強震を受ける損傷制御型二層ブレース構造物の層間変形集中に対する ブレース材の二次剛性の影響

EFFECT OF POST YIELDING STIFFNESS OF BUCKLING RESTRAINT BRACES ON MECHANISM OF DAMAGE CONTROL FOR TWO STORY BRACED FRAME WITH RESTRAINT BRACES

木村 祥裕*, 御 幡 結**, 中澤 泰典***

Yoshihiro KIMURA, Yui MIHATA and Yasunori NAKAZAWA

In general, the column moment demands in steel concentrically braced frames are ignored. However, large concentrations of damage are not seen in real frames since columns are continuous and they possess some flexural stiffness and strength. This paper clarifies the effect of continuous columns and the post yielding stiffness of buckling restraint braces on mechanism of damage control for two story braced frame with restraint braces on pushover and dynamic analyses. It is shown that continuous seismic and gravity columns and the post yielding stiffness of braces in a structure significantly decrease the possibility of large drift concentrations.

Keywords: Two Story Braced Frame, Damage Control System, Drift Concentration Factor, Ratio of Column Flexural Stiffness, Post Yielding Stiffness of Braces

二層ブレース架構, 損傷分散型システム, 層間変形集中率, 柱材曲げ剛性比, ブレース材二次剛性

1. 序

二層構造物の層間変形集中に及ぼす各種構造特性の影響を明らかにした研究^{1)~3)}では, 層の二次剛性と層崩壊の関係が示されている。バイリニア型と仮定した層では, 降伏後の層剛性の変化は急激となるため, 特定層への層間変形集中を回避するには降伏後も高い層剛性を必要とする。

一方, 著者らが提示した主抵抗要素と二次抵抗要素で構成される二層構造物では, 仮に主抵抗要素の二次剛性が0であっても二次抵抗要素による応力再配分機構により層間変形集中の抑制が可能となることを示した^{4)~8)}。既往の二層構造物でも, 主抵抗要素をブレース材, 二次抵抗要素を柱材としている構造物が見られるものの, 柱材による応力再配分機構を積極的に取り入れてメカニズムを検討したものとは言い難い。文献 9), 10)ではこのような二次抵抗要素による層間変形集中の緩和効果の重要性を指摘しており, 二相系構造物の地震応答性状に関する研究¹¹⁾¹²⁾も著者ら以外にも見受けられるが, 定性的な把握であり, 二次抵抗要素の要求性能は明らかにされていない。

このような複数の耐震機構を有する構造物は「二相系構造物(Dual System)」と呼ばれ, 米国の Design Code である IBC2003¹³⁾, AISC2006¹⁴⁾では Response Modification Coefficient *R factor* がラーメン構造物と同等の性能として $R=8$ と定められている。

また, 二相系構造物として, 座屈拘束型ブレースによる制振架構が挙げられるが, 座屈拘束型ブレースはブレース材の歪硬化勾配等により降伏後に二次剛性を有し, 層間変形集中を緩和する効果を発揮する。

一方, ブレース材が降伏し, 二次抵抗要素である柱材が応力再配分機構を形成した後も, ブレース材の二次剛性によって層せん断力は増加するため, 柱材の作用せん断力も増加する。その結果, 完全弾塑性であるブレース材の場合には想定しない崩壊機構を形成する可能性がある。

本論文では, 主抵抗要素であるブレース材降伏後の二次剛性が二相系構造物の層間変形集中に及ぼす影響と二次抵抗要素である柱材による層間変形集中抑制効果について明らかにする。水平外力を受ける構造物の静的釣合いを仮定し, 層間変形集中率の評価式を導く。ブレース材の二次剛性, 柱材曲げ剛性やブレース架構の塑性率から層間変形集中率や柱材への作用モーメントを明らかにする。さらに, 構造物に損傷を及ぼすレベルの強震が作用した場合に, 慣性力等の動的効果が上記の構造特性と要求性能との関係に及ぼす影響を検討する。

2. ブレース材が二次剛性を有する損傷制御型二層ブレース構造物の層間変形と柱材作用モーメント

二層ブレース構造物を構成する部材の剛性, 耐力と構造物の層間変形との関係を釣合方程式により明らかにする。

2. 1 二層ブレース構造物の層間変形及び柱材作用モーメントに対する静的釣合いの仮定条件

ブレース材が二次剛性を有する二層ブレース構造物の崩壊機構を把握するために, 水平外力に対するブレース架構の静的釣合いにより

* 長崎大学工学部構造工学科 教授・博士(工学)

** 大分市役所 修士(工学)
(元 長崎大学大学院生)

*** 翔栄建築設計事務所

Prof., Dept. of Structural Engineering, Nagasaki University, Dr. Eng.
Oita City Officer, M. Eng.

Shouei Architect & Engineers LTD.

評価式を誘導する。その際、以下の仮定を用いる。

1) 二層ブレース構造物では、施工性の観点から梁材をウェブボルト接合のみで柱材に取り付ける場合が多いことから、梁材及びブレース材両端はピン接合とし、柱材及び梁材に作用する軸変形は無視する。これは、二層ブレース架構の層間変形集中に対して軸変形の影響は小さいことが文献 6) で明らかにされているためである。

2) 通し柱材を弾性とし、通し柱材の柱脚をピン支持とする。二層構造物の場合、柱脚に作用する軸力は小さく、また弾性範囲であれば軸力による剛性低下が小さいことから、柱脚への作用軸力による剛性低下を無視する。

3) ブレース架構に作用する静的地震外力 F_i を A_i 分布により定めている。

4) 座屈拘束型ブレース材の材料特性は図 1(b)に示すように、ブレース材の降伏後の軸剛性は初期勾配の χ_i 倍の二次剛性とする。その際、ブレース材の圧縮曲げ座屈は生じないものとし、圧縮、引張で二次剛性は等しいものとする。

5) 高さ方向のせん断剛性比・耐力比を β と定義する。すなわち、 β は下層に対する上層のせん断剛性・せん断耐力比である。なお、本論文ではブレース材長、ブレース材ヤング係数は等しいことから、 β は上下層のブレース材断面積の割合となる。また、架構におけるブレース材の層間剛性の総和に対する柱材の曲げ剛性の総和の比を柱材曲げ剛性比 α と定義し、次式に示す。

$$\alpha = \sum_{i=1}^m EI_i / h^3 \left/ \sum_{i=1}^n EA_i \cos^2 \theta / l \right. \quad (i \text{ はスパン数}) \quad (1)$$

