PC 圧着関節工法多層骨組の耐震設計

EARTHQUAKE RESISTANT DESIGN OF PC FRAME WITH PC-MILD-PRESS JOINTS

秋山 宏*

Hiroshi AKIYAMA

The precast prestressed concrete frame with mild-press joints is considered to be a promising earthquake resistant structure on the reason that the structure behaves quasi-elastically under a wide range of story deformation due to elasticity of secondary PC cables applied to form the frame.

The flexible-stiff mixed structure which consists of elastic elements and stiff nonlinear elements has been recognized to develop most excellent structural performance under earthquakes.

In this paper, the possibility of concrete frames with PC mild-press joints are discussed through the estimate of its ultimate resistance to earthquakes based on the balance of energy between the seismic input energy and the absorbed energy by the frame.

Keywords: PC Mild-Press Joints, Flexible-Stiff Mixed Structure, Quasi-Elasticity, Balance of Energy

PC 圧着関節、柔剛混合構造、擬似弾性、エネルギーの釣合

1. 序

PC 圧着関節工法は主要構造部材（柱、梁）を高品質（ $F_c \geq 50\text{N/mm}^2$ ）のプレキャスト・プレストレスト（PCaPC）部材として工場生産し、現場において、PC 鋼材（PC 鋼より線）を用いて柱・梁部材を圧着接合し一体化させる工法である¹⁾。PC 鋼材は1次PC鋼材、2次PC鋼材の2種類からなる。1次PC鋼材は柱・梁の個材形成に用いられるもので緊張力は規格降伏強度の85%とする。2次PC鋼材は柱・梁部材を圧着接合する為に用いられ、緊張力は規格値の50%程度とする。こうすることによって、地震時に骨組を準弾性範囲に留めることが可能となる。PC 圧着関節工法の研究は系統的に進められ、 $1/60\text{rad}$ 程度の層間変形角に達するまで、残留塑性変形は殆ど生ぜず、復元力特性は安定していることが確かめられている^{1), 2), 3)}。

高度な耐震性能を発揮する構造形式に柔剛混合構造がある^{4), 5), 6)}。柔剛混合構造は弾性に留まる柔要素と、弾塑性挙動し地震入力エネルギーを吸収する剛要素からなる。柔要素は地震エネルギーを一時的に受けとめ、順次これを剛要素に送り込む。柔要素の存在によりせん断変形は抑制され、残留変形を殆ど生じさせなくすることができる。また、自重とせん断変形がもたらす $P-\delta$ 効果は負のパネ効果であり、柔要素の弾性効果によってこれを相殺することができ、柔剛混合構造は $P-\delta$ 効果の影響を無視することができる。多層骨組に柔剛混合構造を適用した場合、柔要素の存在により、塑性歪エネルギーの特定層への集中（損傷集中）を軽減させることができる。剛要素はエネルギー吸収要素であり、構造骨組とは独立に開発された各種ダンパー類もこれに含まれる。

損傷分布に関して、柔剛混合構造は次の両極端に分かれる。

- ・ 損傷集中型柔剛混合構造（免震構造）

- ・ 損傷分散型柔剛混合構造（制振構造）

PC 圧着関節工法を用いた多層骨組は擬似弾性的な挙動をする。その為にPC 圧着関節工法多層骨組を擬似柔要素と考え、これに剛要素を組込むことにより損傷分散型柔剛混合構造に類似な構造形式を実現することができる。

2. PC 圧着関節工法¹⁾

既往の研究を参照して PC 圧着関節工法骨組の特性の概要を描いてみる^{1), 2), 3)}。

Fig.1 には PC 圧着関節工法の基本構成を示す。骨組は基礎、柱、梁で構成される。柱、梁は1次ケーブルにより構成され、骨組は2次ケーブルにより構成される。2次ケーブルは2段配置され部材外縁からの距離は $D/4$ 程度（ D は部材せい）とする。また、コンクリートの圧壊が生じないように2次ケーブルの導入張力は制限されるものとする。梁端における柱の突起（コーベル）は梁の下方へのずれ止めとして必須である。Fig.2 には地震時の梁の材端曲げモーメントと材端回転角 θ との関係の基本的な様相を示す。ここで柱は剛体を仮定し、柱の反曲点は柱中央を仮定する。また、梁の変形は梁材端の回転角に集約されているものと仮定する。自重と水平変形による $P-\delta$ 効果は無視されている。コーベルも無視されている。Fig.2(a)は地震水平力 Q と梁材端モーメント M との基本的関係（関節機構）を示す。Fig.2(b)は梁材端曲げモーメント M と材端回転角 θ との関係を示す。Fig.2(a)に示されるように、梁材端の曲げに関する引張側最外縁にコンクリートの引張破断に伴う離間が生じ、圧着関節が形成される。その時の曲げモーメントを M_y とする。

2次ケーブルの緊張力は規格降伏強度の50%とすると規格値に達

* 東京大学 名誉教授・工博

Prof. Emeritus, The University of Tokyo, Dr. Eng.

