学校体育館のブレース構造の弾塑性応答変形に関する研究

学校体育館　ブレース構造　弾塑性応答　屋根面ブレース　　　　　　　　山下哲郎＊ 米田良祐＊＊

限界耐力計算 坂澤良寛＊＊＊ 長島由香里＊＊＊

１．はじめに

学校体育館の地震被害の多くは屋根面を含むブレースの座屈、破断であり、ブレースの変形に伴う外装材の脱落、損傷なども多い。2011年度はブレースの弾塑性応答変形に関する以下の研究を実施した。

1. 屋根面ブレースまで含めた弾塑性応答変形の推定法の検討と立体弾塑性モデルによる検証
2. 特性の異なる地震動に対する応答
3. 1階ＲＣ造、2階S造ブレース構造の弾塑性応答解析

２．弾塑性応答変形の推定法の検討

２．1．対象構造物と解析モデル

a) 対象構造物

　＊　：工学院大学建築学部建築学科准教授，＊＊：工学院大学大学院建築学専攻、

＊＊＊：工学院大学工学部建築学科（いずれも2012年2月28日現在）







図1.2　ブレースの復元力特性

図1.1　架構形状

図1.3　1/.2解析モデル

表1.1　耐震診断結果

モデルD (28.6m x 39.6m)

モデルA (27m x 32.5m)

モデルB (20m x 40.5m)

モデルC (18m x 37.8m)

関東近辺に実在する耐震補強設計が完了した4つのS1タイプ1）の学校体育館（以下モデルA-D）をモデル化し解析する。桁行構面と屋根面はブレース構造、梁間架構はH形鋼の山形ラーメンである。架構形状を図1.1に示す。ブレースには一部を除き保有耐力接合されたJIS建築用ターンバックルを使用している。診断基準1）に基づき算出した補強後の桁行構面及び屋根面の耐震診断結果を表1.1に示す（記号の定義は診断基準1）参照）。ブレースの靱性指標Fの値は一律2.21)である。γは屋根面ブレース耐力の必要耐力に対する比率であり、必要耐力は*Iso*に対応する水平震度から定める略算法と、軸組構面の保有水平耐力から定める精算法により計算する。

b) 3次元解析モデル

ブレースの降伏強さ*σy*=235N/mm2x1.2とする。ブレースの復元力特性を図1.2に示すような降伏後の2次剛性比0.01のバイリニア型完全スリップ履歴と仮定する。柱及び梁は弾性とする。小梁及びブレースをピン接合、山形ラーメンを剛接合とした。柱脚の支持条件は桁行方向に回転バネを設置したピン支持とする。

桁行方向の応答のみを解析するため、モデルは対称性を考慮して図1.3のように梁間方向1/2とし、対称面には屋根面中央部分に対象条件を設定した。

さらに、桁行構面上下のブレース設置構面数を1箇所ずつ増やした「+1」モデル、桁行構面上下のブレース呼び径のランクを1つ下げた「-1」モデルを追加する（表1.1）。

２．２．固有値解析結果

固有値解析結果よりX方向の有効質量比と刺激係数より桁行方向の支配的な振動モード(桁行1次モードと呼ぶ)を抽出すると、はモデルA、Cでは5次、モデルBでは6次、モデルDでは4次となる（図1.4）。これらの固有周期は建築基準法2）による設計用1次固有周期に概ね一致する（表1.2）。

２．３．入力地震動と解析条件

**

表1.2　桁行1次モードの固有周期

**

図1.6　層の構成例

図1.8　ブレース塑性率分布

図1.7　最大層間変形角分布

図1.5　入力地震動

図1.4　桁行1次モード

モデルB

モデルA

モデルD

モデルC

告示スペクトル2)を目標スペクトルとしてEl Centro、Taft、Hachinohe、Kobeの4波NS成分の位相特性を用いて作成した地震波（図1.5）を入力する。入力は桁行方向(X)のみとし、上下動と長期荷重は無視する。Newmark-β法(β=1/4)を用い、解析時間刻みは0.001秒、解析時間は40秒間とする。初期剛性比例型減衰で定数2%とし、桁行1次モードに対して設定する。解析ソフトはSNAP ver53)を用いる。

