

平成 27 年度 修士論文

耐震架構形式の異なる鋼構造事務所建築建物の構造的性状比較

首都大学東京大学院
都市環境科学研究科建築学域
14886419 石川 葉
指導教員 高木次郎

目次

| | |
|----------------------|-----|
| 第 1 章 序論 | |
| 1.1 研究背景 | 5 |
| 1.2 研究目的 | 6 |
| 1.3 類似既往研究 | 7 |
| 1.4 本論文の構成 | 8 |
| 第 2 章 検討建物 | |
| 2.1 架構と部材区分 | 11 |
| 2.2 比較検討形式 | 12 |
| 2.3 優良設計解の導出 | 14 |
| 2.4 優良設計解の傾向分析 | 21 |
| 2.5 建物階数の影響 | 28 |
| 第 3 章 静的増分解析 | |
| 3.1 解析条件 | 33 |
| 3.2 必要保有水平耐力 | 35 |
| 3.3 解析結果 | 36 |
| 3.4 保有耐力を満足する優良設計解 | 39 |
| 第 4 章 地震応答解析 | |
| 4.1 解析条件 | 47 |
| 4.2 固有値解析 | 52 |
| 4.3 解析結果 | 53 |
| 4.4 比較分析 | 65 |
| 第 5 章 結論 | 69 |
| 参考文献 | 71 |
| 謝辞 | 73 |
| 付録 1 ダイヤフラム・スチフナ量の算出 | A-1 |
| 付録 2 溶接量 | A-5 |

第 1 章 序論

第1章 序論

1.1 研究背景

日本の鋼構造建築物では、多くの柱梁接合部を剛接合とするのが一般的となっており、地震を代表とする水平方向荷重下において、それらの接合部で曲げモーメントを伝達する設計となっている。その一方で欧米を中心とする諸外国では、地震地域であっても、水平力を負担する架構（以下、「耐震架構」と）と、鉛直荷重を負担する架構（以下、「長期架構」）を明確に分離するのが一般的であり、長期架構における柱梁接合部は、梁フランジを柱に接合しないピン接合となっている。このような日本と欧米の構造形式の相違の理由のひとつとして、設計の考え方の違いが挙げられる。日本においては、多くの架構に水平力を分担させることが合理的と考えられる傾向があり、その結果、柱は水平2方向に対して十分な曲げ耐力を有する必要性から、角形鋼管が多用される（図 1.1）。そして柱梁の仕口部分にダイヤフラムを挿入するために、柱は切断され、多くの完全溶け込み溶接が必要となる。したがって、このような構造形式は、角形鋼管に代表されるような鋼材製造能力や、仕口の溶接加工能力といった、日本の高度な技術に支えられているとも言える。それに対し、欧米のピン接合形式では、それぞれの耐震架構が負担する荷重を1方向に限定しているため、柱にはH形鋼が用いられることが多く、柱梁の仕口部分には柱を切断することなくスチフナが挿入、溶接される（図 1.2）。



図 1.1 角形鋼管柱接合部



図 1.2 H形鋼柱接合部

多くの柱梁接合部を剛接合とする日本の構造形式では、架構の不静定次数が増大し、不確定性が高い地震荷重下での冗長性を確保する上で有効と考えられているが、欧米のピン接合形式に比べて鋼材量が多くなる可能性がある。それは柱梁接合部の納まりの関係から、取り合う梁の成に制約が生じ、耐力に余裕のある梁が含まれることが多い上に、梁崩壊型のメカニズムとする上での柱梁耐力比を満足させるために柱断面が決定されるためである。事務用途の建物では、10mを越えるロングスパンの梁も多用されるが、それらを含めて柱梁耐力比を満足させることが、柱断面を引き上げる原因である。

1.2 研究目的

本研究は標準的な事務所用途の鋼構造建物を対象とし、全ての柱梁接合部を剛接合とした設計と、外周部の柱梁接合部のみを剛接合とした設計とを比較する。設計には最適化の手法を応用して、耐震規定を含む許容応力度設計を満足することを制約条件とし、グループ化された部材断面寸法を変数として総鋼材量を最小化した最適断面寸法を、規格断面寸法に収斂させた現実的な優良設計解を得る。得られた2つの形式の設計解に対し、鋼材量や解の傾向の分析をする。静的増分解析により、耐震性能及び必要保有水平耐力を満足するよう設計用地震荷重を割り増しした場合の設計解の鋼材量変化を評価する。また地震応答解析による耐震性能の評価や、崩壊挙動の比較、分析を行う。

本研究で最適化を用いる利点は、大きく2つある。1つは、設計解提供者の経験や技量の偏在の影響を極力排除して、共通の設計条件下での異なる耐震架構配置の設計解の比較において客観性を確保できることである。もう1つは、複数の設計制約条件を満足する設計解を得ることで、設計を決定づける支配的な制約条件の見極めが可能となることである。耐震架構配置に応じて支配的な制約条件が異なることが考えられ、架構形式の特性分析上有用である。

1.3 類似既往研究

本研究に類似した既往研究として、鋼構造建物の耐震架構配置に着目して耐震性能の比較分析を行ったもの^{1, 2}などや、経済性を比較したもの^{3, 4}は存在するが、最適化手法を応用したものはない。

長谷川ら¹⁾は、日米の架構形式それぞれを日本の耐震基準に合わせて設計した同規模の鋼構造建物について損傷度を比較し、累積塑性変形倍率による評価では損傷に大差がないことを示した。ここでの米国式建物はH形鋼柱で外周部のみの耐震架構配置であり、日本式建物はすべての柱が角形鋼管で梁と剛接合されたものである。木村²⁾は文献1)と同じ架構を用いて損傷集中を評価し、米国式架構が特定層への層間変形の集中を抑制する効果はあるが、特定部位への損傷集中を緩和する効果はないことを示した。六郷ら³⁾は日米の架構形式の相違が耐震性状に及ぼす影響の比較として、同一地域を想定して設計した両形式の架構の鋼材量が、米国式が30%程度多くなることを示した。また保有水平耐力はほぼ同等であるが、米国式の方が降伏耐力が低く、特定部材に損傷が集中する傾向にあることを示した。多賀ら⁴⁾は角形鋼管柱とH形鋼柱の多方向入力に対する合理性を比較し、H形鋼柱は鋼材量が多くなるが、規格材の価格を踏まえると経済的に優れる可能性があることを示した。これらの研究では、異なる耐震架構配置の設計条件が、設計基準への準拠や、同等の水平剛性等の評価のみとなっており、比較対象の妥当性について明確に議論されているとは言い難い。一方、コスト最小化に関する研究では、澤田ら⁵⁾が立体骨組を対象として、最小重量解や加工手間を考慮する最小コスト解を求め耐震性能の比較を行っているが、変数の多い立体骨組を扱ったものは少数である。鋼材量と加工手間その他コストを最適化の中で詳細に評価しようとする試み⁶⁾や、耐震性能とコストの両面からの最適化の試み⁷⁾は存在するものの、耐震架構配置に着目した検討は行われていない。近年の熟練工の不足から、溶接量を筆頭とする加工手間の縮減が望まれており、それを含めた鋼構造コストの評価が必要と考える。

1.4 本論文の構成

章構成と各章の概要について以下にまとめる。

第1章 序論

研究の背景と目的及び、類似既往研究との違いを述べる。論文の構成について説明する。

第2章 検討建物と優良設計解

本研究で検討対象とする事務所建物と、2つの架構形式について述べる。最適化の手法を応用して得られた設計解について、解の傾向を分析し、鋼材量の比較を行う。

第3章 静的増分解析

二章で得た優良設計解について弾塑性静的増分解析を行い、架構の耐震性能を評価する。必要保有水平耐力を満足するように設計用地震荷重を割り増して再度得られた設計解の鋼材量変化についても述べる。

第4章 地震応答解析

三章で得た必要保有水平耐力を満足する設計解について地震応答解析を行い、架構の崩壊挙動について評価する。静的な解析の場合との結果の違いについても述べる。

第5章 結論

本研究の成果の統括を行う。

第 2 章 検討対象建物

第 2 章 検討建物

2.1 架構と部材区分

標準的な事務所用途の建物として、図 2.1 に示す 32.0m×19.2m の架構平面を想定する⁸⁾。スパンのモジュールは X 方向、Y 方向共に 6.4m であり、平面架構は全ての階で共通とする。X 方向には Y1・Y3・Y4 の 3 架構が存在し、Y 方向には X1～X6 の 6 架構が存在する。また Y 方向の外側架構 (X1、X6) には、中央の Y2 通りと Y3 通りの間に K 型ブレースが存在し、内側架構 (X2～X5) には 12.8m のロングスパン梁が存在する。この構成により、X 方向が純ラーメン架構、Y 方向がブレース付架構という異なる建物構造を検討対象として、架構形態が結果に与える影響を評価することを意図している。なお、外側架構 (X1、X6) と内側架構 (X2～X5) はそれぞれ同一とする。

検討対象は建物階数が 4、7、10 の 3 通りの場合とする。7 階建の場合の軸組図を図 2.2 に示す。図中の▲印は柱の継手位置を示し、2、5、8 階の中央にあると仮定する。これらの継手位置で区切られる階構成を節と呼ぶ。柱、梁、ブレースの各部材を節ごとにグループ化し、同一グループ内の各部材断面を統一する。各節に所属する部材区分を表 2.1 に示す。

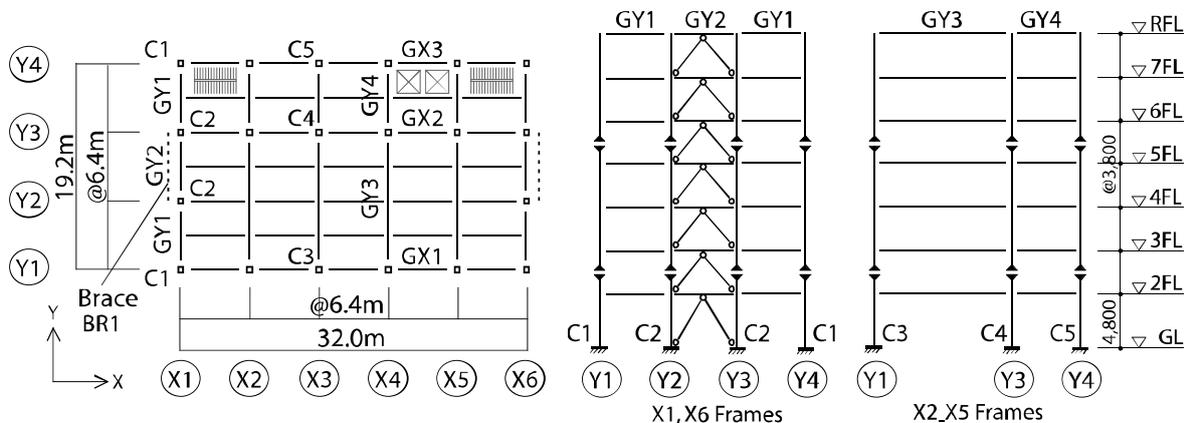


図 2.1 平面架構と部材符号

図 2.2 軸組図 (7 階建の場合)

表 2.1 各節の所属部材区分

| 節 | 柱 (角形鋼管または H 形鋼) | 梁 (H 形鋼) | ブレース (鋼管) |
|---|---------------------|--------------|--------------|
| 4 | 8 階中央 - 10 階上端 | 9 - 11 (R) 階 | 8 - 10 階 |
| 3 | 5 階中央 - 8 階中央 | 6 - 8 階 | 5 - 7 階 |
| 2 | 2 階中央 - 5 階中央 | 3 - 5 階 | 2 - 4 階 |
| 1 | 1 階下端 - 2 階中央 | 2 階 | 1 階 |

2.2 比較検討形式

柱には角形鋼管またはH形鋼を用い、梁とブレースにはH形鋼と鋼管を用いる。角形鋼管は正方形断面をとし、4辺の板厚は統一する。鋼材は全て490級とし、設計基準強度（F値）は 325N/mm^2 である。後述の解析では、柱脚部の回転を固定し、ブレース端部をピン接合とする。

建物の柱梁の接合方法は、梁ウェブをボルトまたは溶接接合し、フランジを柱に完全溶け込み溶接する剛接合（図2.3(a)）、あるいはウェブのボルト接合のみのピン接合（図2.3(b)）のいずれかとする。解析上では、剛接合は曲げモーメントとせん断力が伝達するが、ピン接合ではせん断力のみが伝達されるものとする。

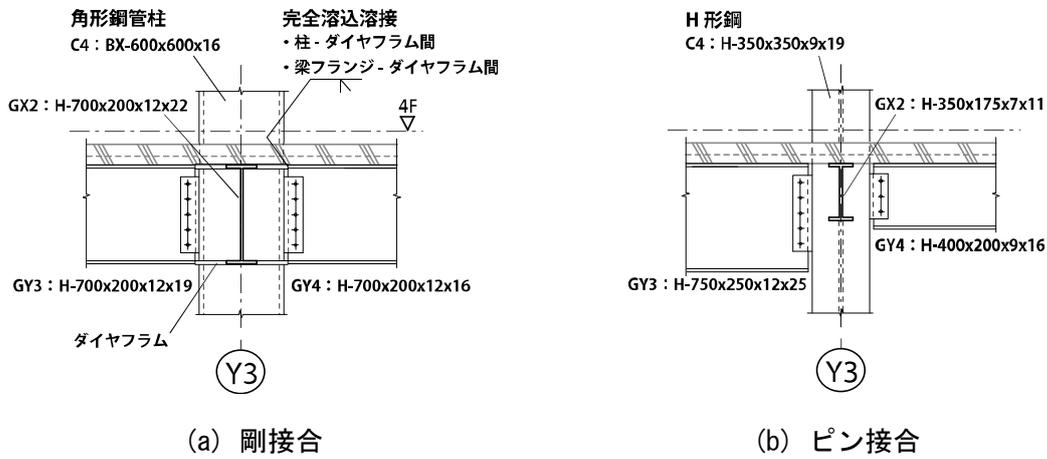


図 2.3 接合部詳細図

図 2.4 に検討対象建物の耐震架構配置を示す。梁端部に▲印がある箇所が剛接合、無い箇所がピン接合である。剛接合される柱梁とブレースが耐震架構を構成することとなる。柱梁接合方式の組み合わせに応じて 2 つの耐震架構配置を比較対象とし、図 2.4(a)を全体分散型耐震架構配置（以下、「全体型」）、図 2.4(b)を外周集約型耐震架構配置（以下、「集約型」と称す。全体型ではほぼ全ての柱梁接合部を剛接合とするのに対し、集約型では外周架構（X1、X6 通り架構及び Y1、Y4 通り架構の X2～X5 間）の、構面内方向接合部のみが剛接合である。

集約型の Y 方向は、X2～X5 架構のロングスパン梁を含む内側架構が全てピン接合であり、X1、X6 通りのブレースを含む外側架構に地震力を負担させることとする。一方 X 方向は、地震抵抗システムがラーメン構造であり、出来るだけ剛接合を少なくするため、Y1、Y4 架構の X2～X5 間のみとする。Y1、Y4 架構のもっとも外側の梁は両端ピン接合としたため、Y3 架構と梁と同じ GX2 に分類する。これにより集約型の柱はいずれも 2 軸曲げが生じないことから、H 形鋼を用いる。両端ピン接合の GX2、GY3、GY4 梁は、実質的には小梁であるが、両形式の比較説明のため、全体型と符号を揃えておく。

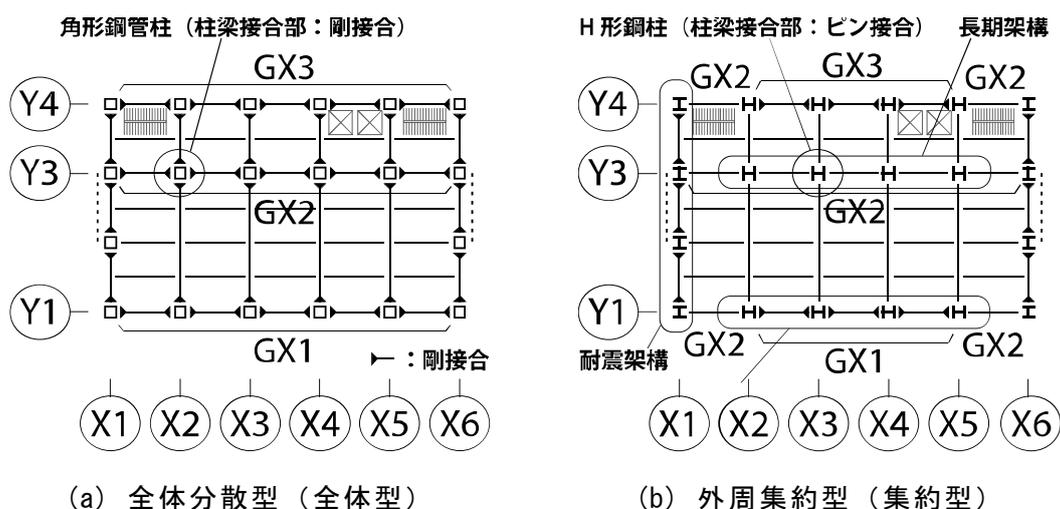


図 2.4 検討対象の耐震架構配置

2.3 優良設計解の導出

2.3.1 共通条件

検討建物に対し、日本の設計基準⁹⁾に準拠して設計用長期荷重と地震荷重下の許容応力度設計を行う。検討建物の床構造はデッキスラブとし、架構平面(図2.1)の外周通り芯から外側に400mmまで床が延長することと仮定する。従って各階床面積は656m²である。固定荷重の設定は既往の設計例⁸⁾を参考にし、床の架構用積載荷重と地震用積載荷重の和はそれぞれ7.8kN/m²及び6.8kN/m²、外壁の平均重量は2kN/m²とする。階全体の重量を床面積で除した平均単位面積重量は、架構用および地震用積載荷重を含めたそれぞれの場合で9.0kN/m²及び8.0kN/m²である。解析モデルへの長期荷重入力は、Y方向架構の支配幅(内側6.4m、外側3.2m)に対して床重量を等分布荷重で載荷した上で、外周部の壁重量を等分布荷重あるいは節点荷重で与える。最上階重量は、基準階重量よりも大きくなるのが一般的であるが、本研究ではモデルを単純化するため、基準階重量と同じとする。地震荷重分布はA_i分布とし、地域係数を1.0、地盤を2種として、標準せん断力係数C₀=0.2に相当する地震力を許容応力度設計用地震荷重とする(表2.2)。

表 2.2 A_i分布

| 階 | w _i /A[kN/m ²] | w _i [kN] | Σ w _i [kN] | α _i | A _i | C _i | Q _i [kN] | P _i [kN] |
|---|---------------------------------------|---------------------|-----------------------|----------------|----------------|----------------|---------------------|---------------------|
| R | 8.0 | 5248 | | | | | | 2298 |
| 7 | 8.0 | 5248 | 5248 | 0.143 | 2.190 | 0.438 | 2298 | 1383 |
| 6 | 8.0 | 5248 | 10496 | 0.286 | 1.753 | 0.351 | 3681 | 1113 |
| 5 | 8.0 | 5248 | 15744 | 0.429 | 1.522 | 0.304 | 4794 | 904 |
| 4 | 8.0 | 5248 | 20992 | 0.571 | 1.357 | 0.271 | 5698 | 720 |
| 3 | 8.0 | 5248 | 26240 | 0.714 | 1.223 | 0.245 | 6418 | 547 |
| 2 | 8.0 | 5248 | 31488 | 0.857 | 1.106 | 0.221 | 6965 | 382 |
| 1 | | | 36736 | 1.000 | 1.000 | 0.200 | 7347 | |

最適化手法を用いて、許容応力度設計制約下で目的関数である鋼材量を最小化する。連続設計変数を部材の断面寸法とし、得られた最適設計解における断面寸法を一般的に流通する規格断面¹⁰⁾あるいは規格板厚の後半による組み立て断面（以下では、これらを総じて「規格断面」と呼ぶ）の寸法に収斂させ、最適解近傍の設計解を得る。的確な規格断面寸法の選定のため、2段階の最適化を行う。1回目では、部材の大きさと板厚を変数とし、大きさを中心とする寸法を決定し、2回目で板厚などの残りの断面寸法を決定する。従って、2回目の最適化では変数が少なくなる。また、梁のフランジ幅については規格断面で比較的选择肢が少ないことから、1回目最適化時に200mmで設定し、得られた梁成やフランジ板厚などの断面寸法結果から、2回目最適化での設定値を適宜修正することにする。また、柱や梁のウェブ板厚については、490級鋼材のCランク幅厚比の上限値で決定される値とする。これは、予備解析で、H形鋼断面では、成が大きく、ウェブ板厚が概ね幅厚比制限値で決定される傾向が確認されたためである。ただし、最終的な設計解では、規格断面に収斂させていることから、必ずしも全てのH形鋼断面の部材ランクがCとなる訳ではない。表2.3に1回目と2回目の最適化での断面寸法中の変数と定数を示す。

表 2.3 最適化変数の設定

| 断面寸法 | 1回目 | 2回目 | 下限 | 上限 |
|------------------------|-------|-----|-----|----|
| D_c : 角形鋼管柱の柱幅 | ○ | ※ | 200 | - |
| t_c : 角形鋼管柱の板厚 | ○ | ○ | 4 | 40 |
| H_{wc} : H形鋼柱の成 | ○ | ※ | 200 | - |
| W_{fc} : H形鋼柱のフランジ幅 | ○ | ※ | 200 | - |
| t_{wc} : H形鋼柱のウェブ板厚 | ○ | ※ | 8 | 40 |
| t_{fc} : H形鋼柱のフランジ板厚 | ○ | ○ | 12 | 40 |
| H_w : H形鋼梁の成 | ○ | ※ | 300 | - |
| W_f : H形鋼梁のフランジ幅 | 200mm | ※ | - | - |
| t_w : H形鋼梁のウェブ板厚 | Hw/61 | ※ | - | - |
| t_f : H形鋼梁のフランジ板厚 | ○ | ○ | 12 | - |
| D_p : 鋼管ブレースの直径 | ○ | ※ | 150 | - |
| t_p : 鋼管ブレースの板厚 | ○ | ○ | 4 | 40 |

○ : 設計変数 (○以外は全て非変数)

※ : 1回目結果を参考に、2回目では規格寸法に固定

このような手順により求められる部材断面寸法の集合を優良設計解と呼ぶことにする。優良設計解は、与えられた設計条件下での厳密な意味での最適解ではない。ただし、個人の経験に基づく設計を解析と修正の反復により収斂させたものではなく、一定の論拠に基づく合理的な設計解である。図 2.3 のような柱梁接合方式配置の構造架構に対する優良設計解同士を比較することで、それらの特徴を分析することが本研究の目的である。従って、厳密な意味での最適解の算出を重視するものではない。

骨組解析および最適化には、汎用ソフトウェアの ABAQUS¹¹⁾ および最適化ライブラリ SNOPT¹²⁾ を用いた。なお、ABAQUS を用いた理由は将来的に塑性崩壊や冗長性を考慮した設計に拡張することを意図したためである。骨組解析は弾性立体解析であり、モデルの概要は以下の通りである。

- (1) 各部材は材軸方向に 3 ガウス積分点を有する梁要素とする。
- (2) 柱は階高の半分の位置で分割し各階 2 要素とし、梁は 3.2m ごとに分割する。
- (3) 梁とスラブの合成効果は無視する。
- (4) H 形断面のフィレット部分は無視する。
- (5) 部材耐力の確認は、軸力と曲げモーメントの組み合わせに対して、各積分点位置および材端で行う。

2.3.2 全体型の設計制約条件

全体型の平面架構は図 2.4(a)のとおりである。最適化の制約条件を以下に整理する。なお、設計変数の記号の定義は表 2.3 の通りである。長期および短期荷重下での全ての部材の応力度 σ が「鋼構造設計規準」¹³⁾ が規定する許容応力度 σ_a 以下であるとした。柱については、圧縮と曲げの組み合わせ応力度に対して検討する。柱とブレースの許容圧縮応力度に対しては、座屈長さを材長と仮定して算出する。また、梁には適切な横補剛材が設けられるものとして、横座屈を考慮しない許容曲げ応力度 (=許容引張応力度) を用いる。板厚については 490 級鋼材各断面の C ランク以上の幅厚比条件⁹⁾ を満足させる。規格断面の実状を参考に¹⁰⁾、鋼管の径 D_p と板厚 t_p に関して $D_p/t_p \leq 60$ とする（「鋼構造設計規準」の規定は $D_p/t_p \leq 72$ である）。また、柱梁耐力比の制限を各階の柱の全塑性曲げモーメント M_{pc} の和 ΣM_{pc} が梁の全塑性曲げモーメント M_{pb} の和 ΣM_{pb} の 1.5 倍を上回ることにする⁹⁾。そして、角形鋼管柱のダイヤフラム高さを揃えるため、同一階の梁成を同じとする。ダイヤフラム数を増やし、複数の梁成を設定する設計も考えられるが、加工手間を考慮して統一する。さらに、梁のフランジ板厚のウェブ板厚に対する比 t_f/t_w を 1.3 以上とする。これは、最適化では、H 形鋼断面の成が大きくフランジ板厚が小さくなる傾向にあり、標準的な断面からの乖離抑制を意図したものである。板厚の最大値を 40mm とする。また、梁の長期たわみと地震荷重下の層間変形角の制限を設ける。制約条件を以下にまとめる。

- (1) $\sigma \leq \sigma_a$ 応力度の制約
- (2) $D_c/t_c \leq 40.8$ C ランク以上とする角形鋼管柱の幅厚比制約
- (3) $D_p/t_p \leq 60$ 鋼管の幅厚比制約
- (4) $\Sigma M_{pc} \geq \Sigma 1.5M_{pb}$ 各階の柱梁接合部耐力比制約
- (5) 同一階内の梁成統一
- (6) $t_f \leq 40$ かつ $t_f/t_w \geq 1.3$
- (7) 長期荷重時の梁のたわみ制約 (スパンの 1/300 以下)
- (8) 設計用地震荷重下の架構ごとの層間変形角制約 (1/200 以下)

2.3.3 集約型の設計制約条件

集約型の平面架構は図 2.4(b)のとおりである。最適化の制約条件は、前節で示した全体型の場合にほぼ準じる。以下に相違点を整理する。

- (1) 梁成について、全体型では同一階内で統一したが、集約型では X 方向と Y 方向の耐震架構間で独立とし、同一階同一方向架構内で統一する。これは、1 つの柱に対して、直交 2 方向の梁が共に剛接合されることがない集約型の柱ではダイヤフラム位置による梁成の制約がなくなるためである。
- (2) X 方向について、地震時の平面的なねじれ変形は比較的小さいと考え、Y1 通りと Y4 通りの耐震架構を同じとする。すなわち、C3 柱と C5 柱、GX1 梁と GX3 梁とをそれぞれ同一断面とする。
- (3) 柱梁接合部耐力比の制約条件に関しては、X と Y のそれぞれの検討方向に対して、耐震架構内で柱の検討方向の曲げ耐力の総和が剛接合される梁の曲げ耐力の総和の 1.5 倍以上とする。H 形鋼柱に対しては、冷間成形角形鋼管同様の柱梁耐力比規定は存在しない⁹⁾ が、スラブによる梁の耐力増大の影響などにも配慮して、同様の制約条件を設ける。
- (4) 全体型の角形鋼管柱は各節で柱幅を同じとしたが、集約型の H 形鋼柱では、成のみを全節同じとし、フランジ幅は独立とする。ただし、フランジ幅は成以下とする。H 形鋼柱のフランジ幅は梁の場合とは異なり 1 回目最適化時に変数とする。これは、柱フランジ幅は弱軸曲げ座屈に対する許容圧縮応力度に直接影響するためである。
- (5) H 形鋼柱に 490N/mm² 級鋼材の C ランク以上となる断面幅厚比の制約⁹⁾ を設ける。
- (6) GX1 梁については、成が大きくなり、溶接組立材となることが予想されるため $t_f/t_w \geq 1.3$ の制約を除外する。
- (7) 両端が柱にピン接合する図 4 の GX2、GY3、GY4 梁について、長期荷重下の必要耐力と剛性を有する最小断面積の圧延規格断面¹⁰⁾ として、それぞれ H-350x175x7x11、H-750x250x12x25、H-400x200x9x16 を用い、最適化変数から除外する。

