討結果

Y構面の小屋組トラスについて、荷重組合せに応じた軸力図を図20に示す。図中の括弧内は σ/f 最大値を示す。トラス材の σ/f はいずれも1を下回っている。

表3に骨組の変形とブレース接合部許容耐力の計算結果を示す。ここでの δ は、図18(a)のモデルの中央たわみに柱の軸方向変形を加算した値である。長期荷重による δ/L は1/300以下、短期荷重による γ は1/200以下であり、A型に比べて変形が大幅に低下している。これは、小屋組にトラスを用い、荷重を軸方向力として伝達する構造形式を採用したこと、ブレース軸力を板要素の面内力で伝達できる接合方法を採用したことなどが奏功したと考えられる。

(a) Y構面 (b) 軸組ブレース
図 17 A型力学モデル

(a) 小屋組 (b) 軸組ブレース
図 18 B型力学モデル

(a) 長期荷重時 (b) X方向地震時 (c) X方向暴風時 (d) Y方向暴風時
図 19 A型Y構面曲げモーメント図

表 2 A 型 骨組の変形及びブレース接合部許容耐力

荷重組合せ	δ (mm)	δ/L	Y 構面		X 構面		N (kN)	N_a (kN)	N/N_a
			δ_h (mm)	γ	δ_h (mm)	γ			
長期荷重	71.5	1/88							
X 方向地震時			39.4	1/61	—	—	—	0.90	—
Y 方向地震時			—	—	7.88	1/306	2.83	0.90	3.14
X 方向暴風時			3.82	1/500	—	—	—	0.90	—
Y 方向暴風時			19.4	1/124	17.1	1/141	6.13	0.90	6.81

表 3 B 型 骨組の変形及びブレース接合部許容耐力

荷重組合せ	δ (mm)	δ/L	Y 構面		X 構面		N (kN)	N_a (kN)	N/N_a
			δ_h (mm)	γ	δ_h (mm)	γ			
長期荷重	1.43	1/4895							
X 方向地震時			0.52	1/4762	—	—	2.11	16.5	0.13
Y 方向地震時			—	—	0.52	1/4762			
X 方向暴風時			0.97	1/2564	—	—	3.90	16.5	0.24
Y 方向暴風時			—	—	1.16	1/2128	4.66	16.5	0.28

図 20 B 型小屋組トラス軸力図 (単位: kN)

ブレース接合部の許容耐力および最大耐力は、いずれもブレースと GP のフレア溶接によって決定する。短期荷重時の検定値 N/N_a は最大で 0.28、最大引張力の接合部係数換算値 N_u/N_y は 0.90 であり、A 型に比べて軸組ブレース接合部の耐力が向上している。

B 型は、A 型発売の翌年に発売を開始したモデルであるが、応力度検定値や剛性が A 型に比べて大幅に向上しており、短期間で有効な改善策が講じられたことが分かる。

4. 結論

軽量鉄骨による初期プレハブ住宅であるセキスイハウス A 型と B 型について、実物件の現地調査を行い、構造骨組を構成する部材の寸法・接合詳細等を実測し、図面化した。さらに、A 型と B 型で構成した平屋住宅の軸組構面について、弾性応力解析と許容応力度設計の検定、ブレース端接合部の耐力算定などの構造計算を行った。

得られた知見は以下の通りである。

- 1) A 型は梁間方向がスリーヒンジラーメン、桁行方向がブレース構造である。柱・梁にリップ溝形鋼のつづり合わせ材を用いており、部材の接合には、ガセットプレートやカットティを 2 つの溝形鋼で挟み、ボルトで固定する方法が採用されている箇所が多い。
- 2) B 型は小屋組にトラスを用いた両方向ブレース構造である。柱頭・柱脚では、A 型と類似した接合方法が採用されているが、軸組ブレース端部は、ブレースガセットプレートと柱梁フランジを溶接し、ブレースの引張力を板要素の面内力として伝達する接合方法が採用されている。
- 3) A 型のスリーヒンジラーメンでは、長期荷重時は許容応力度設計における応力度検定値が 1 を下回ったが、短期荷重時は応力度検定値が 1.2 程度となる場合があった。軸組ブレースの作用軸力はブレース端接合部の許容耐力を大きく上回った。
- 4) B 型は、小屋組をトラスで構成し、軸組ブレースの引張力を板要素の面内力で伝達できる接合方法を採用しており、応力度検定値や剛性が A 型に比べて大幅に改善されていた。

謝辞：本研究の実施にあたり、積水ハウス（株）の皆様、特に濱田智毅氏に多大なるご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 松村秀一、権藤智之、佐藤考一、森田芳朗、江口亨：プレハブ住宅メーカーの住宅事業開始初期の技術開発に関する研究、日本建築学会計画系論文集、第 78 巻、第 693 号、pp2307～2313、2013.11
- 2) 東原佳佑、加藤淳一郎、松本由香、江口亨：初期軽量鉄骨プレハブ住宅の構造技術に関する研究（その 1、その 2）、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 III、pp.1145～1146、2017.7
- 3) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説、2004 年
- 4) 日本建築学会：軽鋼構造設計施工指針・同解説、2002 年
- 5) 日本建築学会：鋼構造設計規準 — 許容応力度設計法 —、2005 年

[2018 年 2 月 7 日原稿受理 2018 年 4 月 26 日採用決定]