

繊維化塑性関節モデルによる学校体育館混合骨組の詳細解析

DETAILED ANALYSIS OF A SCHOOL GYMNASIUM FRAME
BY THE FIBERED PLASTIC HINGE MODEL

修行 稔*, 島津 勝**

Minoru SHUGYO and Masaru SHIMAZU

This paper presents some excellent numerical results of collapse analysis on an RC-steel hybrid frame used in a school gymnasium. The analyses are done by the fibered plastic hinge method. The limit bending moment and the limit shear force of the column base of the upper steel frame and the limit overturning moment of the RC base are checked in the analysis according to a currently recommended evaluation method. The bending strength of the footing is also checked. The influences of eccentricity between the chord members and the lattice members are taken into account. The numerical result is an upper bound solution, and at the same time, a lower bound solution for the idealized numerical model. The results are compared with those obtained by the conventional α -method.

Keywords: fibered plastic hinge model, school gymnasium, hybrid frame

繊維化塑性関節モデル, 学校体育館, 混合骨組

1. 序

学校体育館の多くは、鉄筋コンクリート (RC) 柱の上に鉄骨ラーメンが載った RC・鋼混合骨組を使用している。その保有水平耐力や崩壊メカニズムを評価するためには、鉄骨ラーメン柱脚部の曲げ耐力とせん断耐力および RC 柱基礎の転倒限界モーメント¹⁾などを考慮しつつ混合骨組を解析する必要があるが、一般の構造設計事務所はこのような解析が可能なソフトウェアを容易に使用できる状況にはなく、主として文献 2 の荷重係数 α を用いる方法 (以下 α 法と称する) で保有水平耐力を求めている。 α 法は便宜的な簡略解法であり精度に不安なしとしないが、 α 法で得られる保有水平耐力の精度について検討した研究は少なく、著者らの論文³⁾⁴⁾が目につく程度である。

文献 3 では H 形鋼柱と H 形鋼アーチはりからなる中間フレームと妻フレームを解析し、それぞれ α 法による解に比べて 3.0% と 2.2% 低い保有水平耐力となること、文献 4 では下層部を RC 柱に埋め込まれた H 形鋼の柱と H 形鋼の山形はりからなる中間フレームを解析して、 α 法による解と比較して 8.0% ほど低い保有水平耐力となることを示した。しかし、文献 3 で扱った、上部が山形鋼を用いたトラスラーメンである混合骨組についてはラチス材の偏心接合を無視した解析にとどまっておき、上部鉄骨がトラスである混合骨組についての α 法の信頼性について定量的な判断ができるまでには至っていない。

本研究では、文献 3 で解析したトラスラーメンを有する混合骨組を対象として、RC 部材の解析における信頼性を高めた繊維化塑性関節モデル⁵⁾を用いた精密な解析を実施し、ラチス材の偏心

に起因する複雑な弾塑性挙動を明らかにするとともに、保有水平耐力に関して α 法による結果との比較検討を行う。

2. 解析法の概要

本解法の要素モデルは、本来は鋼骨組の統一的な三次元大変位弾塑性解析のために開発されたもの⁶⁾であり、その特徴から繊維化塑性関節モデルと称している。本モデルは、鋼部材に関しては文献 6 および 7 に、RC や SRC 部材に関しては文献 5 にそれぞれ述べた仮定のもとに定式化されている。なお、本モデルは要素両端に接合部のコンプライアンスを考慮できるが、本研究ではこの機能を利用して、鉄骨ラーメン柱脚部や RC 柱基礎に生じる軸力や曲げモーメントの値を用いて、文献 1 に準拠した形で柱脚や基礎の節点を塑性ヒンジに変えつつ増分解析を進め、1 度の増分解析で崩壊メカニズムと保有水平耐力を得ることを可能としている。

学校体育館の混合骨組には、H 形鋼、山形鋼、RC、SRC、など様々な部材が混在している。本モデルはそのすべてを統一的に扱えるが、それぞれについて要素剛性行列の評価法を記述するのは困難なので、ここでは RC および SRC 部材に関して概略を述べる。

2. 1 仮定

RC および SRC 部材の要素モデルの定式化に際して以下のように仮定する⁵⁾。(a) 鋼材とコンクリートの間にすべりは発生せず両者は一体となって変形する。(b) 部材の断面は二軸対称であり、変形後も平面を保持する。(c) 骨組の節点変位は大きい部材の弾性ひずみは小さい。(d) 断面の形状は降伏後も不変である。(e) せん断変形は無視できる。(f) 部材の材軸回りのねじれ変形は小さく、部

* 長崎大学工学部構造工学科 教授・工博

** 長崎大学工学部構造工学科 助教・博士(工学)

Prof., Dept. of Struct. Eng., Faculty of Eng., Nagasaki Univ., Dr. Eng.

Res. Assoc., Dept. of Struct. Eng., Faculty of Eng., Nagasaki Univ., Dr. Eng.