する迄 2 倍程度の余力を持っている。従って、最大耐力 M_u は次式で与えられると考えることにする。

$$M_u = 2M_y \quad (1)$$

$M > M_y$ における梁末端の回転角は次式で与えられる¹⁾。

$$\theta = \theta_e + \theta_i \quad (2)$$

ここで、 θ_e : 弾性限界回転角

θ_i : 2 次ケーブルの抜け出しによる回転角

文献 3) に示される実験結果を参照すれば $M-\theta$ 関係は Fig. 2(b) に示す様なものとなる。 θ_e から θ_u (最大耐力 M_u に対応する回転角) に至る曲線は図示の細線で示す bi-linear な関係で近似することができる。繰返し荷重下の $\theta < 0.02$ の範囲では基本的に原点指向型になり、ほとんど残留変形が生じないことが実験により確かめられている^{1), 2), 3)}。柱脚部の $M-\theta$ 関係も同様の形態を持つと考えることができる。骨組の基本要素の $M-\theta$ 関係が Fig. 2(b) の形態をとることから、PC 圧着関節工法多層骨組の層せん断力 Q_i と層せん断変形角 θ_i も Fig. 2(b) と相似な Fig. 3 に示す形態をとると考えることができる。

Fig. 3 に示す $Q_i-\theta_i$ 関係において Q_{yi} は i 層のせん断力であり θ_{yi} は層間変形角である。図中の太線は $P-\delta$ 効果は考慮されていない。 $P-\delta$ 効果は図中下部の $Q_{p\delta}$ により示されている。 W_i は i 層に加わる鉛直荷重であり i 層により付加される $Q_{p\delta}-\theta_i$ 関係は負の勾配を持ち、これにより $P-\delta$ 効果を考慮した $Q_i-\theta_i$ 関係は図中の細線で示されるものになる。一般に多層骨組の層の復元力特性における塑性化域の勾配が負勾配となると、損傷集中を受け易くなり、塑性化域の勾配を正勾配に保つことは重要である。 $P-\delta$ 効果を無視した場合の塑性化域の勾配は次式で与えられる。

$$k_{pi} = \frac{Q_{ui}}{3(\theta_{ui} - \theta_{ei})} \quad (3)$$

ここで、 Q_{ui} : i 層の最大せん断力

θ_{ui} : i 層の Q_{ui} 時の変形角

θ_{ei} : i 層の弾性限変形角

Fig.1 Precast-Prestressed Frame with PC Mild-Press Joints

一方、 $P-\delta$ 効果における $Q_{p\delta}-\theta_i$ 関係の勾配 $k_{p\delta}$ の絶対値は W_i である。従って、 $P-\delta$ 効果の下で塑性域の勾配を正勾配に保つ条件は次式で与えられる。

$$\frac{Q_{ui}}{3(Q_{ui} - \theta_{ei})} \geq W_i \quad (4)$$

または、

$$\frac{Q_{ui}}{W_i} > 3(\theta_{ui} - \theta_{ei}) \quad (5)$$

Fig.2 Fundamental Behavior of Mild Press Joint

Fig.3 Shear Force-Deformation Relationship

(5)式が満たされる条件の下で最も安全側の評価として、PC 圧着関節を多層骨組の各層の復元力特性は Fig. 4 に示すように簡略化することができる。 $P-\delta$ 効果における降伏耐力の低下量は小さいので降伏耐力 Q_{yi} は次の値をとることができる。

$$Q_{yi} = \frac{2}{3} Q_{ui} \quad (6)$$

Fig.4 Simplified $Q_i-\theta_i$ Relationship

3. 柔剛混合構造

構造物の地震時の変形応答を論ずる際には基本的な構造形式に着目する必要がある。基本的な構造形式として Fig.5 に示す柔剛混合構造が挙げられる。柔剛混合構造は弾性挙動する柔要素と弾塑性挙動する剛要素との混合構造である。柔要素の弾性剛性に比べ剛要素の弾性剛性は大きいので柔、剛の区別がつけられる。剛要素の復元力特性は完全弾塑性型とする。柔要素と剛要素の混合比は(7)式で示される r_Q によって定義される。

$$r_Q = \frac{f Q_m}{s Q_Y} \quad (7)$$

ここで、 r_Q : 柔剛混合比、 $s Q_Y$: 剛要素の降伏せん断力
 $f Q_m$: 最大変形下の柔要素の負担せん断力

Fig.5 Flexible-Stiff Mixed Structure

柔要素が存在しない構造が通常の骨組であり、 $r_Q > 1.0$ の領域において柔剛混合構造の特徴が明確なものとなる。柔剛混合構造では柔要素の存在により最大変形が抑制され、 δ_p / δ_{pm} の比率が大きくなる。ここで、 δ_p は剛要素の累積塑性変形であり、 δ_{pm} は次式で示される見かけの最大塑性変形である。

$$\delta_{pm} = \delta_m - s \delta_Y \quad (8)$$

ここで、 δ_m : 最大変形、 $s \delta_Y$: 剛要素の降伏変形

δ_p / δ_{pm} の比率を a_d とすれば、 a_d の値は概ね次のようになる^{5),6)}。

$$\left. \begin{aligned} & r_Q = 0 \text{ の場合 (非柔剛混合構造の場合)} \\ & a_d = \frac{\delta_p}{\delta_{pm}} = 2.0 \sim 5.0 \\ & r_Q \geq 1.0 \text{ の場合 (柔剛混合構造の場合)} \\ & a_d = 8.0 \sim 12.0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