ここで、 m は柱材の本数、 n はブレース材の本数である。また、図 1 に示すように、 EL_i は柱材一本の曲げ剛性、 EA_i はブレース材一本の軸剛性、 h は層高、 l はブレース材の材長、 θ はブレース材の傾きである。

α と実際の柱材断面との関係については、例えば H 形鋼柱材がブレース構面に対して弱軸方向に配置された場合、 α は 0.001~0.05 程度、強軸に配置された場合、0.01~0.1 程度となる。また、中程度から大口径鋼管柱材の場合、 α は 0.1~1 程度となる。そして、文献 11)12) に示されるようなトラス柱材の場合、 $\alpha \geq 1$ となる。

6) ブレース架構の P - Δ 効果は無視する。文献 4) で、 P - Δ 効果は層間変形集中率及び柱材の作用モーメントを低減するものの、その影響は非常に小さいことが示されている。

層間変形集中率 γ はブレース架構頂部の水平変形 Δ_2 をブレース架構の高さ H で除した水平変形角 Δ_2/H に対して、上下層のうち最大層間変形 δ_{max} をその層の高さ h で除した層せん断変形角 δ_{max}/h の比 $(\delta_{max}/h) / (\Delta_2/H)$ と定義する。

2. 2 静的釣り合いによる二層ブレース構造物の層間変形式及び柱材作用モーメント式の誘導

二次剛性を有する二層ブレース構造物の層間変形集中率の評価を、ブレース架構の塑性率、降伏順序によって次のように分類する。その際、ブレース材が最初に降伏したときのブレース架構頂部の水平変位をブレース架構の降伏変位 Δ_y と定義する。塑性率 μ とは、ブレース架構頂部で生じている降伏変位 Δ_y に対する水平変位 Δ_2 の割合である。なお、各記号の添字において最初の数字 1, 2 は層を、 c は柱材を表し、

図 1 二層ブレース架構のモデル化

ハイフンの後ろの数字は塑性率、降伏順序の各段階を表している。

1) 下層のブレース材が降伏するまでの上下層変位 ($\mu \leq 1$)

架構全体、ブレース架構部分、全ての柱材のそれぞれの系に作用するせん断力 V_{s1-1} , V_{f1-1} , V_{c1-1} ($i=1,2$) の関係、及び全ての柱材に作用するせん断力 V_{c1-1} と柱の曲げ変形に伴う通し柱材中央 (高さ h) での水平変位 δ_{c1-1} の関係は、文献 4) と同様、上述の仮定及び図 1(a) より次式となる。

$$V_{s1-1} = V_{f1-1} + V_{c1-1}, V_{s2-1} = \phi V_{s1-1}, V_{s2-1} = V_{f2-1} - V_{c1-1} \quad (2)$$

$$V_{c1-1} = \frac{l^3}{EAb^2} 3\alpha \delta_{c1-1} \quad (3)$$

ここで、 EA は(1)式に示すブレース材の軸剛性の和である。

$\mu \leq 1$ では、上下層の水平変位 δ_{1-1} , Δ_{2-1} はブレース架構の上下層に作用するせん断力 V_{f1-1} , V_{f2-1} により次式で表される。

$$\delta_{1-1} = \frac{l^3}{EAb^2} V_{f1-1}, \Delta_{2-1} = \delta_{1-1} + \delta_{2-1} = \frac{l^3}{EAb^2} (V_{f1-1} + \frac{V_{f2-1}}{\beta}) \quad (4)$$

ここで、 β は高さ方向のせん断剛性・耐力比、 δ_{2-1} は上層の層間変形である。また、 l , b , h , H は図 1 に示すとおりである。下層の降伏せん断耐力を V_{fy} とすると、(2)~(4)式から上下層の水平変位 δ_{1-1} , Δ_{2-1} は次式で表される。

$$\delta_{1-1} = \frac{l^3}{EAb^2} V_{fy}, \Delta_{2-1} = \delta_{1-1} + \frac{l^3}{EAb^2} \frac{2\phi + 3\alpha(\phi + 1)}{2\beta + 3\alpha(\phi + 1)} V_{fy} \quad (5)$$

ここで、 $\phi = A_2 W_2 / A_1 W_1$, A_i : A_i 分布による係数、 W_i : 各層の重量) は上下層のせん断力比である。全ての柱材及び上層のブレース架構に作用するせん断力 V_{c1-1} , V_{f2-1} は下層の降伏せん断耐力 V_{fy} により次式で表される。

$$V_{c1-1} = \frac{3\alpha(\beta - \phi)}{2\beta + 3\alpha(\phi + 1)} V_{fy} \quad (6)$$

$$V_{f2-1} = \frac{2\phi + 3\alpha(\phi + 1)}{2 + 3\alpha(\phi + 1)/\beta} V_{fy} \quad (7)$$

2) $\mu > 1$ から上下層ブレース材が降伏するまでの上下層変位増分

1)以降、すなわち下層ブレース材降伏後 ($\mu > 1$) から上下層のブレース材降伏までのせん断力増分及び全ての柱材のせん断力の増分は(2), (3)式と同様、次式で表される。

$$\Delta V_{s1-2} = \Delta V_{f1-2} + \Delta V_{c1-2}, \Delta V_{s2-2} = \phi \Delta V_{s1-2}, \Delta V_{s2-2} = \Delta V_{f2-2} + \Delta V_{c1-2} \quad (8)$$

$$\Delta V_{c1-2} = \frac{l^3}{EAb^2} 3\alpha \delta_{c1-2} \quad (9)$$

$\mu > 1$ から上下層ブレース材が降伏するまでについては、上下層の水平変位の増分 δ_{1-2} , Δ_{2-2} は、ブレース架構の上下層に作用するせん断力の増分 ΔV_{f1-2} , ΔV_{f2-2} により次式で表される。

$$\delta_{1-2} = \frac{l^3}{\chi_1 EAb^2} \Delta V_{f1-2}, \Delta_{2-2} = \delta_{1-2} + \delta_{2-2} = \frac{l^3}{EAb^2} \left(\frac{\Delta V_{f1-2}}{\chi_1} + \frac{\Delta V_{f2-2}}{\beta} \right) \quad (10)$$

