

第1章 序

本論では、鋼構造ラーメン骨組の柱梁接合部のパネルゾーン（以下、単にパネルと呼ぶ）を対象とする。柱と梁の接合部に位置するパネルには地震荷重作用時に大きなせん断力が作用し、せん断変形を生じることが知られている。1995 年兵庫県南部地震でも、図1.1 に示すようなパネルのせん断変形を伴った被害が見受けられた¹⁻¹⁾。既往の研究によると、パネルが梁・柱と比較して早期に降伏する場合が多いことが指摘されている^{1-2,3)}。そのためパネルの弾塑性挙動は鋼構造骨組全体の応答に大きな影響を与える。鋼構造骨組の地震応答性状を把握し、パネルの影響を設計に反映させるためには、パネルの履歴挙動を適切に把握する必要があることから、パネルの耐力や変形性能に関して多くの研究が過去に行われている^{1,4) ~ 1.17)}。

現在、日本建築学会より出版されている鋼構造関係の指針・規準の中でパネルの耐力に関する記述があるものは以下の4つである。

- ・ 鋼構造設計規準¹⁻¹⁸⁾
- ・ 鋼構造塑性設計指針¹⁻¹⁹⁾
- ・ 鋼構造限界状態設計規準・同解説¹⁻²⁰⁾
- ・ 鋼管構造設計施工指針・同解説¹⁻²¹⁾

これらの内、鋼構造塑性設計指針を除く3つの設計式は、加藤の研究結果と提案式¹⁻²²⁾に基づいた式である（鋼構造塑性設計指針では田中の提案式¹⁻²³⁾が基になっている）。それぞれ若干の相違はあるが、以下に示す文献¹⁻¹⁸⁾の設計式とほぼ同じ表現となっている。

$$\frac{{}_bM_1 + {}_bM_2}{V_e} \leq \frac{4}{3} \cdot 1.5 \cdot f_s \quad (1.1)$$

V_e はパネルの体積、 ${}_bM_1$ 、 ${}_bM_2$ は水平荷重に対して左右の梁端部（柱との接合面）にそれぞれ作用する曲げモーメント、 f_s は材料の長期許容せん断応力度である。この提案式では、「パネル降伏後の耐力上昇が大きいこと」、「柱からの逆向きのせん断力を無視していること」、「設計上の簡便さ」を考慮して、一次設計時にパネルのせん断応力度が多少降伏応力度を越えることを認めたうえで、 $4/3$ という係数を



図 1.1 パネルの塑性変形

計算式に導入している。また、パネルの弾塑性挙動を考慮した設計法については「建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990)¹⁻²⁴⁾」の中に「骨組の吸収する全エネルギーの1/3を接合部が負担する」との記述がある。これは、パネルの塑性化・それに伴うせん断変形が生じることを暗に示しており、パネルの塑性化・変形を設計に考慮するという土壌はすでに存在している。また、近年の研究によれば、「接合部パネルの降伏が骨組の崩壊型を支配するパネル崩壊型では塑性化する層が構造物全体に広がるため、特定層への損傷集中が少ない崩壊型であること¹⁻²⁵⁾」、「パネルが塑性化する事により、柱・梁部材の損傷が低減されること¹⁻²⁶⁾」、「一般にパネルのせん断降伏は非常に大きな塑性変形能力を有すること」が明らかにされており、現在の耐力規定に留まらず、パネルのエネルギー吸収性能を積極的に活用する設計法も可能になりつつある。以上より、パネルは主要構造部材である柱・梁の単なる接合部ではなく、「柱・梁と同様に骨組を構成する主要構造部材の一つである」ことを意識した設計が必要であり、本論文はこれを提案することを目的としている。

