

# 変形増幅機構を導入したブレースの降伏層間変形角制御について

山西 央朗\*・郷田 光希\*\*

(令和7年10月31日受付)

## CONTROL OF YIELD STORY DRIFT ANGLE IN BRACED FRAMES INCORPORATING A DEFORMATION AMPLIFICATION MECHANISM

Teruaki YAMANISHI and Kouki GOUDA

(Received October 31, 2025)

### Abstract

This paper presents an analytical study on a steel braced frame incorporating a deformation amplification mechanism. The results indicate that the story drift angle can be adjusted up to about 3.5 times that of a conventional braced frame under the same conditions. The additional internal forces caused by rigid connections were negligible, suggesting that the effect of joint conditions was limited. Hence, the proposed mechanism is effective in adjusting story stiffness and controlling collapse mechanisms.

**Key Words:** 変形増幅機構, 部分層崩壊, 全層崩壊, 剛接合, 塑性ヒンジ, ブレース

## 1 序論

近年, 国内外で大規模地震が相次いで発生しており, 建築構造物に対する耐震性能への要求は一層高まっている。地震時に生じる塑性変形を適切に制御することで, 構造全体として安定したエネルギー吸収性能を確保することが耐震設計の基本思想であり, 損傷分布に関する研究が長年行われている。例えば1,2など

地震時, 建築構造物は弾性挙動から塑性挙動へと移行し, 塑性ヒンジのエネルギー吸収により振動を抑え, また構造全体に塑性ヒンジを分散させることで, 変形集中に伴う層間変形角の部分的な増大(部分層崩壊)による倒壊を防止する。したがって, 塑性ヒンジの形成位置を制御することは, 構造物の靱性確保および崩壊機構の安定化に直結する極めて重要な設計要素である。

これを実現するために, 柱梁耐力比を1.5以上に設定して梁端部に塑性ヒンジを形成させた「全層崩壊機構(全梁

同時降伏型)」を実現する設計が推奨されている。

しかし, 実際の地震応答下では, 構造全体の応答が高次モード成分を含む動的挙動に移行することにより, 理想的な全層崩壊機構が成立しない場合がある。

### 1.2 部分層崩壊機構の発生過程と問題点

部分層崩壊機構(Partial Story Mechanism)は, 特定の層に塑性ヒンジが集中し, 部分的に崩壊機構が形成される挙動である。典型的には, 第一層において以下のような過程を経て発生する。図1に, 部分層崩壊の発生順序を示す。

1. 第一層柱下端に塑性ヒンジが形成される。
2. 第一層上梁の両端部に塑性ヒンジが形成される。
3. 建物全体の応答が高次モードに移行することにより, 第一層柱上端の塑性ヒンジが形成される。
4. 結果として, 第一層柱上下端の塑性ヒンジにより, 第一層のみが崩壊する部分層崩壊機構が成立する。

地震時の外力分布は建物の高さ方向に応じた $a_i$ 分布でモデル化されることが多いが, 塑性化に伴う構造物の軟化

\* 広島工業大学 工学部建築工学科 准教授・博士(工学)