柔剛混合構造多層骨組では特定層への損傷集中は緩和される^{6),7)}。これを損傷集中指数 n (後出) で表現すれば、 n の値は次の範囲となる。

$$n = 2.0 \sim 4.0 \quad (10)$$

最大変形抑制効果の源泉は柔要素の弾性即ち、柔要素を除荷した際の原点復帰性にある。

損傷集中緩和の要因はある層で損傷集中が生じ層間変形が増大すると、柔要素の弾性により当該層の耐力増大が起こり損傷集中が緩和されることになる。

4. PC圧着関節工法骨組の柔剛構造との対応

本論文ではFig.6に示すPC圧縮間接工法骨組にダンパー要素を組込んだ骨組を疑似柔剛混合構造と呼び、PC圧着関節工法骨組を疑似柔要素、ダンパー要素を剛要素と呼ぶ。

Fig.6 Mixed Structure with Quasi-Flexible Element and Stiff Element

PC圧着関節工法骨組では骨組要素の復元力特性はFig.4に示すものである。最大変形が生じた後は原点復帰性を保つ。この意味で最大変形抑制効果は柔剛混合構造と同等であり、次式が成立すると考えられる。

$$a_d = \frac{\delta_p}{\delta_{pm}} = 10.0 \quad (11)$$

一方疑似柔要素の降伏耐力は $2/3 Q_{ui}$ であり、層間の損傷集中緩和効果は期待できない。Fig.2に示される様に、PC圧着関節工法骨組では最下層柱脚部を除き、柱部材に関節は生ぜず、全て関節は梁端に生ずる。この意味において、PC圧着関節工法骨組の塑性化は梁端のみに生じさせることができ、梁降伏型骨組が形成され得る。従って、損傷集中指数として梁降伏型骨組に対する次の値を採ることができる⁶⁾。

$$n = 6.0 \quad (12)$$

5. 疑似柔剛混合構造における耐震設計法の定式化⁶⁾

5.1 エネルギーの釣合式

地上に建つ構造物の地震時のエネルギーの釣合式は次式のように書ける。

$$W_e + W_p + W_h = E = \frac{MV_E^2}{2} \quad (13)$$

ここで、 W_e : 弾性振動エネルギー、 W_p : 累積塑性歪エネルギー、 W_h : 減衰により吸収されるエネルギー、 E : 地震入力エネルギー、 V_E : エネルギー入力の等価速度
(13)式は次式のように書くこともできる。

$$W_e + W_p = E - W_h = E_D = \frac{E}{(1 + 3h + 1.2\sqrt{h})^2} = \frac{MV_D^2}{2} \quad (14)$$

ここで、 E_D : 損傷に寄与するエネルギー入力、 h : 減衰定数、

$$V_D = \frac{V_E}{1 + 3h + 1.2\sqrt{h}} \quad \text{: 損傷に寄与するエネルギー入力の速度換算値}$$

5.2 損傷分布

せん断型多層骨組の損傷分布は一般に次のように書ける⁶⁾。

$$\frac{W_{pk}}{W_p} = \frac{1}{\gamma_k} = \frac{s_k P_k^{-n}}{\sum_{i=1}^N s_i P_i^{-n}} \quad (15)$$

ここで、 W_{pk} : k 層の累積塑性歪エネルギー (k 層の損傷)、

W_p : 累積塑性歪エネルギーの総量 (全損傷)、

γ_k : 損傷分散係数、 n : 損傷集中指数、

$$s_i = \left(\frac{\sum_{j=1}^N m_j}{M} \right)^2 \cdot \bar{\alpha}_i^2 \cdot \frac{k_1}{k_i}, \quad m_i : i \text{ 質点の質量、}$$

$\bar{\alpha}_i$: 最適降伏せん断力係数分布、 N : 層数、

$p_i = \frac{\alpha_i}{\bar{\alpha}_1}$: 降伏せん断力係数分布の $\bar{\alpha}_i$ よりの偏差

設計における降伏せん断力係数分布の目標値は $\bar{\alpha}_i$ である。しかし、使用材料のばらつき、施工の便宜からの部材寸法の画一化等により、この目標を達成するのは困難である。設計においては現実的に起こりえるであろう偏差として次の値を設定することができる⁶⁾。

$$\left. \begin{aligned} p_k &= 1.0 \\ p_{i \neq k} &= p_d = 1.185 - 0.0014N \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