また、このようなパネルを考慮した設計を行うためには、パネルの耐力・履歴特性・変形性能を明らかにするだけでなく、骨組の中のパネルに作用する応力・パネルの変形を考慮した骨組の変形・パネルの耐力を考慮した保有水平耐力の算定法が必要となる。パネルを考慮した弾塑性解析は1964年の日置らが提案したたわみ角法^{1-6),1-27)}に始まり、ほぼ同時期に田中¹⁻²⁸⁾が同様な提案を行っている。その後はマトリックス法への展開がなされ、パネルを考慮した弾塑性解析プログラムは研究・設計に用いられている。しかしながら、多くの中低層の建物ではパネルを無視した柱・梁のみで構成される骨組モデルによる解析・設計されるのが現状である。このような現状でパネルを考慮した設計法が広く利用されるためには、現状の設計ツールを利用した算定法の構築が必要である。本論では、柱・梁・パネル相互の釣合条件から得られる「節点モーメント」・「節点塑性モーメント」の概念を導入して、パネルを意識することなく、パネルを考慮した弾塑性解析・保有水平耐力の算定が出来る方法についても提案を行う。

なお、本論では、図1.2に示すH形鋼管・角形鋼管(0°方向)・角形鋼管45°方向・円形鋼管の通しダイアフラム形式の柱梁接合部パネルを対象とする。2章以降では以下に示す概要に沿って検討を行う。また、既往の研究との関係についても併せて述べる。

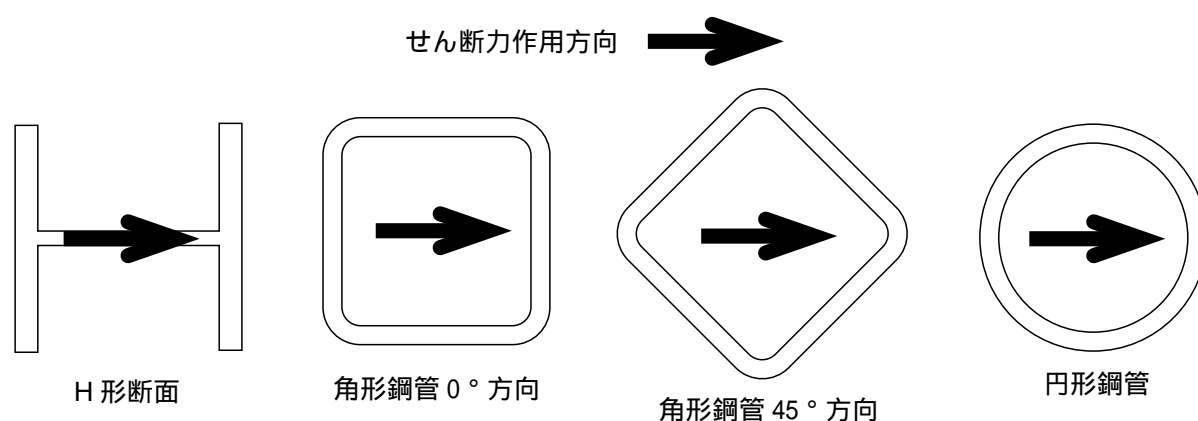


図 1.2 対象パネル断面

第2章 パネルが骨組の弾性剛性・保有水平耐力に及ぼす影響

第2章では、パネルの大きさ・変形・耐力が骨組の弾性剛性・保有水平耐力に及ぼす影響について考察し、パネルを考慮した弾塑性解析・設計の必要性について述べる。まず、1) パネル・柱・梁の相互の釣合条件に基づいて、節点モーメント・節点塑性モーメントの概念を導入する。ここでは、鋼構造骨組の中間層中柱節点付近をモデル化した単純な十字形骨組を対象に、2) 柱・梁・パネルの短期許容耐力比を算定し、一般的なプロポーションの柱梁接合部ではパネルが先行降伏する場合が多いことを示す。3) 柱・梁・パネルの弾性変形成分を算定し、パネルの変形を考慮した場合と無視した場合の骨組の弾性変形の相違について言及する。4) パネルの全塑性耐力比を定義し、保有水平耐力にパネルが及ぼす影響について検討する。

第3章 標準型パネルの載荷実験と耐力評価

タイトルの標準型パネルとは、パネルの上下面で断面が変化せず、パネルの左右に接合する梁の梁せいが等しい場合のパネルを意味する。左右の梁の梁せいが異なる場合のパネル(本論では段違いパネルと呼ぶ)については4章で述べる。3章ではまず、標準型パネルの弾塑性挙動を明らかにするために行ったパネルのせん断載荷実験について述べる。