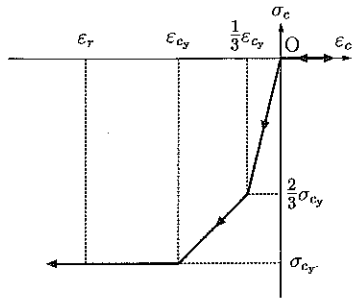


図1 コンクリートの応力ひずみモデル

材の塑性的挙動に影響しない。また、H形鋼のそり変形やコンクリートのねじれ剛性は無視できる。(g) 塑性変形成分は、軸力と二軸回りの曲げモーメントに対応する3成分である。(h) 塑性ひずみ増分の各成分は要素内で線形に分布する。(i) 要素の両端と要素中央部との相対変形の塑性成分は、要素端*i*または*j*側に集約されて生じる。(j) 鋼材の応力ひずみ関係は、降伏後のひずみ硬化係数 $H_s = E_s/100$ のbilinear形である。ここに E_s は鋼材のヤング率である。(k) コンクリートの応力ひずみ関係は、圧縮のみ負担し劣化を生じない trilinear 形である。

コンクリート繊維の応力ひずみ関係のモデルについては、コンクリートの引張り強度や劣化現象を考慮したものほか、様々なものが既往の研究で提案されている。しかし、本研究で扱うRC柱はせん断スパン比が4に近く、本要素モデルのRCフレームへの適用性を検証した文献5で示した適用範囲に入るため、文献5と同じく図1に示す劣化のない trilinear 形を使用する。コンクリート繊維の降伏応力 σ_{cy} はコンクリート強度 F_c の値をそのまま用い ($\sigma_{cy} = -F_c$)、コンクリートのヤング率 E_c は古い建物であるので文献8に準拠して評価する。この E_c を初期剛性として図1の応力ひずみ関係を仮定している。なお、仮定(e)および(f)から明らかのように、本モデルは短柱を含む骨組やRCおよびSRC部材に大きなねじりが生じる骨組を解析対象から除外している。

2.2 幾何学的非線形剛性

要素の両端を*i*, *j*として*i*端の図心に原点Oをとり、材軸方向に*x*軸、これと右手系をなすように断面主軸方向に*y*, *z*軸をとる。仮定(a)~(f)および modified incremental stiffness method を用いると(1)式を満足する弾性接線剛性行列 K^e が得られる⁶⁾。

$$dQ + R = K^e dq^e \quad (1)$$

ここに、 R は不平衡力、 Q と q^e はそれぞれ12成分からなる要素端力と要素端弾性変位である。

2.3 塑性変形増分の算定

本解法では塑性変形増分の算定に要素両端断面(塑性ヒンジ)の塑性接線係数行列を用いる。この係数行列は、要素を構成する微小な繊維の、その時点での剛性を断面に関して数値積分することによって求められる。鋼コンクリート混合部材の場合、仮定(f)から繊維の応力増分とひずみ増分の関係は次のようになる。

$$d\sigma = E_t d\epsilon \quad (2)$$

ここに、 σ は軸力と二軸曲げモーメントによって生じる垂直応力、 E_t は繊維の一軸応力ひずみ関係の硬化係数である。仮定(g)から塑性変形に關与する一般化応力 f と一般化ひずみ δ の成分は次の

ようになる。

$$\left. \begin{aligned} f &= [f_x \quad m_y \quad m_z]^T \\ \delta &= [\epsilon_0 \quad \phi_y \quad \phi_z]^T \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここに、 f_x は軸力、 m_y と m_z は曲げモーメント、 δ の成分はそれぞれに対応する一般化ひずみである。塑性ヒンジ部の断面を微小な繊維に分割し、繊維の応力と一般化応力の関係および繊維のひずみと一般化ひずみの関係を用いて Newton-Raphson 法を適用すれば、一般化応力増分と一般化ひずみ増分の間に次のような関係が得られる⁶⁾。

$$df = s d\delta \quad (4)$$

ここに、 s は断面に関する接線係数行列である。 s を変形することによって、次式を満足する塑性接線係数行列 \hat{s} が求められる。

$$d\delta^p = \hat{s} df \quad (5)$$

ここに、 $d\delta^p$ は一般化ひずみ増分の塑性成分である。

さて、仮定(g)により要素両端の塑性ヒンジに生じる塑性変形増分を次のように定義できる。

$$\left. \begin{aligned} dq_i^p &= [du_i^p \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad d\theta_{yi}^p \quad d\theta_{zi}^p]^T \\ dq_j^p &= [du_j^p \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad d\theta_{yj}^p \quad d\theta_{zj}^p]^T \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

これらの塑性変形増分は、要素の一般化塑性ひずみ増分によって生じるものである。要素両端の塑性接線係数行列 \hat{s} を利用し、仮定(h)~(i)を導入すれば、要素両端の塑性変形増分 dq^p と要素端力増分 dQ とを関係づける行列 s^p を得ることができる⁶⁾。

$$dq^p = s^p dQ \quad (7)$$

2.4 弾塑性接線剛性行列

部材端弾塑性変位増分 dq^{ep} が、弾性変位増分 dq^e と塑性変形増分 dq^p の合計として生じると仮定すると、(10)式に示す弾塑性接線剛性行列 K^{ep} が得られる。