2.3.4 優良設計解

このような条件により得られた優良設計解を表 2.4、表 2.5 に示す。最適化プログラムにより得られた優良設計解に対し、汎用解析ソフトウェア Midas¹⁴⁾ を用いた立体弾性解析を別途行い、長期及び短期荷重時の部材発生力の許容耐力に対する割合（以下、「検定率」）を算出する。ここでの短期荷重時とは、固定荷重と地震用積載荷重による鉛直下方向荷重と設計用地震荷重の組み合わせ荷重であり、地震荷重の方向に応じて、「X 方向荷重時」および「Y 方向荷重時」のように表現する。各部材の検定率の最大値を表中の [] 内に示す。併記した[L]、[X]、[+Y]、[-Y]の記号はそれぞれ、検定率が最大となる荷重状態が、長期荷重時あるいは X、+Y、-Y 方向の短期荷重時のいずれかであることを示す。なお、架構のモデル化方法は、後述する「3 章 静的増分解析」におけるモデル化とほぼ同様であり、本項では省略する。相違点は、本項では部材を全て弾性材として設定している点である。検定値はいずれも 1.0 以下となった。

表 2.4 7階建て全体型

| 柱 | | | | | | ブレース |
|---|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 節 | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | BR1 |
| 3 | BX-450x 450x12 (0.45) [X] | BX-450x 450x12 (0.42) [+Y] | BX-600x 600x16 (0.52) [X] | BX-600x 600x16 (0.41) [X] | BX-450x 450x12 (0.53) [X] | P-318.5 x6.0 (0.61) [+Y] |
| 2 | BX-450x 450x12 (0.80) [X] | BX-450x 450x16 (0.73) [+Y] | BX-600x 600x16 (0.78) [X] | BX-600x 600x16 (0.72) [X] | BX-450x 450x12 (0.75) [X] | P-355.6 x6.4 (0.89) [+Y] |
| 1 | BX-450x 450x12 (0.92) [X] | BX-450x 450x25 (0.74) [+Y] | BX-600x 600x16 (0.93) [X] | BX-600x 600x22 (0.88) [X] | BX-450x 450x12 (0.79) [X] | P-355.6 x6.4 (0.89) [+Y] |

| X 方向梁 | | | Y 方向梁 | | | |
|-------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 節 | GX1 | GX2 | GX3 | GY1= GY2 | GY3 | GY4 |
| 3 | H-550x200 x9x25 (0.69) [X] | H-550x200 x9x12 (0.76) [X] | H-550x200 x9x12 (0.65) [X] | H-550x200 x9x16 (0.67) [+Y] | H-550x250 x9x22 (0.99) [L] | H-550x200 x9x12 (0.74) [-Y] |
| 2 | H-700x300 x12x22 (0.66) [X] | H-700x200 x12x22 (0.75) [X] | H-700x200 x12x16 (0.61) [X] | H-700x200 x12x16 (0.66) [+Y] | H-700x200 x12x19 (0.94) [L] | H-700x200 x12x16 (0.65) [-Y] |
| 1 | H-700x300 x12x25 (0.60) [X] | H-700x250 x12x36 (0.63) [X] | H-700x200 x12x16 (0.59) [X] | H-700x200 x12x16 (0.58) [+Y] | H-700x200 x12x19 (0.95) [L] | H-700x200 x12x16 (0.69) [-Y] |

表 2.5 7階建て集約型

| 柱 | | | | | ブレース |
|---|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|
| 節 | C1 | C2 | C3 (=C5) | C4 | BR1 |
| 3 | H-300x200 x9x16 (0.65) [+Y] | H-500x250 x16x16 (0.69) [+Y] | H-850x300 x22x19 (0.76) [X] | H-350x300 x9x12 (0.82) [L] | P-406.4 x9.5 (0.52) [+Y] |
| 2 | H-300x200 x9x16 (0.95) [L] | H-500x450 x16x36 (0.65) [+Y] | H-850x500 x22x22 (0.72) [X] | H-350x350 x9x19 (0.95) [L] | P-406.4 x7.9 (0.93) [+Y] |
| 1 | H-300x250 x9x16 (0.83) [L] | H-500x500 x16x40 (0.96) [+Y] | H-850x500 x22x36 (0.92) [X] | H-350x350 x9x25 (0.95) [L] | P-406.4 x9.5 (0.85) [+Y] |

| X 方向梁 | | Y 方向梁 | | | |
|-------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| 節 | GX1 (=GX3) | GX2 | GY1 (=GY2) | GY3 | GY4 |
| 3 | H-800x250 x14x19 (0.76) [X] | H-350x175 x7x11 [0.91] [L] | H-350x200 x9x12 (0.97) [+Y] | H-750x250 x12x25 [0.89] [L] | H-400x200 x9x16 [0.86] [L] |
| 2 | H-950x250 x16x19 (0.95) [X] | | H-300x200 x9x16 (0.90) [+Y] | | |
| 1 | H-950x250 x16x22 (0.91) [X] | | H-300x200 x8x12 (0.84) [+Y] | | |

2.4 優良設計解の傾向分析

2.4.1 支配条件

優良設計解が、どのような制約条件に基づいて導出されたかを分析する。

全体型では、検定率が比較的大きくなったのはブレース (BR1) の 0.61-0.89[+Y]、ロングスパン梁 (GY3) の 0.94-0.99 [L]、1階柱の 0.74-0.93 などである。ブレース付帯柱 (C2) は Y 方向荷重時で検定値が大きい、それ以外の柱では X 方向荷重時で大きい。層間変形角については、X 方向では 2~6 階で上限値の 0.5% (=1/200) に近く、Y 方向では 0.34% (5 階) が最大である (図 2.5(a))。また、各層の柱耐力の和 ΣM_{pc} に対する梁耐力の和 ΣM_{pb} の比率 $\Sigma M_{pb}/\Sigma M_{pc}$ (以下、「柱梁耐力比」) は、X 方向の 1、2 節で下限値の 1.5 に近いのに対し、Y 方向では 2 節の 2.2 が最小である (図 2.5(b))。

以上から、全体型の各部材の断面決定において支配的な制約条件は次のように整理できる。

C2 以外の柱と X 方向梁では、X 方向荷重下の耐力と剛性の制約が支配的である。

1 節の柱では耐力の制約が支配的となったが、その他では水平剛性 (層間変形角) および柱梁耐力比の制約が支配的である。

ロングスパン梁 (GY3) は長期荷重下の耐力、全節のブレース(BR1)と 1、2 節の付帯柱 (1C2) は Y 方向荷重下の耐力の制約が支配的である。

Y 方向荷重下での剛性と柱梁耐力比の制約は支配的ではない。

ロングスパン梁以外の Y 方向梁は、梁成統一条件と板厚比の制約により決定される。

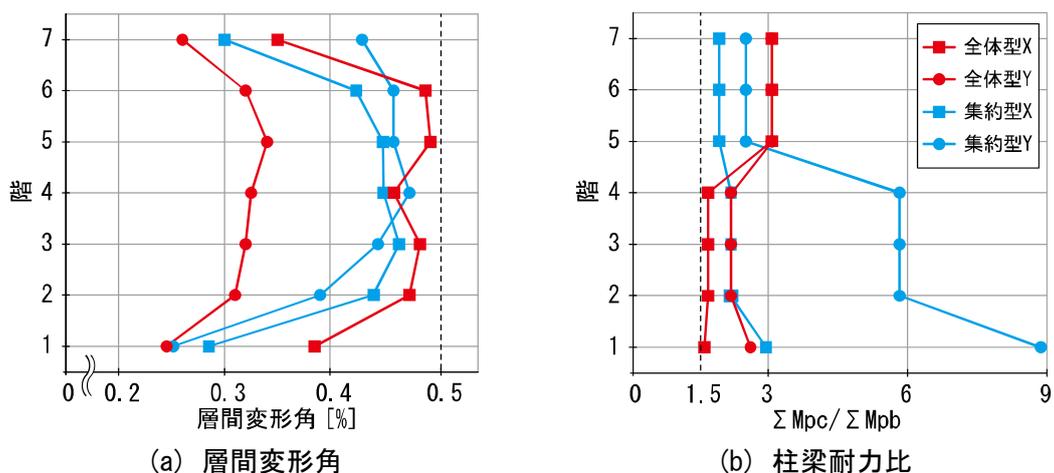


図 2.5 7階建優良設計解の性状

集約型では、検定率が比較的大きくなったのは1階柱の0.74-0.93、長期荷重負担柱(C4)の0.82-0.95、X方向耐震架構梁(GX1、GX3)の0.76-0.95[X]、ブレース境界梁(GY1)の0.84-0.97[+Y]などである。またブレース(BR1)は1、2節で0.85-0.93[+Y]であるが、3節では0.52である。層間変形角について、Y方向では上階で約0.46%(5、6階)と値が大きくなっており(図2.5(a))、これにより上階ではY方向荷重時の水平剛性が支配的な制約条件となっており、耐力には余裕が生じることがわかる。X方向については2~5階で上限値の0.5%に近い。また、3節のブレース境界梁(GY1)は下階より大きく、連層ブレース壁の曲げ変形に対する曲げ戻しに寄与している。柱梁耐力比はX方向の3節が1.94で最小であり(図2.5(b))、下限値の1.5に対しては余裕があるため、断面設計に対する制約条件にはなっていないと考えられる。

以上から、集約型の各部材の断面決定において支配的な制約条件は次のように整理できる。

- (1) 1節の柱では耐力の制約が支配的となったが、その他では耐力に加えて水平剛性(層間変形角)の制約が支配的である。
- (2) 耐震架構を構成する梁(GX1、GX3、GY1)は、耐震架構方向荷重下の耐力と剛性の制約が支配的である。
- (3) ブレース(BR1)1、2節についてはY方向荷重下の耐力が支配的であるが、3節はY方向荷重下の剛性の制約が支配的である。
- (4) ピン接合梁(GY3、GY4)は長期荷重下の耐力のみが制約条件である。
- (5) 柱梁耐力比の制約は支配的ではない。

2.4.2 鋼材量

優良設計解に対応する鋼材量 (m³) を表 2.6 に示す。同表には、後述の建物階数を 4 と 10 とした場合の優良設計解の鋼材量を併記した。また、後の 2.4.3 項で算出したダイヤフラムと小梁の鋼材量を示す。表中、部材の鋼材量を「合計」と表記し、ダイヤフラムと小梁を含む鋼材量を「総計」と表記した。以降の鋼材量に関する記述においても合計と総計を区別して用いる。鋼材の比重を 76.93kN/m³ (密度 7.85ton/m³) とする。小梁は、図 2.1 の平面図で柱に接続しない梁を指すこととし、それらを全て H-350x175x7x11 (断面積 A=6150mm²) とする。同断面の長期荷重に対する検定率は 0.91 である。算出した小梁の鋼材量は 5.51m³ である。

集約型では Y1 と Y4 通りのラーメン架構を構成する柱 (C3=C5) と梁 (GX1) の成が大きいが、X 方向梁の鋼材量の和は全体型よりも少なく、全体型の 82% である。柱についても鋼材量は減少し、全体型の 91% である。Y 方向架構では、梁の鋼材量はほぼ変わらず、ブレース鋼材量は 74% 多い。部材の鋼材量の合計は、全体型より 7% 少ない。柱鋼材量の減少に関しては、H 形鋼柱の強軸と弱軸それぞれの方向に対する断面性能が設計されることで、材料の使用効率が良くなったと考えられる。ブレース鋼材量が増えた理由は、Y 方向の内側架構 (X2-X5 架構) がすべてピン接合となり、X1 と X6 の耐震架構の負担水平力が増加したためである。

なお、全体型の鋼材量の総計を延床面積で除した単位面積当たりの鋼材量 W_A は 784N/m² (80.0kg/m²) である。さらに、これら主構造部材以外の雑鉄骨を主構造部材の 30% と仮定すると単位面積鋼材量 1.3W_A は 1019N/m² (104.0kg/m²) となる。同規模の鋼構造事務所建物における鋼材量は 1280N/m² (130.7kg/m²) 程度と考えられ¹⁵⁾、それよりも 21% 少ない。

表 2.6 優良設計解の鋼材量 (m³)

| 型式 | 階数 | 柱*1) | X 梁 | Y 梁 | ブレース | 合計 | ダイヤ*2) | 小梁*3) | 総計 | W _A (N/m ²) | 1.3W _A *4) (N/m ²) |
|----|----|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-------|-----------------|---------------------------------------|--|
| 全体 | 7 | 16.46 | 10.23 | 11.27 | 0.90 | 38.87 | 2.42 | 5.51 | 46.80 | 784 | 1019 [0.79] |
| 集約 | | 15.00 <0.91> | 8.34 <0.82> | 11.41 <1.01> | 1.57 <1.74> | 36.31 <0.93> | 1.15 <0.48> | | 42.97 <0.92> | 720 | 936 [0.73] |
| 全体 | 4 | 7.68 | 4.75 | 6.04 | 0.43 | 18.89 | 0.94 | 3.15 | 22.98 | 673 | 875 [0.85] |
| 集約 | | 5.64 | 4.19 | 6.35 <1.05> | 0.65 | 16.82 <0.89> | 0.39 <0.43> | | 20.36 <0.89> | 597 | 776 [0.68] |
| 全体 | 10 | 30.86 | 19.45 | 16.99 | 1.79 | 69.09 | 4.44 | 7.88 | 81.37 | 954 | 1241 [0.82] |
| 集約 | | 30.23 | 14.65 | 19.61 <1.16> | 3.15 | 67.63 <0.98> | 2.87 <0.65> | | 78.38 <0.96> | 919 | 1195 [0.78] |

*1) < >内は全体型に対する集約型の鋼材量の比率を示す。

*2) 柱のダイヤフラム (全体型) あるいはスチフナ (集約型) の鋼材量を示す。

*3) 断面を全て H-350x175x7x11 (A=61.5cm²) とした小梁の鋼材量を示す。

*4) []内は参考統計平均値に対する比率を示す。

2.4.3 ダイヤフラム・スチフナ量

角形鋼管柱に挿入するダイヤフラムと、H形鋼柱に挿入するスチフナの鋼材量を算出する。ダイヤフラムの大きさは、柱幅+60mm（柱面から片側 30mm ずつ）とし、板厚は取り合うフランジ厚の 2 サイズアップとする（図 2.6(a)）。スチフナの板厚は、取り合う梁に剛接合が含まれる場合は梁フランジの 1 サイズアップとし、取り合う梁が全てピン接合の場合は一律で 9mm とする（図 2.6(b)）。

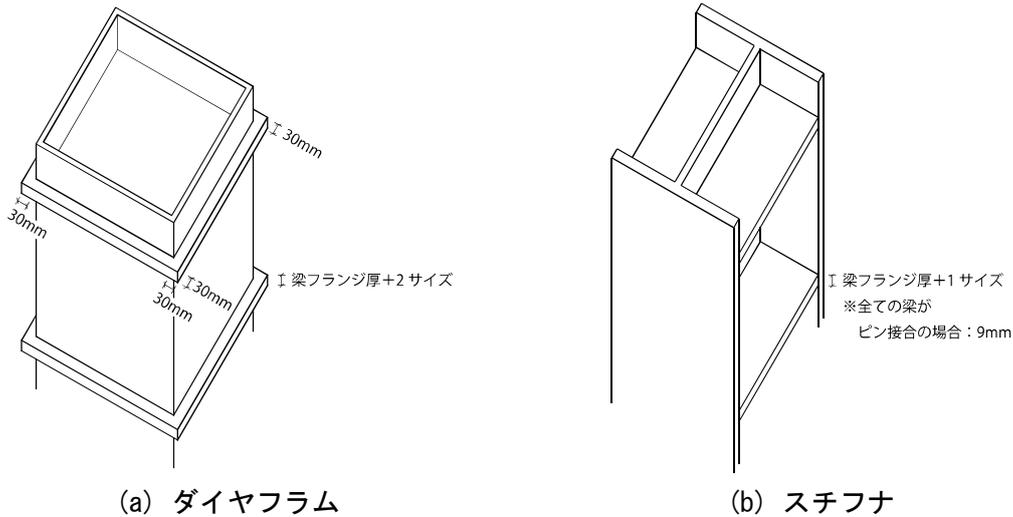


図 2.6 ダイヤフラム・スチフナサイズ

優良設計解における各節のダイヤフラム・スチフナの鋼材量を表 2.7 に示す。また表 2.6 にダイヤフラムまたはスチフナ鋼材量の合計を記載した。各接合部のダイヤフラムとスチフナの板厚や鋼材量の詳細は付録 1 に記載する。

全体型のダイヤフラムの鋼材量は 2.42 m³ であり、柱鋼材量の 15% である。一方、集約型のスチフナの鋼材量は 1.15 m³ であり、柱鋼材量の 8% である。これらを、柱、梁およびブレース等の部材の鋼材量に加えると、全体型は 46.80m³、集約型は 42.80m³ である。集約型のスチフナの鋼材量は、全体型のダイヤフラムの鋼材量に比べて 48% 程度であり、鋼材量の総計は集約型が全体型に比べて 8% 少ない。

表 2.7 ダイヤフラム・スチフナ鋼材量

| | 鋼材量 [m ³] | |
|-------------------------|-----------------------|---------|
| | 全体型ダイヤフラム | 集約型スチフナ |
| 3 節 | 0.319 | 0.118 |
| 2 節 | 0.345 | 0.198 |
| 1 節 | 0.426 | 0.199 |
| 計 (=1 節+2 節×3+3 節×3) | 2.419 | 1.146 |

2.4.4 溶接量

優良設計解の柱梁接合部の溶接量を算出し、両形式の加工手間を比較する。全体型では、角形鋼管柱に挿入するダイヤフラムと柱を完全溶け込み溶接、梁フランジとダイヤフラムを完全溶け込み溶接、梁ウェブと角形鋼管柱を隅肉溶接とする。集約型では、H形鋼柱のフランジ間に挿入するスチフナの溶接に関しては、柱フランジとスチフナを完全溶け込み溶接、柱ウェブとスチフナを隅肉溶接とすることを基本とするが、柱に取り合う梁が全てピン接合である場合（C4柱）に限り、柱とスチフナは全て隅肉溶接とする。また梁ウェブと柱は隅肉溶接とし、梁を剛接合とする場合のみ梁フランジをスチフナに完全全溶け込み溶接とする。全体型と集約型の溶接箇所と溶接種別、また換算係数を参照する際に用いる板厚を表 2.8 に示す。

表 2.8 溶接箇所と溶接種別

| | | 溶接種別 | 換算係数参照時 t | |
|-----|----------------|-----------------|------------------|------------------|
| 全体型 | 角形鋼管柱－ダイヤフラム | レ型 T 継手溶接 | 角形鋼管柱板厚 t | |
| | 梁フランジ－ダイヤフラム | レ型突合せ溶接 | 梁フランジ板厚 t_{bf} | |
| | 梁ウェブ－角形鋼管柱 | 両面すみ肉溶接 | 梁ウェブ板厚 t_{bw} | |
| 集約型 | H 形鋼柱フランジ－スチフナ | 取り合う梁に剛接合を含む場合 | レ型 T 継手溶接 | |
| | | 取り合う梁が全てピン接合の場合 | 両面すみ肉溶接 | |
| | H 形鋼柱ウェブ－スチフナ | | 両面すみ肉溶接 | スチフナ板厚 t_s |
| | 剛接合梁 | 梁フランジ－スチフナ | レ型 T 継手溶接 | 梁フランジ板厚 t_{bf} |
| | | 梁ウェブ－H 形鋼柱 | 両面すみ肉溶接 | 梁ウェブ板厚 t_{bw} |
| | ピン接合梁 | 梁ウェブ－H 形鋼柱 | 両面すみ肉溶接 | 梁ウェブ板厚 t_{bw} |

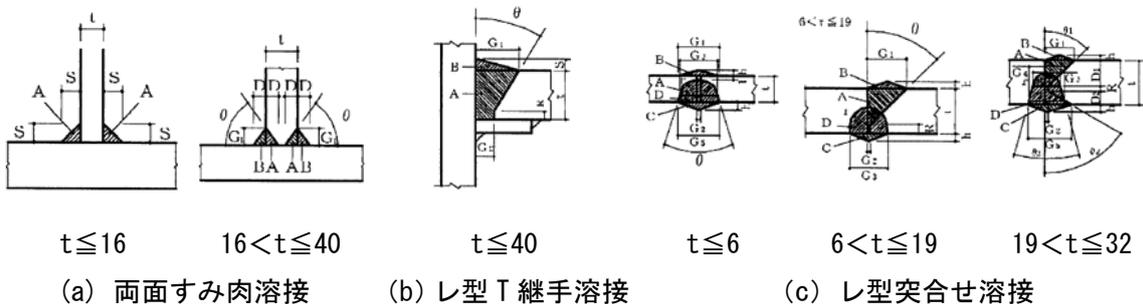


図 2.7 溶接種別

建築積算資料¹⁶⁾に準じて、サイズ6mmの隅肉溶接に換算した溶接長さ（以下、「換算長さ」）を算出する。換算長さは、溶接する部分の長さLに対し、溶接方法と板厚に応じた6mm換算係数 $k^{16)}$ をかけた値である。算出式を表2.9にまとめる。

表 2.9 換算長さ算出式

| | | | |
|-----|---------------|---------------------|--|
| 全体型 | 角形鋼管柱－ダイヤフラム | | $= L_b \times k_{HT1}$ |
| | 剛接合梁 | | $= L_f \times k_{HB2} + L_w \times k_{F2}$ |
| 集約型 | H形鋼柱 －スチフナ | 取り合う梁に剛接合 を含む場合 | $= L_f \times k_{HT1} + L_w \times k_{F2}$ |
| | | 取り合う梁が全て ピン接合の場合 | $= L_f \times k_{F2} + L_w \times k_{F2}$ |
| | 剛接合梁 | | $= L_f \times k_{HB2} + L_w \times k_{F2}$ |
| | ピン接合梁 | | $= L_w \times k_{F2}$ |

t_b : 角形鋼管柱板厚

t_f : フランジ板厚

t_w : ウェブ板厚

t_s : スチフナ板厚

L_b : 角形鋼管の溶接長さ $= ((h + b) \times 2) \times 4$

L_f : フランジ部分の溶接長さ $= b \times 4$

L_w : ウェブ部分の溶接長さ $= (h - t_f \times 2) \times 2$

k_{HT1} : 換算係数（レ型T継手溶接）

k_{F2} : 換算係数（両面すみ肉溶接）

k_{HB2} : 換算係数（レ型突合せ溶接）

算出結果を表 2.10 に示す。各部材の換算溶接長さは付録 2 に記載する。表中「柱」の列は柱とダイヤフラムまたはスチフナの溶接量を、「剛接合梁」の列は剛接合箇所の溶接量を、「ピン接合梁」の列はピン接合箇所の溶接量をそれぞれ合計したものである。

全ての節で集約型の溶接量が全体型の溶接量の 0.41-0.48%と非常に少なくなっており、架構全体で比較すると全体型の 45%である。集約型ではピン接合を多用することにより、梁の溶接量が減少する。また集約型は H 形鋼柱に対してスチフナを挿入する際、スチフナ周囲のみを溶接すればいいのに対し、全体型は角形鋼管柱を切断してダイヤフラムを挿入するため、ダイヤフラムの上下両方に角形鋼管柱を溶接する。そのため全体型では溶接量が多くなる傾向にある。

表 2.10 6mm 換算長さ溶接量

| | | 柱[m] | 剛接合梁[m] | ピン接合梁[m] | 計[m] |
|-----|----------------------|--------|---------|----------|---------|
| 全体型 | 3 節 | 1311.3 | 320.2 | 0.0 | 1631.5 |
| | 2 節 | 1409.5 | 445.2 | 0.0 | 1854.6 |
| | 1 節 | 1940.1 | 554.0 | 0.0 | 2494.1 |
| | 計 (=1 節+2 節×3+3 節×3) | | | | 12952.4 |
| 集約型 | 3 節 | 506.3 | 169.1 | 33.4 | 708.7 |
| | 2 節 | 630.4 | 218.2 | 33.4 | 882.1 |
| | 1 節 | 756.5 | 228.5 | 33.4 | 1018.4 |
| | 計 (=1 節+2 節×3+3 節×3) | | | | 5790.8 |

2.5 建物階数の影響

平面架構は変更せずに、建物階数を1節ずつ増減させた4、10階建とした場合について、7階建と同様の手順により優良設計解を求める。

各優良設計解を表2.11-14に示す。それぞれの鋼材量は表2.6に示す。鋼材量の合計は、全体型に対して集約型は89%（4階建）、93%（7階建）、98%（10階建）であり、階数が大きくなるほど差が小さくなる。この理由として、同一階同一梁成とする全体型では、X方向のラーメン架構で必要な梁成と12.8mのロングスパン梁の成を同じとすることが、4階建では比較的大きな制約になっていたのに対し、階数が増えて地震力に対する必要梁断面が大きくなると、同一階同一梁成制約の影響が相対的に小さくなったためと考えられる。また10階建の集約型では、Y方向地震荷重下で連層ブレースの曲げ変形が顕著になり、それを拘束するGY1境界梁（=GY2）の断面が大きくなった。全体型についても、7階建以下では同一階同一梁成での境界梁断面の耐力には余裕があったのに対し、10階建では境界梁の検定率が高いものが多いことから、Y方向地震荷重下で連層ブレースの曲げ変形に対して、梁成を有効に活用できていると考えられる。

表 2.11 7階建て全体型

| 柱 | | | ブレース | | | |
|------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| 節 | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | BR1 |
| 2 | BX-400x 400x12 (0.57) [X] | BX-300x 300x9 (0.76) [X] | BX-550x 550x16 (0.60) [X] | BX-500x 500x16 (0.53) [X] | BX-450x 450x12 (0.52) [X] | P-267.4 x6.0 (0.80) [+Y] |
| 1 | BX-400x 400x12 (0.71) [X] | BX-300x 300x16 (0.63) [Y] | BX-550x 550x16 (0.80) [X] | BX-500x 500x16 (0.79) [X] | BX-450x 450x12 (0.71) [X] | P-267.4 x7.0 (0.85) [+Y] |
| X方向梁 | | | Y方向梁 | | | |
| 節 | GX1 | GX2 | GX3 | GY1= GY2 | GY3 | GY4 |
| 2 | H-550x250 x9x22 (0.55) [X] | H-550x200 x9x12 (0.61) [X] | H-550x200 x9x12 (0.57) [X] | H-550x200 x9x12 (0.53) [+Y] | H-550x300 x9x19 (0.94) [L] | H-550x200 x9x12 (0.67) [L] |
| 1 | H-600x300 x12x19 (0.57) [X] | H-600x200 x12x16 (0.62) [X] | H-600x200 x12x16 (0.54) [X] | H-600x200 x12x16 (0.40) [+Y] | H-600x250 x12x22 (0.84) [L] | H-600x200 x12x16 (0.57) [-Y] |

表 2.12 7階建て集約型

| 柱 | | | ブレース | | |
|------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| 節 | C1 | C2 | C3 (=C5) | C4 | BR1 |
| 2 | H-200x200 x8x12 (0.93) [L] | H-300x300 x9x16 (0.62) [+Y] | H-750x250 x19x19 (0.78) [X] | H-300x250 x9x16 (0.85) [L] | P-355.6 x6.4 (0.71) [+Y] |
| 1 | H-200x200 x9x16 (0.89) [L] | H-300x300 x9x25 (0.88) [+Y] | H-750x400 x19x22 (0.89) [X] | H-300x300 x9x19 (0.87) [L] | P-406.4 x7.9 (0.66) [+Y] |
| X方向梁 | | Y方向梁 | | | |
| 節 | GX1 (=GX3) | GX2 | GY1 (=GY2) | GY3 | GY4 |
| 2 | H-700x200 x12x19 (0.78) [X] | H-350x175 x7x11 (0.91) [L] | H-300x200 x8x12 (0.73) [+Y] | H-750x250 x12x25 (0.89) [L] | H-400x200 x9x16 (0.86) [L] |
| 1 | H-800x300 x14x25 (0.65) [X] | | H-300x200 x8x12 (0.70) [+Y] | | |