パネルの弾塑性挙動に関する既往の研究は数多い。仲、加藤らは実大箱形断面柱H形鋼梁X形試験体を用いた繰返し実験¹⁻⁴⁾を行い、パネルの変形が骨組に与える影響を検討すべきであるとの結論を示している。また、柱断面にH形断面・十字形断面・円形断面を採用し、箱形断面と同様の実験¹⁻⁵⁾からパネルが骨組の挙動に及ぼす影響について考察している。これらの実験結果は加藤らのパネルの設計式¹⁻²²⁾に反映されている。柱がH形断面の場合では、中尾らが、パネルの塑性化が柱および梁材端部の塑性化を早める現象を示し、X形試験体・十字試験体・ラーメンモデル試験体の実験を行い、パネルの復元力特性評価法・パネル補強の効果・梁端部接合方法の影響の検討や、骨組の復元力とパネルの復元力の関係の定量的検討を行っている¹⁻²⁹⁾。椋代、松尾は、H形断面部材で構成される骨組について、単調載荷実験とともにFEM解析をおこない、パネルの耐力上昇に及ぼす要因を検討し、パネルの塑性変形能力について考察している¹⁻³⁰⁾。角形鋼管パネルに関しては金谷・田淵らが数多くの研究を行っている。角形鋼管の製法及び軸力比の違いによる接合部パネルの挙動¹⁻⁹⁾・角形鋼管のコーナー部の影響^{1-10), 1-11)}を調べ、パネルの降伏耐力及び最大耐力の検討を行っている。

以上の他にも数多くの研究がみられるが、パネルの軸力比に関しては0.3までの実験がほとんどであり、それを超える軸力に関する実験はほとんど見受けられない。本論では、最大0.6の軸力比を採用し、高軸力が作用した場合の角形・円形鋼管パネルの弾塑性挙動についても検討する。また、2構面方向より同時に曲げモーメント(せん断力)が作用した場合を考慮した45°方向から載荷した角形鋼管パネル(以下では、角形鋼管45°方向と呼ぶ)に関する実験は山實らの単純梁形式の実験¹⁻³¹⁾が唯一であり、本章では、これについても検討をおこなう。弾性剛性・耐力・塑性変形性能等が主な考察対象である。

さらにこれらの実験結果に基に、パネルの弾性剛性・耐力に対する分析を行い、評価式について検討する。パネルの弾性剛性は一次設計時の骨組応力解析や変形量の算定のために必要である。パネルの耐力に関する提案式は数多く存在する。鋼構造設計規準を始めとして多くの規準・指針に採用されている加藤らの提案式¹⁻²²⁾では、せん断力を負担するウェブ部分が様に降伏せん断応力度に達した場合を想定して耐力式を提案している。田中は、軸力・曲げモーメント・せん断力の組み合わせ応力が作用するパネルの広範な塑性解析結果からパネルの耐力式を提案している¹⁻²³⁾。この提案式は鋼構造塑性設計

指針にパネルの必要板厚を求める算定式として採用されている。金谷・田淵らは、角形鋼管パネルを対象に軸力の影響などを考慮したさらに精度の高い耐力式を提案している¹⁻⁹⁾。角形鋼管 45° 方向のパネルについては伊藤らの提案式¹⁻³²⁾が挙げられる。伊藤らはパネルせいひの 1/6 の高さの位置で軸力・曲げモーメント・せん断力の組み合わせから全塑性耐力をもとめ、耐力式の形で提案している。田中・伊藤らの提案式は、軸力・曲げ・せん断力の組み合わせを考慮した提案式となっているが、パネルウェブに一樣な平面応力場を仮定した加藤ら、金谷らの提案式と比べると複雑な式となっている。