$$dQ + R = [I + K^e s^p]^{-1} K^e dq^{ep} \equiv K^{ep} dq^{ep} \quad (8)$$

ここに、 I は単位行列である。数値解析は反復修正を行うことなく変位増分法で進める。

3. 鉄骨ラーメン柱脚部とRC柱基礎の取扱い

鉄骨ラーメン柱脚部が曲げ耐力を越えたとき、およびRC柱基礎が転倒限界モーメントまたはフーチング曲げ耐力³⁾を越えたときは対応する節点を塑性ヒンジに変更するが、この変更には本要素モデルの半剛節機能を利用する。(1)式の K^e と(7)式の s^p が得られていることを前提として、要素の両端に長さ零の接合要素を付加する。この接合要素には、軸力および二軸回りの曲げモーメントに対するコンプライアンスを設定できるが、ここでは二軸回りの曲げモーメントに対するコンプライアンスのみを考慮する。要素*i*端の接合要素に生じる(すなわち接合部に生じる)変形を q_i^c で表すと、*i*端の要素端力増分を dQ_i^c として(9)式が得られる。

$$dq_i^c = c_i dQ_i^c \quad (9)$$

ここに、

$$c_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c_{66} \end{bmatrix} \quad (10)$$

である。j 端についても接合部の状況に応じて同様の式が得られ、まとめて次式となる。

$$dq^c = cdQ \quad (11)$$

(10) 式中の c_{55} と c_{66} はそれぞれ要素 y 軸回りと z 軸回りのコンプライアンスであり、 $c_{55}=c_{66}=0$ とおけば剛接合、 c_{55} と c_{66} に大きな数値を入れれば接合部は二軸回りに塑性ヒンジになる。

要素端変位増分 dq が、弾塑性変位増分 dq^{ep} と半剛接合部に生じる変形増分 dq^c の合計として生じると仮定すると、(12) 式に示す半剛接弾塑性接線剛性行列 K^s が得られる。

$$dQ + R = [I + K^e(s^p + c)]^{-1} K^e dq \equiv K^s dq \quad (12)$$

3. 1 柱脚部の取扱い¹⁾

鉄骨フレーム柱脚部については一般的な露出形式柱脚を対象とする。解析に際しては文献 1 に準じて柱脚部の曲げ耐力とせん断耐力を算出し、各ステップで柱脚のベースプレートと節点を共有する RC 要素の、ベースプレート側の節点に生じる曲げモーメントと軸力およびせん断力をチェックする。曲げモーメントが柱脚の曲げ耐力を越えたらその節点を塑性ヒンジに変更し、せん断力が柱脚のせん断耐力を越えたらその旨を出力して計算を終了する。

3. 2 基礎の取扱い¹⁾

RC 柱の基礎についても文献 1 に準じて転倒限界モーメントを算出し、基礎部節点の曲げモーメントがその値を越えた時点、またはフーチングが曲げ耐力に達した時点で基礎部節点を塑性ヒンジに変更する。

4. 実務での計算方法¹⁾²⁾

実務では一般に文献 1 と 2 に準拠して計算が行われている。各部材の等価な降伏軸力を部材の座屈荷重や接合部の耐力などを考慮しながら求めた上で、まず鉄骨部分のみを対象とし、上部鉄骨部のトラス柱やトラスはり等を単一材と考えて線材モデルに置換して柱脚部分をピン支持としたモデルで計算を行う。鉛直荷重を載荷した場合、および水平力の基準荷重を載荷した場合についてそれぞれ部材に生じる軸力を求める。求めた軸力から荷重係数 α を次式により求める。

$$\alpha = \frac{(N_u - N_{DL})}{|N_{EQ}|} \quad (13)$$

ここに、 N_u は N_{EQ} の符号 (引張または圧縮) に対応した等価降伏軸力、 N_{DL} は鉛直荷重時軸力、 N_{EQ} は水平荷重時軸力である。この α が一番小さな部材を探し、その結果から基準荷重の α 倍の荷重をかけたときの軸力を求め、その軸力を使って柱脚耐力を求める。鉄骨部の一般化応力分布としては柱脚をピン支持としたままの値を使い、支持部に柱脚耐力を入れて鉄骨部材のみの耐力を推定する。RC 柱も一体として評価するためには RC 柱の耐力と基礎の転倒限界モーメントを求め、柱脚耐力と照らし合わせて評価する。この方法では骨組に第 3 のヒンジができた時点を保有水平耐力時としていることになるが、必要があれば第 3 のヒンジの反対側で荷重係数が最も小さいところを第 4 のヒンジと仮定して、メカニズム形成時としての保有水平耐力を推定する。