\*\* 広島工業大学 工学部建築工学科 学部生

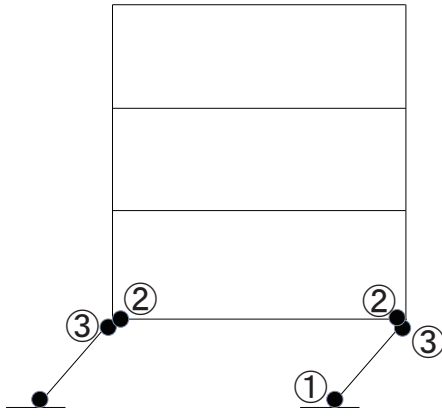


図1 部分層崩壊

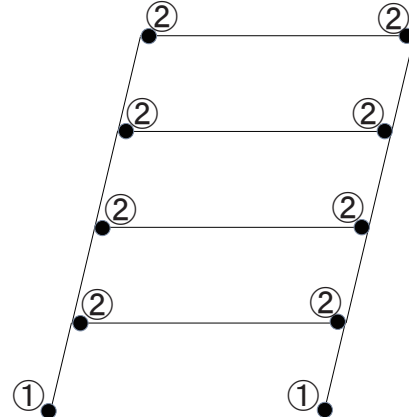


図2 全層崩壊

で高次モードが顕在化し、外力分布が乱れる。がその結果、第一層の柱上端の応力が増大し、新たな塑性ヒンジが形成され、部分層崩壊に至る。

このような部分層崩壊は、エネルギー吸収が限定された層に集中するため、少ない地震エネルギーで倒壊する層間変形角に至る。

部分層崩壊は単なる設計上の不整合によるものではなく、地震応答中の層剛性低下と高次モード移行という構造力学的な必然性に起因する現象であることに留意する必要がある。

### 1.3 全梁同時降伏による全層崩壊機構の実現

全層崩壊機構 (Global Collapse Mechanism) を実現し、柱梁耐力比  $M_{C-pc}/M_{B-p}=1.5$  を満たしても、塑性化に伴う軟化と、順次梁に塑性ヒンジが形成される過程で、任意層柱端に塑性ヒンジが形成される可能性がある。その場合、部分層崩壊を形成することとなる。

すなわち、第一層柱塑性ヒンジ形成後から全層崩壊機構に至る迄の各塑性ヒンジ形成タイミングが異なることにより部分層崩壊は引き起こされる。

これに対し、全層崩壊機構に至る為に必要な全塑性ヒンジが同時に形成されれば、塑性ヒンジ形成位置の制御が容易になることが提案されている<sup>3)</sup> 具体的には以下となる。

1. 第一層柱下端に塑性ヒンジが形成される。
2. 各層の梁端に、同時に塑性ヒンジが形成される。

この様に、塑性ヒンジが構造物全体に分散されれば、1カ所あたりの塑性ヒンジが吸収するべきエネルギーは減少する。すなわち、層間変形角も全層で平均化され、倒壊の可能性を低減できる。

### 1.4 本研究の目的と構成

本研究では、部分層崩壊の発生を抑制し、全層崩壊機構を安定的に実現することを目的として、「変形増幅機構付きブレース (Toggle-Brace Type Deformation Amplification Mechanism)」を導入する。変形増幅機構とは、入力変形に対してブレースの軸方向変形量を幾何学的に増幅するこ

とにより、通常のブレースよりも大きな層間変形角を許容できるようにする機構である。これにより、ブレースによる層剛性調整で架構の曲げ応力分布を制御することで、全梁同時降伏型の崩壊機構を実現することが可能となる。

本研究の主要な検討項目は以下の2点である。

- ① 変形増幅機構を導入したブレースの降伏層間変形角増大法の提案。
- ② 接合条件 (ピン接合・剛接合) の違いが力学的挙動に及ぼす影響の評価。

以上の検討を通じて、変形増幅機構を導入した構造性能を明らかにし、今後の耐震設計における合理的な設計手法の構築を目指すものである。

## 2 変形増幅機構の理論モデル

本章では、変形増幅機構を導入したブレースの幾何学的関係に基づき、その変形特性および増幅比の理論的導出を行う。変形増幅機構は、入力変形に対してブレースの軸方向変形量を幾何学的に増幅させることにより、ブレースの強度を保持したまま、通常のブレースよりも大きな層間変形角を許容できるように設計された機構である。したがって、その力学的挙動を定量的に把握するためには、入力変位と出力変位の関係を明確にする必要がある。

### 2.1 変形増幅比の定義

クランク材の一端を固定支点、他端を自由端とし、自由端が微小回転  $\Delta\alpha$  を受けると、その先端には水平方向変位  $\delta_x$  および鉛直方向変位  $\delta_y$  が生じる。このとき、先端点の変位比  $r_D$  は次式で表される。

$$\begin{aligned}
 r_D &= \frac{\delta_y}{\delta_x} = \frac{Y_i - Y_{i+1}}{X_{i+1} - X_i} \\
 &= \frac{l \cdot \sin \alpha - l \cdot \sin(\alpha + \Delta\alpha)}{l \cdot \cos(\alpha + \Delta\alpha) - l \cdot \cos \alpha} \\
 &= \frac{\sin \alpha - \sin(\alpha + \Delta\alpha)}{\cos(\alpha + \Delta\alpha) - \cos \alpha} \quad (1) \\
 &= \cot\left(\alpha + \frac{\Delta\alpha}{2}\right)
 \end{aligned}$$