表 2.13 7階建て全体型

| 柱 | | | | | | ブレース |
|---|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 節 | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | BR1 |
| 4 | BX-450x 450x12 (0.51) [X] | BX-500x 500x16 (0.39) [-Y] | BX-650x 650x16 (0.56) [X] | BX-600x 600x16 (0.47) [X] | BX-500x 500x16 (0.45) [X] | P-355.6 x7.9 (0.43) [-Y] |
| 3 | BX-450x 450x16 (0.75) [X] | BX-500x 500x16 (0.67) [+Y] | BX-650x 650x19 (0.74) [X] | BX-600x 600x16 (0.73) [X] | BX-500x 500x16 (0.63) [X] | P-318.5 x7.9 (0.79) [-Y] |
| 2 | BX-450x 450x19 (0.91) [X] | BX-500x 500x22 (0.81) [-Y] | BX-650x 650x19 (0.87) [X] | BX-600x 600x16 (0.90) [X] | BX-500x 500x16 (0.75) [X] | P-406.4 x7.9 (0.92) [+Y] |
| 1 | BX-450x 450x22 (0.92) [X] | BX-500x 500x40 (0.77) [-Y] | BX-650x 650x22 (0.95) [X] | BX-600x 600x25 (0.88) [X] | BX-500x 500x19 (0.78) [X] | P-406.4 x7.9 (0.85) [+Y] |

| X方向梁 | | | Y方向梁 | | | |
|------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| 節 | GX1 | GX2 | GX3 | GY1=GY2 | GY3 | GY4 |
| 4 | H-600x300 x12x25 (0.57) [X] | H-600x200 x12x16 (0.68) [X] | H-600x200 x12x16 (0.57) [X] | H-600x200 x12x16 (0.83) [+Y] | H-600x250 x12x19 (0.99) [L] | H-600x200 x12x16 (0.71) [+Y] |
| 3 | H-700x300 x12x36 (0.64) [X] | H-700x200 x12x25 (0.78) [X] | H-700x200 x12x16 (0.70) [X] | H-700x200 x12x19 (0.90) [+Y] | H-700x200 x12x19 (0.98) [-Y] | H-700x200 x12x16 (0.81) [+Y] |
| 2 | H-750x300 x12x40 (0.63) [X] | H-750x300 x12x19 (0.79) [X] | H-750x200 x12x19 (0.73) [X] | H-750x200 x12x16 (0.93) [+Y] | H-750x200 x12x16 (0.98) [-Y] | H-750x200 x12x16 (0.77) [+Y] |
| 1 | H-750x300 x12x40 (0.62) [X] | H-750x300 x12x25 (0.78) [X] | H-750x300 x12x19 (0.61) [X] | H-750x200 x12x19 (0.68) [+Y] | H-750x200 x12x16 (0.95) [L] | H-750x200 x12x16 (0.74) [-Y] |

表 2.14 7階建て集約型

| 柱 | | | | | ブレース |
|---|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| 節 | C1 | C2 | C3 (=C5) | C4 | BR1 |
| 4 | H-650x300 X16x16 (0.64) [+Y] | H-700x250 X19x16 (0.62) [+Y] | H-950x350 x25x19 (0.63) [X] | H-400x300 x12x12 (0.73) [L] | P-355.6 x12.7 (0.32) [+Y] |
| 3 | H-650x450 X16x25 (0.64) [+Y] | H-700x400 X19x19 (0.71) [+Y] | H-950x450 x25x25 (0.74) [X] | H-400x350 x12x19 (0.88) [L] | P-406.4 x16.0 (0.44) [-Y] |
| 2 | H-650x400 X16x19 (0.75) [+Y] | H-700x550 X19x36 (0.67) [+Y] | H-950x650 x25x28 (0.73) [X] | H-400x400 x12x25 (0.91) [L] | P-406.4 x12.0 (0.88) [+Y] |
| 1 | H-650x650 X16x28 (0.64) [+Y] | H-700x700 X19x40 (0.96) [+Y] | H-950x700 x25x40 (0.92) [X] | H-400x400 x12x28 (0.98) [L] | P-406.4 x9.5 (0.85) [+Y] |

| X方向梁 | | Y方向梁 | | | |
|------|------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| 節 | GX1 (=GX3) | GX2 | GY1 (=GY2) | GY3 | GY4 |
| 4 | H-700x300 x12x28 (0.72) [X] | H-350x175 x7x11 (0.91) [L] | H-650x200 X12x19 (0.91) [+Y] | H-750x250 x12x25 (0.89) [L] | H-400x200 x9x16 (0.86) [L] |
| 3 | H-950x300 x16x25 (0.89) [X] | | H-900x250 x16x19 (0.94) [+Y] | | |
| 2 | H-1100x300 x19x22 (0.95) [X] | | H-650x200 X12x19 (0.95) [+Y] | | |
| 1 | H-950x300 x16x22 (0.89) [X] | | H-350x200 X9x12 (0.78) [+Y] | | |

第 3 章 静的増分解析

第3章 静的増分解析

優良設計解は、標準せん断力係数 $C_0=0.2$ の設計用地震荷重に対する設計解である。一方、7階建の検討対象建物の構造設計では、弾性解析による許容応力度設計の検討に加えて、部材の塑性変形能力を考慮した保有水平耐力の検討が必要である⁹⁾。そこで本章では、2章で求めた全体型と集約型の優良設計解について、弾塑性静的増分解析を行い、保有水平耐力 Q_u を算出し必要保有水平耐力 Q_{um} との比較を行う。解析には、汎用解析ソフトウェア Midas¹⁴⁾ を用いる。

3.1 解析条件

部材を線材に置換し、断面性能を入力する。鋼材は全て SN490 とし、基準強度 $F=325\text{N/mm}^2$ 、ヤング係数 $E=2.05 \times 10^5\text{N/mm}^2$ である。柱脚は全て固定し、全ての部材において部材端部の剛域は考慮していない。また柱と梁の端部には塑性回転バネを設ける。塑性回転バネは、全塑性曲げモーメント M_p で降伏するバイリニア型とし、塑性後の回転剛性を、部材の弾性曲げ剛性の $1/100$ とする (図 3.1)。 M_p は基準強度の 1.1 倍と塑性断面係数 Z_p との積とする。ブレースは弾性トラス材とし、発生軸力が終局座屈耐力に達した時点で建物が保有水平耐力に至ったと判断する。

長期荷重入力は、Y 方向架構の支配幅 (内側 6.4m、外側 3.2m) に対して床重量を等分布荷重で載荷した上で、外周部の壁重量を等分布荷重あるいは節点荷重で与える (図 3.2)。地震荷重は、各階中央に設けた節点に対して与える (図 3.3)。

また各階に対し、剛床を仮定している。

解析条件を表 3.1 にまとめる。

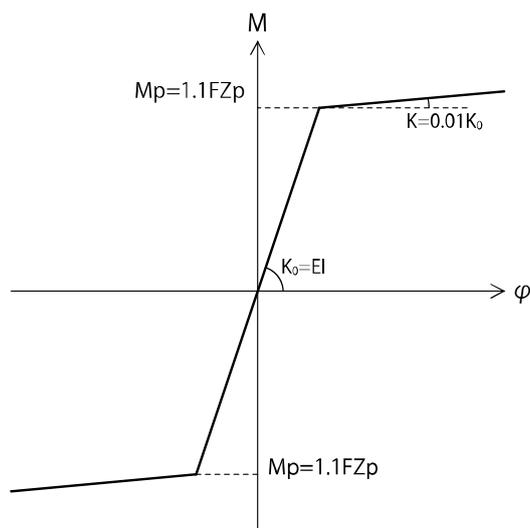


図 3.1 塑性回転バネ

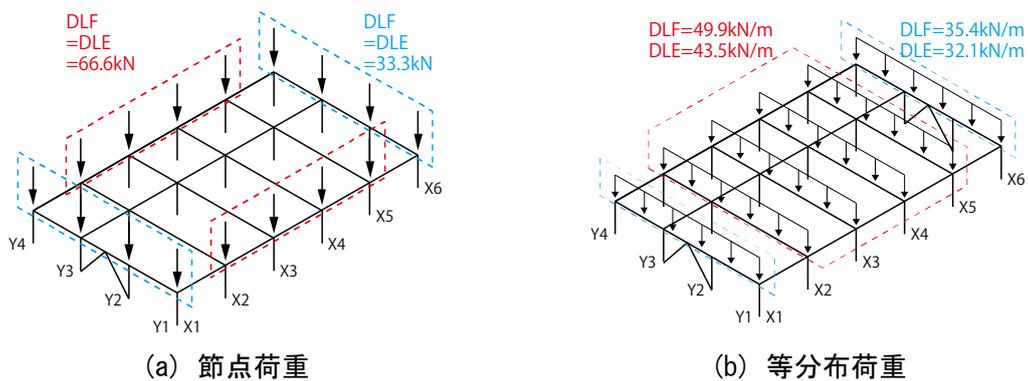


図 3.2 長期荷重入力位置

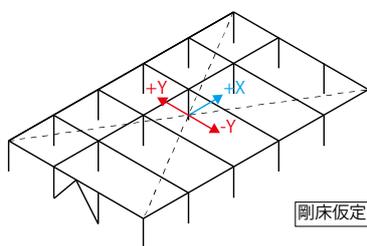


図 3.3 地震荷重入力位置

表 3.1 Midas 解析条件

| | | | |
|--------|--|-------------------|--------------------------------|
| 基準強度 | F=325N/mm ² (SN490) | | |
| ヤング係数 | E=2.05×10 ⁵ N/mm ² | | |
| 要素 | 一般梁/テーパー断面梁要素 ※せん断変形を考慮しない | | |
| 復元力特性 | 柱、梁 | Fx、Fy、Fz、Mx | 弾性 |
| | | My、Mz | 静的増分ヒンジ (バイリニア型、降伏後剛性 0.01) |
| | ブレース | Fx、Fy、Fz、Mx、My、Mz | 弾性 |
| 柱脚支持条件 | dx、dy、dz、rx、ry、rz | fix | |
| 増分方法 | 荷重制御 (最大値 : C ₀ =0.6) | | |
| ステップ数 | 1000 | | |

3.2 必要保有水平耐力

保有水平耐力時の柱とブレースの負担水平力及び部材ランクから、必要保有水平耐力を算出する。保有水平耐力時の負担水平力は、後述する解析結果における保有水平耐力時の部材応力を用いることとし、1～3節に対し、それぞれ1、3、6階の部材の値を使用した。算出方法は、設計基準⁹⁾に準ずる。

算出結果を表3.2に示す。全体型のX方向1節と、集約型のX方向3節の $D_s=0.30$ 以外は、 $D_s=0.35$ となっている。一般の鉄骨ラーメン構造物に比べて高い値となっているが、これは最適化の制約条件として幅厚比をCランク以上とすることが含まれ、その結果架構としてもCランクとなったためである。架構の評価基準として、 D_s 値を層毎ではなく架構全体で統一すると、最も厳しい値を採用して、全体型と集約型の両方向とも $D_s=0.35$ とする。建物は比較的整形であるため、各階の形状特性係数 F_{es} は1.0である。これより必要保有水平耐力 $C_{qun}=1.0 \times D_s \times F_{es}=0.35$ となる。

表 3.2 D_s 値

| | 全体型 | | 集約型 | |
|-------------|------|------|------|------|
| | X 方向 | Y 方向 | X 方向 | Y 方向 |
| 3 節 | 0.35 | 0.35 | 0.30 | 0.35 |
| 2 節 | 0.35 | 0.35 | 0.35 | 0.35 |
| 1 節 | 0.30 | 0.35 | 0.35 | 0.35 |
| 架構の D_s 値 | 0.35 | 0.35 | 0.35 | 0.35 |

3.3 解析結果

3.3.1 X方向

X方向は、いずれかの階で層間変形角が1/80に達した時点で、架構が保有水平耐力に至ったと判断する。

解析結果の層せん断力-層間変形角関係を図3.4に示す。全体型は $C_0=0.335$ で6階の梁GX2が曲げ降伏し、 $C_0=0.383$ で1階の柱C3の脚部が曲げ降伏、 $C_0=0.418$ で3階が層間変形角1/80に達した。保有水平耐力時には、R階を除く全ての層で梁の降伏が発生している。X方向の荷重に対しては、ロングスパンと短スパンの存在により架構が非対称であるため、Y1通り架構ではほぼ全層で梁の曲げ降伏が発生しているのに対し、Y4通り架構では梁の曲げ降伏が少なく、2、3階の柱に曲げ降伏が発生しており、架構ごとに降伏発生箇所が異なっている(図3.5)。柱の降伏は1階柱脚とY4通り架構の一部のみであるため、架構全体としては梁降伏型の崩壊形を形成しているが、層崩壊の危険性を含んでいると言える。 $C_0=0.35$ に対し約1.2倍と十分な耐力を有している。集約型は $C_0=0.278$ で3階の梁GX1、GX3が降伏し、 $C_0=0.325$ 時に3階が層間変形角1/80に達した。保有水平耐力時には、7、R階を除く全ての層で梁の降伏が発生しているが、柱の降伏は発生していない(図3.6)。集約型は内側の柱梁接合が全てピン接合であるため、Y1通り架構とY4通り架構の降伏がほぼ対称に発生していた。 $C_0=0.35$ に対しては7%耐力が不足している。

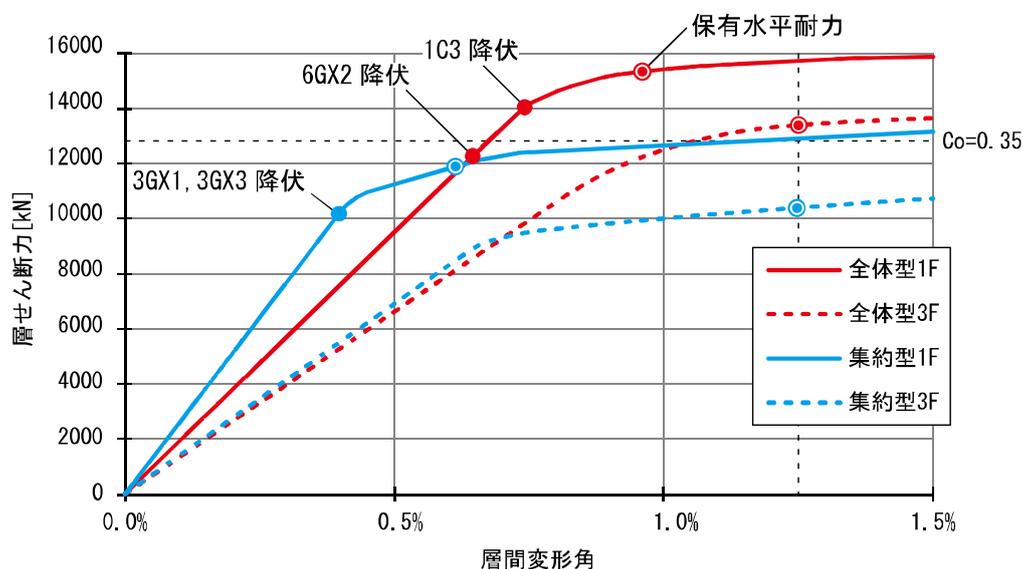


図3.4 層せん断力-層間変形角関係 (X方向)

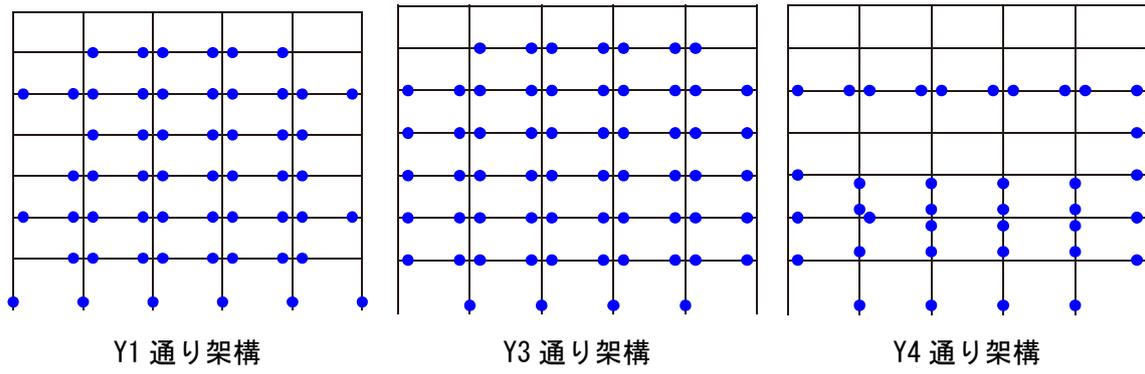


図 3.5 全体型保有耐力時ヒンジ図

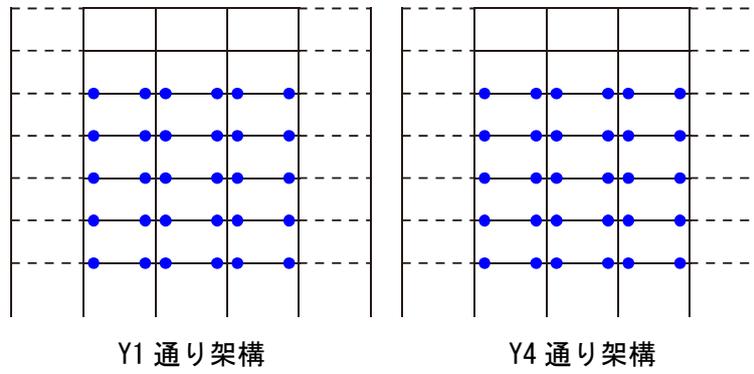


図 3.6 集約型保有耐力時ヒンジ図

3.3.2 Y方向

Y方向は、いずれかのブレースが終局座屈耐力に達した時点で、架構が保有水平耐力に至ったと判断する。ここでの終局座屈耐力は、短期許容圧縮応力度の1.1倍と断面積の積とする。なお、座屈拘束ブレースの使用により、ブレースの座屈が必ずしも保有水平耐力の決定要因とならない可能性もあるが、本研究では特殊な部材や装置などを用いない範囲を想定して検討を行う。

解析結果の層せん断力-層間変形角関係を図3.7に示す。全体型は、 $C_0=0.249$ で、1階のブレースが座屈した。また集約型は、 $C_0=0.238$ で、2階のブレースが座屈した。保有水平耐力時には、両形式とも柱梁の降伏や、ブレースの引張降伏は発生していない。 $C_0=0.35$ に対しては全体型では29%、集約型では32%、耐力が不足している。

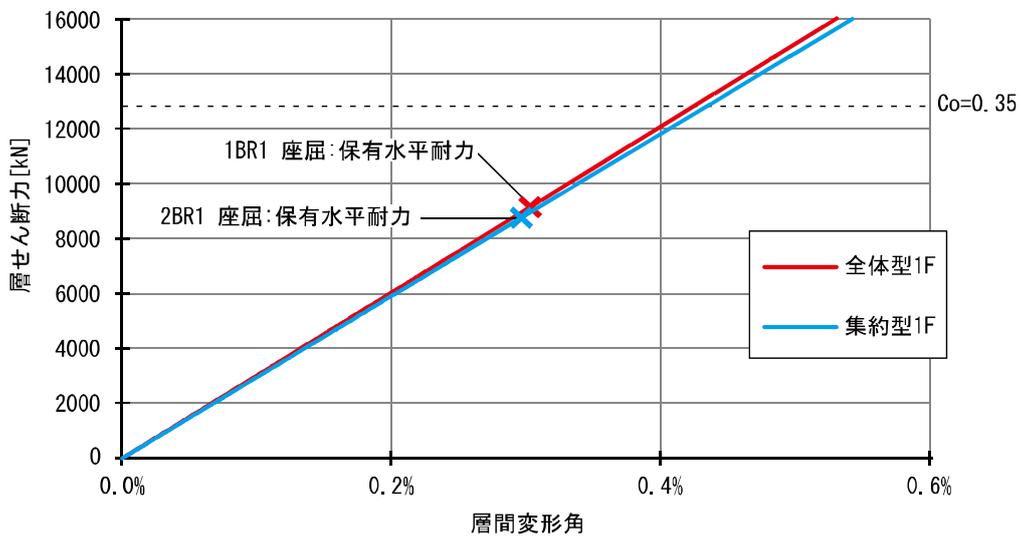
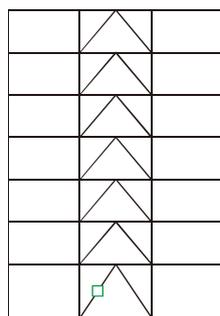
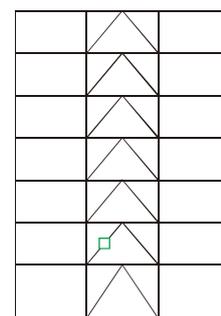


図 3.7 層せん断力-層間変形角関係 (Y方向)



X1 架構

図 3.8 全体型保有耐力時ヒンジ図



Y1 架構

図 3.9 集約型保有耐力時ヒンジ図

3.4 保有耐力を満足する優良設計解

3.4.1 保有耐力優良設計解の導出

解析結果より、全体型 Y 方向、集約型 X 方向、Y 方向で保有耐力が不足していることを確認した。そのため、設計用地震荷重を保有水平耐力の不足分だけ割り増すことで、必要保有水平耐力を満足する優良設計解を求める。荷重の割り増しは $1.05 \times C_{Qun}/C_{Qu}$ 倍とし(表 3.3)、設計解の算出方法は 2 章と同様とする。

表 3.3 設計用地震荷重の割増係数

| | | C_{Qun} | C_{Qu} | 荷重の割増係数 $1.05 \times C_{Qun}/C_{Qu}$ |
|-----|---|-----------|----------|---|
| 全体型 | X | 0.35 | 0.418 | — |
| | Y | | 0.249 | 1.48 |
| 集約型 | X | | 0.325 | 1.13 |
| | Y | | 0.238 | 1.54 |

このようにして得られた必要保有水平耐力を満足する優良設計解（以下、「保有耐力優良設計解」）を表 3.4、表 3.5 に示す。3.1 節と同条件で汎用解析ソフトウェア Midas¹⁴⁾ を用いた弾塑性静的増分解析を行い、保有水平耐力の評価を行う。なお、ここでの必要保有水平耐力については、優良設計解と同様として、全体型と集約型共に $C_0=0.35$ として検討する。

表 3.4 7階建て全体型

| 柱 | | | | | | ブレース |
|---|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| 節 | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | BR1 |
| 3 | BX-450x 450x16 | BX-550x 550x16 | BX-600x 600x16 | BX-600x 600x16 | BX-450x 450x12 | P-406.4 x9.5 |
| 2 | BX-450x 450x12 | BX-550x 550x16 | BX-600x 600x16 | BX-600x 600x16 | BX-450x 450x12 | P-406.4 x9.5 |
| 1 | BX-450x 450x12 | BX-550x 550x28 | BX-600x 600x16 | BX-600x 600x19 | BX-450x 450x16 | P-406.4 x9.5 |

| X 方向梁 | | | Y 方向梁 | | | |
|-------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 節 | GX1 | GX2 | GX3 | GY1= GY2 | GY3 | GY4 |
| 3 | H-550x200 x9x22 | H-550x200 x9x12 | H-550x200 x9x12 | H-550x300 x9x36 | H-550x250 x9x22 | H-550x200 x9x19 |
| 2 | H-700x300 x12x19 | H-700x200 x12x25 | H-700x200 x12x16 | H-700x200 x12x19 | H-700x200 x12x19 | H-700x200 x12x16 |
| 1 | H-700x300 x12x25 | H-700x300 x12x22 | H-700x200 x12x28 | H-700x200 x12x16 | H-700x200 x12x19 | H-700x200 x12x16 |

表 3.5 7階建て集約型

| 柱 | | | | | ブレース |
|---|--------------------|---------------------|---------------------|--------------------|------------------|
| 節 | C1 | C2 | C3 (=C5) | C4 | BR1 |
| 3 | H-250x200 x9x16 | H-800x250 x22x16 | H-850x300 x22x22 | H-350x300 x9x12 | P-406.4 x12.0 |
| 2 | H-250x200 x9x16 | H-800x550 x22x40 | H-850x500 x22x25 | H-350x350 x9x19 | P-406.4 x12.0 |
| 1 | H-250x250 x9x16 | H-800x800 x22x40 | H-850x500 x22x40 | H-350x350 x9x25 | P-406.4 x12.0 |

| X 方向梁 | | Y 方向梁 | | | |
|-------|----------------------|--------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| 節 | GX1 (=GX3) | GX2 | GY1 (=GY2) | GY3 | GY4 |
| 3 | H-850x250 x16x16 | H-350x175 x7x11 | H-400x200 x9x12 | H-750x250 x12x25 | H-400x200 x9x16 |
| 2 | H-1000x250 x19x19 | | H-300x200 x8x12 | | |
| 1 | H-1000x250 x19x19 | | H-300x200 x8x12 | | |

3.4.2 X方向

X方向は、いずれかの階で層間変形角が 1/80 に達した時点で、架構が保有水平耐力に至ったと判断する。

解析結果の層せん断力-層間変形角を図 3.10 に示す。全体型は $C_0=0.418$ 、また集約型は $C_0=0.374$ で、両形式共に 3 階が層間変形角 1/80 に達した。保有耐力に至るまでの過程は優良設計解と同様である。これにより、必要保有水平耐力 $C_0=0.35$ に対して全体型は 1.19 倍、集約型は 1.07 倍の保有水平耐力を有していることが確認できた。

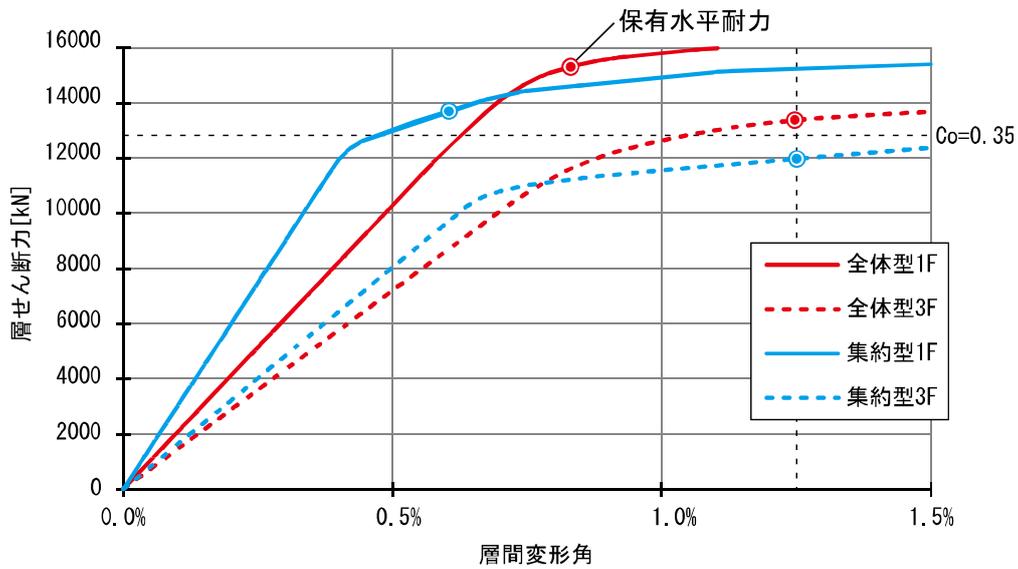


図 3.10 層せん断力-層間変形角関係 (X方向)

3.4.3 Y方向

Y方向は、いずれかのブレースが終局座屈耐力に達した時点で、架構が保有水平耐力に至ったと判断する。

解析結果の層せん断力-層間変形角を図 3.11 に示す。全体型は、 $C0=0.371$ で1階のブレースが、集約型は、 $C0=0.350$ で2階のブレースが座屈した。保有耐力に至るまでの過程は優良設計解と同様である。これにより、必要保有水平耐力 $C0=0.35$ に対して全体型は 1.06 倍、集約型は 1.00 倍の保有水平耐力を有していることが確認できた。