第1層の損傷に着目すれば、 $s_1 = 1.0$ であり、(12)式の n 、(16)式の p_i の値を用いて γ_1 は次のように表される。

$$\gamma_1 = \frac{W_p}{W_{p1}} = 1 + \left(\sum_{i=1}^N s_i - 1.0 \right) p_d^{-6} \quad (17)$$

5.3 有効周期

1 質点振動系における V_E と固有周期 T_o との関係はエネルギースペクトルと呼ばれる。系が塑性化する場合は一般に T_o より大きくなり、塑性化する系のエネルギー入力エネルギースペクトルから読み取る為には T_o に代えて、塑性化する系の有効周期を用いる必要がある⁶⁾。有効周期は次式によって与えられる。

$$T_e = \frac{T_o + T_m}{2} \quad (18)$$

ここで、 T_e : 有効周期、 T_m : 塑性化する系の最長周期

最長周期は一般に最大変形 δ_m に対応する割線剛性周期 T_s を用いて次のように表現できる⁶⁾。

$$T_m = a_T T_s = a_T T_o \sqrt{1 + \mu_m} \quad (19)$$

ここで、 μ_m : δ_m に対応する塑性変形倍率

a_T : 復元力特性に応じた修正係数

疑似柔要素の最大周期は割線剛性周期そのものであり、次式が成り立つ。

$$a_T = 1.0 \quad (20)$$

剛要素の復元力特性は完全弾塑性型とする。

a_T の値は完全弾塑性型の復元力特性に対して次の値となる⁶⁾。

$$a_T = \frac{1 + \frac{\mu_m}{8}}{\sqrt{1 + \mu_m}} \quad (21)$$

多層骨組の有効周期は T_o を1次固有周期にとり、 T_m を求める際に μ_m を各層の μ_{mi} の平均値 $\bar{\mu}_m$ に採れば良い。従って、 $\bar{\mu}_m$ の値は次式で与えられる⁶⁾。

$$\bar{\mu}_m = \frac{\gamma_1}{\sum_i s_i} \mu_{m1} \quad (22)$$

ここで、 $\mu_{m1} = (\delta_{m1} - \delta_{y1}) / \delta_{y1}$ 、 $\bar{\mu}_m$: μ_{mi} の平均値

柔剛混合構造は柔要素と剛要素との混合構造である。骨組が柔要素のみから成る場合の有効周期を $_f T_e$ 、剛要素のみからなる場合の有効周期を $_s T_e$ とすれば、混合系（並列系）の有効周期は次式により求められる。

$$\frac{1}{T_e^2} = \frac{1}{_f T_e^2} + \frac{1}{_s T_e^2} \quad (23)$$

5.4 耐震設計法の定式化

a) W_e

(13)式に占める W_e の量は十分に小さくこれを無視することにする。

b) W_p の算出

第1層の損傷 W_{p1} は次式で表される。

$$W_{p1} = _f W_{p1} + _s W_{p1} \quad (24)$$

ここで、 $_s W_{p1}$: 第1層の剛要素の損傷

$_f W_{p1}$: 第1層の疑似柔要素の損傷

剛要素の復元力特性は Fig. 7 に示されるように完全弾塑性型であるとする。 $_s W_{p1}$ は次式で表される。

$$_s W_{p1} = _s \alpha_1 a_d (\delta_{m1} - _s \delta_{y1}) Mg \quad (25)$$

ここで、 $_s \alpha_1 = _s Q_{y1} / Mg$: 第1層の剛要素のせん断力係数

$_s \delta_{y1}$: 第1層の剛要素の降伏変形

δ_{m1} : 第1層の最大変形

$_s Q_{y1}$: 第1層の剛要素の降伏せん断力

g : 重力加速度

Fig.7 Stiff Element

正負の荷重変形領域で同一の最大変形を生ずるものとすれば疑似柔要素の塑性歪エネルギーは Fig. 8 を参照すれば次の値となる。

$$_f W_{p1} = _f \alpha_1 (\delta_{m1} - _f \delta_{y1}) Mg \quad (26)$$

ここで、 $_f \alpha_1 = \frac{_f Q_{y1}}{Mg}$: 第1層の疑似柔要素の降伏せん断力係数

$_f \delta_{y1}$: 第1層の疑似柔要素の降伏変形

$_f Q_{y1} = \frac{2Q_{u1}}{3}$: 第1層の疑似柔要素の降伏耐力

Fig. 3 中の除荷直線は PC 圧着関節工法骨組の理想化された姿である。実際には例えば A から除荷した際の再負荷の過程で図中に破線で示される様に塑性化による更なるエネルギー吸収を伴う。このことを考慮して (26) 式に示す面積の 1.5 倍に相当するエネルギー吸収がなされるものと見なすことにする。従って、 $_f W_{p1}$ は次の値となる。

$${}_f W_{p1} = 1.5 {}_f \alpha_1 (\delta_{m1} - {}_f \delta_{Y1}) Mg \quad (27)$$

