

平面ラチス梁における終局耐震性能に及ぼす塑性仕事の効果について

建築構造学分野 松浦 由紀

Abstract

空間構造は、体育館やスポーツ施設などその内部に大きな空間を内包する屋根として広く用いられており、地震災害時には地域の避難所や災害救助の拠点として利用される。よって、空間構造の耐震性能は重要であると考えられ、合理的な耐震設計手法が求められる。そこで本論文では、簡単な2種類の平面ラチス梁を対象に、静的鉛直荷重を受ける場合と地震波を入力した場合を比較し、動的崩壊時の地震入力エネルギーに及ぼす塑性仕事および静的安全率の効果を数値解析により明らかにする。その際、構造物の歪エネルギーに着目し、静的解析から得られた歪エネルギー速度換算値と動的解析から得られた歪エネルギー速度換算値との関係を考察し、終局耐震性能の評価方法について提案する。

1. 序

空間構造は、体育館やスポーツ施設など、その内部に大きな空間を内包する屋根として広く用いられており、地震災害時には地域の避難所や災害救助の拠点として利用される。東海地震の発生が指摘されていることを考えると、空間構造の耐震性能は以前にも増して重要性が増していると考えられる。そのため、設計時に想定した以上の地震を構造物が受けた場合どの程度のレベルまで耐え得るのかを把握することも重要であり、安全かつ合理的な耐震設計手法が求められていると言える。地震時の構造物の応答予測はエネルギーの釣合いに基づく手法で多く行われてきた。既往の研究としては、秋山によってエネルギーの釣合いに基づいて多層ラーメン構造の耐震性能評価式が提案されている¹⁾。多田らは二層立体ラチス平板を対象として、静的弾塑性挙動より定まる内部吸収エネルギーを定義し、その最大値が動的崩壊の尺度となりうることを示している²⁾。萩原は非線形系の自由振動解から系のエネルギーレベルと有効周期の関係を表わす特性曲線(E - T_e 曲線)を定義し、エネルギー応答推定法の適用性を検討した^{3),4)}。このように、耐震設計の資料となる空間構造の終局状態での耐荷性能について、様々な研究がなされているが、十分に挙動を把握するには至っていない。

本論文では、簡単な平面ラチス梁を対象に、静的鉛直荷重を受ける場合と地震波を入力した場合を比較し、動的崩壊時の地震入力エネルギーに及ぼす塑性仕事の効果を明らかにし、静的解析から得られた歪エネルギー速度換算値と動的解析から得られた歪エネルギー速度換算値との関係に基づき終局耐震性能の評価方法について提案する。

2. 解析モデル概要

本論で取り扱う解析モデルを図1,2に示す。支持条件はピン・ローラー支持とする。モデルは部材断面が一樣であるものと、中央上面の部材の圧縮降伏を防ぐために中央上面の3部材のみ断面を大きくしたものの2種類を扱うものとする。なお接合部の強度と剛性が十分あるものとして、部材間の接合部はすべて剛接合とする。また、各モデルにおいて静的解析より得られた結果から静的安全率 $\gamma=2,3,4$ となるように固定荷重を設定し、節点集中型として扱う。本論で用いる部材モデルは座屈現象を考慮するため、中央上面の1部材のみ中央部に新たに節点を設け、1部材2要素として取り扱っているが、部材中央に設けた節点には荷重は作用させない。各モデル名称を整理したものを表1に示す。