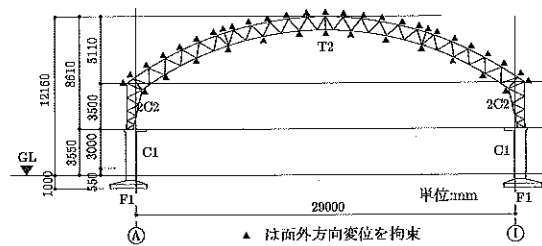


図 2 体育館の中間骨組

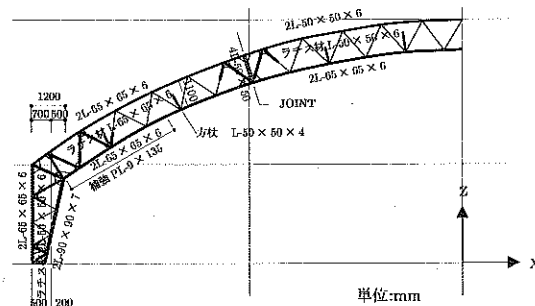


図 3 鉄骨ラーメンの詳細図

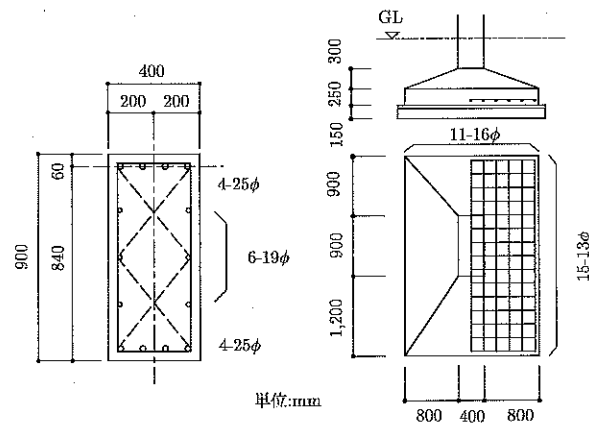


図 4 RC 柱の断面図および基礎図

5. 解析

5. 1 解析対象骨組の概要

図 2 のようにはりと 2 階の柱がトラス状に鉄骨で形成され、1 階部分が RC 造となっている学校体育館の中間骨組である。図中の▲印はもや方づえなどで構面外への変位を拘束されている点を示す。地盤の長期許容耐力度は 150 kN/m^2 である。鉄骨ラーメンの詳細を図 3 に、RC 柱の断面図と基礎の形状を図 4 に示す。表 1 は RC 柱と基礎の材料定数である。鉄骨部材の材料定数については後で述べる。表 1 中のコンクリートの降伏ひずみは図 1 の ϵ_{cy} である。上下弦材の接合には $\phi 20$ の、ラチス材の接合には $\phi 16$ のリベットを使用しており、はしあきは 40 mm 、ピッチは 60 mm である。

5. 2 偏心接合ラチス部の予備解析

本研究はラチス材の偏心の影響を定量的に調べることを目的としている。そこで、まずラチス材の偏心座屈を十分な精度で追跡す

表 1 RC 柱と基礎の材料定数

材料	鋼種	降伏応力 (N/mm^2)	降伏ひずみ ($\times 10^{-6}$)	ヤング率 (N/mm^2)
コンクリート	-	-18	-1810	19900
鉄筋	SR235	294	1470	206000

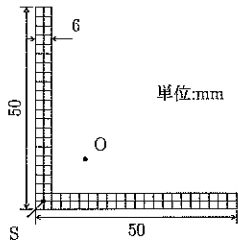


図 5 ラチス材の繊維への分割

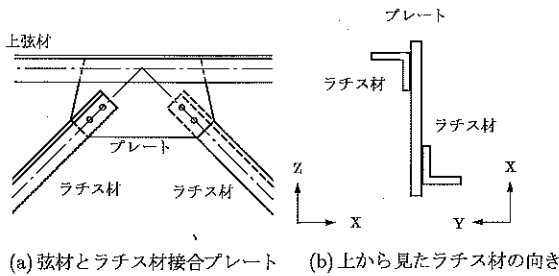


図 6 ラチス部材の配置方向

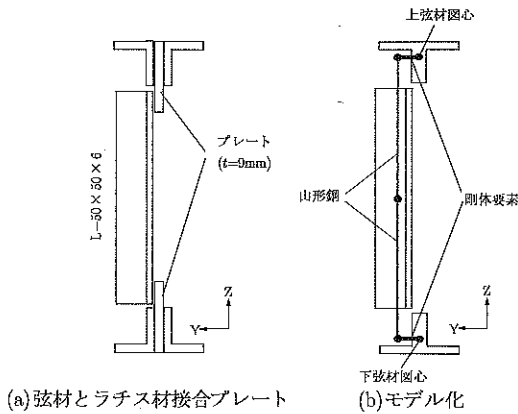


図 7 ラチス部のモデル化

るのに必要な要素分割数を確認する。解析では鋼材の標準値である降伏応力 $\sigma_{sy} = 235N/mm^2$ 、ヤング率 $E_s = 20600N/mm^2$ を使用する。ラチス材は図 5 に示すような等辺山形鋼であり、要素断面を 84 の繊維に分割する。図中の O は圆心、S はせん断中心である。ラチス材は図 6 のように交互に使用されているが、偏心を考慮してこれを図 7 のようにモデル化する。このラチス材を 2 要素で近似したモデルの精度を確認するため、図 8(b) に示すようにラチス材を 10 要素で近似したモデルを用意し、圧縮荷重載荷点の節点の X, Y 方向変位と Z 軸回りの回転を拘束したうえで、両節点の X, Y 軸回りの回転を拘束したときと自由にしたときの荷重 P とラ