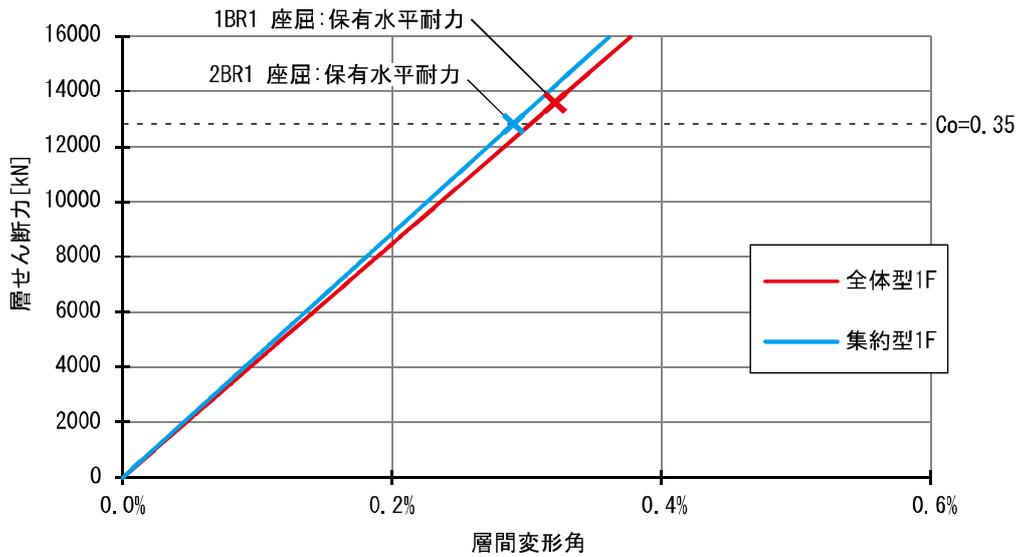


図 3.11 層せん断力-層間変形角関係 (Y方向)

3.4.4 鋼材量の変化

保有耐力優良設計解では、集約型の X 方向梁 (GX1)、X 方向耐震架構柱 (C3=C5) と、両形式のブレース (BR1)、付帯柱 (C2)、上層階 (3 節) の境界梁 (GY1=GY2) 等、優良設計解において耐力決定要因となった部材を中心に断面が増大し、必要保有水平耐力を満足する設計解となった。

それに伴う鋼材量の増分は、全体型が 11.4%、集約型が 10.9%である (表 3.6)。従って、許容応力度設計の設計制約条件に加えて必要保有水平耐力を考慮する設計解においても、全体型に対し集約型が約 94%の鋼材量と少ない結果となった。

表 3.6 保有耐力優良設計解の鋼材量 (m³)

| 型式 | 階数 | 柱 ^{*1)} | X 梁 | Y 梁 | ブレース | 合計 |
|----|----|------------------|-------|-------|------|------------------|
| 全体 | 7 | 17.94 | 10.07 | 13.31 | 1.69 | 43.01 [38.87] |
| 集約 | | 17.73 | 9.17 | 11.25 | 2.12 | 40.27 [36.31] |

※ []内は優良設計解での鋼材量を示す。

第 4 章 地震応答解析

第4章 地震応答解析

3章で導出した必要保有水平耐力 $C0=0.35$ を満たす保有耐力優良設計解に対し、地震応答解析を行い、耐震性能の評価及び、崩壊系の分析、比較を行う。解析には汎用解析ソフトウェア SNAP¹⁷⁾ を用いる。なお、3章で用いた汎用解析ソフトウェア Midas と本章で用いる SNAP とでは、荷重や塑性回転バネ等の条件を同様とした際に、弾性解析、弾塑性静的増分解析共にほぼ等しい結果が得られることを確認している。SNAP を用いる理由は、部材レベルで弾塑性応答を評価するためである。

4.1 解析条件

4.1.1 解析モデル

部材を線材に置換し、断面性能を入力する。鋼材は全て SN490 とし、基準強度 $F=325\text{N/mm}^2$ 、ヤング係数 $E=2.05 \times 10^5\text{N/mm}^2$ である。柱脚は全て固定し、全ての部材において部材端部の剛域は考慮していない。また柱と梁の端部には塑性回転バネを設ける。柱と梁の端部の塑性回転バネは、全塑性曲げモーメント M_p で降伏するバイリニア型の復元力特性とし、降伏後剛性はひずみ硬化による耐力上昇を考慮して、弾性剛性の $3/100$ とする (図 4.1(a))。 M_p は基準強度の 1.1 倍と塑性断面係数 Z_p との積とする。ブレースの軸方向の復元力特性は修正柴田-若林モデル¹⁸⁾ (図 4.1(b)) とする。モデルの元となる柴田-若林モデル^{19, 20)} は、軸方向繰返し载荷実験の結果の履歴に基づいて作成されており、繰返し载荷の中で座屈耐力を一定としている。しかし初期座屈耐力を低めに評価する傾向にあるため、修正柴田-若林モデルでは繰返しに応じて座屈耐力の低下を考慮するよう修正している。引張側は F_y で降伏し、降伏後の剛性は 0 とする。圧縮側は初期座屈耐力を F_y' とし、座屈以降は曲線状に耐力が低下する。 F_y は基準強度の 1.1 倍と断面積の積とし、 F_y' は短期許容圧縮応力の 1.1 倍と断面積の積とする。

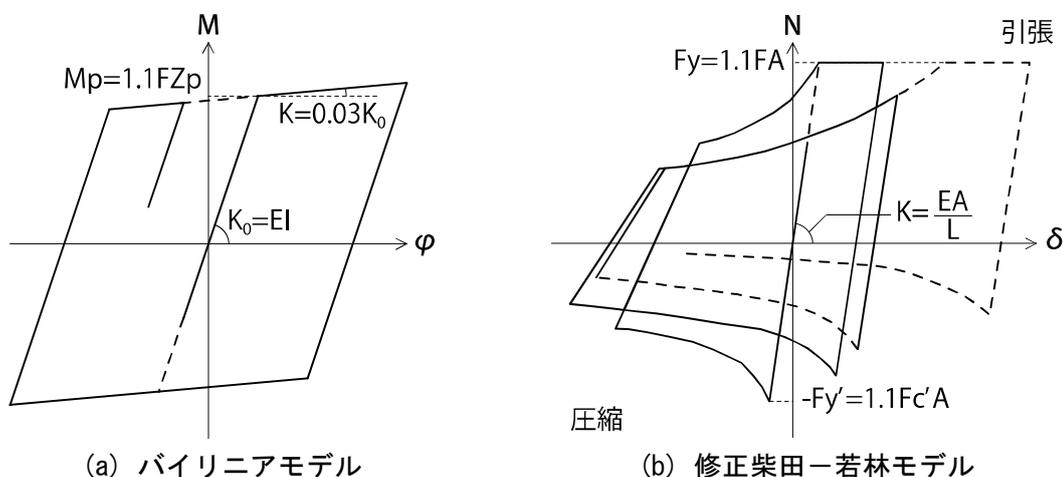


図 4.1 復元力特性

荷重は3章におけるMidasでのモデル化と同様に、節点荷重、部材荷重として入力する。それらを各節点における質量に変換した。各階の質量の合計は547.86tである。

減衰は瞬間剛性比例型減衰を、減衰定数 $h=2.0\%$ として入力した。

解析方法はNewmark β 法($\beta=1/4$)とする。

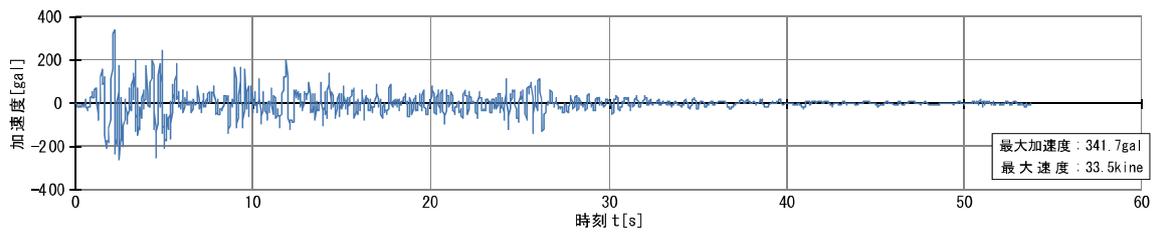
4.1.4 入力地震動

地震動は、観測地震波のEL Centro NS (1940)、TAFT EW (1952)、八戸 NS (1968)の最大速度を25、50、75kine (レベル1~3)に基準化したものと、神戸 NS (1995)、八戸 EW (1968)及び、一様乱数の位相を用いて作成された告示波の最大速度を25、50kine (レベル1~2)に基準化したものを用いる(表4.1)。図4.2に各地震動の波形を、図4.3にスペクトルを示す。なお、本解析で用いた告示波の入力レベルは、告示されている「稀に発生する地震動」及び「極めて稀に発生する地震動」とは異なる。これは告示波を用いる目的として、異なる固有周期の建物同士に対して、地震波の卓越周期の影響を除いた状況下での比較をすることがあり、一部の周期帯において応答スペクトル値が均一となるよう規定される告示波においてそれが可能となる。また告示されている応答スペクトルは、解放工学的基盤面における入力レベルを規定しているものであり、本解析のような地表面においては入力レベルを増幅する必要性が考えられる。そのため、厳密には告示波の入力レベルとは異なるが、本解析では観測波と同様に地表面での入力を最大速度25、50kineとして規準化することとし、以降これを「告示波」と呼ぶこととする。

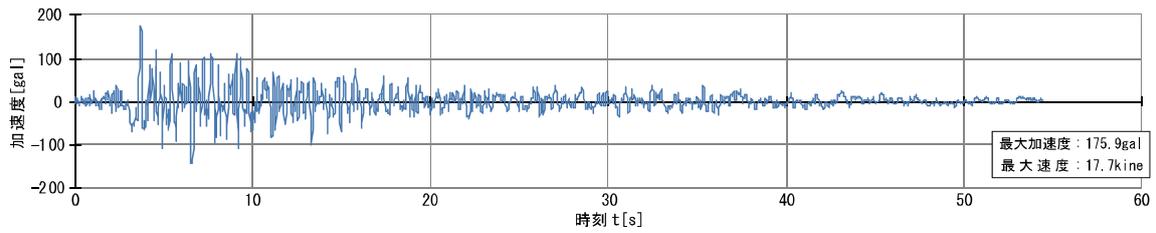
解析時間は、観測地震波と告示波でそれぞれ60秒、120秒とし、刻み幅は1/200秒で統一する。各地震動について、X方向、Y方向の解析を行う。

表 4.1 観測波

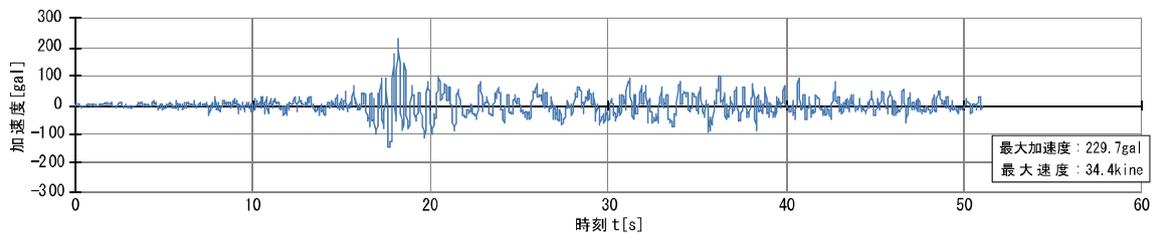
| | | 観測波元波・告示波(極稀) | | 基準化後最大加速度[gal] | | |
|-----|--------------|---------------|--------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | | 速度 [kine] | 加速度 [gal] | Level1 (25kine) | Level2 (50kine) | Level3 (75kine) |
| 観測波 | EL Centro NS | 33.5 | 341.7 | 254.9 | 509.8 | 765.1 |
| | TAFT EW | 17.7 | 175.9 | 248.4 | 496.9 | 745.3 |
| | 八戸 NS | 34.4 | 229.7 | 166.96 | 333.7 | 500.6 |
| 告示波 | 神戸 NS 位相 | 46.4 | 380.1 | 204.80 | 409.59 | — |
| | 八戸 EW 位相 | 40.8 | 328.8 | 201.47 | 402.94 | — |
| | 乱數位相 | 40.6 | 327.1 | 201.42 | 402.83 | — |



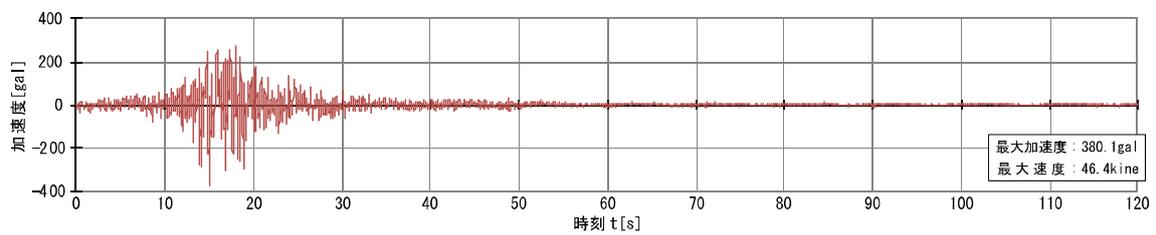
(a) EL Centro NS



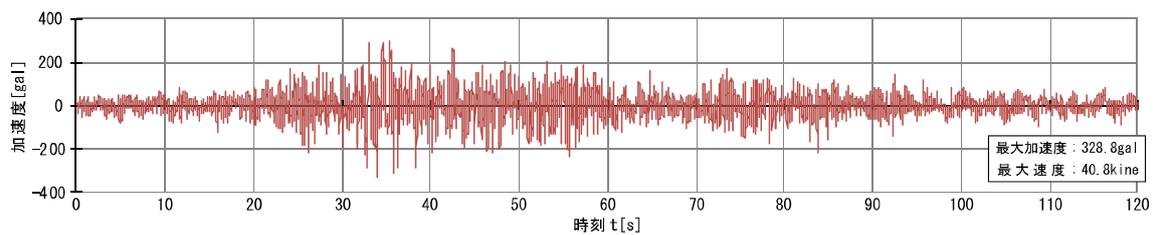
(b) TAFT EW



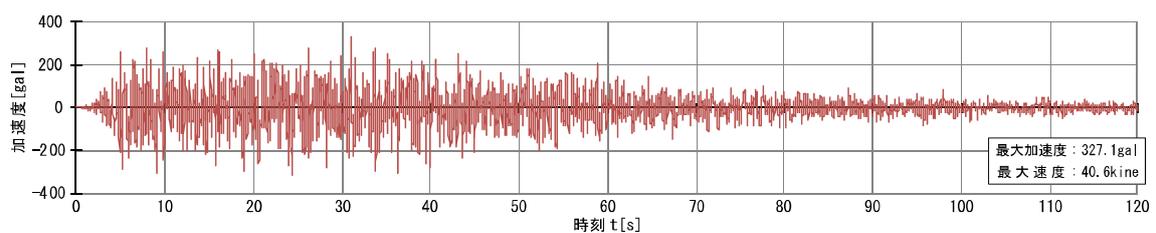
(c) Hachinohe NS



(d) ART 神戸

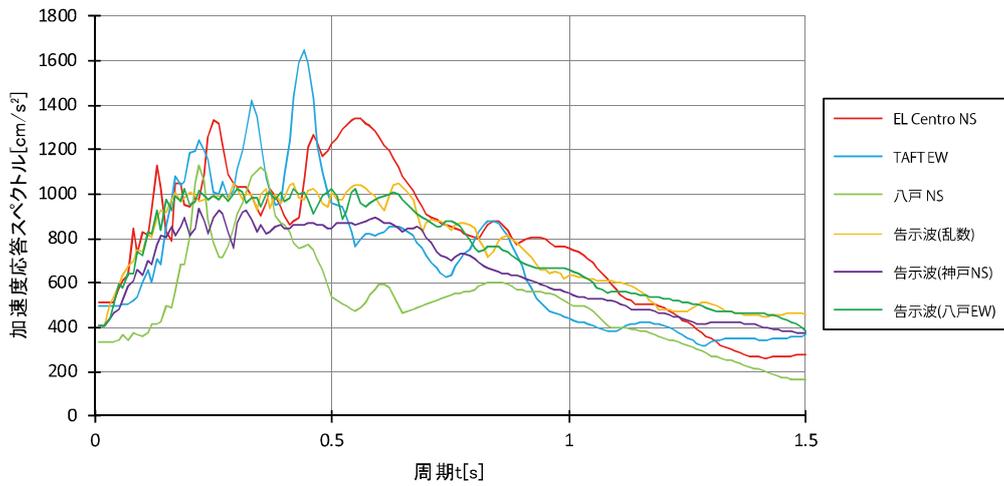


(e) ART 八戸

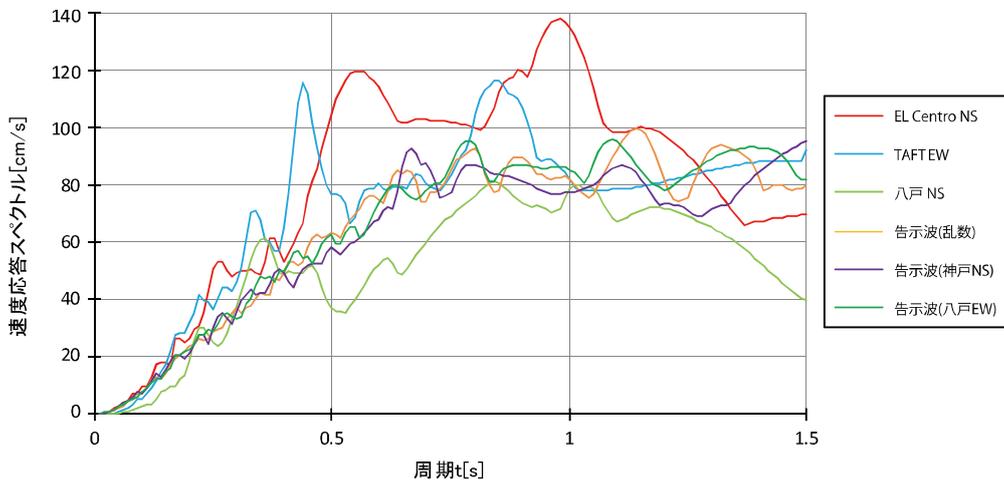


(f) ART 乱数

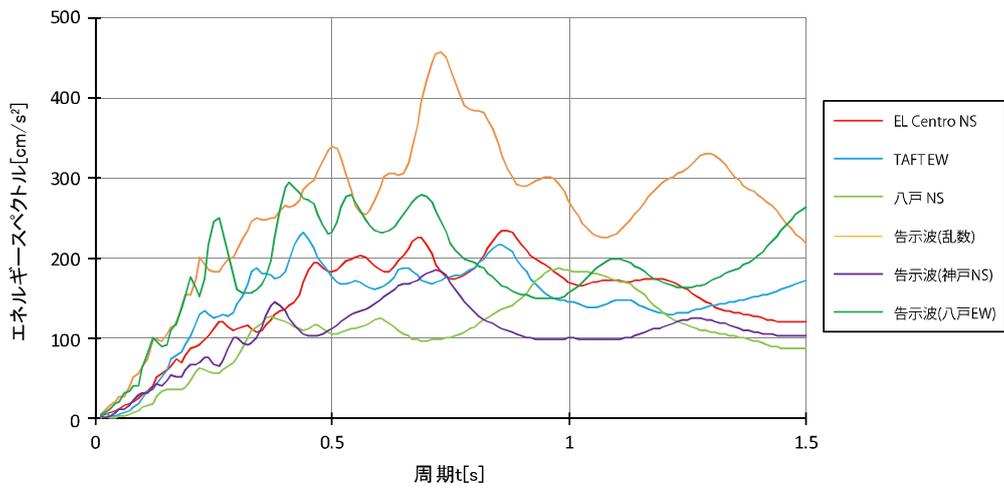
図 4.2 入力地震動



(a) 加速度応答スペクトル



(b) 速度応答スペクトル



(c) エネルギースペクトル

図 4.3 応答スペクトル図

解析条件を表 4.2 にまとめる。

表 4.2 SNAP 解析条件

| | | | |
|-----------------|------|--|------------------|
| 基準強度 | | F=325N/mm ² (SN490) | |
| ヤング係数 | | E=2.05×10 ⁵ N/mm ² | |
| 復元力特性 (単軸バネ) | 柱、梁 | Fx、Fy、Fz、Mx | 弾性 |
| | | My、Mz | BL2 (降伏後剛性 0.03) |
| | ブレース | Fx | STB |
| | | Fy、Fz、Mx、My、Mz | 弾性 |
| 柱脚支持条件 | | dx、dy、dz、rx、ry、rz | fix |
| 減衰 | | 瞬間剛性比例型 (h=2.0%) | |
| 解析時間 | | 60 秒 / 120 秒 (観測波 / 告示波) | |
| 刻み幅 | | 1/200 秒 | |

4.2 固有値解析

振動性状と地震動との関係性を明らかにするために、固有値解析を行う。解析方向は立体とした。解析結果を表 4.3 に示す。1 次は X 方向の変形が卓越したモードで、全体型が 1.197 秒、集約型が 1.070 秒と、全体型の周期が長いのに対し、2 次は Y 方向が卓越したモードで全体型が 0.834 秒、集約型が 0.926 秒で、集約型の周期が長い。両形式共に、一般的な鉄骨造に比べて固有周期が長い傾向にあるが、これは鋼材量が一般の鉄骨構造物に比べて少なく設計されていることと、本モデルでは床スラブや外壁の剛性効果を考慮していないためであると考えられる。

表 4.3 固有値

| | 全体型 | | 集約型 | |
|-----|-----------|---------|-----------|---------|
| | 固有周期 T[s] | 方向 (次数) | 固有周期 T[s] | 方向 (次数) |
| 1 次 | 1.197 | X(1) | 1.070 | X(1) |
| 2 次 | 0.834 | Y(1) | 0.926 | Y(1) |
| 3 次 | 0.668 | Rz(1) | 0.652 | Rz(1) |
| 4 次 | 0.434 | X(2) | 0.370 | X(2) |
| 5 次 | 0.278 | Y(2) | 0.296 | Y(2) |

4.3 解析結果

以下に示す、地震応答解析における一般的な設計クライテリアと比較して建物の性状を評価する。

- (1) レベル1地震動に対して塑性率1.0以下、層間変形角：1/200以下
- (2) レベル2地震動に対して塑性率5.0以下、層間変形角：1/100以下

ここで、塑性率とは部材の最大変形を降伏時変形で除した値であり、塑性率5.0を越えると破断に至る可能性が高いと考えられる。

なお架構の崩壊の基準として、既往研究では局部座屈を考慮した劣化勾配を持つ復元力特性を柱梁に設定し、層せん断力が負勾配のまま0に達すること^{21、22}などで評価したり、柱梁の部材端ヒンジが規定した塑性率に達することで評価されている²³。本研究では崩壊の基準を明確に設定しないが、これは本研究では異なる2つの架構形式の構造型状の比較を目的としているためであり、復元力特性に負勾配を設定することで解析モデルが複雑化されること等を避けるためである。

4.3.1 X方向

4.3.1.1 塑性ヒンジ状態

レベル2地震動における塑性ヒンジ図を、全体型を図4.4、集約型を図4.5に示す。全体型ではY1、Y3通り架構で多くの梁が塑性化している中で、Y4通り架構では梁の塑性化が少なく、一部の柱の塑性化が先行している。柱の塑性化はY4通り架構のみであり、架構全体としては梁降伏型の崩壊系となっているが、層崩壊の可能性を含んでいると言える。また全体型ではX方向の地震動に対して捻れるように変形することもあり、捻れ中心にある内側のY3通り架構の塑性化が最も多い。

一方で集約型では梁のみの塑性化となっており、Y1、Y4架構の塑性ヒンジ位置は均等であった。全ての地震動においてレベル2までに柱の塑性化は発生しておらず、梁降伏型の崩壊系を形成している。

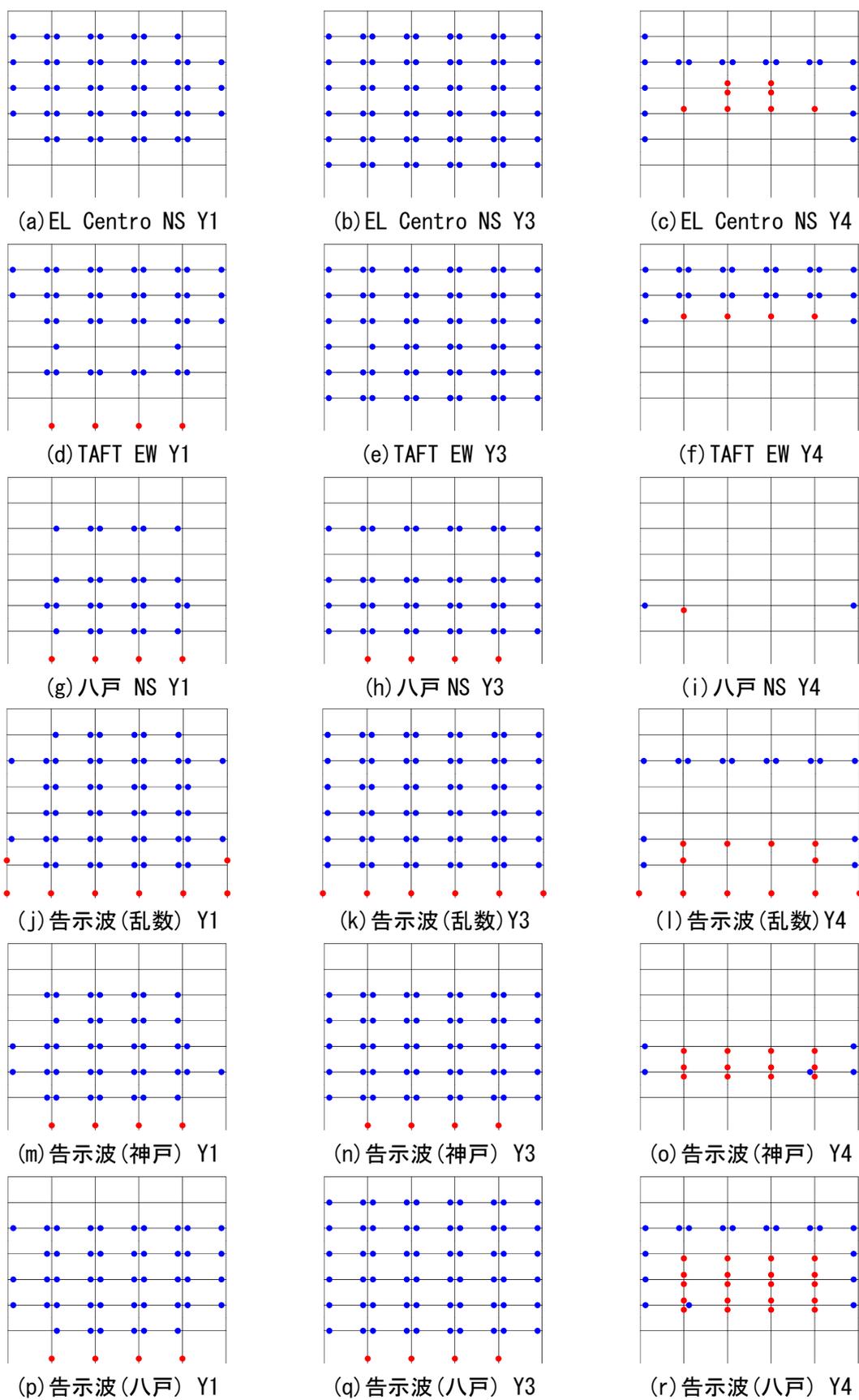
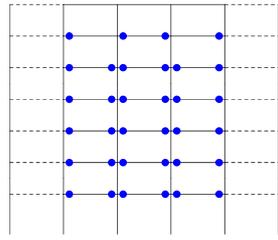
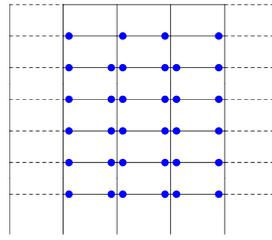