ここで、 χ_i ($i=1,2$) はブレース材二次剛性比である。下層の降伏せん断耐力 V_{fy} により、(8)~(10)式から上下層に作用するせん断力の増分 ΔV_{f1-2} 、 ΔV_{f2-2} は、次式で表される。

$$\Delta V_{f1-2} = \frac{\chi_1(\mu-1)\{2\beta+3\alpha(\varphi+1)\}}{2\{\beta+\varphi\chi_1+3\alpha(\varphi+1)\}} \left\{ \frac{2\varphi+3\alpha(\varphi+1)}{2\beta+3\alpha(\varphi+1)} + 1 \right\} V_{fy} \quad (11)$$

$$\Delta V_{f2-2} = \frac{(\mu-1)\beta\{2\varphi\chi_1+3\alpha(\varphi+1)\}}{2\{\beta+\varphi\chi_1+3\alpha(\varphi+1)\}} \left\{ \frac{2\varphi+3\alpha(\varphi+1)}{2\beta+3\alpha(\varphi+1)} + 1 \right\} V_{fy} \quad (12)$$

また、上下層の水平変位の増分 δ_{1-2} 、 Δ_{2-2} は(10)~(12)式より次式で表される。

$$\delta_{1-2} = \frac{(\mu-1)\{2\beta+3\alpha(\varphi+1)\}}{2\{\beta+\varphi\chi_1+3\alpha(\varphi+1)\}} \left\{ \frac{2\varphi+3\alpha(\varphi+1)}{2\beta+3\alpha(\varphi+1)} + 1 \right\} \frac{l^3}{EAb^2} V_{fy} \quad (13)$$

$$\Delta_{2-2} = (\mu-1)\Delta_{2y} = (\mu-1) \left\{ \frac{2\varphi+3\alpha(\varphi+1)}{2\beta+3\alpha(\varphi+1)} + 1 \right\} \frac{l^3}{EAb^2} V_{fy} \quad (14)$$

また、全ての柱材に作用するせん断力増分 ΔV_{c-2} は下層の降伏せん断耐力 V_{fy} により次式で表される。

$$\Delta V_{c-2} = \frac{3\alpha(\mu-1)(\beta-\varphi\chi_1)}{2\{\beta+\varphi\chi_1+3\alpha(\varphi+1)\}} \left\{ \frac{2\varphi+3\alpha(\varphi+1)}{2\beta+3\alpha(\varphi+1)} + 1 \right\} V_{fy} \quad (15)$$

3) 上下層ブレース材がともに降伏した後の上下層変位増分

2)以降、すなわち上下層ブレース材が降伏した後のせん断力及び全ての柱材のせん断力の増分は(2)、(3)式と同様、次式で表される。

$$\Delta V_{s1-3} = \Delta V_{f1-3} + \Delta V_{c-3}, \Delta V_{s2-3} = \varphi \Delta V_{s1-3}, \Delta V_{s2-3} = \Delta V_{f2-3} - \Delta V_{c-3} \quad (16)$$

$$\Delta V_{c-3} = \frac{l^3}{EAb^2} 3\alpha\delta_{c-3} \quad (17)$$

上下層ブレース材がともに降伏した後の変位増分 δ_{1-3} 、 Δ_{2-3} を求めるために、上下層ブレース材がともに降伏するときの塑性率 μ_s を算定する。上下層ブレース材が降伏するとき、上層の降伏せん断耐力 V_{fy} 及びせん断力 V_{fy} 、 ΔV_{f2-2} の関係は次式となる。

$$V_{fy} - V_{f2-2} = \Delta V_{f2-2} \quad (18)$$

また、(7)、(12)、(20)式より上下層ブレース材が降伏するときの塑性率 μ_s は次式で表される。

$$\mu_s = 1 + \frac{2\{\beta+\varphi\chi_1+3\alpha(\varphi+1)\}(\beta-\varphi)}{\{2\varphi\chi_1+3\alpha(\varphi+1)\}\{\varphi+\beta+3\alpha(\varphi+1)\}} \quad (19)$$

$\mu_s < \mu$ では、上下層の水平変位の増分 δ_{1-3} 、 Δ_{2-3} は、ブレース架構の上下層に作用するせん断力の増分 ΔV_{f1-3} 、 ΔV_{f2-3} により次式で表される。

$$\delta_{1-3} = \frac{l^3}{\chi_1 EAb^2} \Delta V_{f1-3}, \Delta_{2-3} = \delta_{1-3} + \delta_{2-3} = \frac{l^3}{EAb^2} \left(\frac{\Delta V_{f1-3}}{\chi_1} + \frac{\Delta V_{f2-3}}{\chi_2\beta} \right) \quad (20)$$

下層の降伏せん断耐力 V_{fy} で表すと、(16)、(17)、(20)式から上下層に作用するせん断力の増分 ΔV_{f1-3} 、 ΔV_{f2-3} は次式となる。

$$\Delta V_{f1-3} = \frac{(\mu-\mu_s)\chi_1\{2\beta\chi_2+3\alpha(\varphi+1)\}}{2\{\beta\chi_2+\varphi\chi_1+3\alpha(\varphi+1)\}} \left\{ \frac{2\varphi+3\alpha(\varphi+1)}{2\beta+3\alpha(\varphi+1)} + 1 \right\} V_{fy} \quad (21)$$

$$\Delta V_{f2-3} = \frac{\beta\chi_2(\mu-\mu_s)\{2\varphi\chi_1+3\alpha(\varphi+1)\}}{2\{\beta\chi_2+\varphi\chi_1+3\alpha(\varphi+1)\}} \left\{ \frac{2\varphi+3\alpha(\varphi+1)}{2\beta+3\alpha(\varphi+1)} + 1 \right\} V_{fy} \quad (22)$$