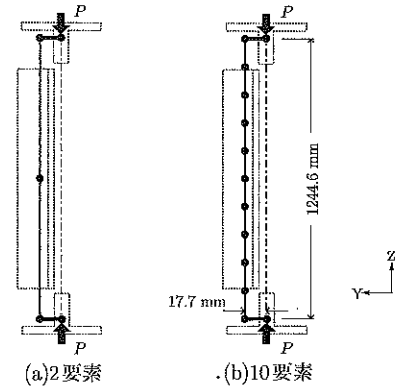


図 8 ラチス部の解析モデル

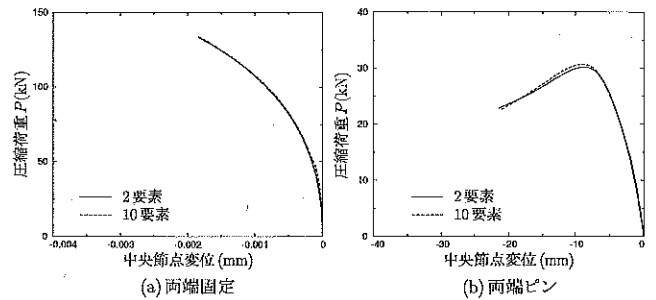


図 9 圧縮荷重～X 方向水平変位関係

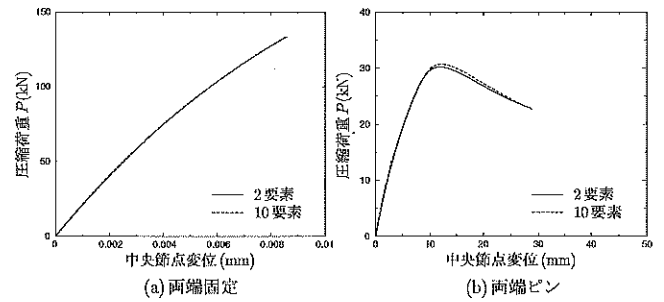


図 10 圧縮荷重～Y 方向水平変位関係

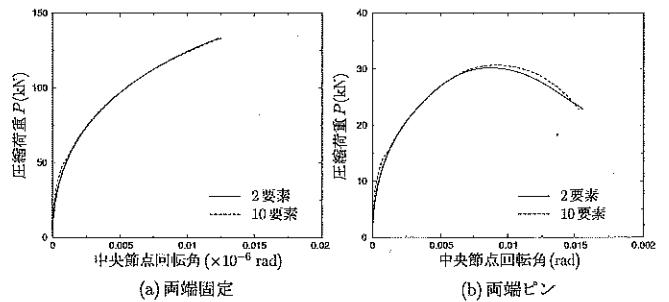


図 11 圧縮荷重～Z 軸まわり回転角関係

チス材中央節点の変位との関係を比較した。

ラチス材は山形鋼なので、断面の主軸がフレームの構面と一致せず、変位は構面外 (Y 方向) にも生じる。図 9～図 11 はそれぞれ圧縮荷重 P と X 方向変位、Y 方向変位および材軸回りの回転角の関係の比較図である。これらの図は、弦材の材軸回り回転が拘束されていても自由であっても、ラチス材 2 要素近似でラチスドレーメンの高精度の解析が可能であることを示している。なお、両端固

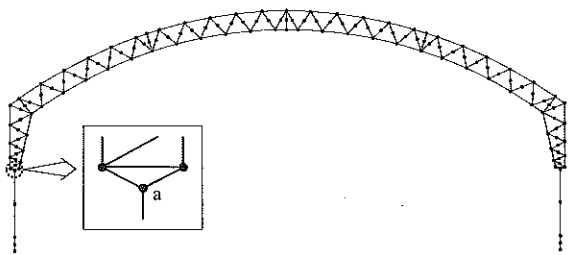


図 12 中間骨組の解析モデル

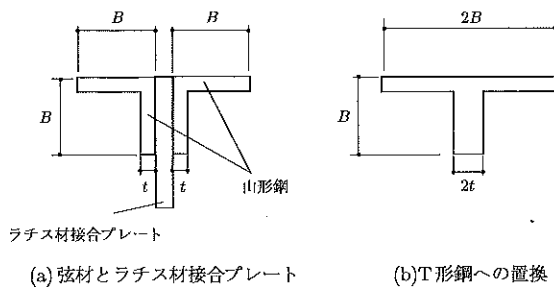


図 13 弦材の T 形鋼への置換

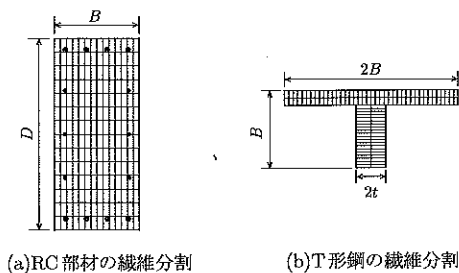


図 14 断面の繊維への分割図

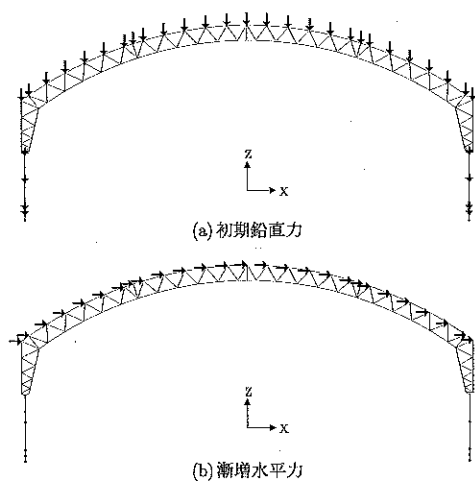


図 15 荷重方法

定の場合、図中の最高荷重点で圧縮荷重 P がラチス材の降伏軸力 (132kN) に達する。この時点でラチス材の全断面が降伏してほぼ一軸圧縮状態となり、材軸方向塑性変形が卓越する。