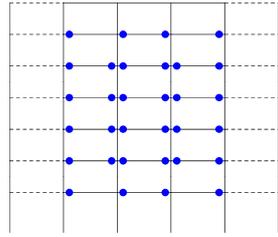
图 4.4 全体型 X 方向



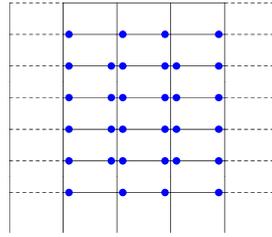
(a) EL Centro NS Y1



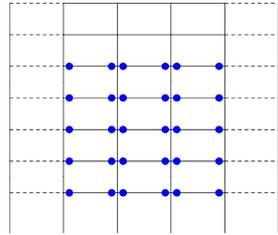
(b) EL Centro NS Y4



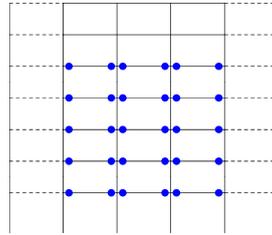
(c) TAFT EW Y1



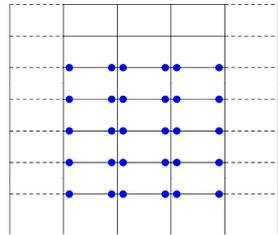
(d) TAFT EW Y4



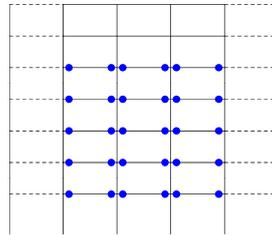
(e) 八戸 NS Y1



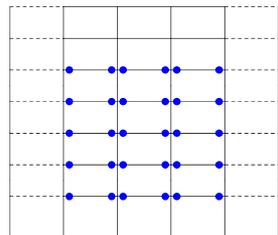
(f) 八戸 NS Y4



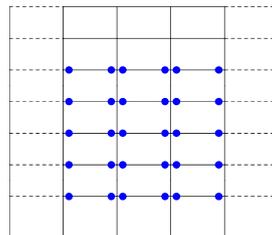
(g) 告示波(乱数) Y1



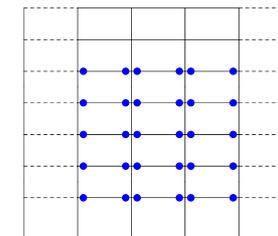
(h) 告示波(乱数) Y4



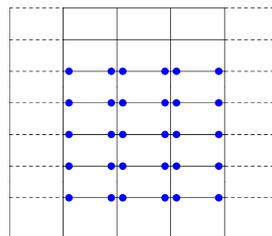
(i) 告示波(神戸) Y1



(j) 告示波(神戸) Y4



(k) 告示波(八戸) Y1



(l) 告示波(八戸) Y4



図 4.5 集約型 X 方向

4.3.1.2 塑性率

各地震動における最大塑性率を表 4.4、表 4.5 に示す。レベル 1 地震動に対する梁の塑性率は、全体型が 0.68~1.09、集約型が 0.65~1.19 であり、全体型の告示波乱数位相、集約型の EL Centro NS と告示波八戸 NS 位相で 1.0 を越えている。また、降伏耐力として設定している $M_p=1.1F_zp$ は、弾性設計における降伏耐力 $M=FZ$ に対して若干大きい値となっているため、0.8~1.0 程度の塑性率であっても、弾性設計を満足できていない可能性があると考えられる。

レベル 2、3 地震動に対しては、両形式ともに全ての地震動で梁の塑性率が 1.0 を越えており、全体型については柱の塑性率も 1.0 を越えている。ただし全体型の最大値は 2.68 (TAFT EW レベル 3)、集約型は 2.96 (TAFT EW レベル 3) であり、5.0 を越えるものはない。

また梁の塑性率は全体型に対し集約型が大きい傾向にあり (図 4.6)、耐震架構の部材数が少ない集約型は損傷が集中しやすいと傾向にあると考えられる。

表 4.4 最大塑性率 (梁)

| | | 全体型 | | | 集約型 | | |
|-----|--------------|------|------|------|------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 観測波 | EL Centro NS | 0.93 | 1.78 | 2.18 | 1.19 | 2.06 | 2.80 |
| | TAFT EW | 0.89 | 2.06 | 2.68 | 0.65 | 1.55 | 2.96 |
| | 八戸 NS | 0.68 | 1.56 | 2.14 | 0.78 | 1.68 | 2.46 |
| 告示波 | 乱数位相 | 1.09 | 2.05 | — | 0.97 | 1.98 | — |
| | 神戸 NS 位相 | 0.74 | 1.74 | — | 0.79 | 2.32 | — |
| | 八戸 EW 位相 | 0.85 | 1.76 | — | 1.19 | 2.03 | — |

表 4.5 最大塑性率 (柱)

| | | 全体型 | | | 集約型 | | |
|-----|--------------|------|------|------|------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 観測波 | EL Centro NS | 0.59 | 1.03 | 1.69 | 0.71 | 0.87 | 0.95 |
| | TAFT EW | 0.56 | 1.33 | 2.55 | 0.46 | 0.90 | 1.52 |
| | 八戸 NS | 0.55 | 1.00 | 2.16 | 0.51 | 0.81 | 0.95 |
| 告示波 | 乱数位相 | 0.87 | 1.59 | — | 0.63 | 0.81 | — |
| | 神戸 NS 位相 | 0.53 | 1.38 | — | 0.52 | 0.85 | — |
| | 八戸 EW 位相 | 0.64 | 1.19 | — | 0.72 | 0.87 | — |

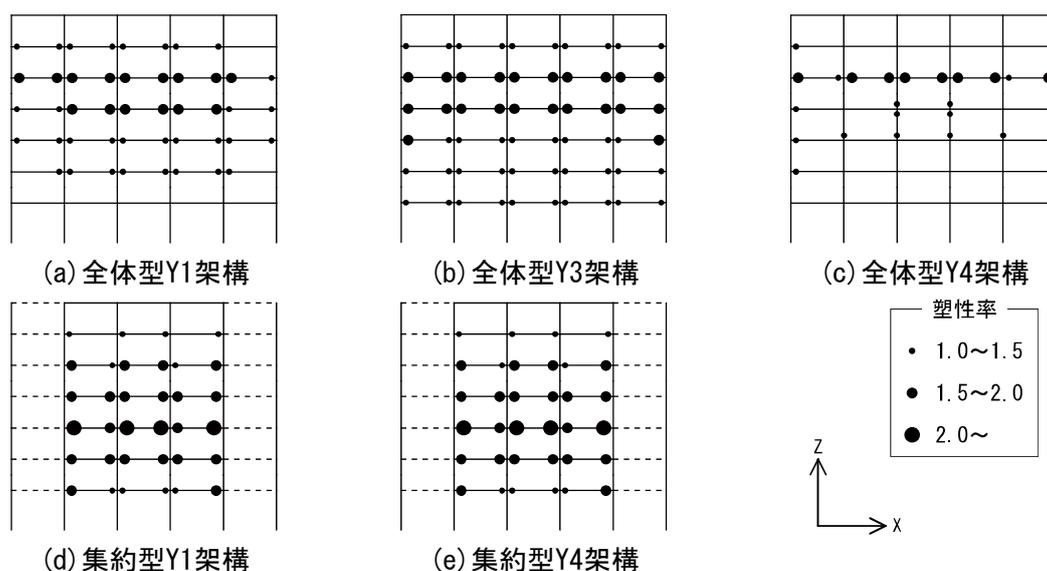


図4.6 X方向地震時ヒンジ図 EL Centro NS レベル2

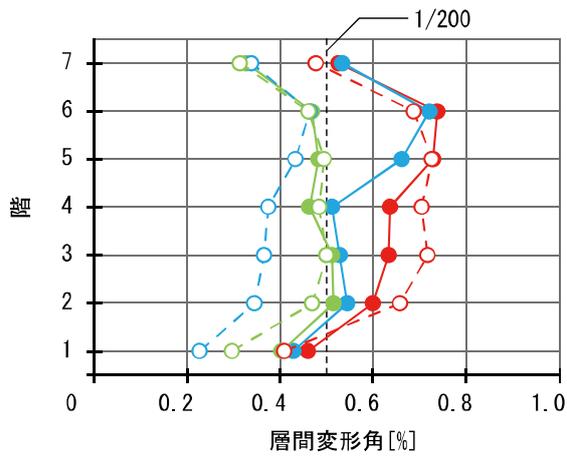
4.3.1.3 層間変形角

層間変形角の最大値を図 4.7 に示す。レベル 1 地震動に対しては、両形式とも層間変形角 $1/200$ を大きく超えている地震動が多数である。各層の層間変形角に大きなばらつきは見られず全体型と集約型の差は大きくない。レベル 2 地震動に対しても、両形式とも多くの地震動で層間変形角 $1/100$ を越えている。また全体型で中間～上層の層間変形角が大きくなり、特に EL Centro NS と TAFT EW では 5、6 階の応答が非常に大きい。一方で、集約型は極端に大きな値は見られない。レベル 3 地震動においても、全体型が上階で大きく変形する傾向は変わらず、集約型は中間層の変形が大きい。

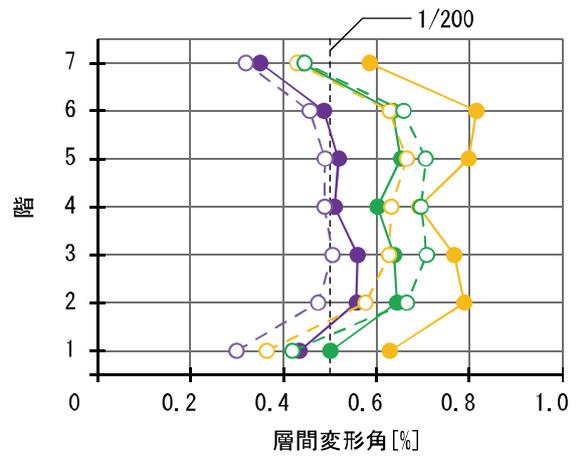
層間変形角の最大値は、地震動の種類によらず、全体型が集約型を上回る傾向にある。また全体型の TAFT EW の応答値が突出しているが、これは全体型の X 方向の 2 次固有周期が TAFT EW の卓越周期と一致しているためであると考えられる。

4.3.1.4 X 方向結果まとめ

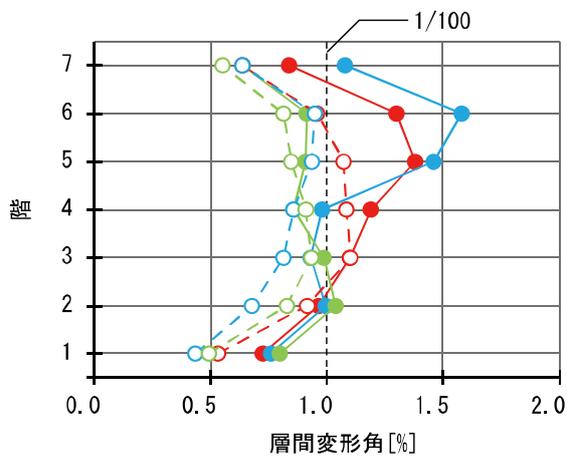
両形式共に、塑性率、層間変形角について設計クライテリアを満足できていないことが確認された。なお、静的解析により保有水平耐力を満足していても、地震応答解析におけるクライテリアを満足できないことについては、比較的一般的と考えられるが、本検討でも同様の事象が確認された。



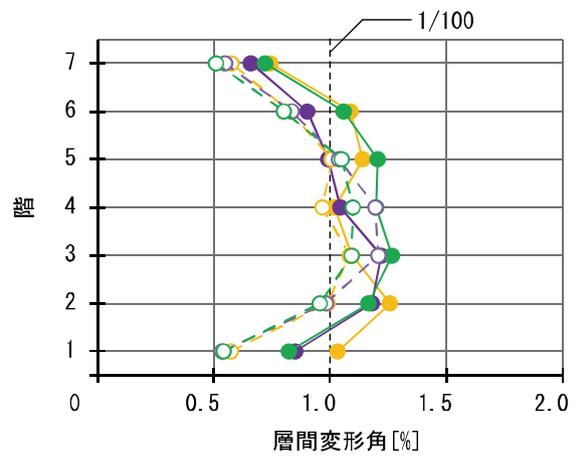
(a) 観測波 (レベル1)



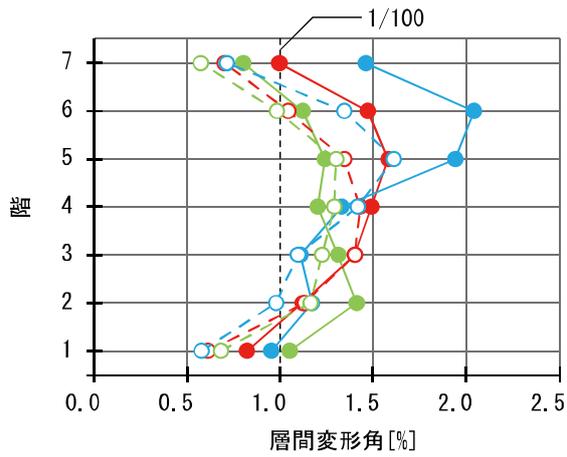
(b) 告示波 (レベル1)



(c) 観測波 (レベル2)



(d) 告示波 (レベル2)



(e) 観測波 (レベル3)

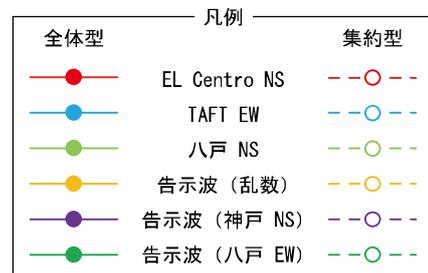


図 4.7 最大層間変形角

4.3.2 Y方向

4.3.2.1 塑性ヒンジ

レベル2地震動における塑性ヒンジ図を、全体型を図4.8、集約型を図4.9に示す。両形式とも、Y方向に対してはX1通り架構とX6通り架構の塑性状態が対称であり、X2～X5通り架構の塑性状態が同様であったため、ここではX1、X2通り架構を検討対象とする。

ブレースの座屈は1～4階で発生し、5階以上では発生していない。全体型はX1通り架構のブレースの座屈と同じ層で梁が塑性化しているほか、内側のX2通り架構でも2～4階の梁が塑性化している。また上層にはブレース、柱、梁の全てが塑性化していない。

一方で集約型は、ブレースの座屈は全体型同様1～4階で発生したが、梁に関しては全体型とは異なり、上層においても塑性化しているところがある。

これらの傾向はレベル3地震動においても同様であった。また柱の塑性化は両形式とも1階柱脚部のみとなっている。

4.3.2.2 塑性率

各地震動における最大塑性率を表4.6-8に示す。レベル1地震動に対する梁の塑性率は、全体型が0.66～0.89、集約型が0.79～1.00である。ここでもX方向で述べたように、降伏耐力として設定している $M_p=1.1FZ_p$ は、弾性設計における降伏耐力 $M=FZ$ に対して若干大きい値であるため、特に集約型では弾性設計を満足できていない可能性があると考えられる。またブレースにおける塑性率1.0を越えるものは、ブレースが座屈したことを示しており、両形式共にレベル1地震動においてブレースが座屈したことがわかる。

レベル2では全体型が2.61～8.54、集約型が2.16～10.46と、X方向と比べると塑性率の値が大きく、5.0を大きく超えている。

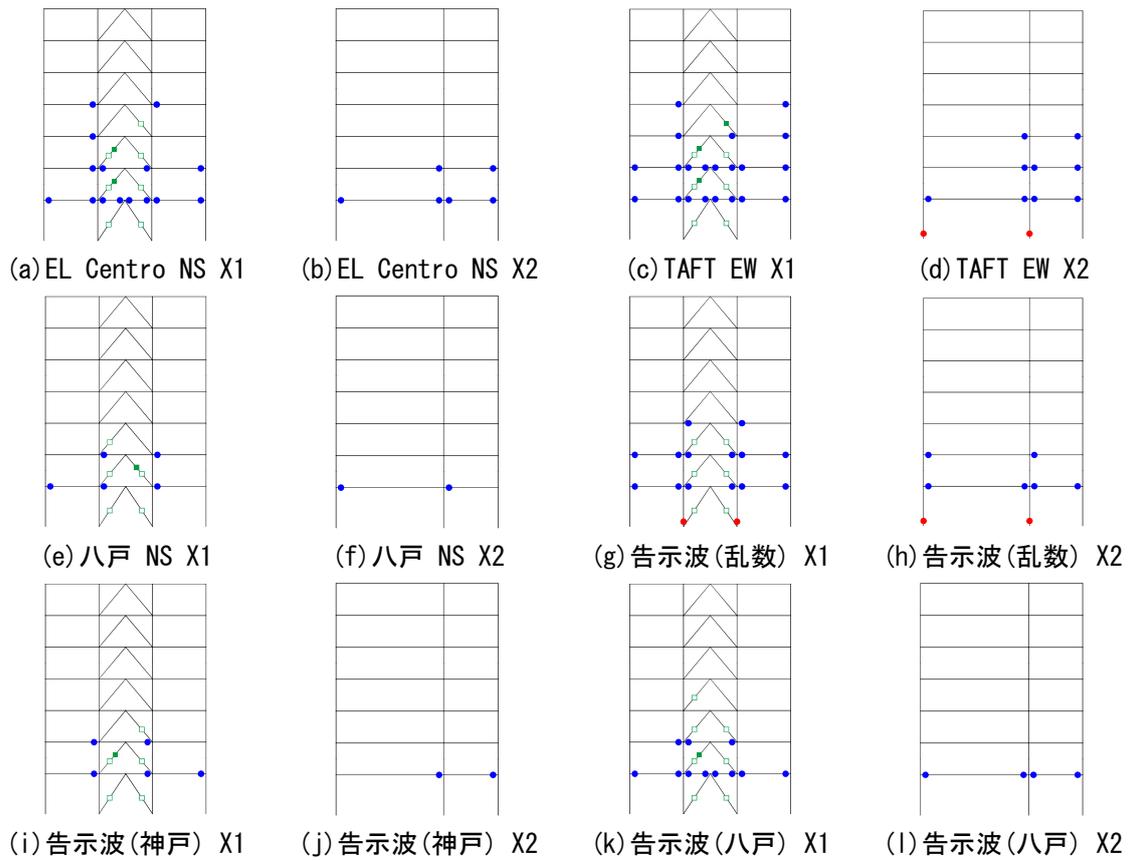


图 4.8 全体型 Y 方向

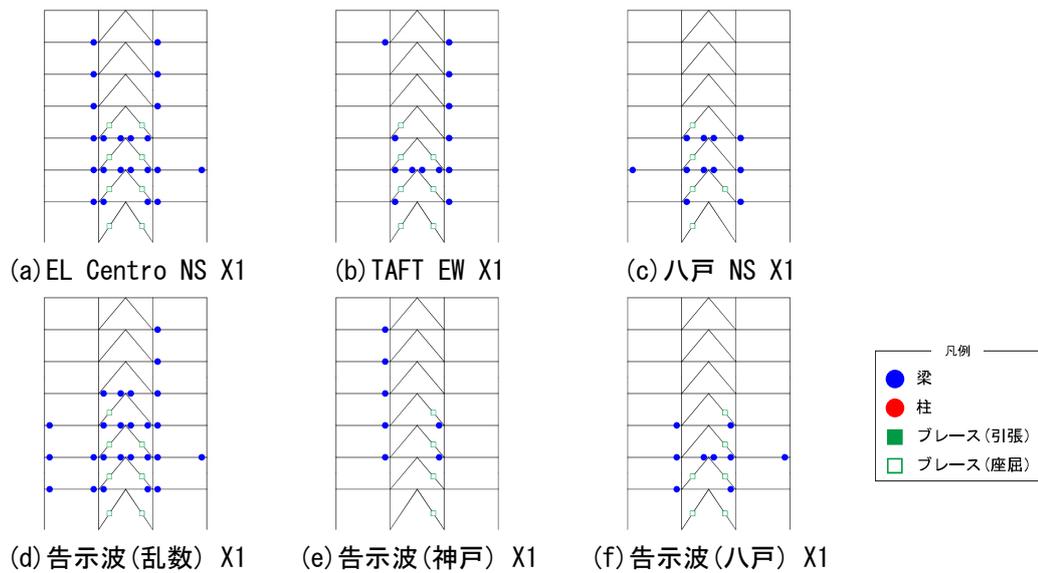


图 4.9 集約型 Y 方向

表 4.6 最大塑性率（梁）

| | | 全体型 | | | 集約型 | | |
|-----|--------------|------|------|-------|------|-------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 観測波 | EL Centro NS | 0.89 | 7.06 | 11.08 | 1.00 | 6.11 | 7.72 |
| | TAFT EW | 0.85 | 5.92 | 7.25 | 0.85 | 3.23 | 4.40 |
| | 八戸 NS | 0.66 | 2.61 | 9.84 | 0.79 | 3.78 | 5.66 |
| 告示波 | 乱数位相 | 0.76 | 8.54 | — | 0.95 | 10.46 | — |
| | 神戸 NS 位相 | 0.67 | 2.76 | — | 0.79 | 2.16 | — |
| | 八戸 EW 位相 | 0.74 | 4.63 | — | 0.87 | 3.90 | — |

表 4.7 最大塑性率（柱）

| | | 全体型 | | | 集約型 | | |
|-----|--------------|------|------|------|------|------|------|
| | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 観測波 | EL Centro NS | 0.50 | 0.95 | 1.92 | 0.55 | 0.78 | 1.24 |
| | TAFT EW | 0.46 | 1.19 | 1.23 | 0.51 | 0.73 | 0.77 |
| | 八戸 NS | 0.29 | 0.60 | 0.85 | 0.46 | 0.61 | 0.92 |
| 告示波 | 乱数位相 | 0.47 | 0.84 | — | 0.58 | 0.95 | — |
| | 神戸 NS 位相 | 0.33 | 0.83 | — | 0.42 | 0.58 | — |
| | 八戸 EW 位相 | 0.41 | 0.96 | — | 0.48 | 0.88 | — |

表 4.8 最大塑性率（ブレース）

| | | 全体型 | | | 集約型 | | |
|-----|--------------|------|------|-------|------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 観測波 | EL Centro NS | 1.74 | 7.00 | 10.48 | 2.39 | 12.89 | 16.66 |
| | TAFT EW | 1.40 | 5.59 | 7.97 | 0.88 | 6.83 | 9.83 |
| | 八戸 NS | 0.83 | 3.09 | 9.19 | 0.73 | 7.90 | 12.20 |
| 告示波 | 乱数位相 | 1.36 | 9.95 | — | 2.77 | 21.43 | — |
| | 神戸 NS 位相 | 0.81 | 3.16 | — | 0.77 | 4.97 | — |
| | 八戸 EW 位相 | 1.05 | 4.82 | — | 1.23 | 8.30 | — |

4.3.2.3 ブレースの軸方向歪

本解析ではブレースの局部座屈や破断について考慮していないが、鋼管ブレースは軸方向歪（＝軸方向変形／初期長さ）1~2%程度の繰り返し変形を続けると、全体座屈以降に局部座屈が発生し、破断に至るとされている²⁴⁾。解析におけるブレースの最大軸方向歪を表4.9に示す。レベル2地震動に対して、全体型はEL Centro NSと告示波乱数位相で1.06%と1.57%、集約型では告示波神戸NS位相以外の地震波で1.07~3.37%となっており、特に集約型においては、実際はブレースが破断に至る可能性が高いことが考えられる。

表 4.9 ブレース最大軸方向歪

| | | 全体型 | | | 集約型 | | |
|-----|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
| 観測波 | EL Centro NS | 0.27% | 1.06% | 1.59% | 0.38% | 2.03% | 2.62% |
| | TAFT EW | 0.22% | 0.85% | 1.26% | 0.14% | 1.07% | 1.55% |
| | 八戸 NS | 0.13% | 0.47% | 1.40% | 0.12% | 1.24% | 1.92% |
| 告示波 | 乱数位相 | 0.21% | 1.57% | — | 0.44% | 3.37% | — |
| | 神戸 NS 位相 | 0.12% | 0.48% | — | 0.12% | 0.78% | — |
| | 八戸 EW 位相 | 0.16% | 0.73% | — | 0.19% | 1.31% | — |

4.3.2.4 層間変形角

層間変形角の最大値を図 4.10 に示す。レベル 1 地震動では、ブレースが座屈下した全体型の TAFT EW、集約型の EL Centro NS と告示波乱数位相で層間変形角 1/200 を大きく超えているが、その他は両形式とも概ね 1/200 以下となっている。

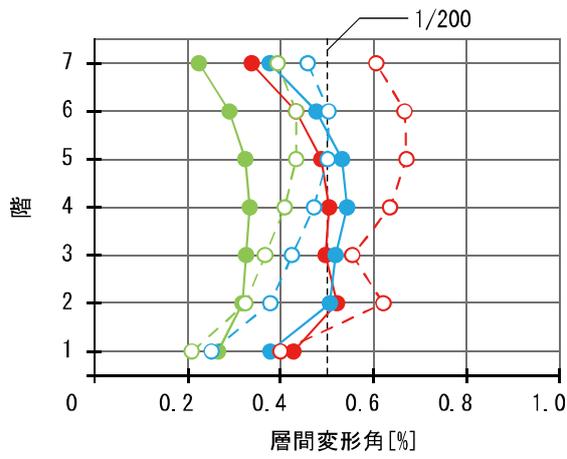
レベル 2 地震動に対しては、ブレースの座屈が発生した下層を中心に層間変形角が大きくなり、層間変形角 1/100 を越える。特に集約型は、座屈が発生していない上階に比べて変形角の値が極端に大きい。これは、集約型の Y 方向の耐震架構がほぼブレースにのみ依存していることを示しており、ブレースの座屈により、層の剛性が著しく低下したことがわかる。一方で、全体型でもブレースの座屈は発生しているが、内側架構の柱梁接合部も剛接合となっているため、集約型ほど極端に変形が進行していない。

レベル 3 では更に変形が進行し、両形式とも全ての地震波で層間変形角 1/100 に達しており、集約型は 2~5 階で変形角が非常に大きく、1/50 を越えるものもある。

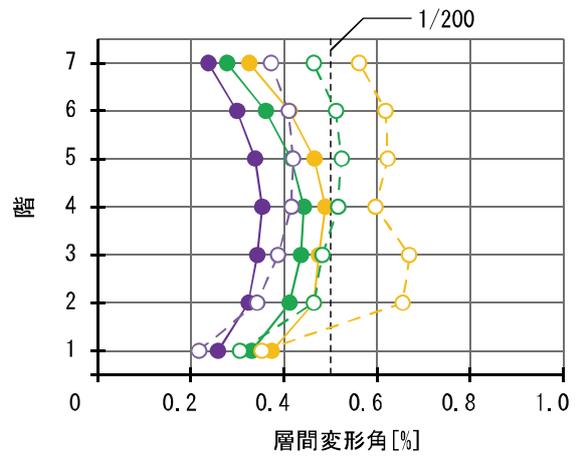
両形式共に、告示波乱数位相の応答値が非常に大きくなっているが、これは告示波乱数位相が他の地震動に比べてエネルギーが大きいためである（図 4.3(c)）。

4.3.2.4 Y 方向結果まとめ

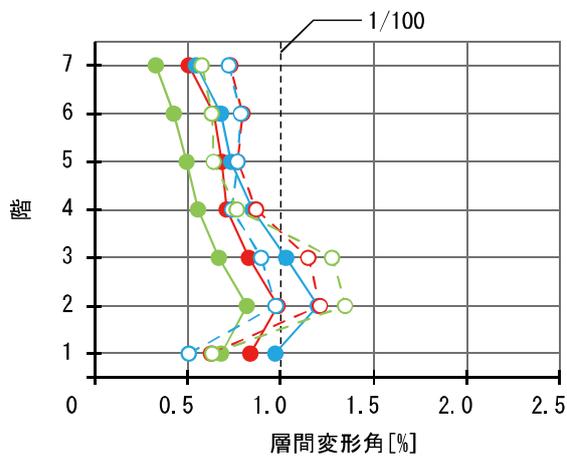
両形式共に、塑性率、層間変形角について設計クライテリアを満足できていないことが確認され、X 方向同様に保有水平耐力を満足していても応答解析のクライテリアを満足しない結果となった。