また、上下層の水平変位の増分 δ_{1-3} 、 Δ_{2-3} は、(20)~(22)式より次式となる。

$$\delta_{1-3} = \frac{(\mu-\mu_s)\{2\beta\chi_2+3\alpha(\varphi+1)\}}{2\{\beta\chi_2+\varphi\chi_1+3\alpha(\varphi+1)\}} \left\{ \frac{2\varphi+3\alpha(\varphi+1)}{2\beta+3\alpha(\varphi+1)} + 1 \right\} \frac{l^3}{EAb^2} V_{fy} \quad (23)$$

$$\Delta_{2-3} = (\mu-\mu_s)\Delta_{2y} = (\mu-\mu_s) \left\{ \frac{2\varphi+3\alpha(\varphi+1)}{2\beta+3\alpha(\varphi+1)} + 1 \right\} \frac{l^3}{EAb^2} V_{fy} \quad (24)$$

また、全ての柱材に作用するせん断力増分 ΔV_{c-3} は、下層の降伏せん断耐力 V_{fy} により次式で表される。

$$\Delta V_{c-3} = \frac{3\alpha(\mu-1)(\beta\chi_2-\varphi\chi_1)}{2\{\beta\chi_2+\varphi\chi_1+3\alpha(\varphi+1)\}} \left\{ \frac{2\varphi+3\alpha(\varphi+1)}{2\beta+3\alpha(\varphi+1)} + 1 \right\} V_{fy} \quad (25)$$

4) 層間変形集中率の算定

任意の塑性率 μ のときの各層の変位を求めるには、1)~3)のどの段階であるかを調べる必要がある。そして、各層の変位は各段階の変形量の総和として次のように表される。

$$\delta_1 = \sum_{i=1}^N \delta_{1-i} \quad (26)$$

$$\Delta_2 = \sum_{i=1}^N \Delta_{2-i} \quad (27)$$

ここで、 N は 1)~3)のうち、該当する段階を示している。上式より層間変形集中率 γ は次式で表される。

$$\gamma = \frac{MAX\{[\Delta_2 - \delta_1], \delta_1\} / h}{\Delta_2 / H} \quad (28)$$

1)~3)の変形状態における各柱材の作用モーメントの合計は、(6)、(15)、(25)式の上下層柱材の作用せん断力により次式で与えられる。

$$M_c = \sum_{i=1}^N V_{c-i} h \quad (29)$$

5) 等価柱材曲げ剛性比の算定

任意の層間変形集中率 γ となるブレース材二次剛性比 χ_i と柱材曲げ剛性比 α の関係を、 $\chi_i=0$ のときの α に等価に置き換える。このとき、 α を等価柱材曲げ剛性比 α_0 と定義する。 α_0 を求めるには、1)~3)の3段階に分類して求める必要がある。1)の場合、 γ はブレース材二次剛性比 χ_i によらない。2)の場合、(5)、(13)、(14)式を(28)式に代入することで、任意のブレース材二次剛性比 χ_i に対して、 $\chi_i=0$ の場合の等価柱材曲げ剛性比 α_0 が求められる。3)の場合も同様に、(5)、(13)、(14)、(23)、(24)式を(28)式に代入することで α_0 が求められる。

2.3 損傷制御型二層ブレース構造物の層間変形集中に対するブレース材二次剛性の影響

図2は、塑性率が層間変形集中率に及ぼす影響を調べるために、(28)式及び静的解析結果を比較したものである。縦軸は層間変形集中率 γ であり、横軸は塑性率 μ である。各線は(28)式で示されるように、上下層の層間変形角のうち、大きい方の値をブレース架構頂部の水平変形角で除したものであり、二層構造物の場合 $1 \leq \gamma \leq 2$ の範囲となる。各プロットは静的解析結果である。静的解析には DRAIN2DX¹⁵⁾ を使用しており、図1の数値解析モデルで $b=900\text{cm}$ 、 $h=360\text{cm}$ としている。せん断剛性・耐力比 $\beta=5/6$ である。図2(a)で上下層ブレース材二次剛性比 χ_i が等しい場合、(a-1) $\alpha=0.01$ では χ_i が大きいほど、塑性率 μ の増加に伴い γ は低下していく。これは、 χ_i が大きいほど層間変形が小さくなるためである。また、折れ点は上下層降伏時の塑性率 μ_s であり、 χ_i が大きいほど上層ブレース材は早期に降伏する。そして、上下層ともに降伏すると層間変形集中率 γ は急激に低下する。これは、上層ブレース材が弾性である場合、下層のみに層間変形が集中していたが、上層ブレース材降伏後、上層の層剛性が低下し、上層の層間変形も急激に増加したためである。(a-2) $\alpha=0.1$ では χ_i によらず γ は概ね等しい。柱材曲げ剛性が大きくなると、早期に応力再配分が進み、 χ_i の違いに

よる μ_6 の差は小さくなり、そして上下層降伏後の層剛性はほぼ等しくなるためである。図 2(b)下層ブレース材二次剛性比 χ_1 が異なる場合 ($\chi_2=0.01$)、(b-1) $\alpha=0.01$ では(a-1)と同様、 χ_1 が大きいほど、 μ の増加に伴い γ は低下していく。これは、 χ_1 が大きいほど下層の層間変形が小さくなるためである。また、 $\chi_1=0.1$ の場合、 μ が概ね 5 を超えると上層に層間変形が集中するため、 γ は増加していく。(b-2) $\alpha=0.1$ の場合も(a-2)と同様、 μ_6 までは γ は概ね等しい。そして、 μ_6 以降は χ_1 が大きいほど、 μ の増加に伴い γ は低下する。 $\chi_1=0.1$ では、(b-1)と同様、 μ が概ね 5 を超えると下層から上層に層間変形集中が変化するため、再び γ は増加していく。

図 3 は、上下層ブレース材二次剛性比がブレース架構の層間変形集中率に及ぼす影響を調べるために、塑性率をパラメータとして(28)式及び静的解析結果を比較したものである。縦軸は層間変形集中率 γ であり、横軸はブレース材二次剛性比 χ_i である。せん断剛性・耐力比 $\beta=5/6$ である。図 3(a)上下層ブレース材二次剛性比 χ_i が等しい場合、