本論では、各種パラメータがパネルのせん断耐力に与える影響について実験結果から考察し、より合理的な耐力評価式を提案する。また、併せて既往の耐力式とも比較・検討をおこなう。ここから得られるパネルの耐力は、骨組の保有水平耐力の算定に用いる。

第 4 章 左右の梁せいが異なるパネル（段違いパネル）の載荷実験と耐力評価

3 章では、左右の梁せいが同じである標準的なパネルについて述べた。しかしながら、現実の建物には、機能上の制約や重量軽減の目的から左右の梁せいが異なるパネルが存在する。本章では、このような左右の梁せいが異なるパネル（以下、段違いパネルと称する）の弾塑性挙動を明らかにし、その弾性剛性・耐力の評価式を提案する。

柱・パネルが H 形断面である段違いパネルの弾塑性挙動・設計法に関する研究^{1-34) ~ 1-37)}は数件見られるが、柱・パネルが角形鋼管である段違いパネルの挙動に関する研究は見受けられない。パネルが H 形断面の場合には、最外縁のダイアフラムで囲まれる部分をパネルの有効体積として考えれば、標準型パネルと同様に耐力の評価が出来るとの結論が得られているが、角形鋼管の場合にはパネルと柱・梁の耐力比が相対的に大きくなるため、H 形断面の場合に生じたものとは異なる崩壊性状が現れる可能性がある。本章ではまず、段違いパネルの釣合条件を示す。さらにパネルの剛性・耐力の評価式を提案する。段違いパネルの弾塑性挙動を明らかにするためにに行った実験の結果と評価式から得られる結果を比較・検討し、その妥当性について述べる。

第 5 章 パネルが骨組の地震応答性状に及ぼす影響と要求される変形性能

本章では、地震時にパネルに要求される塑性変形性能・パネルが骨組の地震応答性状に及ぼす影響について考察する。

パネルの影響を考慮した骨組の地震応答性状を把握するためには、パネルの復元力特性モデルが必要となる。単純なモデルとしては、3, 4 章で述べるパネル耐力を折れ曲がり点とする完全弾塑性型モデル・bi-linear 型モデルが挙げられる。加藤・中尾らは初期降伏時を第一折れ曲がり点とする poly-linear 型で表されるパネルの復元力特性モデルを提案している¹⁻³⁷⁾。松尾らはさらに H 形断面パネルで顕著に現れるダイアフラム・パネルフランジによる枠組み硬化の影響を考慮した復元力モデルを提案している¹⁻³⁰⁾。これらのモデルでは事前にパネルに作用する軸力を想定し、復元力特性モデルを規定するために、応答解析時に時々刻々変化するパネルへの軸力の影響を考慮することは出来ない。本論では、辻らが提案した複合応力下での応力度 - 歪度関係モデル¹⁻³⁸⁾を用い、変動軸力にも対応できるパネルの復元力特性モデルを提案する。また、実験より観察されたパネルウェブからフランジへの軸力の再分配も考慮できるモデルとしている。提案したモデルと実験結果を比較し、モデルの妥当性について検討する。

次にパネルに要求される塑性変形性能について既往の文献より考察する。一つめは、本章で提案したパネルの履歴モデルを組み込んだ弾塑性応答解析プログラムによる広範なパラメータに対する応答解析

結果¹⁻³⁹⁾であり、ここから得られるパネルの変形性能に対する要求値について検討する。もう一つは、小川らが提案した等価 1 質点系から予測されるパネルの必要変形性能^{1-40) ~ 1-42)}である。これらと第 3 章での実験結果から得られるパネルの変形性能を比較し、両者の関係について明らかにする。