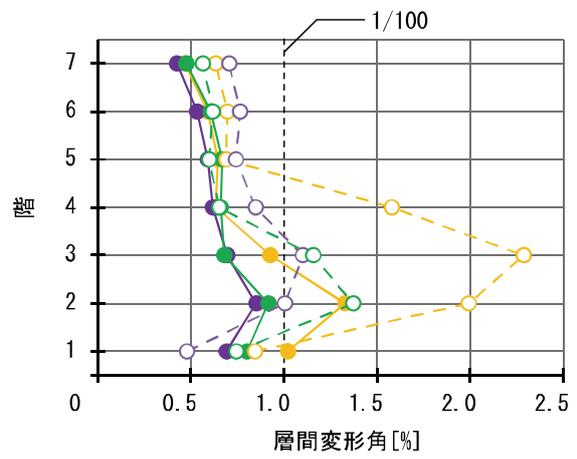
(a) 観測波 (レベル1)



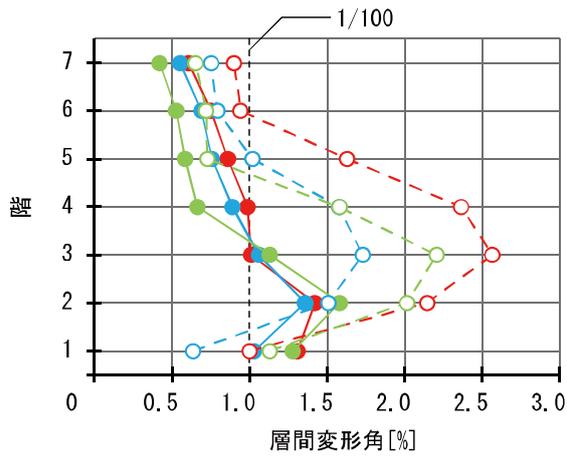
(b) 告示波 (レベル1)



(c) 観測波 (レベル2)



(d) 告示波 (レベル2)



(e) 観測波 (レベル3)



図 4.10 最大層間変形角

4.4 比較分析

解析結果における、全体型と集約型の違いについて分析する。2つの形式で大きく差異が生じた事項を以下に示す。

- (1) X方向地震動において、全体型では柱が塑性化したのに対し、集約型では1階柱脚以外塑性化していない。
- (2) X方向地震動において、全体型の層間変形角は層毎の応答値のばらつきが大きい。
- (3) Y方向地震動において、全体型では下層に塑性化が集中したのに対し、集約型では上階でも梁が塑性化している。

このような違いをもたらした要因として、集約型における、長期架構柱や別方向の耐震架構の、心棒としての役割が考えられる。心棒となる部材は、設計時は水平力を負担しないとされるが、実際には特定層の剛性や強度を高めると言われており²⁵⁾、本解析の結果もこれに相当する。設計時には耐震要素として考慮していない長期架構柱や別方向耐震架構が心棒の役割を果たし、X方向地震動においては特定の層への変形や応力の集中を防ぎ、Y方向においては上階へ応力を伝達させる効果を発揮したと考えられる。

ただし、集約型のY方向ではブレース座屈層の変形が大きく進行することを抑制できていない。これは水平剛性のほぼ全てを負担していたブレースが座屈したことにより、架構の水平剛性が大きく低下したためであり、耐震架構の水平剛性がある程度確保されている状態でないと、心棒の効果は発揮されないとと言える。

以上の検討により、X方向すなわちラーメン構造に対しては、鋼材量が少なく、心棒の効果により層崩壊の危険性が少ない集約型が有効であると考ええる。一方で、Y方向すなわちブレース構造に対しては、集約型はブレース座屈以降の挙動に課題が多いため、ブレースに損傷が集中しない全体型が有効であると考ええる。

ただし、一般的に同様の傾向が見られるかは定かでなく、例えば全体型で梁降伏型を保障した場合や、座屈拘束ブレースを用いた場合は異なる傾向を示す可能性がある。しかし、本検討では最適化手法を用いた設計同士を比較することにより、比較対象とした設計解に一定の客観性を確保することができた。

第 5 章 結論

第5章 結論

本研究では、鋼構造事務所建物の耐震架構配置に着目し、角形鋼管柱で柱梁接合部を全て剛接合とした全体分散型耐震架構（全体型）と、H形鋼柱で耐震架構と長期架構を明確に分離した外周集約型耐震架構（集約型）の構造的性状を比較した。検討対象は標準的な7階建建物とし、最適化の手法を用いて鋼材量を最小化した優良設計解を導出し、2つの架構形式の傾向を分析した。以下に本研究で得られた知見をまとめる。

- (1) 複数の制約条件を設定した最適化手法により導出された全体型と集約型の設計解について、設計用地震荷重を用いた弾性解析を行い、断面設計に支配的となった制約条件を明らかにした。ブレースと付帯柱はY方向荷重下での耐力が支配的であるが、その他の柱とX方向梁は主としてX方向荷重下の耐力と剛性の制約が支配的である。また1節の柱は耐力の制約、2、3節の柱は層間変形角及び柱梁耐力比の制約が支配的である。またY方向荷重下での剛性と柱梁耐力比は支配的ではない。ラーメン架構でほとんどの柱梁部材が地震抵抗要素となるX方向架構に対し、Y方向架構ではブレースと付帯柱が大きく地震力に抵抗し、その他の部材はY方向荷重下で余裕がある。またロングスパン梁は長期荷重下の耐力の制約が支配的であるが、その他のY方向梁は梁成統一条件と板厚比の制約が支配的である。
- (2) 優良設計解の部材鋼材量の合計は、全体型に対して集約型は約93%となった。小梁、柱のダイヤフラムあるいはスチフナ分を加えた総鋼材量では、全体型に対して集約型が約92%となった。ここで集約型の柱梁接合部のスチフナの鋼材量は、全体型の柱梁接合部のダイヤフラムの鋼材量の約48%であった。階数を4、10階に変化させた場合の優良設計解についても、集約型の鋼材量が全体型を下回る結果となった。また全層の柱梁仕口の換算溶接量は、全体型が集約型の約2.2倍であり、両型式の加工手間に大きな差があることを定量的に示した。
- (3) 塑性変形能力を考慮した保有水平耐力の検討として、弾塑性静的増分解析を行い、全体型のX方向以外は必要保有水平耐力 $C_0=0.35$ を満足できていないことを確認した。設計用地震荷重を $1.05 \times C_{Qm}/C_{Qu}$ 倍だけ割り増して再度得た保有耐力解では $C_0=0.35$ を満足することを確認した。地震荷重の割増による鋼材量の増分は、全体型が11.4%、集約型が10.9%で、必要保有水平耐力を考慮する設計解においても、集約型の方が鋼材量が少ない結果となった。
- (4) 地震時挙動の分析として、保有耐力優良設計解に対して地震応答解析を行った。レベル1地震動に対して塑性率1.0以下、層間変形角1/200以下、レベル2地震動に対して塑性率5.0以下、層間変形角1/100以下という一般的な設計クライテリアを、両形

式とも満足しないことを確認した。X方向地震時には全体型で中間層の柱が塑性化し、層崩壊の可能性がある。またY方向地震時には、1～4層でブレースが座屈し、集約型の軸方向歪が1.07～3.37%となり、実際には破断に至る可能性が高いと考えられる。

- (5) X方向地震時の全体型の柱の塑性化や、層間変形角のばらつき、Y方向地震時の集約型の上層の梁の塑性化に関して、集約型では耐震設計時に考慮されない柱や別方向の耐震架構が、心棒の役割を果たしていると考ええる。ただしブレース座屈層の極端な変形の進行を抑制できていないため、耐震架構の水平剛性がある程度確保されている状態でないと、心棒の効果は発揮されないと言える。
- (6) X方向（ラーメン構造）は、鋼材量が少なく、心棒の効果により層崩壊の危険性も少ない集約型が有効だが、Y方向（ブレース構造）は、集約型ではブレース座屈以降の挙動に課題が多いため、ブレースに損傷が集中しない全体型の方が有効であると考えられる。これらについて一般的に同様の傾向が見られるかは定かでないが、最適化手法を用いた設計同士の比較により、一定の客観性を確保することができた。

参考文献

- 1) 長谷川隆ほか：日米の鉄骨造建物の耐震性能比較 その 1-3, 日本建築学会学術講演梗概集, C-1, 構造 III, pp903-908, 1998.9
- 2) 木村祥裕：日米鋼構造ラーメン構造物の履歴吸収エネルギーと累積塑性変形倍率の比較, 日本建築学会学術講演梗概集, C-1, 構造 III, pp761-762, 2008.9
- 3) 六郷美佳, 長尾直治: 日米の鋼構造ラーメン骨組の耐震性状に関する比較研究, 日本建築学会学術講演梗概集, C-1, 構造 III, pp943-944, 2005.9
- 4) 多賀 謙蔵, 小原 英：多方向の入力を考慮した場合の箱形断面柱と H 形断面柱の耐震性能比較に関する研究, 日本建築学会学術講演梗概集, 構造 III, pp1035-1036, 2012.9
- 5) 澤田樹一郎, 清水斉, 松尾彰: 鉄骨工場製作コストを考慮した最小コスト骨組と最小重量骨組の設計解と地震応答の比較研究, 日本建築学会構造系論文集 77(679), pp1413-1420, 2012.9
- 6) L. Pavlovčič, A. Krajnc, D. Beg: Cost function analysis in the structural optimization of steel frames, *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 28(4), pp286-295, 2004.8
- 7) Min Liua, Y.K. Wenb, Scott A. Burnsc: Life cycle cost oriented seismic design optimization of steel moment frame structures with risk-taking preference, *Engineering Structures*, 26(10), pp1407-1421, 2004.8
- 8) 国土交通省住宅局建築指導課ほか編集：2001 年版 限界耐力計算法の計算例とその解説, 工学図書株式会社, 2006.6
- 9) 国土交通省住宅局建築指導課ほか監修：2007 年版 建築物の構造関係技術基準解説書, 2008.6
- 10) 新日鉄住金株式会社：建設用資材ハンドブック, 2012.10
- 11) ABAQUS Ver 6.13, Dassault Systemes, 2014.
- 12) SNOPT Ver 7.2, Stanford Business Software Inc., 2014
- 13) 日本建築学会：鋼構造設計規準—許容応力度設計法, 2007.7
- 14) Midas GEN Ver. 800, MIDAS Information Technology, 2016
- 15) 橋本真一, 丸木健: 躯体工事の主要資材数量と変動要因に関する研究: その 2 S 造事務所, 日本建築学会学術講演梗概集. F-1, 都市計画, 建築経済・住宅問題, pp1217-1218, 2008.9
- 16) 日本建築積算協会：建築積算, 第 6 版, 2013.11
- 17) SNAP Ver.6.0.1.3, 株式会社構造システム, 2016
- 18) 谷口元, 他：原子力発電所建屋の鉄骨架構の復元力特性に関する研究 その 6, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1541-1542, 1990.9
- 19) 柴田道生, 若林実：鉄骨筋違の履歴特性の定式化 その 1, 日本建築学会論文報告集, 第 316 号, pp.18-23, 1982.6
- 20) 柴田道生, 若林実：鉄骨筋違の履歴特性の定式化 その 2, 日本建築学会論文報告集,

第 320 号, pp.29-35, 1982.10

- 21) 向出静司, 本木洸介, 北川智也, 多田元英: 局部座屈による耐力劣化を考慮した多層鋼構造ラーメン骨組の倒壊解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 685 号, pp.579-588, 2013.3
- 22) 山田哲, 島田侑子: 水平二方向入力を受ける層崩壊型鋼構造多層骨組の倒壊挙動と終局耐力, 日本建築学会構造系論文集, 第 662 号, pp.837-844, 2011.4
- 23) 呉相勲, 山田哲, 他: 梁柱耐力比及び剛性比を考慮した梁降伏型鋼構造多層骨組の損傷分布則, 日本建築学会構造系論文集, 第 506 号, pp.171-177, 1998.4
- 24) 竹内徹, 他: 局部座屈を伴う鋼管ブレースの累積繰返し変形性能, 日本建築学会構造系論文集, 第 608 号, pp.143-150, 2006.10
- 25) 和田章: 靱性確保は損傷覚悟, 鋼構造制震技術の現状と現実と設計指針への期待, 2006 年度日本建築学会大会, 構造部門, パネルディスカッション資料, 2006.9
- 26) 長谷川隆, 他: 角形鋼管柱・H 形鋼梁ラーメン構造の地震応答 その 1~7, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.269-282, 1995.8
- 27) 井上一朗, 小川厚治, 多田元英, 柳原秀和: 角形鋼管柱ラーメン構造部材の塑性変形応答 その 1~2 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.233-240, 1994
- 28) 向出静司, 村上友規, 多田元英: 魚骨型骨組による鋼構造ラーメン骨組の倒壊解析, 日本建築学会構造系論文集, 第 690 号, pp.1523-1532, 2013.8

謝辞

本研究に際して、多くの御指導や御助言、御協力をいただき、感謝を申し上げます。

指導教員である高木次郎准教授に心より感謝いたします。手厚く御指導いただいたことはもちろんですが、本研究は先生と共に作業を進めることも多く、研究に対する熱意や心得を常に感じる事が出来たのは、非常に良い経験となりました。本当にありがとうございました。

高木研究室の皆様には、日々の研究室生活で大変お世話になりました。同期である臼井亮君、松岡舞さん、安田裕俊君には、3年間常に、研究に取り組む姿勢に刺激されてきましたし、楽しい思い出もたくさん共有できたことを嬉しく思います。先輩方には、常に明るく研究室を引っ張っていただき、悩んでいる時もよく励ましていただきました。後輩達とは、残念ながら共同で研究を進める機会は多くありませんでしたが、日々の研究室生活でいつも楽しませてくれていました。

本研究は高木研究室で初めて取り組むテーマという事もあり、不安も多々ありましたが、御協力いただいた皆様のおかげで本論文の執筆に至ることができ、心より感謝いたします。

最後に、大学院進学から2年間の一人暮らしを認めてくれた両親には、本当に多くの心配や迷惑をかけたと思いますが、そのおかげで研究活動に専念することが出来たと共に、自立した生活を送る大変さを改めて実感いたしました。いつも温かく見守り、応援してくれた両親に、心から感謝いたします。

平成 28 年 2 月 8 日

付録

付録1 ダイヤフラム・スチフナ量の算出

7層全体型

| | X軸 | Y軸 | 部材 | A _g [cm ²] | 板厚 t[mm] | 枚数 | 鋼材量[cm ²] | |
|----|-------------------------------------|----|-----|-----------------------------------|----------|----|-----------------------|---------|
| 3節 | X1 | Y4 | C13 | 2601.0 | 22 | 2 | 11444 | |
| | X2 | Y4 | C53 | 2601.0 | 19 | 2 | 9884 | |
| | X3 | Y4 | C53 | 2601.0 | 19 | 2 | 9884 | |
| | X4 | Y4 | C53 | 2601.0 | 19 | 2 | 9884 | |
| | X5 | Y4 | C53 | 2601.0 | 19 | 2 | 9884 | |
| | X6 | Y4 | C13 | 2601.0 | 22 | 2 | 11444 | |
| | X1 | Y3 | C23 | 2601.0 | 22 | 2 | 11444 | |
| | X2 | Y3 | C43 | 4356.0 | 19 | 2 | 16553 | |
| | X3 | Y3 | C43 | 4356.0 | 19 | 2 | 16553 | |
| | X4 | Y3 | C43 | 4356.0 | 19 | 2 | 16553 | |
| | X5 | Y3 | C43 | 4356.0 | 19 | 2 | 16553 | |
| | X6 | Y3 | C23 | 2601.0 | 22 | 2 | 11444 | |
| | X1 | Y2 | C23 | 2601.0 | 22 | 2 | 11444 | |
| | X6 | Y2 | C23 | 2601.0 | 22 | 2 | 11444 | |
| | X1 | Y1 | C13 | 2601.0 | 32 | 2 | 16646 | |
| | X2 | Y1 | C33 | 4356.0 | 32 | 2 | 27878 | |
| | X3 | Y1 | C33 | 4356.0 | 32 | 2 | 27878 | |
| | X4 | Y1 | C33 | 4356.0 | 32 | 2 | 27878 | |
| | X5 | Y1 | C33 | 4356.0 | 32 | 2 | 27878 | |
| | X6 | Y1 | C13 | 2601.0 | 32 | 2 | 16646 | |
| | 計 | | | | | | | 319219 |
| | 2節 | X1 | Y4 | C12 | 2601.0 | 22 | 2 | 11444 |
| | | X2 | Y4 | C52 | 2601.0 | 22 | 2 | 11444 |
| | | X3 | Y4 | C52 | 2601.0 | 22 | 2 | 11444 |
| X4 | | Y4 | C52 | 2601.0 | 22 | 2 | 11444 | |
| X5 | | Y4 | C52 | 2601.0 | 22 | 2 | 11444 | |
| X6 | | Y4 | C12 | 2601.0 | 22 | 2 | 11444 | |
| X1 | | Y3 | C22 | 2601.0 | 28 | 2 | 14566 | |
| X2 | | Y3 | C42 | 4356.0 | 28 | 2 | 24394 | |
| X3 | | Y3 | C42 | 4356.0 | 28 | 2 | 24394 | |
| X4 | | Y3 | C42 | 4356.0 | 28 | 2 | 24394 | |
| X5 | | Y3 | C42 | 4356.0 | 28 | 2 | 24394 | |
| X6 | | Y3 | C22 | 2601.0 | 28 | 2 | 14566 | |
| X1 | | Y2 | C22 | 2601.0 | 22 | 2 | 11444 | |
| X6 | | Y2 | C22 | 2601.0 | 22 | 2 | 11444 | |
| X1 | | Y1 | C12 | 2601.0 | 28 | 2 | 14566 | |
| X2 | | Y1 | C32 | 4356.0 | 28 | 2 | 24394 | |
| X3 | | Y1 | C32 | 4356.0 | 28 | 2 | 24394 | |
| X4 | | Y1 | C32 | 4356.0 | 28 | 2 | 24394 | |
| X5 | | Y1 | C32 | 4356.0 | 28 | 2 | 24394 | |
| X6 | | Y1 | C12 | 2601.0 | 28 | 2 | 14566 | |
| 計 | | | | | | | 344966 | |
| 1節 | | X1 | Y4 | C11 | 2601.0 | 22 | 2 | 11444 |
| | | X2 | Y4 | C51 | 2601.0 | 22 | 2 | 11444 |
| | | X3 | Y4 | C51 | 2601.0 | 22 | 2 | 11444 |
| | X4 | Y4 | C51 | 2601.0 | 22 | 2 | 11444 | |
| | X5 | Y4 | C51 | 2601.0 | 22 | 2 | 11444 | |
| | X6 | Y4 | C11 | 2601.0 | 22 | 2 | 11444 | |
| | X1 | Y3 | C21 | 2601.0 | 42 | 2 | 21848 | |
| | X2 | Y3 | C41 | 4356.0 | 42 | 2 | 36590 | |
| | X3 | Y3 | C41 | 4356.0 | 42 | 2 | 36590 | |
| | X4 | Y3 | C41 | 4356.0 | 42 | 2 | 36590 | |
| | X5 | Y3 | C41 | 4356.0 | 42 | 2 | 36590 | |
| | X6 | Y3 | C21 | 2601.0 | 42 | 2 | 21848 | |
| | X1 | Y2 | C21 | 2601.0 | 22 | 2 | 11444 | |
| | X6 | Y2 | C21 | 2601.0 | 22 | 2 | 11444 | |
| | X1 | Y1 | C11 | 2601.0 | 32 | 2 | 16646 | |
| | X2 | Y1 | C31 | 4356.0 | 32 | 2 | 27878 | |
| | X3 | Y1 | C31 | 4356.0 | 32 | 2 | 27878 | |
| | X4 | Y1 | C31 | 4356.0 | 32 | 2 | 27878 | |
| | X5 | Y1 | C31 | 4356.0 | 32 | 2 | 27878 | |
| | X6 | Y1 | C11 | 2601.0 | 32 | 2 | 16646 | |
| | 計 | | | | | | | 426420 |
| | 総計[m ²] (=1節+2節×3+3節×3) | | | | | | | 2418977 |

7層集約型

| | X軸 | Y軸 | 部材 | A _g [cm ²] | 板厚 t[mm] | 枚数 | 鋼材量[cm ²] | |
|----|-------------------------------------|----|-----|-----------------------------------|----------|----|-----------------------|---------|
| 3節 | X1 | Y4 | C13 | 511.9 | 16 | 2 | 1638 | |
| | X2 | Y4 | C53 | 2257.4 | 22 | 2 | 9932 | |
| | X3 | Y4 | C53 | 2257.4 | 22 | 2 | 9932 | |
| | X4 | Y4 | C53 | 2257.4 | 22 | 2 | 9932 | |
| | X5 | Y4 | C53 | 2257.4 | 22 | 2 | 9932 | |
| | X6 | Y4 | C13 | 511.9 | 16 | 2 | 1638 | |
| | X1 | Y3 | C23 | 1095.1 | 16 | 2 | 3504 | |
| | X2 | Y3 | C43 | 948.7 | 9 | 2 | 1708 | |
| | X3 | Y3 | C43 | 948.7 | 9 | 2 | 1708 | |
| | X4 | Y3 | C43 | 948.7 | 9 | 2 | 1708 | |
| | X5 | Y3 | C43 | 948.7 | 9 | 2 | 1708 | |
| | X6 | Y3 | C23 | 1095.1 | 16 | 2 | 3504 | |
| | X1 | Y2 | C23 | 1095.1 | 16 | 2 | 3504 | |
| | X6 | Y2 | C23 | 1095.1 | 16 | 2 | 3504 | |
| | X1 | Y1 | C13 | 511.9 | 16 | 2 | 1638 | |
| | X2 | Y1 | C33 | 2257.4 | 28 | 2 | 12641 | |
| | X3 | Y1 | C33 | 2257.4 | 28 | 2 | 12641 | |
| | X4 | Y1 | C33 | 2257.4 | 28 | 2 | 12641 | |
| | X5 | Y1 | C33 | 2257.4 | 28 | 2 | 12641 | |
| | X6 | Y1 | C13 | 511.9 | 16 | 2 | 1638 | |
| | 計 | | | | | | | 117694 |
| | 2節 | X1 | Y4 | C12 | 511.9 | 19 | 2 | 1945 |
| | | X2 | Y4 | C52 | 3852.7 | 22 | 2 | 16952 |
| | | X3 | Y4 | C52 | 3852.7 | 22 | 2 | 16952 |
| X4 | | Y4 | C52 | 3852.7 | 22 | 2 | 16952 | |
| X5 | | Y4 | C52 | 3852.7 | 22 | 2 | 16952 | |
| X6 | | Y4 | C12 | 511.9 | 19 | 2 | 1945 | |
| X1 | | Y3 | C22 | 1857.5 | 19 | 2 | 7059 | |
| X2 | | Y3 | C42 | 1063.9 | 9 | 2 | 1915 | |
| X3 | | Y3 | C42 | 1063.9 | 9 | 2 | 1915 | |
| X4 | | Y3 | C42 | 1063.9 | 9 | 2 | 1915 | |
| X5 | | Y3 | C42 | 1063.9 | 9 | 2 | 1915 | |
| X6 | | Y3 | C22 | 1857.5 | 19 | 2 | 7059 | |
| X1 | | Y2 | C22 | 1857.5 | 19 | 2 | 7059 | |
| X6 | | Y2 | C22 | 1857.5 | 19 | 2 | 7059 | |
| X1 | | Y1 | C12 | 511.9 | 19 | 2 | 1945 | |
| X2 | | Y1 | C32 | 3852.7 | 28 | 2 | 21575 | |
| X3 | | Y1 | C32 | 3852.7 | 28 | 2 | 21575 | |
| X4 | | Y1 | C32 | 3852.7 | 28 | 2 | 21575 | |
| X5 | | Y1 | C32 | 3852.7 | 28 | 2 | 21575 | |
| X6 | | Y1 | C12 | 511.9 | 19 | 2 | 1945 | |
| 計 | | | | | | | 197782 | |
| 1節 | | X1 | Y4 | C11 | 645.9 | 16 | 2 | 2067 |
| | | X2 | Y4 | C51 | 3718.8 | 25 | 2 | 18594 |
| | | X3 | Y4 | C51 | 3718.8 | 25 | 2 | 18594 |
| | X4 | Y4 | C51 | 3718.8 | 25 | 2 | 18594 | |
| | X5 | Y4 | C51 | 3718.8 | 25 | 2 | 18594 | |
| | X6 | Y4 | C11 | 645.9 | 16 | 2 | 2067 | |
| | X1 | Y3 | C21 | 2032.8 | 16 | 2 | 6505 | |
| | X2 | Y3 | C41 | 1023.0 | 9 | 2 | 1841 | |
| | X3 | Y3 | C41 | 1023.0 | 9 | 2 | 1841 | |
| | X4 | Y3 | C41 | 1023.0 | 9 | 2 | 1841 | |
| | X5 | Y3 | C41 | 1023.0 | 9 | 2 | 1841 | |
| | X6 | Y3 | C21 | 2032.8 | 16 | 2 | 6505 | |
| | X1 | Y2 | C21 | 2032.8 | 16 | 2 | 6505 | |
| | X6 | Y2 | C21 | 2032.8 | 16 | 2 | 6505 | |
| | X1 | Y1 | C11 | 645.9 | 16 | 2 | 2067 | |
| | X2 | Y1 | C31 | 3718.8 | 28 | 2 | 20826 | |
| | X3 | Y1 | C31 | 3718.8 | 28 | 2 | 20826 | |
| | X4 | Y1 | C31 | 3718.8 | 28 | 2 | 20826 | |
| | X5 | Y1 | C31 | 3718.8 | 28 | 2 | 20826 | |
| | X6 | Y1 | C11 | 645.9 | 16 | 2 | 2067 | |
| | 計 | | | | | | | 199332 |
| | 総計[m ²] (=1節+2節×3+3節×3) | | | | | | | 1145761 |