5.3 中間骨組の解析

前項の結果を受けて、図 2 の中間骨組を原則として図 12 のようにモデル化する。鉄骨柱脚部は図に示すように剛性が高く降伏しな

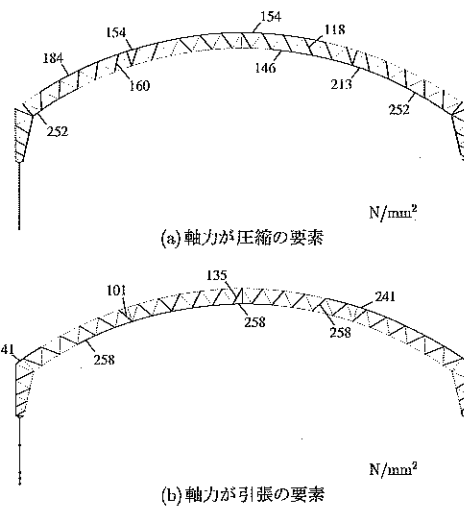


図 16 弾性解析時の部材の軸力の状況と代表的な部材の等価降伏応力 $(\sigma_y)_{eq}$

表 2 解析条件

解析	ラチス材の取扱い	部材の降伏応力の取扱い	弦材のねじり	保有水平耐力 (kN)
解析 1	偏心はないと仮定し、1部材1要素で近似する。	部材が引張か圧縮かにかかわらず、最小の等価降伏応力を降伏応力とする。	自由	144
解析 2	解析 1 に同じ。	部材が引張か圧縮かに応じて等価降伏応力を降伏応力とする。	自由	142
解析 3	偏心を剛体要素で与え、図 7 のようにモデル化する。	圧縮となるラチス材の降伏応力を標準の 258N/mm ² とする以外は解析 2 に同じ。	拘束	135
解析 4	解析 3 に同じ。	解析 3 に同じ。	自由	127

注) 各部材はほとんどの場合、引張のときは接合部、圧縮のときは座屈で耐力が決まるが、それらの耐力を部材断面積で割ったものを、それぞれその部材の等価引張降伏応力および等価圧縮降伏応力とする。

い要素で剛接トラスに置換し、図の a 節点で柱脚の塑性化を判断することとした。2本の山形鋼からなる部材については図 13 のように T 形鋼に置換した。図 14 は RC 部材と T 形鋼の繊維への分割図である。解析に際しては図 2 中の ▲ 印の節点の構面外変形を固定した。荷重は、まず図 15(a) のように屋根側の全節点と RC 柱の節点に分担すべき鉛直荷重を荷重したあと、水平荷重を図 15(b) のように屋根の全節点に分布して与えて漸増させた。

RC 部分の材料定数は表 1 に示すものを用い、鋼材の接合状況と降伏応力の取扱いに応じて 4 種類の解析を行った。鋼材の標準の降伏応力は並行して行った α 法による解析に準じて 235N/mm² の 1.1 倍の 258N/mm² としている¹⁾。各部材は座屈耐力や接合部耐力によって引張りとは異なる等価降伏応力を持つ¹⁾が、構造解析においては解析のし易さも一つの要因であり、読者の参考資料にもなり得ると思われるので、解析の内容を以下のように設定した。

解析 1. 部材が引張りか圧縮かにかかわらず最も小さな等価降伏応力をその部材の降伏応力として解析を行う。弦材とラチス材の偏心はないと仮定し、ラチス材は 1 部材を 1 要素で近似して弦材と図心で接合する。

解析 2. 解析 1 のモデルを用いて、予備解析として弾性限度内での

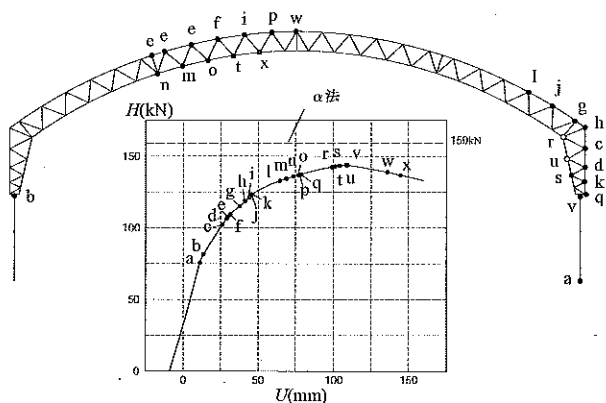


図 17 荷重～変位関係と降伏状況
(解析 1: 偏心なし・最小の等価降伏応力を使用)

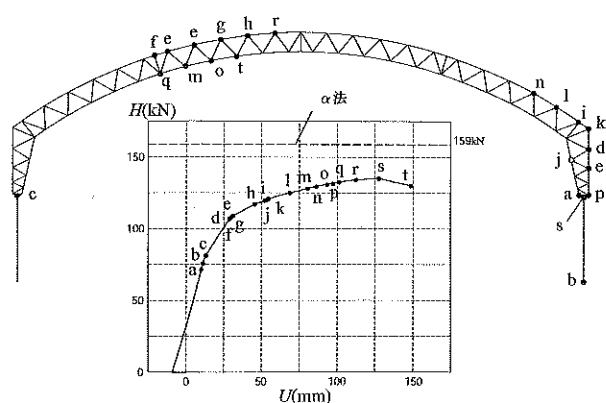


図 19 荷重～変位関係と降伏状況
(解析 3: 偏心あり・弦材のねじりを拘束)