２．４．Ｉｓ値と弾塑性応答

文献4)を参考に屋根面まで含め層を設定する（図1.6）。最大応答層間変形角とブレースの塑性率を図1.7、図1.8に示す。*Is*の最小層で最大変形角を生じるが、モデルDでは屋根面ブレースが降伏した。屋根面ブレースの検討においては耐力に余裕がないと屋根面ブレースの降伏を招くことがわかる。

最大層間変形角を生じる層の*Is*と層間変形角の関係を図1.9に、塑性率の関係を図1.10に示す。解析結果を近似する直線として式(1)(2)を定める。

(1)



(2)



*Ri*は層間変形角、*μi*は塑性率である。大まかではあるが、*Isi*値で告示波相当の入力に対する層間変形角及び塑性率が推定できる。構造耐震判定指標*Is* =0.7では最大層間変形角が4/100程度、塑性率が9.4程度となり、最大層間変形角を1/100以下に抑えるには*Is*値が1.5程度必要である。

２．５．層せん断力分布とその近似

以下の層せん断力分布を図1.11に示す。

1. 弾塑性応答解析結果（4波平均値）

②*Ai*を用いた層せん断力分布（桁行1次固有周期、設計用1次固有周期の2種類を用いて算定）

③屋根面を剛床と仮定した2層の分布（*Ai*分布、固有周期は軒高さより計算）

④弾性応答解析結果

⑤1～20次モードを用いたSRSS法5)による算定（告示スペクトルと剛性比例減衰を使用）

⑥降伏耐力の分布（後述する式(14)より算定）。

②③はベースシア係数を①に合わせた。*Ai*分布は弾塑性応答と近いが屋根層は比較的誤差が大きく、また診断で用いる一様震度ではない。SRSSと弾性応答はほぼ一致するが、弾塑性応答との差は大きい。

２．６．簡易質点系モデルを用いた限界耐力計算2)による変形推定

a) 簡易質点系モデル

簡易な応答推定法である質点系モデルを用いた限界耐力計算2)の精度を検証する。桁行方向を図1.12のように屋根面も含めた多質点系モデル4)と、屋根面を剛床とみなした2質点系モデルにモデル化する。各層のバネ定数と降伏耐力は柱梁の変形を無視し、ブレースのみを考慮して、式(3)(4)より算出する。

　　　　　　　　　(3)

　　　　　　　　　(4)

*Abi*はブレース断面積、*ni*はブレース構面数、はブレース長さ、*θi*はブレース角度を表す。降伏後の2次勾配比は3次元モデルの静的増分解析結果から0.02とした。

b) 限界耐力計算による応答変形推定

立体三次元モデルでは弾塑性動的解析、質点系モデルでは限界耐力計算で得た応答層間変形角を図1.17に示す。等価粘性減衰定数の算定には式(5)2)を用いた。

　　　　　　　　　(5)