下層ブレース材降伏時である $\mu=1$ では(a-1)、(a-2)ともに χ_i によらず γ は一定となる。(a-1) $\alpha=0.01$ では、 $\mu=2$ のとき上層が弾性であるため、 χ_i が大きくても下層ブレース材の負担層せん断力が大きくなるだけで、ブレース架構のメカニズムに変化はない。その負担量の増加の割合は小さいことから、 γ は χ_i によらずほぼ一定となる。 $\mu=4$ のとき $\chi=0.02$ 以上では上下層が降伏し、上下層ともに層間変形はほぼ一様に増加するため、 γ は急激に低下する。 $\mu=6$ のときには上下層ともに降伏しており、 χ_i が大きくなるほど γ は低下していく。(a-2) $\alpha=0.1$ では、 γ は χ_i によらずほぼ一定の値となる。これは、柱材の曲げ剛性比 α が大きいと、ブレース材降伏後の柱材の負担せん断力はブレース材に対して相対的に大きくなることから、 χ_i の大きさによらず層間変形集中を抑制するためである。また、 $\mu=2$ では上下層がほぼ同時に降伏しているため、 γ の値は小さくなっている。図 3(b)下層ブレース材二次剛性比 χ_1 が異なる場合 ($\chi_2=0.01$)、下層ブレース材降伏時 $\mu=1$ では χ_1 によらず γ は一定となる。(b-1) $\alpha=0.01$ では、 $\mu=2$ のとき上層は弾

性であるため χ_1 が γ に及ぼす影響は小さく、 γ は χ_1 によらずほぼ一定となる。 $\mu=4$ のとき $\chi_1=0.02$ 以上では上下層ともに降伏しているため上層の層間変形が増加し、 γ は急激に低下する。 $\mu=6$ のとき $\chi_1=0.001$ では上下層降伏後間もないため、下層に層間変形が集中しているものの、 χ_1 が大きいほど塑性化した上層の層間変形は増加するため、 γ は小さくなる。そして、 χ_1 が約0.08で $\gamma=1$ となり、 χ_1 が約0.08を超えると、上層に層間変形が集中するため、 γ は再び大きくなる。

図4は、柱材曲げ剛性比がブレース架構の層間変形集中率に及ぼす影響を調べるため、上下層ブレース材二次剛性比をパラメータとして(28)式と静的解析結果を比較している。縦軸は層間変形集中率 γ であり、横軸は柱材曲げ剛性比 α である。せん断剛性・耐力比 $\beta=5/6$ 、塑性率 $\mu=4$ の場合を示している。図4(a)上下層ブレース材二次剛性比 χ_i が等しい場合、 $\alpha=0.001$ では χ_i が大きいほど γ は顕著に低下している。 α が大きくなると、全ての χ_i で早期に上下層のブレース材がほぼ同時に降伏するため、 γ は1に収束していく。柱材の作用せん断力は上下層ブレース材による層せん断力の差であり、柱材は心棒のように上下層の層間変形を均一化する効果を有することが分かる。図4(b)下層ブレース材二次剛性比 χ_1 が異なる場合($\chi_2=0.01$)、 $\chi_1=0.1$ において $\alpha=0.001$ では、上下層ともに降伏しており、 γ は低下している。図4(a)と同様、 α が大きくなると上下層ブレース材がほぼ同時に降伏するため、 γ は1に収束していく。(c)上層ブレース材二次剛性比 χ_2 が異なる場合($\chi_1=0.01$)、 $\alpha=0.001\sim 0.01$ 程度では上層が弾性であるため、 χ_2 によらず γ は等しい。 α が約0.01を超えると上下層ともに降伏しており、 $\alpha=0.01\sim 1$ 程度では χ_2 が χ_1 に近い値ほど上層の層間変形が下層とほぼ等しくなるため、 γ は小さくなる。そして、 α が大きくなると上下層ブレース材はほぼ同時に降伏するため、 γ は1に収束していく。

図5にブレース材二次剛性比と等価柱材曲げ剛性比の関係を $\gamma=1.1\sim 1.6$ について(28)式を用いて表している。縦軸はブレース材二次剛性比 χ_i であり、横軸は等価柱材曲げ剛性比 α_0 である。ここで、 α_0 は2.2節5)で定義したものである。せん断剛性・耐力比 $\beta=1$ 、 $5/6$ で塑性率 $\mu=4$ の場合について、 $\beta=1$ を黒線、 $\beta=5/6$ を灰色線としている。等しい γ における α_0 の値は完全弾塑性の場合よりブレース材が二次剛性を有する場合の方が小さくなる。例えば、 $\beta=5/6$ 、 $\gamma=1.6$ となるときの χ_i と α_0 の組み合わせは $\chi_i=0$ では $\alpha_0=0.018$ 程度、 $\chi_i=0.05$ では $\alpha_0=0.0053$ 程度となる。 $\chi_i=0.05$ のときの α_0 は $\chi_i=0$ のときの約1/3に相当する。また、せん断剛性・耐力比 β が大きいほど、層間変形は下層に