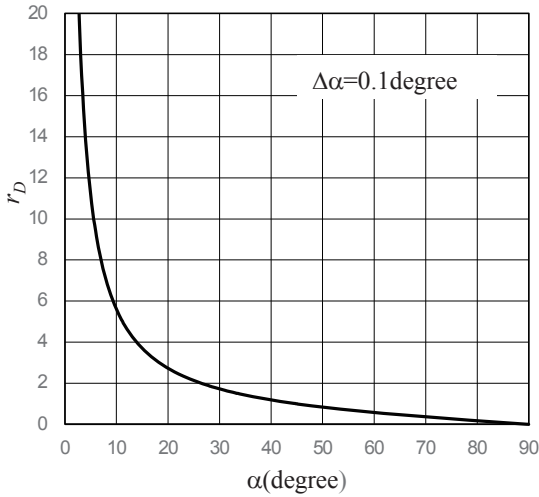


図3  $r_D$ - $\alpha$ 曲線

ここで、 $l$ はクランク材の長さ、 $\alpha$ は初期配置角度、 $\Delta\alpha$ は回転増分角である。この関係式は、クランク材先端の運動を幾何学的に表現したものであり、鉛直変位に対する水平変位の増幅効果を示す。

### 2.2 配置角度 $\alpha$ と変位増幅比の関係

式(1)に基づき、配置角度 $\alpha$ と変位増幅比 $r_D$ の関係を整理すると、 $\alpha$ が $90^\circ$ に近づくほど $r_D$ は0に収束し、鉛直方向変位 $\delta_Y$ が小さくなる。一方、 $\alpha$ が $0^\circ$ に近い場合には $r_D$ が急激に増大し、鉛直変位に対する水平変位の増幅が顕著となる。この関係を図3に示す。図より、 $\alpha$ の減少に伴い $r_D$ が非線形的に増加する傾向が確認できる。すなわち、クランク材の配置角度を調整することで、増幅機構の変形倍率を幾何学的に制御することが可能であり、ブレース剛性の調整要素として機能するので、結果として崩壊機構の制御にも寄与することが期待できる。

### 2.3 クランク材角度変化と剛性への影響

本研究で対象とする変形増幅機構は、ピン支点によって構成されており、荷重の作用によりクランク材の配置角度 $\alpha$ がわずかに変化する。図4に変形増幅機構を導入したブレースのディテールを示す。

解析的検討の結果、ブレースに降伏軸力を作用させた際

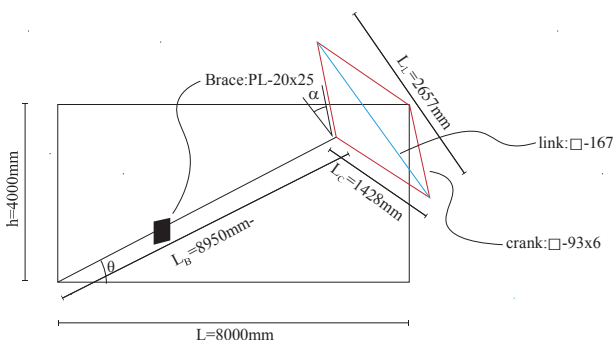


図4 変形増幅機構を導入したブレースのディテール

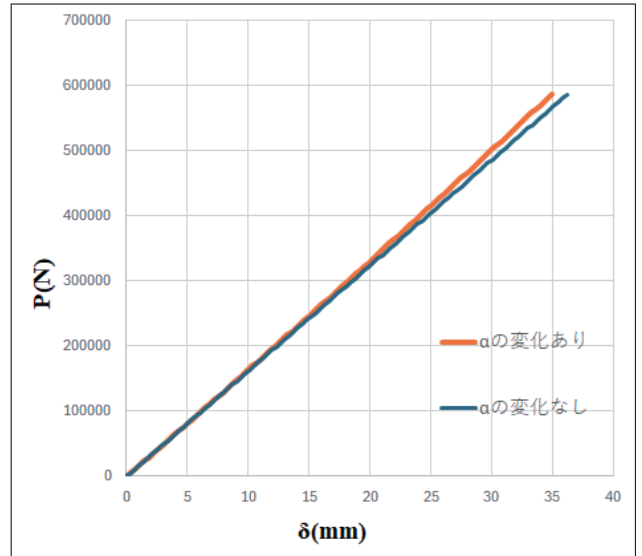


図5  $\alpha$ の変化と変形増幅機構の剛性変化

に、クランク材の角度変化量( $\Delta\alpha$ )は最大で $0.53^\circ$ にとどまることが確認された。このことから、変形増幅機構における角度変化は極めて小さく、その幾何学的変形による増幅比 $r_D$ およびブレース剛性への影響は限定的であることがわかる。