(25)、(27)式を(24)式に代入し、(15)式の関係を用いれば、 W_p 次式のように求まる。

$$W_p = [1.5 {}_f \alpha_1 (\delta_{m1} - {}_f \delta_{Y1}) + {}_s \alpha_1 a_d (\delta_{m1} - {}_s \delta_{Y1})] \gamma_1 Mg \quad (28)$$

Fig.8 Energy Absorption in Quasi-Elastic Element

c) T_e の算出

以下に初期周期には T_o を最長周期には T_m を使い、疑似柔要素、剛要素に関するものには左添字 f, s を用いて区別する。

せん断型多層骨組の 1 次固有周期 T_o は一般に次のように表現できる⁶⁾。

$$T_o = 2\pi \sqrt{\frac{M}{k_e}} = 2\pi \sqrt{\frac{M\kappa_1}{k_1}} = 2\pi \sqrt{\frac{\delta_{Y0}\kappa_1}{\alpha_o g}} \quad (29)$$

ここで、 k_e : 等価バネ定数、 δ_{Y0} : 第 1 層の降伏変形、
 k_1 : 第 1 層のバネ定数、 α_o : 第 1 層の降伏せん断力係数、
 $\kappa_1 = k_1/k_e$

c-1. ${}_f T_e$: 疑似柔要素の T_e

Fig.4 を参照すれば、せん断力係数 α_o は次のように表される。

$$\alpha_o = {}_f \alpha_1 \quad (30)$$

また、 $\delta_{Y0} = {}_f \delta_{Y1}$ であり、 ${}_f T_o$ は(29)式より次式のように求められる。

$${}_f T_o = 2\pi \sqrt{\frac{{}_f \delta_{Y1} \kappa_1}{{}_f \alpha_1 \cdot g}} \quad (31)$$

Fig.4 中の A 点の割線剛性に対応する周期が ${}_f T_m$ であり、 ${}_f T_m$ は次式で表される。

$${}_f T_m = \sqrt{1 + \mu_f} {}_f T_o \quad (32)$$

ここで、 $\mu_f = \frac{\lambda_1 {}_f \mu_{mi}}{\sum s_i}$: 疑似柔要素の μ_{mi} の平均値

従って、 ${}_f T_e$ は次のように求められる。

$${}_f T_e = \frac{(1 + \sqrt{1 + \mu_f})}{2} {}_f T_o = \frac{{}_f T_e}{a_f} \quad (33)$$

ここで、 $a_f = \frac{1}{1 + \sqrt{1 + \mu_f}}$

c-2. ${}_s T_e$: 剛要素の T_e

同様に、 ${}_s T_o$ 、 ${}_s T_m$ 、 ${}_s T_e$ は次のように求められる。

$${}_s T_o = 2\pi \sqrt{\frac{{}_s \delta_{Y1} \kappa_1}{{}_s \alpha_1 g}} \quad (34)$$

$${}_s T_m = \left(1 + \frac{\mu_{Y1}}{8}\right) {}_s T_o \quad (35)$$

$${}_s T_e = \left(1 + \frac{\mu_s}{16}\right) {}_s T_o = \frac{{}_s T_o}{a_s} \quad (36)$$

ここで、 $\mu_s = \frac{\gamma_1 {}_s \mu_{mi}}{\sum s_i}$: 剛要素の μ_{mi}

${}_s \mu_{mi}$: 剛要素の μ_{mi}

$$a_s = \frac{1}{1 + \frac{\mu_s}{16}}$$

c-3. T_e

${}_f T_e$ 、 ${}_s T_e$ は次式のように表現できる。

$${}_f T_e = \frac{{}_f T_o}{a_f}, \quad {}_s T_e = \frac{{}_s T_o}{a_s} \quad (37)$$

従って、(23)式より有効周期は次のように表現できる。

$$T_e = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{a_f}{{}_f T_o}\right)^2 + \left(\frac{a_s}{{}_s T_o}\right)^2}} = a_e {}_s T_o \quad (38)$$

ここで、 $a_e = \frac{1}{\sqrt{a_s^2 + a_f^2 \left(\frac{{}_s T_o}{{}_f T_o}\right)^2}}$ (39)

d) 耐震性評価式

柔剛混合構造における混合比 r_Q を用いて次式の関係を導入する。

$${}_f \alpha_1 = r_Q {}_s \alpha_1 \quad (40)$$

(14)式に $W_e = 0$ 及び(28)、(40)式を代入すれば耐震評価の基本式が次のように求まる。

$${}_s \alpha_1 [1.5 r_Q (\delta_{m1} - {}_f \delta_{Y1}) + a_d (\delta_{m1} - {}_s \delta_{Y1})] \gamma_1 = \frac{V_D^2}{2g} \quad (41)$$