4層全体型

| | X軸 | Y軸 | 部材 | A _g [cm ²] | 板厚 t[mm] | 枚数 | 鋼材量[cm ³] | |
|--------------------------------|----|----|-----|-----------------------------------|-----------------------------------|----------|-----------------------|-----------------------|
| 2節 | X1 | Y4 | C12 | 2116.0 | 19 | 2 | 8041 | |
| | X2 | Y4 | C52 | 2601.0 | 19 | 2 | 9884 | |
| | X3 | Y4 | C52 | 2601.0 | 19 | 2 | 9884 | |
| | X4 | Y4 | C52 | 2601.0 | 19 | 2 | 9884 | |
| | X5 | Y4 | C52 | 2601.0 | 19 | 2 | 9884 | |
| | X6 | Y4 | C12 | 2116.0 | 19 | 2 | 8041 | |
| | X1 | Y3 | C22 | 1296.0 | 19 | 2 | 4925 | |
| | X2 | Y3 | C42 | 3136.0 | 19 | 2 | 11917 | |
| | X3 | Y3 | C42 | 3136.0 | 19 | 2 | 11917 | |
| | X4 | Y3 | C42 | 3136.0 | 19 | 2 | 11917 | |
| | X5 | Y3 | C42 | 3136.0 | 19 | 2 | 11917 | |
| | X6 | Y3 | C22 | 1296.0 | 19 | 2 | 4925 | |
| | X1 | Y2 | C22 | 1296.0 | 19 | 2 | 4925 | |
| | X6 | Y2 | C22 | 1296.0 | 19 | 2 | 4925 | |
| | X1 | Y1 | C12 | 2116.0 | 28 | 2 | 11850 | |
| | X2 | Y1 | C32 | 3721.0 | 28 | 2 | 20838 | |
| | X3 | Y1 | C32 | 3721.0 | 28 | 2 | 20838 | |
| | X4 | Y1 | C32 | 3721.0 | 28 | 2 | 20838 | |
| | X5 | Y1 | C32 | 3721.0 | 28 | 2 | 20838 | |
| | X6 | Y1 | C12 | 2116.0 | 28 | 2 | 11850 | |
| | 計 | | | | | | | 230033 |
| | | X軸 | Y軸 | 部材 | A _g [cm ²] | 板厚 t[mm] | 枚数 | 鋼材量[cm ³] |
| | 1節 | X1 | Y4 | C11 | 2116.0 | 22 | 2 | 9310 |
| | | X2 | Y4 | C51 | 2601.0 | 22 | 2 | 11444 |
| X3 | | Y4 | C51 | 2601.0 | 22 | 2 | 11444 | |
| X4 | | Y4 | C51 | 2601.0 | 22 | 2 | 11444 | |
| X5 | | Y4 | C51 | 2601.0 | 22 | 2 | 11444 | |
| X6 | | Y4 | C11 | 2116.0 | 22 | 2 | 9310 | |
| X1 | | Y3 | C21 | 1296.0 | 22 | 2 | 5702 | |
| X2 | | Y3 | C41 | 3136.0 | 22 | 2 | 13798 | |
| X3 | | Y3 | C41 | 3136.0 | 22 | 2 | 13798 | |
| X4 | | Y3 | C41 | 3136.0 | 22 | 2 | 13798 | |
| X5 | | Y3 | C41 | 3136.0 | 22 | 2 | 13798 | |
| X6 | | Y3 | C21 | 1296.0 | 22 | 2 | 5702 | |
| X1 | | Y2 | C21 | 1296.0 | 22 | 2 | 5702 | |
| X6 | | Y2 | C21 | 1296.0 | 22 | 2 | 5702 | |
| X1 | | Y1 | C11 | 2116.0 | 25 | 2 | 10580 | |
| X2 | | Y1 | C31 | 3721.0 | 28 | 2 | 20838 | |
| X3 | | Y1 | C31 | 3721.0 | 28 | 2 | 20838 | |
| X4 | | Y1 | C31 | 3721.0 | 28 | 2 | 20838 | |
| X5 | | Y1 | C31 | 3721.0 | 28 | 2 | 20838 | |
| X6 | | Y1 | C11 | 2116.0 | 25 | 2 | 10580 | |
| 計 | | | | | | | 246912 | |
| 總計[m ³] (=1節+2節×3) | | | | | | | 937010 | |

4層集約型

| | X軸 | Y軸 | 部材 | A _g [cm ²] | 板厚 t[mm] | 枚数 | 鋼材量[cm ³] | |
|--------------------------------|----|----|-----|-----------------------------------|-----------------------------------|----------|-----------------------|-----------------------|
| 2節 | X1 | Y4 | C12 | 337.9 | 16 | 2 | 1081 | |
| | X2 | Y4 | C52 | 1644.7 | 22 | 2 | 7237 | |
| | X3 | Y4 | C52 | 1644.7 | 22 | 2 | 7237 | |
| | X4 | Y4 | C52 | 1644.7 | 22 | 2 | 7237 | |
| | X5 | Y4 | C52 | 1644.7 | 22 | 2 | 7237 | |
| | X6 | Y4 | C12 | 337.9 | 16 | 2 | 1081 | |
| | X1 | Y3 | C22 | 779.9 | 16 | 2 | 2496 | |
| | X2 | Y3 | C42 | 645.9 | 9 | 2 | 1163 | |
| | X3 | Y3 | C42 | 645.9 | 9 | 2 | 1163 | |
| | X4 | Y3 | C42 | 645.9 | 9 | 2 | 1163 | |
| | X5 | Y3 | C42 | 645.9 | 9 | 2 | 1163 | |
| | X6 | Y3 | C22 | 779.9 | 16 | 2 | 2496 | |
| | X1 | Y2 | C22 | 779.9 | 16 | 2 | 2496 | |
| | X6 | Y2 | C22 | 779.9 | 16 | 2 | 2496 | |
| | X1 | Y1 | C12 | 337.9 | 16 | 2 | 1081 | |
| | X2 | Y1 | C32 | 1644.7 | 28 | 2 | 9210 | |
| | X3 | Y1 | C32 | 1644.7 | 28 | 2 | 9210 | |
| | X4 | Y1 | C32 | 1644.7 | 28 | 2 | 9210 | |
| | X5 | Y1 | C32 | 1644.7 | 28 | 2 | 9210 | |
| | X6 | Y1 | C12 | 337.9 | 16 | 2 | 1081 | |
| | 計 | | | | | | | 84747 |
| | | X軸 | Y軸 | 部材 | A _g [cm ²] | 板厚 t[mm] | 枚数 | 鋼材量[cm ³] |
| | 1節 | X1 | Y4 | C11 | 320.9 | 16 | 2 | 1027 |
| | | X2 | Y4 | C51 | 2689.9 | 28 | 2 | 15063 |
| X3 | | Y4 | C51 | 2689.9 | 28 | 2 | 15063 | |
| X4 | | Y4 | C51 | 2689.9 | 28 | 2 | 15063 | |
| X5 | | Y4 | C51 | 2689.9 | 28 | 2 | 15063 | |
| X6 | | Y4 | C11 | 320.9 | 16 | 2 | 1027 | |
| X1 | | Y3 | C21 | 727.5 | 16 | 2 | 2328 | |
| X2 | | Y3 | C41 | 762.4 | 9 | 2 | 1372 | |
| X3 | | Y3 | C41 | 762.4 | 9 | 2 | 1372 | |
| X4 | | Y3 | C41 | 762.4 | 9 | 2 | 1372 | |
| X5 | | Y3 | C41 | 762.4 | 9 | 2 | 1372 | |
| X6 | | Y3 | C21 | 727.5 | 16 | 2 | 2328 | |
| X1 | | Y2 | C21 | 727.5 | 16 | 2 | 2328 | |
| X6 | | Y2 | C21 | 727.5 | 16 | 2 | 2328 | |
| X1 | | Y1 | C11 | 320.9 | 16 | 2 | 1027 | |
| X2 | | Y1 | C31 | 2689.9 | 28 | 2 | 15063 | |
| X3 | | Y1 | C31 | 2689.9 | 28 | 2 | 15063 | |
| X4 | | Y1 | C31 | 2689.9 | 28 | 2 | 15063 | |
| X5 | | Y1 | C31 | 2689.9 | 28 | 2 | 15063 | |
| X6 | | Y1 | C11 | 320.9 | 16 | 2 | 1027 | |
| 計 | | | | | | | 139414 | |
| 總計[m ³] (=1節+2節×3) | | | | | | | 393655 | |

10層全体型

| | X軸 | Y軸 | 部材 | A _s [cm ²] | 板厚 t[mm] | 枚数 | 鋼材量[cm ³] | |
|----|----|----|-----|-----------------------------------|----------|----|-----------------------|--------|
| 4節 | X1 | Y4 | C14 | 2601.0 | 22 | 2 | 11444 | |
| | X2 | Y4 | C54 | 3136.0 | 22 | 2 | 13798 | |
| | X3 | Y4 | C54 | 3136.0 | 22 | 2 | 13798 | |
| | X4 | Y4 | C54 | 3136.0 | 22 | 2 | 13798 | |
| | X5 | Y4 | C54 | 3136.0 | 22 | 2 | 13798 | |
| | X6 | Y4 | C14 | 2601.0 | 22 | 2 | 11444 | |
| | X1 | Y3 | C24 | 3136.0 | 22 | 2 | 13798 | |
| | X2 | Y3 | C44 | 4356.0 | 22 | 2 | 19166 | |
| | X3 | Y3 | C44 | 4356.0 | 22 | 2 | 19166 | |
| | X4 | Y3 | C44 | 4356.0 | 22 | 2 | 19166 | |
| | X5 | Y3 | C44 | 4356.0 | 22 | 2 | 19166 | |
| | X6 | Y3 | C24 | 3136.0 | 22 | 2 | 13798 | |
| | X1 | Y2 | C24 | 3136.0 | 22 | 2 | 13798 | |
| | X6 | Y2 | C24 | 3136.0 | 22 | 2 | 13798 | |
| | X1 | Y1 | C14 | 2601.0 | 32 | 2 | 16646 | |
| | X2 | Y1 | C34 | 5041.0 | 32 | 2 | 32262 | |
| | X3 | Y1 | C34 | 5041.0 | 32 | 2 | 32262 | |
| | X4 | Y1 | C34 | 5041.0 | 32 | 2 | 32262 | |
| | X5 | Y1 | C34 | 5041.0 | 32 | 2 | 32262 | |
| | X6 | Y1 | C14 | 2601.0 | 32 | 2 | 16646 | |
| | 計 | | | | | | | 372284 |
| | 3節 | X1 | Y4 | C13 | 2601.0 | 25 | 2 | 13005 |
| | | X2 | Y4 | C53 | 3136.0 | 22 | 2 | 13798 |
| | | X3 | Y4 | C53 | 3136.0 | 22 | 2 | 13798 |
| X4 | | Y4 | C53 | 3136.0 | 22 | 2 | 13798 | |
| X5 | | Y4 | C53 | 3136.0 | 22 | 2 | 13798 | |
| X6 | | Y4 | C13 | 2601.0 | 25 | 2 | 13005 | |
| X1 | | Y3 | C23 | 3136.0 | 32 | 2 | 20070 | |
| X2 | | Y3 | C43 | 4356.0 | 32 | 2 | 27878 | |
| X3 | | Y3 | C43 | 4356.0 | 32 | 2 | 27878 | |
| X4 | | Y3 | C43 | 4356.0 | 32 | 2 | 27878 | |
| X5 | | Y3 | C43 | 4356.0 | 32 | 2 | 27878 | |
| X6 | | Y3 | C23 | 3136.0 | 32 | 2 | 20070 | |
| X1 | | Y2 | C23 | 3136.0 | 25 | 2 | 15680 | |
| X6 | | Y2 | C23 | 3136.0 | 25 | 2 | 15680 | |
| X1 | | Y1 | C13 | 2601.0 | 42 | 2 | 21848 | |
| X2 | | Y1 | C33 | 5041.0 | 42 | 2 | 42344 | |
| X3 | | Y1 | C33 | 5041.0 | 42 | 2 | 42344 | |
| X4 | | Y1 | C33 | 5041.0 | 42 | 2 | 42344 | |
| X5 | | Y1 | C33 | 5041.0 | 42 | 2 | 42344 | |
| X6 | | Y1 | C13 | 2601.0 | 42 | 2 | 21848 | |
| 計 | | | | | | | 477292 | |
| 2節 | | X1 | Y4 | C12 | 2601.0 | 25 | 2 | 13005 |
| | | X2 | Y4 | C52 | 3136.0 | 25 | 2 | 15680 |
| | | X3 | Y4 | C52 | 3136.0 | 25 | 2 | 15680 |
| | X4 | Y4 | C52 | 3136.0 | 25 | 2 | 15680 | |
| | X5 | Y4 | C52 | 3136.0 | 25 | 2 | 15680 | |
| | X6 | Y4 | C12 | 2601.0 | 25 | 2 | 13005 | |
| | X1 | Y3 | C22 | 3136.0 | 25 | 2 | 15680 | |
| | X2 | Y3 | C42 | 4356.0 | 25 | 2 | 21780 | |
| | X3 | Y3 | C42 | 4356.0 | 25 | 2 | 21780 | |
| | X4 | Y3 | C42 | 4356.0 | 25 | 2 | 21780 | |
| | X5 | Y3 | C42 | 4356.0 | 25 | 2 | 21780 | |
| | X6 | Y3 | C22 | 3136.0 | 25 | 2 | 15680 | |
| | X1 | Y2 | C22 | 3136.0 | 22 | 2 | 13798 | |
| | X6 | Y2 | C22 | 3136.0 | 22 | 2 | 13798 | |
| | X1 | Y1 | C12 | 2601.0 | 45 | 2 | 23409 | |
| | X2 | Y1 | C32 | 5041.0 | 45 | 2 | 45369 | |
| | X3 | Y1 | C32 | 5041.0 | 45 | 2 | 45369 | |
| | X4 | Y1 | C32 | 5041.0 | 45 | 2 | 45369 | |
| | X5 | Y1 | C32 | 5041.0 | 45 | 2 | 45369 | |
| | X6 | Y1 | C12 | 2601.0 | 45 | 2 | 23409 | |
| | 計 | | | | | | | 463101 |

| | X軸 | Y軸 | 部材 | A _s [cm ²] | 板厚 t[mm] | 枚数 | 鋼材量[cm ³] | |
|----|--|----|-----|-----------------------------------|----------|----|-----------------------|---------|
| 1節 | X1 | Y4 | C11 | 2601.0 | 25 | 2 | 13005 | |
| | X2 | Y4 | C51 | 3136.0 | 25 | 2 | 15680 | |
| | X3 | Y4 | C51 | 3136.0 | 25 | 2 | 15680 | |
| | X4 | Y4 | C51 | 3136.0 | 25 | 2 | 15680 | |
| | X5 | Y4 | C51 | 3136.0 | 25 | 2 | 15680 | |
| | X6 | Y4 | C11 | 2601.0 | 25 | 2 | 13005 | |
| | X1 | Y3 | C21 | 3136.0 | 32 | 2 | 20070 | |
| | X2 | Y3 | C41 | 4356.0 | 32 | 2 | 27878 | |
| | X3 | Y3 | C41 | 4356.0 | 32 | 2 | 27878 | |
| | X4 | Y3 | C41 | 4356.0 | 32 | 2 | 27878 | |
| | X5 | Y3 | C41 | 4356.0 | 32 | 2 | 27878 | |
| | X6 | Y3 | C21 | 3136.0 | 32 | 2 | 20070 | |
| | X1 | Y2 | C21 | 3136.0 | 25 | 2 | 15680 | |
| | X6 | Y2 | C21 | 3136.0 | 25 | 2 | 15680 | |
| | X1 | Y1 | C11 | 2601.0 | 45 | 2 | 23409 | |
| | X2 | Y1 | C31 | 5041.0 | 45 | 2 | 45369 | |
| | X3 | Y1 | C31 | 5041.0 | 45 | 2 | 45369 | |
| | X4 | Y1 | C31 | 5041.0 | 45 | 2 | 45369 | |
| | X5 | Y1 | C31 | 5041.0 | 45 | 2 | 45369 | |
| | X6 | Y1 | C11 | 2601.0 | 45 | 2 | 23409 | |
| | 計 | | | | | | | 500038 |
| | 総計[m ³] (=1節+2節×3+3節×3+4節×3) | | | | | | | 4438070 |

10 層集約型

| | X 軸 | Y 軸 | 部材 | A _s [cm ²] | 板厚 t[mm] | 枚数 | 鋼材量[cm ³] | |
|-----|-----|-----|-----|-----------------------------------|----------|----|-----------------------|--------|
| 4 節 | X1 | Y4 | C14 | 1755.1 | 22 | 2 | 7723 | |
| | X2 | Y4 | C54 | 2964.0 | 32 | 2 | 18970 | |
| | X3 | Y4 | C54 | 2964.0 | 32 | 2 | 18970 | |
| | X4 | Y4 | C54 | 2964.0 | 32 | 2 | 18970 | |
| | X5 | Y4 | C54 | 2964.0 | 32 | 2 | 18970 | |
| | X6 | Y4 | C14 | 1755.1 | 22 | 2 | 7723 | |
| | X1 | Y3 | C24 | 1543.1 | 22 | 2 | 6790 | |
| | X2 | Y3 | C44 | 1082.9 | 9 | 2 | 1949 | |
| | X3 | Y3 | C44 | 1082.9 | 9 | 2 | 1949 | |
| | X4 | Y3 | C44 | 1082.9 | 9 | 2 | 1949 | |
| | X5 | Y3 | C44 | 1082.9 | 9 | 2 | 1949 | |
| | X6 | Y3 | C24 | 1543.1 | 22 | 2 | 6790 | |
| | X1 | Y2 | C24 | 1543.1 | 22 | 2 | 6790 | |
| | X6 | Y2 | C24 | 1543.1 | 22 | 2 | 6790 | |
| | X1 | Y1 | C14 | 1755.1 | 22 | 2 | 7723 | |
| | X2 | Y1 | C34 | 2964.0 | 32 | 2 | 18970 | |
| | X3 | Y1 | C34 | 2964.0 | 32 | 2 | 18970 | |
| | X4 | Y1 | C34 | 2964.0 | 32 | 2 | 18970 | |
| | X5 | Y1 | C34 | 2964.0 | 32 | 2 | 18970 | |
| | X6 | Y1 | C14 | 1755.1 | 22 | 2 | 7723 | |
| | 計 | | | | | | | 217602 |
| | 3 節 | X1 | Y4 | C13 | 2604.0 | 22 | 2 | 11458 |
| | | X2 | Y4 | C53 | 3825.0 | 28 | 2 | 21420 |
| | | X3 | Y4 | C53 | 3825.0 | 28 | 2 | 21420 |
| X4 | | Y4 | C53 | 3825.0 | 28 | 2 | 21420 | |
| X5 | | Y4 | C53 | 3825.0 | 28 | 2 | 21420 | |
| X6 | | Y4 | C13 | 2604.0 | 22 | 2 | 11458 | |
| X1 | | Y3 | C23 | 2522.2 | 22 | 2 | 11098 | |
| X2 | | Y3 | C43 | 1223.6 | 9 | 2 | 2202 | |
| X3 | | Y3 | C43 | 1223.6 | 9 | 2 | 2202 | |
| X4 | | Y3 | C43 | 1223.6 | 9 | 2 | 2202 | |
| X5 | | Y3 | C43 | 1223.6 | 9 | 2 | 2202 | |
| X6 | | Y3 | C23 | 2522.2 | 22 | 2 | 11098 | |
| X1 | | Y2 | C23 | 2522.2 | 22 | 2 | 11098 | |
| X6 | | Y2 | C23 | 2522.2 | 22 | 2 | 11098 | |
| X1 | | Y1 | C13 | 2604.0 | 22 | 2 | 11458 | |
| X2 | | Y1 | C33 | 3825.0 | 28 | 2 | 21420 | |
| X3 | | Y1 | C33 | 3825.0 | 28 | 2 | 21420 | |
| X4 | | Y1 | C33 | 3825.0 | 28 | 2 | 21420 | |
| X5 | | Y1 | C33 | 3825.0 | 28 | 2 | 21420 | |
| X6 | | Y1 | C13 | 2604.0 | 22 | 2 | 11458 | |
| 計 | | | | | | | | 270391 |
| 2 節 | | X1 | Y4 | C12 | 2350.1 | 22 | 2 | 10340 |
| | | X2 | Y4 | C52 | 5587.5 | 25 | 2 | 27938 |
| | | X3 | Y4 | C52 | 5587.5 | 25 | 2 | 27938 |
| | X4 | Y4 | C52 | 5587.5 | 25 | 2 | 27938 | |
| | X5 | Y4 | C52 | 5587.5 | 25 | 2 | 27938 | |
| | X6 | Y4 | C12 | 2350.1 | 22 | 2 | 10340 | |
| | X1 | Y3 | C22 | 3334.7 | 22 | 2 | 14673 | |
| | X2 | Y3 | C42 | 1358.0 | 9 | 2 | 2444 | |
| | X3 | Y3 | C42 | 1358.0 | 9 | 2 | 2444 | |
| | X4 | Y3 | C42 | 1358.0 | 9 | 2 | 2444 | |
| | X5 | Y3 | C42 | 1358.0 | 9 | 2 | 2444 | |
| | X6 | Y3 | C22 | 3334.7 | 22 | 2 | 14673 | |
| | X1 | Y2 | C22 | 3334.7 | 22 | 2 | 14673 | |
| | X6 | Y2 | C22 | 3334.7 | 22 | 2 | 14673 | |
| | X1 | Y1 | C12 | 2350.1 | 22 | 2 | 10340 | |
| | X2 | Y1 | C32 | 5587.5 | 28 | 2 | 31290 | |
| | X3 | Y1 | C32 | 5587.5 | 28 | 2 | 31290 | |
| | X4 | Y1 | C32 | 5587.5 | 28 | 2 | 31290 | |
| | X5 | Y1 | C32 | 5587.5 | 28 | 2 | 31290 | |
| | X6 | Y1 | C12 | 2350.1 | 22 | 2 | 10340 | |
| | 計 | | | | | | | 346739 |

| | X 軸 | Y 軸 | 部材 | A _s [cm ²] | 板厚 t[mm] | 枚数 | 鋼材量[cm ³] | | |
|-----|----------------------|--------------------------|-----|-----------------------------------|----------|----|-----------------------|--------|---------|
| 1 節 | X1 | Y4 | C11 | 3766.0 | 16 | 2 | 12051 | | |
| | X2 | Y4 | C51 | 5872.5 | 25 | 2 | 29363 | | |
| | X3 | Y4 | C51 | 5872.5 | 25 | 2 | 29363 | | |
| | X4 | Y4 | C51 | 5872.5 | 25 | 2 | 29363 | | |
| | X5 | Y4 | C51 | 5872.5 | 25 | 2 | 29363 | | |
| | X6 | Y4 | C11 | 3766.0 | 16 | 2 | 12051 | | |
| | X1 | Y3 | C21 | 4222.2 | 16 | 2 | 13511 | | |
| | X2 | Y3 | C41 | 1334.7 | 9 | 2 | 2402 | | |
| | X3 | Y3 | C41 | 1334.7 | 9 | 2 | 2402 | | |
| | X4 | Y3 | C41 | 1334.7 | 9 | 2 | 2402 | | |
| | X5 | Y3 | C41 | 1334.7 | 9 | 2 | 2402 | | |
| | X6 | Y3 | C21 | 4222.2 | 16 | 2 | 13511 | | |
| | X1 | Y2 | C21 | 4222.2 | 16 | 2 | 13511 | | |
| | X6 | Y2 | C21 | 4222.2 | 16 | 2 | 13511 | | |
| | X1 | Y1 | C11 | 3766.0 | 16 | 2 | 12051 | | |
| | X2 | Y1 | C31 | 5872.5 | 28 | 2 | 32886 | | |
| | X3 | Y1 | C31 | 5872.5 | 28 | 2 | 32886 | | |
| | X4 | Y1 | C31 | 5872.5 | 28 | 2 | 32886 | | |
| | X5 | Y1 | C31 | 5872.5 | 28 | 2 | 32886 | | |
| | X6 | Y1 | C11 | 3766.0 | 16 | 2 | 12051 | | |
| | 計 | | | | | | | 360852 | |
| | 總計 [m ³] | (=1 節+2 節×3+3 節×3+4 節×3) | | | | | | | 2865049 |

付録 2 溶接量

柱（ダイヤフラム、スチフナ）については、柱梁接合部 1 か所あたりの溶接長さを、梁については、1 部材あたり（梁の両端部の合計）の溶接長さを示す。

| | | | |
|-----------|---|-----------------|---------------------------------|
| t_b | : | 角形鋼管柱板厚 | |
| t_f | : | フランジ板厚 | |
| t_w | : | ウェブ板厚 | |
| t_s | : | スチフナ板厚 | |
| L_b | : | 角形鋼管の溶接長さ | $= ((h + b) \times 2) \times 4$ |
| L_f | : | フランジ部分の溶接長さ | $= b \times 4$ |
| L_w | : | ウェブ部分の溶接長さ | $= (h - t_f \times 2) \times 2$ |
| k_{HT1} | : | 換算係数（レ型 T 継手溶接） | |
| k_{F2} | : | 換算係数（両面すみ肉溶接） | |
| k_{HB2} | : | 換算係数（レ型突合せ溶接） | |

7層全体型

| 柱 | | | | | | | |
|----|----|-----|---------------------|---------------------|------------------|---------|------|
| X軸 | Y軸 | 部材 | t _b [mm] | L _b [mm] | k _{HT1} | 換算長さ[m] | |
| 3節 | | | | | | | |
| X1 | Y4 | C13 | 12 | 7200 | 6.43 | 46.3 | |
| X2 | Y4 | C53 | 12 | 7200 | 6.43 | 46.3 | |
| X3 | Y4 | C53 | 12 | 7200 | 6.43 | 46.3 | |
| X4 | Y4 | C53 | 12 | 7200 | 6.43 | 46.3 | |
| X5 | Y4 | C53 | 12 | 7200 | 6.43 | 46.3 | |
| X6 | Y4 | C13 | 12 | 7200 | 6.43 | 46.3 | |
| X1 | Y3 | C23 | 12 | 7200 | 6.43 | 46.3 | |
| X2 | Y3 | C43 | 16 | 9600 | 9.84 | 94.5 | |
| X3 | Y3 | C43 | 16 | 9600 | 9.84 | 94.5 | |
| X4 | Y3 | C43 | 16 | 9600 | 9.84 | 94.5 | |
| X5 | Y3 | C43 | 16 | 9600 | 9.84 | 94.5 | |
| X6 | Y3 | C23 | 12 | 7200 | 6.43 | 46.3 | |
| X1 | Y2 | C23 | 12 | 7200 | 6.43 | 46.3 | |
| X6 | Y2 | C23 | 12 | 7200 | 6.43 | 46.3 | |
| X1 | Y1 | C13 | 12 | 7200 | 6.43 | 46.3 | |
| X2 | Y1 | C33 | 16 | 9600 | 9.84 | 94.5 | |
| X3 | Y1 | C33 | 16 | 9600 | 9.84 | 94.5 | |
| X4 | Y1 | C33 | 16 | 9600 | 9.84 | 94.5 | |
| X5 | Y1 | C33 | 16 | 9600 | 9.84 | 94.5 | |
| X6 | Y1 | C13 | 12 | 7200 | 6.43 | 46.3 | |
| 計 | | | | | | | 1311 |
| 2節 | | | | | | | |
| X1 | Y4 | C12 | 12 | 7200 | 6.43 | 46.3 | |
| X2 | Y4 | C52 | 12 | 7200 | 6.43 | 46.3 | |
| X3 | Y4 | C52 | 12 | 7200 | 6.43 | 46.3 | |
| X4 | Y4 | C52 | 12 | 7200 | 6.43 | 46.3 | |
| X5 | Y4 | C52 | 12 | 7200 | 6.43 | 46.3 | |
| X6 | Y4 | C12 | 12 | 7200 | 6.43 | 46.3 | |
| X1 | Y3 | C22 | 16 | 7200 | 9.84 | 70.8 | |
| X2 | Y3 | C42 | 16 | 9600 | 9.84 | 94.5 | |
| X3 | Y3 | C42 | 16 | 9600 | 9.84 | 94.5 | |
| X4 | Y3 | C42 | 16 | 9600 | 9.84 | 94.5 | |
| X5 | Y3 | C42 | 16 | 9600 | 9.84 | 94.5 | |
| X6 | Y3 | C22 | 16 | 7200 | 9.84 | 70.8 | |
| X1 | Y2 | C22 | 16 | 7200 | 9.84 | 70.8 | |
| X6 | Y2 | C22 | 16 | 7200 | 9.84 | 70.8 | |
| X1 | Y1 | C12 | 12 | 7200 | 6.43 | 46.3 | |
| X2 | Y1 | C32 | 16 | 9600 | 9.84 | 94.5 | |
| X3 | Y1 | C32 | 16 | 9600 | 9.84 | 94.5 | |
| X4 | Y1 | C32 | 16 | 9600 | 9.84 | 94.5 | |
| X5 | Y1 | C32 | 16 | 9600 | 9.84 | 94.5 | |
| X6 | Y1 | C12 | 12 | 7200 | 6.43 | 46.3 | |
| 計 | | | | | | | 1409 |
| 1節 | | | | | | | |
| X1 | Y4 | C11 | 12 | 7200 | 6.43 | 46.3 | |
| X2 | Y4 | C51 | 12 | 7200 | 6.43 | 46.3 | |
| X3 | Y4 | C51 | 12 | 7200 | 6.43 | 46.3 | |
| X4 | Y4 | C51 | 12 | 7200 | 6.43 | 46.3 | |
| X5 | Y4 | C51 | 12 | 7200 | 6.43 | 46.3 | |
| X6 | Y4 | C11 | 12 | 7200 | 6.43 | 46.3 | |
| X1 | Y3 | C21 | 25 | 7200 | 19.85 | 142.9 | |
| X2 | Y3 | C41 | 22 | 9600 | 16.15 | 155.0 | |
| X3 | Y3 | C41 | 22 | 9600 | 16.15 | 155.0 | |
| X4 | Y3 | C41 | 22 | 9600 | 16.15 | 155.0 | |
| X5 | Y3 | C41 | 22 | 9600 | 16.15 | 155.0 | |
| X6 | Y3 | C21 | 25 | 7200 | 19.85 | 142.9 | |
| X1 | Y2 | C21 | 25 | 7200 | 19.85 | 142.9 | |
| X6 | Y2 | C21 | 25 | 7200 | 19.85 | 142.9 | |
| X1 | Y1 | C11 | 12 | 7200 | 6.43 | 46.3 | |
| X2 | Y1 | C31 | 16 | 9600 | 9.84 | 94.5 | |
| X3 | Y1 | C31 | 16 | 9600 | 9.84 | 94.5 | |
| X4 | Y1 | C31 | 16 | 9600 | 9.84 | 94.5 | |
| X5 | Y1 | C31 | 16 | 9600 | 9.84 | 94.5 | |
| X6 | Y1 | C11 | 12 | 7200 | 6.43 | 46.3 | |
| 計 | | | | | | | 1940 |