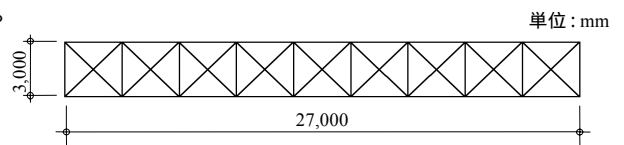


図1 X型平面ラチス梁

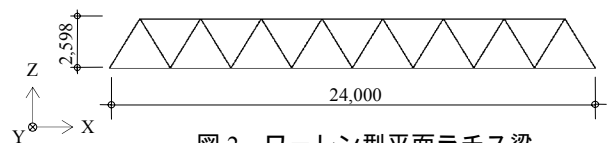


図2 ワーレン型平面ラチス梁

表1 解析モデル名称

| モデル名称 | 全体形状 | 使用部材 | 静的安全率 | |
|-------|-------|------|-------|-----|
| X | X型 | 1種類 | Xa2 | 2.0 |
| | | | Xa3 | 3.0 |
| | | | Xa4 | 4.0 |
| | | 2種類 | Xb2 | 2.0 |
| | | | Xb3 | 3.0 |
| | | | Xb4 | 4.0 |
| W | ワーレン型 | 1種類 | Wa2 | 2.0 |
| | | | Wa3 | 3.0 |
| | | | Wa4 | 4.0 |
| | | | Wb2 | 2.0 |
| | | 2種類 | Wb3 | 3.0 |
| | | | Wb4 | 4.0 |

3. 静的弾塑性解析

本解析モデルを対象として、塑性ヒンジ法による幾何学的非線形弾塑性解析を行い、モデル上面節点に負担面積に応じた鉛直下向きの等分布荷重を作用させた場合の耐荷性能を把握した。

静的解析において、(1)式のようなエネルギーの釣合い式が成り立つ。

$$E^e - E^G = E^F \quad (1)$$

ここで、 E^e は歪エネルギー、 E^G は自重と鉛直方向変位によってなされるポテンシャルエネルギー、 E^F は外力によって入力されるエネルギーである。また、歪エネルギー E^e は、弾性歪エネルギー ${}_sW_e$ と塑性変形による消費エネルギー ${}_sW_p$ の和(${}_sW_e + {}_sW_p$)とする。各種エネルギーを(2)式により等価速度に換算する。

$${}_sV^e = \sqrt{2E^e/M}, \quad {}_sV^G = \sqrt{2E^G/M}, \quad {}_sV^F = \sqrt{2E^F/M} \quad (2)$$

M はモデルの総質量である。エネルギーを速度に換算することにより、質量の影響を取り除き速度の次元を持つ物理量として表現することができる。この変換により各解析モデルのエネルギーを比較することができる。本論では、 ${}_sV^F$ を静的吸収エネルギーと定義し、 ${}_sV^F$ が最大となる時、構造物が吸収できるエネルギーが最大となるとし、この時の歪エネルギー速度換算値を ${}_sV_f$ と定義する。また、弾性限界耐力 P_{LE} 時、限界耐力 P_{GY} 時の歪エネルギー速度換算値をそれぞれ ${}_sV_{LE}$ 、 ${}_sV_{GY}$ と定義する。ここで、限界耐力とは、解析で得られた荷重変形関係より得られた耐荷力であり、変形性能倍率 α を用いて図3のように定義し、限界耐力時の変位を限界変形とする。

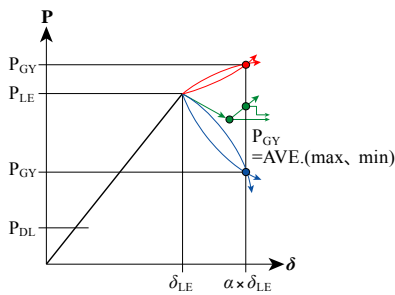


図3 限界耐力の定義

解析により得られた荷重変形関係を図4に示す。ここで、横軸はモデル下面中央節点の鉛直変位量である。Xaモデルは圧縮降伏と引張降伏が同時に起こっているため、圧縮降伏しているWaモデルより初期降伏後の耐力低下は緩やかである。Xb、Wbモデルは引張降伏し、耐力低下がほとんど見られない。また、各モデル($\nu=4$)の得られた各種エネルギー速度換算値とモデル下面中央節点との鉛直変位量の関係を図5に示す。Waモデル以外は静的吸収エネルギーが最大値をとるまで解析を行うことが困難だったため、部材の破断基準として部材の引張ひずみが3%となる時を静的吸収エネルギーの最大値時とし、その時の歪エネルギー速度換算値を ${}_sV_f$ としている。また、 $\alpha=3.0, 6.0$ となる限界変形時の ${}_sV_{GY}$ を算出した。得られた各種歪エネルギー