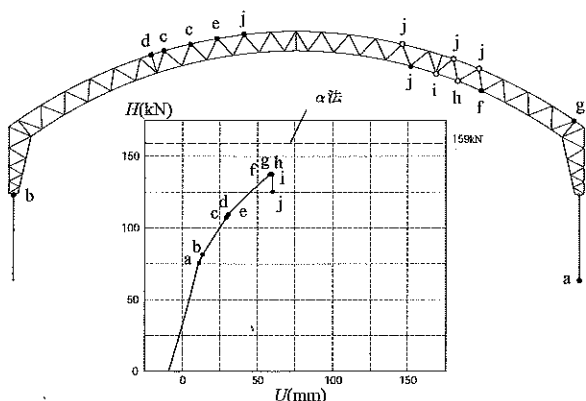


図 18 荷重～変位関係と降伏状況
(解析 2: 偏心なし・部材の引張り圧縮を考慮)

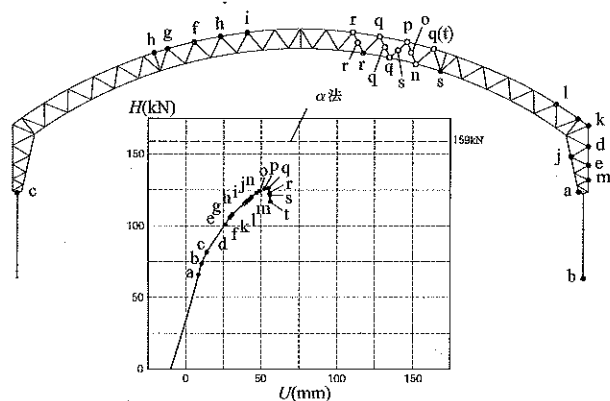


図 20 荷重～変位関係と降伏状況
(解析 4: 偏心あり・弦材のねじり拘束なし)

解析を実施し (図 16), その結果判明する各部材の引張と圧縮の状況に対応する等価降伏応力をその部材の降伏応力として解析を行う。解析 1 と同様に部材とラチス材の偏心はないと仮定し, ラチス材は 1 部材を 1 要素で近似して弦材と図心で接合する。
解析 3. ラチス材を図 7 のようにモデル化して弦材と接合する。部材の降伏応力は, 弦材すべてと引張となるラチス材は解析 2 と同じように設定するが, 圧縮となるラチス材は, 偏心を与えてあるので降伏応力を標準値の $258\text{N}/\text{mm}^2$ とする。弦材の X 軸回りの回転を拘束して解析を行う。

解析 4. 解析 3 と同じであるが, 弦材の X 軸回り回転を自由にして解析を行う。

なお, 上記のいずれの解析においても部材はすべて剛接合されると仮定している。以上の解析条件をまとめたのが表 2 である。

5. 4 解析結果

4 種類の解析の結果をそれぞれ図 17～図 20 に示す。荷重～変位関係の縦軸は水平荷重の合計値 H , 横軸は上弦材左端部の節点の変位 U である。図中のアルファベットの点は, RC 基礎や鉄骨柱脚が耐力に達した点あるいは部材の断面の初期降伏点を示す。本解法の場合, RC 基礎や鉄骨柱脚以外の一般の要素では塑性ヒンジ部の繊維が徐々に降伏していくため, 軸力と 2 軸曲げを受けている要素断面の初期降伏をどう定義するかが問題となるが, 著者らは

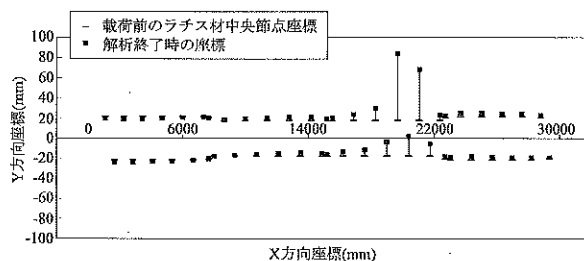


図 21 解析 4 でのラチス材中央点の面外方向変位

断面の軸ひずみと 2 主軸回りの曲率のいずれかが初期降伏値を越えた点をその断面の初期降伏点として定義している。それぞれの図中の骨組の図の黒丸は RC 基礎, 鉄骨柱脚, 弦材の降伏節点を, 白丸はラチス材の降伏節点を示す。節点が共通なので図では明確でないが, 白丸の節点ではすべて弦材も降伏している。荷重～変位関係と骨組に付けられたアルファベットはそれぞれ対応している。図 20 の t では q と同じ節点の反対側のラチス材が降伏したため, 括弧つきで示した。なお, この t の時点で (4) 式の s の計算が収束せず, 計算が終了した。

図 17 からわかるように解析 1 では保有水平耐力が 144kN となる。本解析では, 骨組のモデル化や部材の降伏応力の設定法は文献 3 と同じであるが, 荷重条件などの違いから文献 3 の値よりも耐