集中する。そのため、 β が大きいほど、 γ が等しくなるときの α_0 の値は大きくなる。

2. 4 損傷制御型二層ブレース構造物の柱材作用モーメントに対するブレース材二次剛性の影響

図6に塑性率が柱材に作用するモーメントに及ぼす影響を調べるために、上下層ブレース材二次剛性比をパラメータとして(29)式と静的解析結果を比較している。縦軸は柱材作用モーメント M_c を下層の降伏せん断耐力に階高を乗じた $V_{fy}h$ で除したものであり、横軸は塑性率 μ である。せん断剛性・耐力比 $\beta=5/6$ の場合を示している。図6(a)上下層ブレース材二次剛性比 χ_i が等しい場合、(a-1) $\alpha=0.01$ 、(a-2) $\alpha=0.1$ ともに χ_i によらず、 μ の増加の伴い、 $M_c/V_{fy}h$ は等しい傾きで上昇していく。 M_c は上下層の負担せん断力の差に階高を乗じることで求められるが、初期勾配時では、上層は弾性であるため、上下層の負担せん断力の差に対して χ_i の影響は小さい。また、折れ点は上下層降伏時の塑性率 μ_s であり、 χ_i が大きいほど上層は早期に降伏し、そのときの $M_c/V_{fy}h$ は小さくなっている。そして、折れ点以降、すなわち上下層降伏後の $M_c/V_{fy}h$ の第二勾配は χ_i が大きいほど高くなっている。(a-2) $\alpha=0.1$ では χ_i が大きいほど上下層降伏時の $M_c/V_{fy}h$ の値は低いものの、第二勾配が高いため、 $\mu=4$ で $M_c/V_{fy}h$ はほぼ等しくなり、 μ がほぼ4を超えると χ_i が大きいほど $M_c/V_{fy}h$ は大きくなる。図6(b)下層ブレース材二次剛性比 χ_1 が異なる場合($\chi_2=0.01$)、(b-1) $\alpha=0.01$ では(a-1)と同様、 χ_1 が大きいほど上層は早期に降伏し、そのときの $M_c/V_{fy}h$ は小さくなる。上下層降伏後、 $M_c/V_{fy}h$ の第二勾配は、 $\chi_1 \leq \chi_2$ であれば正勾配となり、 $\chi_1 > \chi_2$ であれば負勾配となる。そのため、 χ_1 が大きい

図5 ブレース材二次剛性比と等価柱材曲げ剛性比 ($\beta=1, 5/6, \mu=4$)

(a) 上下層ブレース材二次剛性比 χ_i が等しい場合

(b) 下層ブレース材二次剛性比 χ_1 が異なる場合($\chi_2=0.01$)

図6 柱材作用モーメントと塑性率 ($\beta=5/6$)

ほど、 μ の増加の伴い $M_c/V_{fy}h$ は小さくなる。(b-2) $\alpha=0.1$ では、折れ点となるとき μ_6 の値は χ_i によらずほぼ等しい。 $\chi_1 \leq \chi_2$ では $M_c/V_{fy}h$ は μ に対して正勾配となり、 $\chi_1 > \chi_2$ では $M_c/V_{fy}h$ は負勾配となるため、 μ の増加に伴い $M_c/V_{fy}h$ の差は大きくなっていく。

図 7 は、ブレース材二次剛性比が柱材に作用するモーメントに及ぼす影響を調べるために、(29)式と静的解析結果を比較している。横軸はブレース材二次剛性比 χ_i である。せん断剛性・耐力比 $\beta=5/6$ の場合を示している。図 7(a) 上下層ブレース材二次剛性比 χ_i が等しい場合、(a-1) $\alpha=0.01$ では上層が弾性のとき、 $M_c/V_{fy}h$ はほぼ一定である。上下層降伏後、 χ_i が大きいほど $M_c/V_{fy}h$ は小さくなる。これは、図 6(a-1) でも上層が弾性であれば χ_i によらず、 $M_c/V_{fy}h$ はほぼ等しくなり、 χ_i が大きいほど上層は早期に降伏し、 $M_c/V_{fy}h$ は小さくなることから分かる。(a-2) $\alpha=0.1$ では、 $\mu=1, 2$ のとき(a-1) $\alpha=0.01$ と同様の傾向を示すが、 $\mu=4$ では χ_i の値によらず $M_c/V_{fy}h$ はほぼ一定のままであり、 $\mu=6$ のとき χ_i が大きいほど $M_c/V_{fy}h$ は大きくなっている。これは、図 6(a-2) で $\mu=4$ のとき $M_c/V_{fy}h$ の値はほぼ等しくなり、 $\mu=6$ のとき第二勾配が大きいほど $M_c/V_{fy}h$ が大きくなることから分かる。図 7(b) 下層ブレース材二次剛性比 χ_i が異なる場合($\chi_2=0.01$)、(b-1) $\alpha=0.01$ 、(b-2) $\alpha=0.1$ とともに、下層のみ降伏しているときの $M_c/V_{fy}h$ は χ_1 によらずほぼ一定である。上下層降伏後、 χ_1 が大きいほど $M_c/V_{fy}h$ は小さくなる。これは、図 6(b-1)、(b-2) で上層が弾性のとき、 χ_1 によらず $M_c/V_{fy}h$ はほぼ等しくなり、 χ_1 が大きいほど上層は早期に降伏し、 $M_c/V_{fy}h$ は

小さくなることから分かる。また、(b-2) $\alpha=0.1$ では、(b-1) $\alpha=0.01$ より χ_1 が大きいほど $M_c/V_{fy}h$ は急激に低下していく。これは、図 6(b-2) では図 6(b-1) に比べて χ_i による上下層降伏後の $M_c/V_{fy}h$ の傾きが大きく異なるためである。

図 8 は、柱材曲げ剛性比が柱材に作用するモーメントに及ぼす影響を調べるために、(29)式と静的解析結果を比較したものである。横軸は柱材曲げ剛性比 α である。せん断剛性・耐力比 $\beta=5/6$ で塑性率 $\mu=4$ の場合を示している。図 8(a) 上下層ブレース材二次剛性比 χ_i が等しいとき、 $\alpha=0.0001 \sim 0.1$ 程度では χ_i が大きいほど、上下層ブレース材降伏時の塑性率 μ_6 は小さいため、 $M_c/V_{fy}h$ は小さくなる。一方、 $\alpha > 0.1$ では χ_i の違いによる μ_6 の差は小さいため、 χ_i が大きいほど、 $M_c/V_{fy}h$ は大きくなる。ブレース材が完全弾塑性($\chi=0$)³⁾のとき、 $M_c/V_{fy}h=0.1$ が上限となるが、ブレース材二次剛性を有すると、 α の増加により $M_c/V_{fy}h$ も増加していく。図 8(b) 下層ブレース材二次剛性比 χ_i が異なる場合($\chi_2=0.01$)、 χ_1 が大きいほど $M_c/V_{fy}h$ は小さくなる。 $M_c/V_{fy}h$ の上下層降伏後の第二勾配は $\chi_1=0.001, 0.01$ では正勾配、 $\chi_1=0.05, 0.1$ では負勾配となり、そして χ_1 が大きいほど $M_c/V_{fy}h$ の第二勾配は急勾配となることから、 $M_c/V_{fy}h$ は小さくなる。図 8(c) 上層ブレース材二次剛性比 χ_2 が異なる場合($\chi_1=0.01$)、 $\alpha=0.001 \sim 0.01$ 程度では上層は弾性であるため、 χ_2 によらず $M_c/V_{fy}h$ は等しくなる。上下層ともに降伏する $\alpha \geq 0.01$ では、 χ_2 が大きいほど $M_c/V_{fy}h$ は大きくなり、 $\chi_2=0.1$ では $\alpha=10$ で $M_c/V_{fy}h=0.25$ まで達する。