速度換算値を表2に示す。表中には、 ${}_sV_{GY}$ を算出した時点での弾性歪エネルギー ${}_sW_e$ と塑性変形による消費エネルギー ${}_sW_p$ の比率 ${}_sW_e/{}_sW_p$ を合わせて示している。

4. 固有振動解析

本解析モデルの固有振動性状を把握するため、非減衰自由振動解析を行い、有効質量比分布及び固有周期を算出した。各方向有効質量比上位3位までのモード次数と固有周期、及び有効質量比を表3に示す。

図4に示しているように、初期弾性剛性がすべてのモデルにおいてほぼ等しくなっており、すべてのモデルにおいて1次固有周期は近い値となった。また、固有周期は $T = 2\pi\sqrt{M/K}$ (M :質量, K :剛性)で表わされるように、安全率 $\nu=4$ の固有周期に対する安全率 $\nu=2, 3$ の固有周期はそれぞれ $\sqrt{2}, \sqrt{3/2}$ 倍となった。

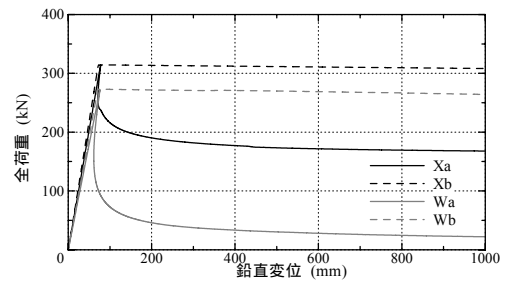


図4 荷重変形関係

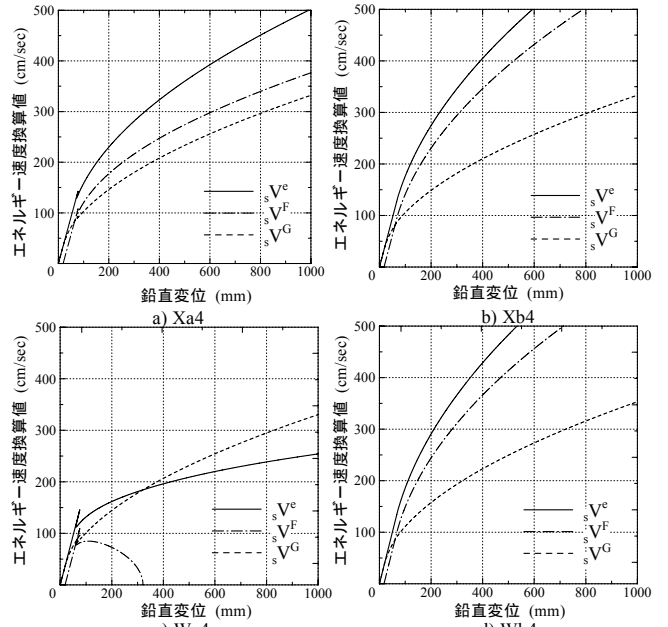


図5 各種エネルギー速度換算値と鉛直変位の関係

表2 各種歪エネルギー速度換算値と ${}_sW_e/{}_sW_p$

| モデル | 安全率 | ${}_sV_{LE}$ (cm/sec) | ${}_sV_f$ (cm/sec) | ${}_sV_{GY}$ (cm/sec) | | ${}_sW_e/{}_sW_p$ | |
|-----|-----|--------------------------|-----------------------|-----------------------|--------|-------------------|------|
| | | | | =3.0 | =6.0 | =3.0 | =6.0 |
| Xa | 2 | 99.15 | 236.98 | 174.27 | 244.24 | 0.21 | 0.15 |
| | 3 | 121.43 | 290.25 | 213.44 | 299.14 | | |
| | 4 | 140.26 | 335.21 | 246.51 | 345.52 | | |
| Xb | 2 | 95.99 | 291.38 | 201.89 | 297.00 | 0.30 | 0.12 |
| | 3 | 117.37 | 356.72 | 247.06 | 363.33 | | |
| | 4 | 135.46 | 411.81 | 285.05 | 419.34 | | |
| Wa | 2 | 103.30 | 103.30 | 118.69 | 143.94 | 0.06 | 0.04 |
| | 3 | 126.41 | 126.41 | 145.33 | 176.23 | | |
| | 4 | 146.04 | 146.04 | 167.79 | 203.49 | | |
| Wb | 2 | 100.01 | 310.82 | 212.54 | 312.88 | 0.29 | 0.12 |
| | 3 | 122.27 | 380.71 | 260.12 | 382.95 | | |
| | 4 | 141.10 | 439.55 | 300.28 | 442.03 | | |