は減衰特性を表す指標でブレース構造は0.2を用いる。は等価1自由度系の塑性率である。設計用1次固有周期を用いて計算した*Ai*分布を用いる。

多少の誤差はあるが、概ね限界耐力計算で弾塑性応答変形を推定できる。屋根面が降伏しなければ簡易な２質点系で十分な精度が得られる。

２．７．まとめ

1)今回のモデルでは桁行方向の振動は4次以上の高次モードで生じ、その固有周期は建築基準法の略算式による計算値とほぼ一致した。

2) 最大変形層の応答層間変形角およびブレースの塑性率と*Is*値の関係は式(1)(2)で表せる。

3)弾塑性応答において屋根面を含めた層せん断力分布は*Ai*分布で概ね近似できる。

4)質点系モデルを使用した限界耐力計算により、軸組ブレースの変形を推定できる。





図1.11層せん断力係数分布

図1.17 限界耐力計算による弾塑性応答変形推定精度

モデルD

モデルD

モデルC

モデルA

モデルB

モデルA

図1.12 質点系モデル

図1.10 *Is*と塑性率

図1.9 *Is*と層間変形角

モデルC

モデルB

なお、当研究では地震入力を桁行方向に限定したが、今後の課題として鉛直荷重と多方向入力の影響を調べる必要がある。

３．特性の異なる地震動に対する応答

３．１　目的

海溝型の東北地方太平洋沖地震と活断層型の新潟県中越地震では地震動の性質と構造物の応答が大きく異なる。ブレースの被害が多発するのは後者の地震動であり、弾塑性応答解析で検証する。

３．２　応答解析

　モデルA-Dについて屋根面まで弾塑性質点系モデルに置換し（図1.12）、時刻歴応答解析を実施する。１次に対して2%初期剛性比例減衰を仮定する。入力はK-net観測波および２章の告示波と、弾性応答ベースシア係数が1.0となるよう観測波と告示波を基準化した地震動（基準化波）をそれぞれ入力する。

３．３　結果とまとめ

　層間変形と塑性率を表3.1（観測波＋告示波）、表3.2（基準化波）に示す。観測波＆告示波に対する層間変形角の最小値は東日本（牡鹿）の1/194、最大は新潟県中越地震（小千谷）の1/10である。基準化した地震動では最小が兵庫県南部地震の1/175、最大は新潟県中越沖地震の1/10である。海溝型地震は観測波、基準化波とも応答が小さい。活断層型と告示波は観測波、基準化波ともほぼ同じレベルの応答を示した。



図4.1 １層RC造、２層S造の桁行構面

◆：応答解析

×：限界耐力

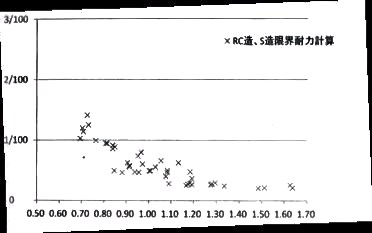


図4.2　ブレース層の応答変形とIs値

４．第１層RC造、第２層S造ブレース構造の応答

４．１　目的

実在する７棟の第１層RC造、第２層S造（図4.1）の補強後の学校体育館の桁行方向の弾塑性応答解析を実施し、応答変形とIs値との関連を調べる。

４．２　解析モデルと入力地震動

表3.1 観測波＋告示波に対する解析結果



表3.2 基準化波に対する解析結果

解析モデルは前章と同様、屋根面まで含めた質点系モデルとする。第２層と屋根面は前述した方法で弾塑性バネの特性を求める。第１層RC壁式構造の骨格曲線は2010年度の研究6)と同様に求め、履歴モデルは原点指向型とする。入力は２章の告示波を用いる。減衰は１次2%の剛性比例減衰とする。

４．３　解析結果

　図4.2に軸組ブレース層の弾塑性応答変形を、２自由度系の限界耐力計算による推定値6)と併せて示す。*Is*値の低い領域では両者の差が大きく、限界耐力計算の推定に補正が必要である。

謝辞

工学院大学名誉教授廣澤雅也博士より学校体育館の耐震診断計算書の提供を受けた。深謝を表す。

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（18年度版）」、2006
2. 国土交通省：「2007年度版　建築物の構造関係技術基準解説書」2007
3. 構造システム：SNAP Ver.5テクニカルマニュアル、2009
4. 長屋敦士、柴田良一、中澤祥二、大家貴徳、加藤史郎：「桁行き方向に地震動を受ける体育館のリスクアナリシス：その1：等価質点モデル」日本建築学会大会学術講演梗概集、B-1分冊、pp.745-746、2009年
5. 日本建築学会：「建築物荷重指針・同解説」、2004年
6. 2010年度UDM報告書