エネルギースペクトルは次式で示す 2 線分で表現できる。即ち、

$$\left. \begin{array}{ll} T_e \leq T_G & V_E = \frac{V_{Em}}{T_G} \cdot T_e \\ T_e > T_G & V_E = V_{Em} \end{array} \right\} \quad (42)$$

(41)、(42)式より ${}_s \alpha_1$ は次のように求められる

$T_e \leq T_G$ の場合

$${}_s \alpha_1 = \frac{2\pi V_{Dm} a_e}{g T_G} \cdot \frac{\sqrt{\kappa_1 / \gamma_1}}{\sqrt{2} \sqrt{1.5 r_Q (\delta_{m1} - {}_f \delta_{Y1}) + a_d (\delta_{m1} - {}_s \delta_{Y1})}} \quad (43)$$

$T_e > T_G$ の場合

$${}_s \alpha_1 = \frac{1}{[1.5 r_Q (\delta_{m1} - {}_f \delta_{Y1}) + a_d (\delta_{m1} - {}_s \delta_{Y1})] \gamma_1} \cdot \frac{V_{Dm}^2}{2g} \quad (44)$$

ここで、 $V_{Dm} = \frac{V_{Em}}{1+3h+1.2\sqrt{h}}$

真の ${}_s\alpha_1$ は(43)、(44)式が与える ${}_s\alpha_1$ の小さい方の値である。第1層の必要せん断力係数は次の値である。

$$\alpha_1 = {}_s\alpha_1 + {}_f\alpha_1 = {}_s\alpha_1(1+r_Q) \quad (45)$$

更に $P-\delta$ 効果を打消す為には(5)式を考慮する必要がある。

$1.5{}_fQ_{Y1} = Q_{u1}$ であり(5)式を $P-\delta$ 効果が最も大きい第1層に適用すれば次式となる。

$$\frac{1.5{}_fQ_{Y1}}{W_1} \geq 3.0(\theta_{u1} - \theta_{e1}) \quad (46)$$

ここで、 W_1 ：1階に加わる全重量

${}_fQ_{Y1} = {}_f\alpha_1 W_1$ であり、 ${}_f\alpha_1$ の $P-\delta$ 効果による制限式は次の値となる。

$${}_f\alpha_1 = 2.0(\theta_{u1} - \theta_{e1}) \quad (47)$$

6. 例題

PC 圧着関節工法骨組の疑似柔剛混合構造としての有効性を示す為以下条件の下での例題を示す。

a. 地震入力と最大変形

地震入力としては Fig.9 に示す範囲のエネルギースペクトルを設定する。

b. 損傷集中指数 n

梁降伏型であり $n=6$ とする。

Fig. 9 に示すエネルギースペクトルは兵庫県南部地震の記録、長周期地震動に対する最近の予測波を概ね包絡するものとして設定されている⁹⁾。ローマ数字 I から V は地震入力レベルを表す。地震入力のレベルに対応させて、剛要素の塑性変形倍率 μ_o を Table 1 の様に設定する。地震入力が増大すれば塑性変形倍率も増大する。(44)式に従えば、 α_1 が同一であれば塑性変形は V_{Em}^2 に比例すると云える。従って μ_D の設定値は、ほぼ V_{Em}^2 に比例する値とした。

Fig.9 Energy Spectrum

Table 1

	I	II	III	IV	V
μ_o	1.5	2.5	4.0	6.0	8.0

c. 疑似柔要素緒元

$$\theta_{ei} = \theta_e = \frac{1}{500} \quad , \quad {}_f\delta_{Y1} = {}_f\delta_Y = 0.8cm$$

$$\theta_{ui} = \theta_u = \frac{1}{55.6} \quad , \quad {}_f\delta_u = 7.2cm$$

$$r_Q = 1.0 \quad , \quad H = 400cm$$

d. 剛要素緒元

$${}_s\delta_{Y1} = {}_s\delta_Y = 0.8cm$$

e. その他

$h=0.03$ とする。また、 $a_d=10.0$ とする。

$\kappa_1 \cdot \sum_i s_i$ に関しては次の近似式を用いる。

$$\kappa_1 = 0.48 + 0.52N \quad (48)$$

$$\sum_i S_i = 0.36 + 0.64N \quad (49)$$

f. α_1 の推定式

例題の条件を考慮すれば(43)、(44)式より α_1 が次のように求められる。

$T_e \leq T_G$ の場合

$$\alpha_1 = 2{}_s\alpha_1 = \frac{4\pi V_{Dm} a_e}{g T_G} \cdot \frac{\sqrt{\kappa_1 / \gamma_1}}{\sqrt{23.0({}_f\delta_{m1} - {}_f\delta_{Y1})}} \quad (50)$$

$T_e > T_G$ の場合

$$\alpha_1 = \frac{2}{11.5({}_f\delta_{m1} - {}_f\delta_{Y1})\gamma_1} \cdot \frac{V_{Dm}^2}{2g} \quad (51)$$