また、強柱骨組を対象にパネル梁耐力比をパラメータとした地震応答解析を行い、各部の必要塑性変形性能・パネル梁耐力比が骨組の応答性状に及ぼす影響について考察を行う。地震荷重作用時の骨組に及ぼすパネルの影響を応答解析より検討した研究には以下に示す文献が挙げられる。田淵らは^{1-43) ~ 1-45)}、パネルの全塑性耐力と柱あるいは梁の全塑性耐力のどちらか小さい方との比として定義されるパネル耐力比 R_{pp} をパラメータとした解析を行い、「 R_{pp} が大きくなるとパネルのエネルギー吸収の全体に対する比 W_p/W_t は小さくなる。 R_{pp} が 1 以下の場合には層間変形が大きくなるにつれ W_p/W_t は増加する傾向にある。一方、 R_{pp} が 1 以上の場合には減少する。 R_{pp} が 1 以上の時はパネルのエネルギー吸収がほとんど期待できない。」と結論づけている。長谷川らは¹⁻⁴⁶⁾ パネルの降伏耐力と柱あるいは梁の降伏耐力のどちらか小さい方との比として定義されるパネル降伏比をパラメータとした解析を行い、「パネル降伏比を低下させ、骨組への地震エネルギーをパネルにも分担させることで、骨組の柱および梁の強度を低減できる。」ことを示唆している。松尾らは¹⁻⁴⁷⁾、パネル降伏比 R_{py} をパラメータとした解析を行い、「 R_{py} が減少するとパネルの早期降伏による履歴減衰効果・固有周期が長くなることにより層間変形角が小さくなる。弱パネルにすると変形集中が緩和され、変形が一様化する傾向がある。」としている。

これらの研究では、「パネル耐力比またはパネル降伏比が骨組の応答性状・各部材の損傷に与える影響が大きいこと」、「パネル耐力比を小さくすることで応答や周辺部材の損傷を低減できること」を示唆している。これらの研究では柱・梁の耐力はそのままに、パネルの耐力を変えることでパネル耐力比を変更している。この考え方は、骨組の保有水平耐力を柱・梁の耐力から計算し、パネルの耐力が減少しても計算される保有水平耐力は一定であるとするパネルの耐力を無視した設計法に基づくものであり、本論で提案するパネル耐力を考慮した保有水平耐力の計算では、パネル耐力比が 1 以下であれば、パネル耐力比が小さくなると骨組の保有水平耐力も小さくなる。このパネルを考慮した保有水平耐力を用いるのであれば、この保有水平耐力を一定にし、パネル耐力比をパラメータとした場合の応答性状についても検討しておく必要がある。本章では、保有水平耐力を一定とした魚骨形骨組を対象とし、パネル梁耐力比を主パラメータとした地震応答解析を行い、骨組の地震応答性状を考察する。特にパネルと梁の塑性変形の比に着目し、それぞれの部材に要求される塑性変形性能の低減の可能性について検討する。

第 6 章 パネルの影響を考慮した鋼構造骨組の耐震設計法

本章では前章までの議論を元に、パネルを考慮した鋼構造骨組の耐震設計法について提案を行う。本論では、以下の 3 点についてパネルを考慮した設計を提案する。1) 許容応力度設計、2) 保有水平耐力の確認、3) 一次設計用荷重作用時の層間変形角の確認。これらの検討事項について示すとともに、要求値と比較される骨組の応力・保有水平耐力の算定方法を示す。パネルを考慮した骨組の弾塑性解析方法については 1960 年代から提案がなされている。日置らの一連の研究^{1-6), 1-27)}ではパネルの変形・降伏がラーメン構造物全体に及ぼす影響を数式化し、部材の降伏をも含めてパネルを考慮した理想弾塑性ラーメンのたわみ角法を提案している。ほぼ同時期に、田中も同様な提案¹⁻⁷⁾を行っている。本章で示す算定方法では、現状で使用されている計算ツールに応じた方法を示し、より多くの設計者にパネルを考慮した設計を利用できるよう配慮する。すなわち、2 章で述べた柱・梁・パネル相互の釣合条件から得られる「節点モーメント」・「節点塑性モーメント」の概念を導入して、パネルを意識することなく、パ

ネルを考慮した弾塑性解析・保有水平耐力の算定が出来る方法について提案を行う．また，斜め 45 ° 方向から水平力が入力した場合についての検討方法についても述べる．

第 7 章 結語

本論をまとめる．

なお，本論中の単位は，重量 ton 表示となっている．SI 単位系への換算には付録の「SI 単位系への換算表」を参照のこと．