3. ブレース材二次剛性を有する損傷制御型二層ブレース構造物の地震応答性状

本章では、前章における静的地震外力の釣り合いより得られた層間変形集中及び柱材作用モーメントを元に、ブレース架構が損傷を生じるレベルの強震を受ける場合の動的効果を検討する。

3. 1 二層ブレース構造物の動的応答解析概要

2章で誘導された層間変形集中率式及び柱材作用モーメントの算定式〔(28)式, (29)式〕と複数の観測地震波による地震応答解析結果を比較し、これらの算定式の適用の可能性を検証する。解析に用いるブレース架構モデルは図1と同様の形状とし、ブレース架構の一スパン $b=900\text{cm}$ 、層高 $h=360\text{cm}$ とする。また、ブレース材の断面積 $A_b=30\text{cm}^2$ とし、降伏応力 $\sigma_y=235\text{N/mm}^2$ とする。柱材の断面性能は柱材曲げ剛性比 α によって異なり、(1)式より求められる。各層の質量は文献4)と同様、一スパンあたり 120ton とする。ブレース架構の保有水平耐力時のベースシア係数は 0.56 となる。構造物の粘性減衰は Rayleigh 型で、1次と2次の減衰定数は 2% である。数値解析は Newmark- β 法 ($\beta=0.25$) で、時間成分刻みは 1/1000 秒である。地震波は EL Centro 1940 NS/ EW, Hachinohe 1968 NS/ EW, Kobe 1995 NS/ EW, Taft 1952 NS/ EW, Tohoku 1978 NS/ EW の 10 種類とし、ブレース架構に強震が作用し、塑性変形が生じる場合ブレース架構の塑性率と層間変形集中との関係を明らかにする。

3. 2 二層ブレース構造物の動的応答性状に対する弾性柱材の効果

解析対象はせん断剛性・耐力比 β が 1, 5/6, 2/3 の場合のブレース架構であり、柱材曲げ剛性比 α は 0.001, 0.01, 0.1, 1.0, 10 である。

図9にベースシア係数 $C_b=0.56$, $\beta=5/6$ のブレース架構において、最大層間塑性率が生じる層での応答変位時刻歴を示す。地震波は EL Centro 1940 NS である。(a)は $\alpha=0.01$, $\chi_i=0.001$, (b)は $\alpha=1$, $\chi_i=0.001$, (c)は $\alpha=0.01$, $\chi_i=0.1$ について示したものである。縦軸は下層の層間塑性率 μ_1 である。(a) $\alpha=0.01$, $\chi_i=0.001$ では、 $t=4.5\sim 12.0(\text{s})$ の間で $\mu_1=4.0$ 程度に達し、その後片振りし、 $\mu_1=1.8$ 程度を中心として振動している。(b) $\alpha=1$, $\chi_i=0.001$ では、(a)と同様、 $\chi_i=0.001$ であるが柱材曲げ剛性比 α が大きいので、 μ_1 は最大 2.0 程度と小さいものの、残留変形を生じている。(c) $\alpha=0.01$, $\chi_i=0.1$ では、(a)と比較するとブレース材二次剛性比 χ_i が大きいので、 μ_1 は 2.0 程度に低減されている。また、最大変形後の残留変形もほとんど生じていない。残留変形の抑制には、柱材曲げ剛性よりもブレース材の二次剛性が寄与していることが分かる。

図10に図9と同じブレース架構において、最大モーメントを生じ

る位置での応答モーメント時刻歴を示す。縦軸は柱材の最大作用モーメント M_c を、下層の降伏せん断耐力 V_{fy} に層高 h を乗じた値で除したものである。(a) $\alpha=0.01$, $\chi_i=0.001$ では、 $t=4.5\sim 12.0(\text{s})$ 間で $M_c/V_{fy}h$ は最大となり、約 0.05 である。(b) $\alpha=1$, $\chi_i=0.001$ では、 α が大きいので、最大 $M_c/V_{fy}h=0.27$ 程度と、(a)の7倍程度になっている。(c) $\alpha=0.01$, $\chi_i=0.1$ の場合ブレース材二次剛性比 χ_i が大きいので、(a)の場合よりも $M_c/V_{fy}h$ は小さい。

図11に地震波について最大層間塑性率が生じる時の上下層の応答せん断力比 V_{s2}/V_{s1} を示す。各プロットは EL Centro 1940 NS/ EW, Hachinohe 1968 NS/ EW, Kobe 1995 NS/ EW, Taft 1952 NS/ EW, Tohoku 1978 NS/ EW である。図中の太線は柱材曲げ剛性比ごとに V_{s2}/V_{s1} の平均値を示している。各応答解析結果はばらついてはいるが、その平均値は 0.619~0.652 となっており、2章の静的解析で A_i 分布により仮定した上下層のせん断力比 $\varphi=0.644$ と概ね等しくなっている。