剛接合梁

| X軸 | Y軸 | 部材 | t _r [mm] | t _s [mm] | L _r [mm] | k _r | L _s [mm] | k _s | 換算長さ[m] |
|-----|-----|------|---------------------|---------------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------|
| 3節 | | | | | | | | | |
| X2' | Y1 | GX13 | 25 | 9 | 800 | 19.65 | 1000 | 2.72 | 18.4 |
| X3' | Y1 | GX13 | 25 | 9 | 800 | 19.65 | 1000 | 2.72 | 18.4 |
| X4' | Y1 | GX13 | 25 | 9 | 800 | 19.65 | 1000 | 2.72 | 18.4 |
| X1 | Y1' | GY13 | 16 | 9 | 800 | 9.99 | 1036 | 2.72 | 10.8 |
| X6 | Y1' | GY13 | 16 | 9 | 800 | 9.99 | 1036 | 2.72 | 10.8 |
| X1 | Y2' | GY13 | 16 | 9 | 800 | 9.99 | 1036 | 2.72 | 10.8 |
| X6 | Y2' | GY13 | 16 | 9 | 800 | 9.99 | 1036 | 2.72 | 10.8 |
| X1 | Y4' | GY13 | 16 | 9 | 800 | 9.99 | 1036 | 2.72 | 10.8 |
| X6 | Y4' | GY13 | 16 | 9 | 800 | 9.99 | 1036 | 2.72 | 10.8 |
| X2' | Y4 | GX33 | 12 | 9 | 800 | 7 | 1052 | 2.72 | 8.5 |
| X3' | Y4 | GX33 | 12 | 9 | 800 | 7 | 1052 | 2.72 | 8.5 |
| X4' | Y4 | GX33 | 12 | 9 | 800 | 7 | 1052 | 2.72 | 8.5 |
| X1' | Y1 | GX13 | 25 | 9 | 800 | 19.65 | 1000 | 2.72 | 18.4 |
| X5' | Y1 | GX13 | 25 | 9 | 800 | 19.65 | 1000 | 2.72 | 18.4 |
| X2 | Y1' | GY33 | 22 | 9 | 1000 | 16.88 | 1012 | 2.72 | 19.6 |
| X3 | Y1' | GY33 | 22 | 9 | 1000 | 16.88 | 1012 | 2.72 | 19.6 |
| X4 | Y1' | GY33 | 22 | 9 | 1000 | 16.88 | 1012 | 2.72 | 19.6 |
| X5 | Y1' | GY33 | 22 | 9 | 1000 | 16.88 | 1012 | 2.72 | 19.6 |
| X1' | Y3 | GX23 | 12 | 9 | 800 | 7 | 1052 | 2.72 | 8.5 |
| X2' | Y3 | GX23 | 12 | 9 | 800 | 7 | 1052 | 2.72 | 8.5 |
| X3' | Y3 | GX23 | 12 | 9 | 800 | 7 | 1052 | 2.72 | 8.5 |
| X4' | Y3 | GX23 | 12 | 9 | 800 | 7 | 1052 | 2.72 | 8.5 |
| X5' | Y3 | GX23 | 12 | 9 | 800 | 7 | 1052 | 2.72 | 8.5 |
| X1' | Y4 | GX33 | 12 | 9 | 800 | 7 | 1052 | 2.72 | 8.5 |
| X5' | Y4 | GX33 | 12 | 9 | 800 | 7 | 1052 | 2.72 | 8.5 |
| 計 | | | | | | | | | 320.2 |
| 2節 | | | | | | | | | |
| X軸 | Y軸 | 部材 | t _r [mm] | t _s [mm] | L _r [mm] | k _r | L _s [mm] | k _s | 換算長さ[m] |
| X2' | Y1 | GX12 | 22 | 12 | 1200 | 16.88 | 1312 | 4.50 | 26.2 |
| X3' | Y1 | GX12 | 22 | 12 | 1200 | 16.88 | 1312 | 4.50 | 26.2 |
| X4' | Y1 | GX12 | 22 | 12 | 1200 | 16.88 | 1312 | 4.50 | 26.2 |
| X1 | Y1' | GY12 | 16 | 12 | 800 | 9.99 | 1336 | 4.50 | 14.0 |
| X6 | Y1' | GY12 | 16 | 12 | 800 | 9.99 | 1336 | 4.50 | 14.0 |
| X1 | Y2' | GY12 | 16 | 12 | 800 | 9.99 | 1336 | 4.50 | 14.0 |
| X6 | Y2' | GY12 | 16 | 12 | 800 | 9.99 | 1336 | 4.50 | 14.0 |
| X1 | Y4' | GY12 | 16 | 12 | 800 | 9.99 | 1336 | 4.50 | 14.0 |
| X6 | Y4' | GY12 | 16 | 12 | 800 | 9.99 | 1336 | 4.50 | 14.0 |
| X2' | Y4 | GX32 | 16 | 12 | 800 | 9.99 | 1336 | 4.50 | 14.0 |
| X3' | Y4 | GX32 | 16 | 12 | 800 | 9.99 | 1336 | 4.50 | 14.0 |
| X4' | Y4 | GX32 | 16 | 12 | 800 | 9.99 | 1336 | 4.50 | 14.0 |
| X1' | Y1 | GX12 | 22 | 12 | 1200 | 16.88 | 1312 | 4.50 | 26.2 |
| X5' | Y1 | GX12 | 22 | 12 | 1200 | 16.88 | 1312 | 4.50 | 26.2 |
| X2 | Y1' | GY32 | 19 | 12 | 800 | 12.33 | 1324 | 4.50 | 15.8 |
| X3 | Y1' | GY32 | 19 | 12 | 800 | 12.33 | 1324 | 4.50 | 15.8 |
| X4 | Y1' | GY32 | 19 | 12 | 800 | 12.33 | 1324 | 4.50 | 15.8 |
| X5 | Y1' | GY32 | 19 | 12 | 800 | 12.33 | 1324 | 4.50 | 15.8 |
| X1' | Y3 | GX22 | 22 | 12 | 800 | 16.88 | 1312 | 4.50 | 19.4 |
| X2' | Y3 | GX22 | 22 | 12 | 800 | 16.88 | 1312 | 4.50 | 19.4 |
| X3' | Y3 | GX22 | 22 | 12 | 800 | 16.88 | 1312 | 4.50 | 19.4 |
| X4' | Y3 | GX22 | 22 | 12 | 800 | 16.88 | 1312 | 4.50 | 19.4 |
| X5' | Y3 | GX22 | 22 | 12 | 800 | 16.88 | 1312 | 4.50 | 19.4 |
| X1' | Y4 | GX32 | 16 | 12 | 800 | 9.99 | 1336 | 4.50 | 14.0 |
| X5' | Y4 | GX32 | 16 | 12 | 800 | 9.99 | 1336 | 4.50 | 14.0 |
| 計 | | | | | | | | | 445.2 |
| 1節 | | | | | | | | | |
| X軸 | Y軸 | 部材 | t _r [mm] | t _s [mm] | L _r [mm] | k _r | L _s [mm] | k _s | 換算長さ[m] |
| X2' | Y1 | GX11 | 25 | 12 | 1200 | 19.65 | 1300 | 4.50 | 29.4 |
| X3' | Y1 | GX11 | 25 | 12 | 1200 | 19.65 | 1300 | 4.50 | 29.4 |
| X4' | Y1 | GX11 | 25 | 12 | 1200 | 19.65 | 1300 | 4.50 | 29.4 |
| X1 | Y1' | GY11 | 16 | 12 | 800 | 9.99 | 1336 | 4.50 | 14.0 |
| X6 | Y1' | GY11 | 16 | 12 | 800 | 9.99 | 1336 | 4.50 | 14.0 |
| X1 | Y2' | GY11 | 16 | 12 | 800 | 9.99 | 1336 | 4.50 | 14.0 |
| X6 | Y2' | GY11 | 16 | 12 | 800 | 9.99 | 1336 | 4.50 | 14.0 |
| X1 | Y4' | GY11 | 16 | 12 | 800 | 9.99 | 1336 | 4.50 | 14.0 |
| X6 | Y4' | GY11 | 16 | 12 | 800 | 9.99 | 1336 | 4.50 | 14.0 |
| X2' | Y4 | GX31 | 16 | 12 | 800 | 9.99 | 1336 | 4.50 | 14.0 |
| X3' | Y4 | GX31 | 16 | 12 | 800 | 9.99 | 1336 | 4.50 | 14.0 |
| X4' | Y4 | GX31 | 16 | 12 | 800 | 9.99 | 1336 | 4.50 | 14.0 |
| X1' | Y1 | GX11 | 25 | 12 | 1200 | 19.65 | 1300 | 4.50 | 29.4 |
| X5' | Y1 | GX11 | 25 | 12 | 1200 | 19.65 | 1300 | 4.50 | 29.4 |
| X2 | Y1' | GY31 | 19 | 12 | 800 | 12.33 | 1324 | 4.50 | 15.8 |
| X3 | Y1' | GY31 | 19 | 12 | 800 | 12.33 | 1324 | 4.50 | 15.8 |
| X4 | Y1' | GY31 | 19 | 12 | 800 | 12.33 | 1324 | 4.50 | 15.8 |
| X5 | Y1' | GY31 | 19 | 12 | 800 | 12.33 | 1324 | 4.50 | 15.8 |
| X1' | Y3 | GX21 | 36 | 12 | 1000 | 32.25 | 1256 | 4.50 | 37.9 |
| X2' | Y3 | GX21 | 36 | 12 | 1000 | 32.25 | 1256 | 4.50 | 37.9 |
| X3' | Y3 | GX21 | 36 | 12 | 1000 | 32.25 | 1256 | 4.50 | 37.9 |
| X4' | Y3 | GX21 | 36 | 12 | 1000 | 32.25 | 1256 | 4.50 | 37.9 |
| X5' | Y3 | GX21 | 36 | 12 | 1000 | 32.25 | 1256 | 4.50 | 37.9 |
| X1' | Y4 | GX31 | 16 | 12 | 800 | 9.99 | 1336 | 4.50 | 14.0 |
| X5' | Y4 | GX31 | 16 | 12 | 800 | 9.99 | 1336 | 4.50 | 14.0 |
| 計 | | | | | | | | | 554.0 |

7層集約型

| 柱 | | X軸 | Y軸 | 部材 | t _s [mm] | L _r [mm] | k _{F2} /k _{HR} | L _s [mm] | k _{F2} | 換算長さ[m] |
|----|----|-----|-----|-----|---------------------|---------------------|----------------------------------|---------------------|-----------------|---------|
| 3節 | X1 | Y4 | C13 | 16 | 764 | 9.8 | 107 | 8.0 | 16.1 | |
| | X2 | Y4 | C53 | 22 | 111 | 16. | 324 | 6.7 | 39.8 | |
| | X3 | Y4 | C53 | 22 | 111 | 16. | 324 | 6.7 | 39.8 | |
| | X4 | Y4 | C53 | 22 | 111 | 16. | 324 | 6.7 | 39.8 | |
| | X5 | Y4 | C53 | 22 | 111 | 16. | 324 | 6.7 | 39.8 | |
| | X6 | Y4 | C13 | 16 | 764 | 9.8 | 107 | 8.0 | 16.1 | |
| | X1 | Y3 | C23 | 16 | 936 | 9.8 | 187 | 8.0 | 24.2 | |
| | X2 | Y3 | C43 | 9 | 116 | 2.7 | 130 | 2.7 | 6.7 | |
| | X3 | Y3 | C43 | 9 | 116 | 2.7 | 130 | 2.7 | 6.7 | |
| | X4 | Y3 | C43 | 9 | 116 | 2.7 | 130 | 2.7 | 6.7 | |
| | X5 | Y3 | C43 | 9 | 116 | 2.7 | 130 | 2.7 | 6.7 | |
| | X6 | Y3 | C23 | 16 | 936 | 9.8 | 187 | 8.0 | 24.2 | |
| | X1 | Y2 | C23 | 16 | 936 | 9.8 | 187 | 8.0 | 24.2 | |
| | X6 | Y2 | C23 | 16 | 936 | 9.8 | 187 | 8.0 | 24.2 | |
| | X1 | Y1 | C13 | 16 | 764 | 9.8 | 107 | 8.0 | 16.1 | |
| | X2 | Y1 | C33 | 22 | 111 | 16. | 324 | 6.7 | 39.8 | |
| | X3 | Y1 | C33 | 22 | 111 | 16. | 324 | 6.7 | 39.8 | |
| | X4 | Y1 | C33 | 22 | 111 | 16. | 324 | 6.7 | 39.8 | |
| X5 | Y1 | C33 | 22 | 111 | 16. | 324 | 6.7 | 39.8 | | |
| X6 | Y1 | C13 | 16 | 764 | 9.8 | 107 | 8.0 | 16.1 | | |
| 計 | | | | | | | | | | 506.3 |
| 2節 | X1 | Y4 | C12 | 19 | 764 | 12. | 107 | 4.8 | 14.9 | |
| | X2 | Y4 | C52 | 22 | 191 | 16. | 322 | 6.7 | 52.5 | |
| | X3 | Y4 | C52 | 22 | 191 | 16. | 322 | 6.7 | 52.5 | |
| | X4 | Y4 | C52 | 22 | 191 | 16. | 322 | 6.7 | 52.5 | |
| | X5 | Y4 | C52 | 22 | 191 | 16. | 322 | 6.7 | 52.5 | |
| | X6 | Y4 | C12 | 19 | 764 | 12. | 107 | 4.8 | 14.9 | |
| | X1 | Y3 | C22 | 19 | 173 | 12. | 171 | 4.8 | 30.5 | |
| | X2 | Y3 | C42 | 9 | 136 | 2.7 | 124 | 2.7 | 7.1 | |
| | X3 | Y3 | C42 | 9 | 136 | 2.7 | 124 | 2.7 | 7.1 | |
| | X4 | Y3 | C42 | 9 | 136 | 2.7 | 124 | 2.7 | 7.1 | |
| | X5 | Y3 | C42 | 9 | 136 | 2.7 | 124 | 2.7 | 7.1 | |
| | X6 | Y3 | C22 | 19 | 173 | 12. | 171 | 4.8 | 30.5 | |
| | X1 | Y2 | C22 | 19 | 173 | 12. | 171 | 4.8 | 30.5 | |
| | X6 | Y2 | C22 | 19 | 173 | 12. | 171 | 4.8 | 30.5 | |
| | X1 | Y1 | C12 | 19 | 764 | 12. | 107 | 4.8 | 14.9 | |
| | X2 | Y1 | C32 | 22 | 191 | 16. | 322 | 6.7 | 52.5 | |
| | X3 | Y1 | C32 | 22 | 191 | 16. | 322 | 6.7 | 52.5 | |
| | X4 | Y1 | C32 | 22 | 191 | 16. | 322 | 6.7 | 52.5 | |
| X5 | Y1 | C32 | 22 | 191 | 16. | 322 | 6.7 | 52.5 | | |
| X6 | Y1 | C12 | 19 | 764 | 12. | 107 | 4.8 | 14.9 | | |
| 計 | | | | | | | | | | 630.4 |
| 1節 | X1 | Y4 | C11 | 16 | 964 | 9.8 | 107 | 8.0 | 18.1 | |
| | X2 | Y4 | C51 | 25 | 191 | 19. | 311 | 8.9 | 65.8 | |
| | X3 | Y4 | C51 | 25 | 191 | 19. | 311 | 8.9 | 65.8 | |
| | X4 | Y4 | C51 | 25 | 191 | 19. | 311 | 8.9 | 65.8 | |
| | X5 | Y4 | C51 | 25 | 191 | 19. | 311 | 8.9 | 65.8 | |
| | X6 | Y4 | C11 | 16 | 964 | 9.8 | 107 | 8.0 | 18.1 | |
| | X1 | Y3 | C21 | 16 | 193 | 9.8 | 168 | 8.0 | 32.5 | |
| | X2 | Y3 | C41 | 9 | 136 | 2.7 | 120 | 2.7 | 7.0 | |
| | X3 | Y3 | C41 | 9 | 136 | 2.7 | 120 | 2.7 | 7.0 | |
| | X4 | Y3 | C41 | 9 | 136 | 2.7 | 120 | 2.7 | 7.0 | |
| | X5 | Y3 | C41 | 9 | 136 | 2.7 | 120 | 2.7 | 7.0 | |
| | X6 | Y3 | C21 | 16 | 193 | 9.8 | 168 | 8.0 | 32.5 | |
| | X1 | Y2 | C21 | 16 | 193 | 9.8 | 168 | 8.0 | 32.5 | |
| | X6 | Y2 | C21 | 16 | 193 | 9.8 | 168 | 8.0 | 32.5 | |
| | X1 | Y1 | C11 | 16 | 964 | 9.8 | 107 | 8.0 | 18.1 | |
| | X2 | Y1 | C31 | 25 | 191 | 19. | 311 | 8.9 | 65.8 | |
| | X3 | Y1 | C31 | 25 | 191 | 19. | 311 | 8.9 | 65.8 | |
| | X4 | Y1 | C31 | 25 | 191 | 19. | 311 | 8.9 | 65.8 | |
| X5 | Y1 | C31 | 25 | 191 | 19. | 311 | 8.9 | 65.8 | | |
| X6 | Y1 | C11 | 16 | 964 | 9.8 | 107 | 8.0 | 18.1 | | |
| 計 | | | | | | | | | | 756.5 |

剛接合梁

| X軸 | Y軸 | 部材 | t _r [mm] | t _s [mm] | L _r [mm] | k _F | L _s [mm] | k _s | 換算長さ[m] | | |
|-----|-----|-----|---------------------|---------------------|---------------------|----------------|---------------------|----------------|---------|-------|-------|
| 3節 | X2' | Y1 | GX13 | 19 | 14 | 1000 | 12.33 | 1524 | 5.56 | 20.8 | |
| | X3' | Y1 | GX13 | 19 | 14 | 1000 | 12.33 | 1524 | 5.56 | 20.8 | |
| | X4' | Y1 | GX13 | 19 | 14 | 1000 | 12.33 | 1524 | 5.56 | 20.8 | |
| | X1 | Y1' | GY13 | 12 | 9 | 800 | 7 | 652 | 2.72 | 7.4 | |
| | X6 | Y1' | GY13 | 12 | 9 | 800 | 7 | 652 | 2.72 | 7.4 | |
| | X1 | Y2' | GY13 | 12 | 9 | 800 | 7 | 652 | 2.72 | 7.4 | |
| | X6 | Y2' | GY13 | 12 | 9 | 800 | 7 | 652 | 2.72 | 7.4 | |
| | X1 | Y4' | GY13 | 12 | 9 | 800 | 7 | 652 | 2.72 | 7.4 | |
| | X6 | Y4' | GY13 | 12 | 9 | 800 | 7 | 652 | 2.72 | 7.4 | |
| | X2' | Y4 | GX33 | 19 | 14 | 1000 | 12.33 | 1524 | 5.56 | 20.8 | |
| | X3' | Y4 | GX33 | 19 | 14 | 1000 | 12.33 | 1524 | 5.56 | 20.8 | |
| | X4' | Y4 | GX33 | 19 | 14 | 1000 | 12.33 | 1524 | 5.56 | 20.8 | |
| | 計 | | | | | | | | | | 169.1 |
| | 2節 | X2' | Y1 | GX12 | 19 | 16 | 1000 | 12.33 | 1824 | 8.00 | 26.9 |
| X3' | | Y1 | GX12 | 19 | 16 | 1000 | 12.33 | 1824 | 8.00 | 26.9 | |
| X4' | | Y1 | GX12 | 19 | 16 | 1000 | 12.33 | 1824 | 8.00 | 26.9 | |
| X1 | | Y1' | GY12 | 16 | 9 | 800 | 9.99 | 536 | 2.72 | 9.4 | |
| X6 | | Y1' | GY12 | 16 | 9 | 800 | 9.99 | 536 | 2.72 | 9.4 | |
| X1 | | Y2' | GY12 | 16 | 9 | 800 | 9.99 | 536 | 2.72 | 9.4 | |
| X6 | | Y2' | GY12 | 16 | 9 | 800 | 9.99 | 536 | 2.72 | 9.4 | |
| X1 | | Y4' | GY12 | 16 | 9 | 800 | 9.99 | 536 | 2.72 | 9.4 | |
| X6 | | Y4' | GY12 | 16 | 9 | 800 | 9.99 | 536 | 2.72 | 9.4 | |
| X2' | | Y4 | GX32 | 19 | 16 | 1000 | 12.33 | 1824 | 8.00 | 26.9 | |
| X3' | | Y4 | GX32 | 19 | 16 | 1000 | 12.33 | 1824 | 8.00 | 26.9 | |
| X4' | | Y4 | GX32 | 19 | 16 | 1000 | 12.33 | 1824 | 8.00 | 26.9 | |
| 計 | | | | | | | | | | 218.2 | |
| 1節 | | X2' | Y1 | GX11 | 22 | 16 | 1000 | 16.88 | 1812 | 8.00 | 31.4 |
| | X3' | Y1 | GX11 | 22 | 16 | 1000 | 16.88 | 1812 | 8.00 | 31.4 | |
| | X4' | Y1 | GX11 | 22 | 16 | 1000 | 16.88 | 1812 | 8.00 | 31.4 | |
| | X1 | Y1' | GY11 | 12 | 8 | 800 | 7 | 552 | 2.00 | 6.7 | |
| | X6 | Y1' | GY11 | 12 | 8 | 800 | 7 | 552 | 2.00 | 6.7 | |
| | X1 | Y2' | GY11 | 12 | 8 | 800 | 7 | 552 | 2.00 | 6.7 | |
| | X6 | Y2' | GY11 | 12 | 8 | 800 | 7 | 552 | 2.00 | 6.7 | |
| | X1 | Y4' | GY11 | 12 | 8 | 800 | 7 | 552 | 2.00 | 6.7 | |
| | X6 | Y4' | GY11 | 12 | 8 | 800 | 7 | 552 | 2.00 | 6.7 | |
| | X2' | Y4 | GX31 | 22 | 16 | 1000 | 16.88 | 1812 | 8.00 | 31.4 | |
| | X3' | Y4 | GX31 | 22 | 16 | 1000 | 16.88 | 1812 | 8.00 | 31.4 | |
| | X4' | Y4 | GX31 | 22 | 16 | 1000 | 16.88 | 1812 | 8.00 | 31.4 | |
| | 計 | | | | | | | | | | 228.5 |

ピン接合梁

| | X 軸 | Y 軸 | 部材 | t_w [mm] | L_w [mm] | k_{F2} | 換算長さ [m] | |
|-----|-----|-----|------|------------|------------|------------|----------|----------|
| 3 節 | X1' | Y1 | GX23 | 7 | 656 | 1.39 | 0.9 | |
| | X5' | Y1 | GX23 | 7 | 656 | 1.39 | 0.9 | |
| | X2 | Y1' | GY33 | 12 | 1400 | 4.50 | 6.3 | |
| | X3 | Y1' | GY33 | 12 | 1400 | 4.50 | 6.3 | |
| | X4 | Y1' | GY33 | 12 | 1400 | 4.50 | 6.3 | |
| | X5 | Y1' | GY33 | 12 | 1400 | 4.50 | 6.3 | |
| | X1' | Y3 | GX23 | 7 | 656 | 1.39 | 0.9 | |
| | X2' | Y3 | GX23 | 7 | 656 | 1.39 | 0.9 | |
| | X3' | Y3 | GX23 | 7 | 656 | 1.39 | 0.9 | |
| | X4' | Y3 | GX23 | 7 | 656 | 1.39 | 0.9 | |
| | X5' | Y3 | GX23 | 7 | 656 | 1.39 | 0.9 | |
| | X1' | Y4 | GX23 | 7 | 656 | 1.39 | 0.9 | |
| | X5' | Y4 | GX23 | 7 | 656 | 1.39 | 0.9 | |
| | 計 | | | | | | | 33.4 |
| | 2 節 | X 軸 | Y 軸 | 部材 | t_w [mm] | L_w [mm] | k_{F2} | 換算長さ [m] |
| X1' | | Y1 | GX22 | 7 | 656 | 1.39 | 0.9 | |
| X5' | | Y1 | GX22 | 7 | 656 | 1.39 | 0.9 | |
| X2 | | Y1' | GY32 | 12 | 1400 | 4.50 | 6.3 | |
| X3 | | Y1' | GY32 | 12 | 1400 | 4.50 | 6.3 | |
| X4 | | Y1' | GY32 | 12 | 1400 | 4.50 | 6.3 | |
| X5 | | Y1' | GY32 | 12 | 1400 | 4.50 | 6.3 | |
| X1' | | Y3 | GX22 | 7 | 656 | 1.39 | 0.9 | |
| X2' | | Y3 | GX22 | 7 | 656 | 1.39 | 0.9 | |
| X3' | | Y3 | GX22 | 7 | 656 | 1.39 | 0.9 | |
| X4' | | Y3 | GX22 | 7 | 656 | 1.39 | 0.9 | |
| X5' | | Y3 | GX22 | 7 | 656 | 1.39 | 0.9 | |
| X1' | | Y4 | GX22 | 7 | 656 | 1.39 | 0.9 | |
| X5' | | Y4 | GX22 | 7 | 656 | 1.39 | 0.9 | |
| 計 | | | | | | | | 33.4 |
| | X 軸 | Y 軸 | 部材 | t_w [mm] | L_w [mm] | k_{F2} | 換算長さ [m] | |
| | X1' | Y1 | GX21 | 7 | 656 | 1.39 | 0.9 | |
| | X5' | Y1 | GX21 | 7 | 656 | 1.39 | 0.9 | |
| | X2 | Y1' | GY31 | 12 | 1400 | 4.50 | 6.3 | |
| | X3 | Y1' | GY31 | 12 | 1400 | 4.50 | 6.3 | |
| | X4 | Y1' | GY31 | 12 | 1400 | 4.50 | 6.3 | |
| | X5 | Y1' | GY31 | 12 | 1400 | 4.50 | 6.3 | |
| | X1' | Y3 | GX21 | 7 | 656 | 1.39 | 0.9 | |
| | X2' | Y3 | GX21 | 7 | 656 | 1.39 | 0.9 | |
| | X3' | Y3 | GX21 | 7 | 656 | 1.39 | 0.9 | |
| | X4' | Y3 | GX21 | 7 | 656 | 1.39 | 0.9 | |
| | X5' | Y3 | GX21 | 7 | 656 | 1.39 | 0.9 | |
| | X1' | Y4 | GX21 | 7 | 656 | 1.39 | 0.9 | |
| | 計 | | | | | | | 33.4 |