表 3 固有周期と有効質量比

| a) Xa | | | | | | | |
|-----------|-----------|-------|-------|----------|-------|----|---|
| モード 次数 | 固有周期(sec) | | | 有効質量比(%) | | 順位 | |
| | 安全率 2 | 安全率 3 | 安全率 4 | X方向 | Z方向 | X | Z |
| 1 | 0.367 | 0.300 | 0.260 | 6.06 | 77.74 | | 1 |
| 2 | 0.133 | 0.108 | 0.094 | 71.82 | 2.10 | 1 | |
| 3 | 0.095 | 0.077 | 0.067 | 12.68 | 0.04 | 2 | |
| 4 | 0.054 | 0.044 | 0.038 | 0.03 | 4.46 | | 3 |
| 5 | 0.045 | 0.037 | 0.032 | 7.47 | 7.75 | 3 | 2 |

| b) Xb | | | | | | | |
|-----------|-----------|-------|-------|----------|-------|----|---|
| モード 次数 | 固有周期(sec) | | | 有効質量比(%) | | 順位 | |
| | 安全率 2 | 安全率 3 | 安全率 4 | X方向 | Z方向 | X | Z |
| 1 | 0.356 | 0.290 | 0.252 | 6.86 | 77.42 | 3 | 1 |
| 2 | 0.131 | 0.107 | 0.092 | 70.50 | 2.70 | 1 | |
| 3 | 0.093 | 0.076 | 0.066 | 14.09 | 0.13 | 2 | |
| 4 | 0.054 | 0.044 | 0.038 | 0.11 | 3.97 | | 3 |
| 5 | 0.044 | 0.036 | 0.031 | 6.63 | 7.98 | | 2 |

| c) Wa | | | | | | | |
|-----------|-----------|-------|-------|----------|-------|----|---|
| モード 次数 | 固有周期(sec) | | | 有効質量比(%) | | 順位 | |
| | 安全率 2 | 安全率 3 | 安全率 4 | X方向 | Z方向 | X | Z |
| 1 | 0.361 | 0.295 | 0.256 | 4.55 | 88.91 | | 1 |
| 2 | 0.128 | 0.104 | 0.090 | 72.98 | 1.60 | 1 | |
| 3 | 0.100 | 0.082 | 0.071 | 15.59 | 0.27 | 2 | |
| 4 | 0.057 | 0.047 | 0.041 | 0.41 | 5.73 | | 2 |
| 5 | 0.045 | 0.036 | 0.032 | 5.05 | 2.13 | 3 | 3 |

| d) Wb | | | | | | | |
|-----------|-----------|-------|-------|----------|-------|----|---|
| モード 次数 | 固有周期(sec) | | | 有効質量比(%) | | 順位 | |
| | 安全率 2 | 安全率 3 | 安全率 4 | X方向 | Z方向 | X | Z |
| 1 | 0.350 | 0.286 | 0.248 | 5.29 | 88.68 | 3 | 1 |
| 2 | 0.126 | 0.103 | 0.089 | 71.34 | 2.13 | 1 | 3 |
| 3 | 0.099 | 0.081 | 0.070 | 17.76 | 0.48 | 2 | |
| 4 | 0.057 | 0.047 | 0.040 | 0.21 | 5.24 | | 2 |