3. 3 二層ブレース構造物の動的層間変形及び動的な作用モーメント評価

図12に地震外力を受ける二層ブレース構造物の層間変形集中率及び柱材作用モーメントを、静的釣り合いにより誘導した(28), (29)式と比較している。図12(a)は動的層間変形集中率 γ_d と(28)式より求められる層間変形集中率 γ であり、縦軸は γ_d 、横軸は γ である。各プロットをブレース材二次剛性比ごとに示している。網掛けは ± 0.2 の範囲を示している。 γ 及び γ_d は 1.0 から 2.0 まで幅広く分布しているが、 γ_d と γ は χ_i の大きさによらず概ね対応しており、(28)式により動的層間変形集中率を評価できる。図12(b)は柱材の動的な最大作用モーメント M_{cd} と動的な最大モーメント時の μ に対応した(29)式の柱材の静的な作用モーメント M_c であり、縦軸、横軸をそれぞれ下層の降伏せん断耐力に階高を乗じた $V_{fy}h$ で除したものと示している。 $\beta=2/3$ では $M_c/V_{fy}h=0.014$ 前後、 $\beta=5/6$ では $M_c/V_{fy}h=0.11$ 前後、 $\beta=1$ では $M_c/V_{fy}h=0.22$ 前後にばらつきが見られる。これは、静的解析結果では χ_i が小さいとき、上記の値で $M_c/V_{fy}h$ がほぼ上限となり、 α の値によらず、ほぼ一定となるものの、動的解析結果では慣性力の影響により上記の3箇所では特に各層の最大作用せん断力が増幅・減少し、ばらつきが大きくなったものと思われる。しかし、この3箇所以外では層間変形集中率と同様、 M_{cd} と M_c は概ね一致しており、動的な作用モーメントも(31)式により評価できる。ブレース架構の構造特性及び地震外力レベルを設定すれば、 S_a - S_d スペクトルからブレース架構に要求される変形量(塑性率)を推定でき¹⁰⁾、ブレース材が二次剛性を有する二層ブレース架構の動的層

図9 最大層間塑性率が生じる層での応答変位時刻歴

図10 最大モーメント位置における応答モーメント時刻歴

間変形集中率及び動的作用モーメントはそれぞれ(28)式、(29)式より求められる。

4. 結

本論文では、二相系構造として損傷制御型二層ブレース構造を対象に、構造物に損傷を及ぼすレベルの強震が作用したとき、主抵抗要素にブレース材、二次抵抗要素に弾性柱材を適用したブレース架構について、ブレース材の二次剛性の大きさが層間変形集中率及び柱材作用モーメントに与える影響について検討した。以下に得られた結論を示す。

- 1) 静的釣合いから誘導した二層ブレース構造の層間変形集中率は、ブレース架構の塑性率、柱材曲げ剛性比とブレース材二次剛性比の関係より得られた(28)式で評価できる。
- 2) 静的釣合いから誘導した二層ブレース構造の柱材に作用する最大モーメントは、ブレース架構の塑性率、柱材曲げ剛性比とブレース材二次剛性比の関係より得られた(29)式で評価できる。
- 3) ブレース材二次剛性は層間変形集中率を緩和する効果があるものの、柱材作用モーメントを増加させる。また、地震後のブレース架構の残留変形を低減させる効果もある。
- 4) 動的効果を考慮した層間変形集中率及び動的作用モーメントは静的釣り合いより誘導された(28)、(29)式で評価できる。すなわち、ブレース架構に要求される塑性率を定めることで、設計上想定される地震動を受けるブレース架構の層間変形集中率を予測することが可能となり、層間変形集中を抑制するための柱材断面を決定することができる。

謝辞

本研究は「科学研究費補助金基盤研究(C)(課題番号 19560574)」による成果である。深く感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 川島和彦, A. Macrae, G., 星隈順一, 長屋和宏: 残留変位応答スペクトルの提案とその適用, 土木学会論文集, No.501/I-2, pp183-192, 1995
- 2) 中島正愛, 三谷貴志, 辻文三: 第二剛性比の高いバイリニア系のエネルギー入力・消費特性, 構造工学論文集, vol. 42B, pp.59~68, 1996.3
- 3) 日比野陽, 市之瀬敏勝: 強震を受ける2層鋼構造建物で塑性変形が卓越する層を予測する方法, 日本建築学会構造系論文集, 第606号, pp105~pp.111, 2006.8
- 4) 木村祥裕, グレゴリー・マクレイ: 二層ブレース架構における柱材の力学的性能の違いが架構の層間変形集中に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 第560号, pp189~pp.195, 2002.10
- 5) Gregory A. MacRae, Yoshihiro Kimura, Charles Roeder: Effect of Column Stiffness on Braced Frame Seismic Behavior, Jour. of Structural Engineering, ASCE, Vol.130, No.3, pp.381-391, 2004.3
- 6) 木村祥裕, グレゴリー・マクレイ: 柱脚固定された二層ブレース架構の層間変形集中率に及ぼす柱材の曲げ剛性及び曲げ耐力の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第593号, pp153~pp.160, 2005.7
- 7) 木村祥裕: 損傷制御型二層ブレース構造の層間変形集中率に対する弾性柱材の抑制効果, 日本建築学会構造系論文集, 第612号, pp187~pp.195, 2007.2
- 8) 木村祥裕, 岩間聡史: 強震を受ける損傷制御型二層ブレース構造の層間変形集中に対する柱脚回転剛性の影響, 日本建築学会構造系論文集, 第73巻 628号, pp.973-982, 2008.6
- 9) 秋山宏: 建築物の耐震極限設計, 14.4 損傷分散型骨組, 東京大学出版会, 1987.9
- 10) 日本鋼構造協会: 履歴型ダンパー付骨組の地震応答性状と耐震設計法, 1998.9

図 11 最大層間塑性率を生じる時の上下層の応答せん断力比

(a) 動的層間変形集中率－層間変形集中率

(b) 動的作用モーメント－作用モーメント

図 12 地震外力を受ける架構の動的応答評価

- 11) Tremblay, R.: Achieving a Stable Inelastic Seismic Stability of Concentrically Braced Steel Frames, Engineering Jour. AISC, Vol.40, No.2, pp.111~129, 2003
- 12) 多賀謙蔵, 加登美喜子, 徳田幸弘, 鶴田潤, 和田章: ダンパー効率を高めたパッシブ制震構造における構造計画上の留意点と実用性, パッシブ制震構造シンポジウム 2004, pp.105~112, 2004.11
- 13) International Code Council, Inc. (ICCI): International Building Code, 2003
- 14) American Institute of Steel Construction, Inc.: Seismic Provisions for Structural Steel Buildings, 2006
- 15) Prakash V., Powell G. H. and Campbell S.: Drain-2DX Base Program Description and User Guide Version 1.10, 1993
- 16) 国土交通省住宅局建築指導課, 日本建築主事会議, 日本建築センター: 2001年度版建築物の構造関係技術基準解説書, 2001
- 17) 日本建築学会: 建築耐震設計における保有耐力と変形性能 (1990), 1990.10

(2009年11月10日原稿受理, 2010年1月29日採用決定)