また、 ${}_sT_o = {}_fT_o$ であり、 $a_e = \frac{1}{\sqrt{a_s^2 + a_f^2}}$ となる。

剛要素が存在せず疑似柔要素単独の場合は、剛要素のエネルギー吸収は存在せず、 α_1 の推定式は次式となる。

$T_e \leq T_G$ の場合

$$\alpha_1 = \frac{2\pi V_{Dm} a_e}{g T_G} \cdot \frac{\sqrt{\kappa_1 / \gamma_1}}{\sqrt{3.0({}_f\delta_{m1} - {}_f\delta_{Y1})}} \quad (52)$$

$T_e > T_G$ の場合

$$\alpha_1 = \frac{1}{1.5({}_f\delta_{m1} - {}_f\delta_{Y1})\gamma_1} \cdot \frac{V_{Dm}^2}{2g} \quad (53)$$

$$a_e = \frac{1}{a_f}$$

Fig. 10 には疑似柔剛混合構造の所要降伏せん断力係数 α_1 と N との関係を示す。短周期領域では α_1 はばらつきが大きい、長周期領域では地震入力に拘わらず α_1 は N で応じた一定値をとることがわかる。 α_1-N 関係はほぼ次式で近似でき、PC 圧着関節工法骨組を疑似柔要素とする混合構造は優れた耐震構造であると云える。

$$\alpha_1 = \frac{3}{N} \quad (54)$$

Fig.10 $\alpha_1 - N$ Relationship of Mixed Structures

$P-\delta$ 効果による $f \alpha_1$ の制限値 ((47) 式) を例題にあてはめると次の値が得られる。

$$f \alpha_1 = 2.0(\theta_{u1} - \theta_{e1}) = 0.032 \quad (55)$$

Fig. 8 より $\alpha_1 \geq 0.06$ であり、 $f \alpha_1 = 0.5\alpha_1 \geq 0.03$ は満たされており、Fig. 8 の結果は $P-\delta$ 効果の影響を受けない範囲にあると判断できる。

一方、ダンパー要素を組込まず PC 圧着関節工法骨組単独の場合 (原型) の所要せん断力係数を求めたものが Fig. 11 である。Fig. 10 との比較において、原型単独では大地震入力に耐えるには無理があることから、疑似柔剛混合構造の有効性が歴然となる。

Fig.11 $\alpha_1 - N$ Relationship of Original Systems

Fig.12 Possible Application of Original System

地震入力レベル I、II に対して $\mu_o = 4.0$ 、 $\mu_o = 8.0$ を設定した場合の結果が Fig. 12 に示されている。 $V_E = 200 \text{ cm/s}$ 程度の場合には原型のみによる対応も可能であると云える。

7. 解析モデルの検証

4. において、疑似柔剛混合構造の性能は次のものであることを推論した。

- 1) PC 圧着関節工法骨組の層の復元力特性は原点指向型であり、柔剛混合構造の柔要素と同様に層の塑性変形を抑制する効果を持つ。
- 2) PC 圧着関節工法骨組を弾性範囲に留めることは困難であり、柔剛混合構造における特定層への損傷集中抑制効果をこれに期待することはできない。

上記の推論を確かめる為に、せん断型多層骨組に Fig. 4 に示す原点指向型の要素を疑似柔要素とし、完全弾塑性型復元力特性を持つダンパーを剛要素とする疑似柔剛混合構造の応答解析を行う。モデル諸元は 6. 例題に用いたものと同一である。また、柔要素を弾性とする柔剛混合構造の応答も参考として求める。それぞれの応答の第 1 層の最大変形応答 δ_{m1} と V_{Em} との関係を求める。共通条件として次のものを設定する。

$$f \alpha_1 = s \alpha_1 = 0.15 \quad (\alpha_1 = 0.3) \quad (56)$$

$$h = 0$$

以下に次の条件の下での予測値を求める。

$$a_d = 10.0, \quad N = 10, \quad f \delta_{Y1} = s \delta_{Y1} = 0.8$$

a) 疑似柔剛混合構造

$$W_p = Mg \frac{\alpha_1}{2} \mu_1 (1 + a_d)_s \delta_{Y1} \gamma_1 \quad (57)$$

$$E = \frac{MV_{Em}^2}{2} \quad (58)$$

(57)、(58) 式を等値すれば次式が得られる。

$$\mu_1 = \frac{V_{Em}^2}{2g} \cdot \frac{1}{0.4\alpha_1(1+a_d)\gamma_1} \quad (59)$$

γ_1 は次式で与えられる。

$$\gamma_1 = 1 + \left(\sum_{i=1}^{10} s_i - 1 \right) p_d^{-n} \quad (60)$$

ここで、 $p_d = 1.185 - 0.0014N$

骨組はせん断型であり、損傷集中指数としては $n=12$ を用いる。

b) 柔剛混合構造

$$W_p = Mg \frac{\alpha_1}{2} \mu_{1s} \delta_{Y1} \gamma_1 \quad (61)$$

$$E = \frac{MV_{Em}^2}{2} \quad (62)$$

(61)、(62) を等値すれば

$$\mu_1 = \frac{V_{Em}^2}{2g} \cdot \frac{1}{0.4\alpha_1 a_d \gamma_1} \quad (63)$$