力が少し高くなっている。図からわかるようにまず風下側 RC 基礎がフーチングの曲げで降伏し、次に風上側鉄骨柱脚の曲げモーメントが耐力に達し、その後風下側鉄骨柱とはり中央風上側の部材が徐々に降伏していく。変位が 110mm を越えたところで風下側鉄骨柱脚の曲げモーメントが耐力に達する。この点が最大荷重となり、以後は荷重～変位関係が負勾配となる。図中に破線で示しているが、 α 法による計算では風下側 RC 基礎、風上側鉄骨柱脚部、風下側下弦材の補強が無くなった部分にヒンジが生じ、保有水平耐力は 159kN となる。144kN を基準にとると約 10.4% 高い。

次に解析 2 の結果であるが、部材の降伏応力を部材の引張りと圧縮の状況に応じた正しい値にしたため、部材降伏の進展状況が解析 1 とはかなり異なる。同じ水平荷重値での降伏節点数が少なくなり、風下側鉄骨柱脚が降伏する前に図中に i で示した節点に接合された弦材と 2 本のラチス材が降伏し、その後その周辺のラチス材が連鎖的に降伏して荷重が急速に減少する。保有水平耐力は解析 1 と大差ないが、変形能力が格段に小さくなる。

次に、ラチス材の偏心を考慮し、弦材のねじりを拘束した解析 3 の結果を見ると、本解析モデルでは風下側鉄骨柱の弦材が最初に降伏するものの骨組全体の挙動に影響はなく、ラチス材に偏心があっても弦材のねじりが拘束されていれば、解析 1 とほぼ同じ挙動になることがわかる。解析 1 と同様に風下側鉄骨柱脚が降伏するときが最大荷重となり、保有水平耐力は 135kN と解析 1 より低下する。

解析 4 は、解析 3 と同じ解析モデルで弦材のねじりを拘束せずに解析したものであるが、こちらは解析 2 とほぼ同じ挙動を示している。ラチス材に偏心があっても弦材のねじりが拘束されていないと、早期にラチス材が連鎖的に座屈して変形能力が大きく損なわれ、保有水平耐力も 127kN に低下する。この値を基準にとると、 α 法の値は約 25.0% 高い。図 21 は、図 20 中の t の時点でのラーメンの上部から見たラチス材中央節点の面外方向変位である。弦材がねじれてラチス材が座屈するため、座屈したラチス材の中央節点は偏心の方向とは関係なく Y の正方向に動いている。

実際の骨組の弦材とラチス材は剛接合でもなく完全なピン接合でもないが、構面外について言えばどちらかと言えばピン接合に近く、弦材のねじりをもやが完全に拘束しているかどうかは必ずしも明らかでないことから考えると、本論文で扱った骨組については解析 4 が最も現実を反映していると考えるのが妥当であると思われる。

6. 結語

本研究は、著者らが開発した RC・鋼混合骨組のための大変位弾塑性解析コードを、文献 1 が要求する項目をコード内部でチェック

しつつ解析を進めることができるように拡張し、耐震診断の対象となる学校体育館によく見られる混合骨組を精密に解析して、一般によく用いられている α 法²⁾ による結果と比較して α 法の信頼性を調べたものである。対象とした骨組は α 法の信頼性が最も低いと予想される、山形鋼を用いたトラスラーメンを上部に持つ混合骨組 1 体である。

著者らの解法は骨組の大変形時の外力と内力の不釣合いを厳密に解消しているため、骨組の数値解析モデルへの置換さえ注意深く行えば、得られる解は上界であると同時に下界でもあつてかなり正解に近いものが得られる。この解法を用い、現実の骨組をよく反映していると思われる解析モデルで得られた保有水平耐力を基準にすれば、 α 法による値は約 25% 高くなる。この数値は、本論文で扱った骨組一体での結果であり一般性はないが、耐震診断において、上部に山形鋼トラスラーメンを有する体育館骨組を対象とする場合、 α 法で保有水平耐力を評価する際には慎重な判断が必要であると思われる。

なお、本研究で使用した解析コードは、<http://www.st.nagasaki-u.ac.jp/shugyo/>においてインターフェイスおよびマニュアルとともに無償公開している。

参考文献

- 1) 文部科学省：屋内運動場等の耐震性能診断基準（平成 18 年版）第 2 刷，2008.7
- 2) 文部科学省：学校施設の耐震補強マニュアル S 造屋内運動場編＜2003 年改訂版＞，2004.3
- 3) 修行 稔，作本裕介，島津 勝，峰下由靖：学校体育館の RC・鋼混合ラーメンの弾塑性解析，鋼構造年次論文報告集，第 14 巻，pp.293-300，2006.11
- 4) 峰下由靖，林田幸浩，島津 勝，修行 稔：学校体育館混合骨組のための解析コードの汎用性について，日本建築学会九州支部研究報告，第 46 号・1 構造系，pp.581-584，2007.3
- 5) 修行 稔，島津 勝，林田幸浩，岩永洋尚：曲げで壊れる鋼コンクリート合成部材および骨組の弾塑性解析，日本建築学会構造系論文集，第 631 号，pp.1535-1542，2008.9
- 6) M.Shugyo：Elastoplastic Large Deflection Analysis of Three-Dimensional Steel Frames，J. Struct. Engrg., ASCE, Vol.129, No.9, pp.1259-1267, 2003.9
- 7) 島津 勝，修行 稔，作本裕介：繊維化塑性関節法による H 形鋼立体骨組の解析，日本建築学会構造系論文集，第 587 号，pp.109-116，2005.1
- 8) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 許容応力度設計法，1994.2

(2009年9月10日原稿受理，2010年1月26日採用決定)