さらに、図5に示すように、 $\alpha$ の変化およびリンク材の軸剛性 $EA$ の変化に伴う増幅機構全体の剛性変化を整理した結果、両者の影響はともに微小であり、通常設計範囲においては $\alpha$ を固定値として扱っても解析上の誤差は無視できることが確認された。

これらの結果は、次章で扱う変形増幅機構を導入したブレースの解析モデルにおいて、配置角度 $\alpha$ を一定として解析を進める合理性を裏付けるものである。



図6 剛接合化による曲げモーメント分布

### 2.4 通常ブレースとの比較検討

本節では、変形増幅機構を導入したブレースの効果を検証するため、同一条件下における通常ブレースとの比較解析を行った。ここでは、両者に対して同一の荷重条件を与え、ブレースが降伏する際の層間変形角を求めた。

その結果、変形増幅機構を導入したブレースは、通常ブレースと比較して約3.51倍の層間変形角を示した。このことは、機構により水平変位が増幅された結果、ブレースがより大きな変形に達するまで降伏しないことを意味しており、初期剛性の低減および降伏遅延効果が明確に現れたといえる。

これらの結果から、変形増幅機構は単なる変位増幅効果にとどまらず、構造物の崩壊機構の制御に寄与しうる有効な構造形式であることが示唆された。

### 3 剛接合の検討

#### 3.1 はじめに

前章では、ピン接合を仮定した場合の変形増幅機構の挙動を解析し、機構角度の変化が最大で  $0.53^\circ$  と極めて小さいことを確認した。この結果は、機構自体が高い剛性を有し、接合条件の差異が全体の変形特性に与える影響が限定的である可能性を示唆している。

本章では、この知見を踏まえ、接合部を剛接合として扱った場合の影響を力学的に検証する。特に、剛接合化によって発生する曲げモーメントおよび付加的な内力を定量的に評価し、その妥当性を検討する。

#### 3.2 剛接合化の理論的考察

剛接合化を行うと、クランク材およびリンク材には軸力に加えて曲げモーメントが作用する。このとき、曲げモーメントによって新たに生じる内力成分を付加的引張力  $P_F$  として定義すれば、剛接合時の内力状態は、通常の外力  $P$  に対して

$$P_{\text{total}} = P + P_F$$

として表現できる。

すなわち、剛接合化の影響は「外力に対する内力増分」として整理することができる。

#### 3.3 付加的引張力 $P_F$ の導出

本研究では、仮想仕事の原理を適用して  $P_F$  を算出した。解析においては、ピン接合時に外力  $P$  が作用したときの伸び量  $\delta$  と、剛接合時に曲げモーメントが作用した場合の伸び量が等しいと仮定する。

この条件のもとで釣り合いを整理すると、曲げモーメントによって生じる付加的な引張力  $P_F$  は以下の式で表される。

$$P_F = \frac{I \cdot 12 \cdot P^2 \cdot \cos^2 \alpha \cdot L_L}{L_T^2 \cdot A_T \cdot \sin^2 \alpha \cdot A_L \cdot E \cdot \tan^2 \alpha} \quad (3)$$

ここで、

$I$ : 断面二次モーメント

$P$ : 外力

$L_L$ : リンク材長

$A_T$ : トグル材断面積

$A_L$ : リンク材断面積

$E$ : ヤング係数

を示す。

#### 3.4 モーメント評価

得られた  $P_F$  を用いて、モーメント容量に基づく関係式

よりトグル材に作用する曲げモーメント  $M$  を求めると、次式で表される。

$$M = \frac{P_F \cdot L_T}{2 \cos \alpha} \quad (2)$$

実際の計算では、ブレース外力  $P=587,500$  N に対して付加的な引張力  $P_F=49.64$  N が得られた。このとき、外力に対する増加率は次のように求められる。

$$\frac{P + P_F}{P} = 1.0000845$$

したがって、剛接合化による内力の増加率はわずか  $0.00845\%$  にとどまり、付加的な軸力は外力に対して無視できるほど小さいことが確認された。

さらに、このとき算出された曲げモーメントは、部材の許容曲げモーメントに対して約  $0.067\%$  程度と極めて小さい値に留まった。すなわち、剛接合化によって生じる付加的な曲げは構造安全上、設計許容範囲を大きく下回る。

図6に、剛接合化を行った場合の増幅機構付きブレースに発生する曲げモーメント分布を示す。図より、トグル材およびリンク材に生じるモーメントは端部でわずかに発生するものの、全体として極めて小さいことが確認でき、前述の解析結果を裏付けるものとなっている。