(63) 式に用いるべき n の値は柔剛混合構造であるから $n=3$ を用いることができる。

解析に用いた地震記録は以下の 3 波である。

- a) Imperial Valley (1946) エルセントロ記録 (NS 成分)
- b) 十勝沖地震 (1968) 八戸記録 (EW 成分)
- c) 兵庫県南部地震 (1995) 神戸記録 (NS 成分)

なお、解析にあたっては、 $i \neq 1$ の降伏せん断力係数分布としては予測に用いたのと同じ以下の条件を用いた。

$$\alpha_{i \neq 1} = p_d \bar{\alpha}_i \alpha_1 \quad (64)$$

Fig. 13 には疑似柔剛混合構造の応答を示す。Fig. 13(a)には第1層の最大変位応答 δ_{m1} と V_E との関係を示す。実線は(59)式による予測値 (${}_s\delta_{y1}(1+\mu_1)$) である。(59)式による予測値はほぼ解析値に対応しており、疑似柔要素は損傷集中緩和には役立たず、 $n=12$ に対応する

応する応答であることがわかる。一方、Fig. 13(b)には第1層の変位応答より求めた a_d と V_E との関係を示す。最大変形応答抑制効果として $a_d=10$ の設定は妥当なものであることがわかる。Fig. 14 には柔剛混合構造の応答を示す。柔剛混合構造では $n=3$ に対応する損傷集中抑制効果が発揮されることがわかる。

Fig.13 Response of Shear-Type Mixed Structure

Fig.14 Response of Shear-Type Mixed Structure

7. 結語

PC 圧着関節工法骨組に疑似柔剛混合構造を適用し、PC 圧着関節工法骨組の耐震設計の可能性を検討した結果、以下の結論が得られた。

1. PC 圧着関節工法骨組は地震入力レベルに応じて最大変形を大きく設定することが可能であり、梁降伏型骨組を形成し得る。
2. PC 圧着関節工法骨組は最大せん断変形角 $1/60$ 程度迄、弾性的復元力を保持し、疑似柔剛混合構造における疑似柔要素として機能し得る。
3. PC 圧着関節工法骨組のみの単独構造は $V_E < 200 \text{ cm/s}$ 程度の入力に対して耐震設計は可能である。
4. PC 圧着関節工法骨組を疑似柔要素とし、完全断塑性型の復元力特性を持つ剛要素との混合構造とした疑似柔剛混合構造は単独構造に比べて所要強度を半減させることが可能である。
5. 柔剛混合構造では $V_E = 300 \text{ cm/s}$ 程度の大地震入力に対しても設計が可能である。
6. PC 圧着関節工法骨組はその疑似弾性的挙動により P- δ 効果を相殺し、残留変形を抑制し、疑似柔剛混合構造の疑似柔要素を構成することにより、高い耐震性能を発揮することができる。

参考文献

- 1) 中野清司、田辺恵三、町田重美、和田 章、他：PC 圧着関節工法による損失制御設計（その 1～その 4）、日本建築学会大会学術講演梗概集 C-2、pp. 893-900、2001
- 2) 中野清司、和田 章、松崎育弘、坂田弘安、田辺恵三、久保山博之、池澤 誠、山下 実、中川 理、黒澤亮太郎、他：PC 圧着関節工法による損失制御設計に関する研究（その 1～その 6）、日本建築学会大会学術講演梗概集 C-2、pp. 987-998、2003
- 3) 中野清司、田辺恵三、松崎育弘、和田 章、坂田弘安、久保山寛之、杉山 智明、池澤 誠：PC 圧着関節工法による損失制御架構の力学的性状に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集 第 576 号、pp. 125-132、2004. 2
- 4) 秋山 宏：耐震設計の多様化に対応した耐震設計、日本建築学会論文報告集 第 472 号、pp. 85-90、1995. 6
- 5) 高橋 誠、秋山 宏：地震時における多層骨組の最大変形とエネルギー応答、日本建築学会構造系論文集 第 515 号、pp. 59-66、1999. 1
- 6) 秋山 宏：エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計、技報堂出版、1999
- 7) 高橋 誠、秋山 宏：地震時における柔剛混合構造せん断型骨組の損傷集中特性、日本建築学会構造系論文集 第 536 号、pp. 63-70、2000. 10
- 8) 秋山 宏：鋼構造豪雪骨組の耐震性に及ぼす P- Δ 効果の影響、日本建築学会論文報告集 第 340 号、pp. 11-16、1984. 6
- 9) 日本建築学会：長周期地震動と建築物の耐震性、丸善、2007. 12

(2009年7月1日原稿受理、2009年9月24日採用決定)