#### 3.5 考察

以上の解析結果より、剛接合化を行っても、機構全体の力学挙動や部材応力に及ぼす影響は極めて小さいことが定量的に確認された。

むしろ、ピン接合では接合部に回転自由度を確保する必要があるのに対し、剛接合化を採用することで接合部設計や施工の簡略化を図ることができる。

このことから、剛接合化は構造的な安全性を損なうことなく、構造の合理化・施工性の向上を両立させる有効な設計手法であると結論づけられる。

## 4 総合考察および結言

### 4.1 増幅機構の構造的意義

本研究では、鉄骨造建物における部分層崩壊の発生を抑制し、全層崩壊機構を安定的に誘発することを目的として、変形増幅機構付きブレースを提案し、その力学的特性を理論的および解析的に検討した。

第2章では、変形増幅機構の幾何学的関係に基づき、配置角度  $\alpha$  と変位増幅比  $r_D$  との関係性を明らかにした。 $\alpha$  が小さいほど  $r_D$  が増大することから、配置角度の調整によりブレースの初期剛性を制御できることを示した。これにより、層間変形角の制御を通じて、崩壊機構全体の制御が可能であることを理論的に導いた。

さらに、通常ブレースとの比較解析により、変形増幅機構を導入したブレースは約 3.51 倍の層間変形角を示すことを確認した。この結果は、本機構が単に変位を増幅するだけでなく、ブレースの降伏遅延効果をもたらし、層剛性分布を調整する有効な手段であることを示している。

ただし、本研究で得られた解析結果は、特定のブレースディテール（部材長さ・断面積など）に基づくものであり、これらの寸法条件が変化した場合には初期剛性や変位増幅特性も大きく変化する可能性がある。したがって、本成果は本研究で採用した条件に限定されるものであり、今後はディテールの違いが力学的特性に及ぼす影響についても検討を行う必要がある。

#### 4.2 剛接合化の有効性

第 3 章では、変形増幅機構を構成する接合部を剛接合とした場合の力学的影響を検討した。その結果、剛接合化によって生じる付加的引張力  $P_F$  は外力  $P$  に対して 0.00845% と極めて小さく、曲げモーメントも許容値の 0.067% にとどまることが明らかとなった。

このことから、剛接合化による力学的影響は無視できる範囲であり、むしろ接合部設計の単純化・施工性の向上という実務的利点を有することが確認された。したがって、変形増幅機構においては剛接合を採用しても構造性能を損なわず、合理的な設計が可能であるといえる。

#### 4.3 本研究の成果の総括

以上の検討を通じて、変形増幅機構付きブレースは

- ・幾何学的配置による剛性制御が可能であること。
- ・降伏遅延効果により層ごとの変形集中を抑制できる可能性があること。
- ・剛接合化により構造合理化と施工性向上が両立可能であること。

を明らかにした。

これらの成果は、鉄骨造ラーメン構造における部分層崩壊の抑制および全層崩壊機構の安定的実現に寄与する新たな設計指針を与えるものである。

#### 4.4 今後の課題

本研究では、静的解析に基づく理論的検討を中心に行ったが、今後は以下の課題に取り組む必要がある。

1. 実験的検証による変形増幅機構の非線形挙動の把握。
2. 複数層構造への適用を想定した、層間変形分布の最適化手法の確立。
3. ブレースの長さ・断面積などのディテールが変形増幅機構の剛性や配置角度  $\alpha$  の決定方法の体系化。

これらの検討を通じて、変形増幅機構付きブレースの設計手法を確立し、鉄骨構造物の耐震性能向上に資する実用的な構造システムとしての確立を目指す。

#### 参考文献

- 1) 秋山 宏：地震時における鋼構造ラーメン骨組の損傷分布則，日本建築学会論文報告集，第 309 号，pp.53-59, 1981.11
- 2) 中島 正愛，澤泉 紳一：鉄骨骨組の地震応答に及ぼす柱梁耐力比の影響（その 1：梁崩壊機構を形成するために必要な柱梁耐力比），日本建築学会鋼構造論文集，第 6 巻第 23 号，pp.117-132, 1999.9
- 3) 中村 亮太 山西央朗 小松真吾 松田頼征：梁継手塑性ヒンジを想定した梁強度調整による梁降伏型崩壊機構形成の可能性について，日本建築学会中国支部研究報告集 第 48 巻