表 4 初期降伏加速度 A_{LE}

| モデル | 安全率 | A_{LE} (gal) | | | $A_{LE}/A_{LE(SIN)}$ | | |
|-----|-----|----------------|-----|-------|----------------------|------|-------|
| | | BCJ-L2 | SIN | SIN10 | BCJ-L2 | SIN | SIN10 |
| Xa | 2 | 219 | 39 | 160 | 5.62 | 1.00 | 4.10 |
| | 3 | 431 | 77 | 320 | 5.59 | 1.00 | 4.16 |
| | 4 | 731 | 115 | 470 | 6.36 | 1.00 | 4.09 |
| Xb | 2 | 253 | 40 | 170 | 6.34 | 1.00 | 4.25 |
| | 3 | 459 | 79 | 330 | 5.81 | 1.00 | 4.18 |
| | 4 | 732 | 117 | 490 | 6.26 | 1.00 | 4.19 |
| Wa | 2 | 225 | 38 | 160 | 5.93 | 1.00 | 4.21 |
| | 3 | 449 | 77 | 320 | 5.84 | 1.00 | 4.16 |
| | 4 | 721 | 114 | 470 | 6.32 | 1.00 | 4.12 |
| Wb | 2 | 282 | 38 | 160 | 7.41 | 1.00 | 4.21 |
| | 3 | 459 | 77 | 320 | 5.96 | 1.00 | 4.16 |
| | 4 | 740 | 118 | 520 | 6.27 | 1.00 | 4.41 |

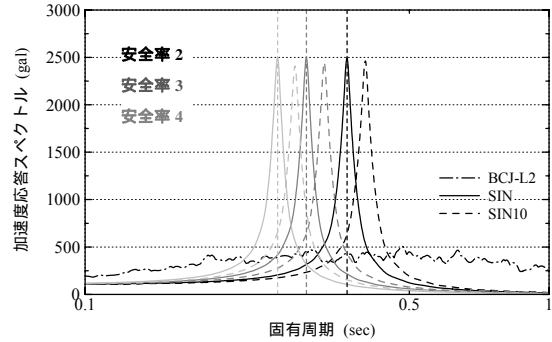


図 6 各地震波の加速度応答スペクトル

5. 時刻歴地震応答解析

上下地震動に対する応答性状を把握するため、幾何学的非線形性を考慮した弾塑性時刻歴応答解析を行った。本解析に用いる地震波は、人工地震波である日本建築センター模擬地震波（レベル 2）および固有周期と等しい周期の正弦波とその周期を 10% 増したものととする。以後、それぞれ BCJ-L2、SIN、SIN10 と記述する。解析の際に入力する地震波には BCJ-L2 は 0 秒から 60 秒までの 60 秒間の加速度データを用いる。正弦波である SIN および SIN10 は 4 秒間の振幅増幅区間を含む 20 秒間を用いる。入力方向は鉛直 Z 方向とする。地震波の最大入力加速度を漸増させながら時刻歴応答解析を繰り返し、最初に部材の一部に塑性ヒンジが形成される際の最大入力加速度を初期降伏加速度 A_{LE} とする。さらに、モデル下面中央節点の最大鉛直変位が急激に下方に増加し、鉛直変位量がモデルのスパンの 1/30 を超えた時を動的崩壊と判断し、その直前の最大入力加速度を動的崩壊加速度 A_f とする。3 章の静的弾塑性解析より得られた限界変形に達した時の加速度を限界変形加速度 A_{GY} とする。

図 6 に各地震波の加速度応答スペクトルを示す。図には各安全率における固有周期も合わせて示している。表 4 に各モデルの地震波ごとの初期降伏加速度 A_{LE} を示す。表には、求めた各加速度を SIN の A_{LE} で除したものをあわせて示している。SIN の A_{LE} に対する SIN10、BCJ-L2 の A_{LE} はそれぞれ約 4、5~7 倍となっている。図 6 に示した SIN の加速度応答スペクトルに対する SIN10、BCJ-L2 の加速度応答スペクトルがそれぞれ約 1/4、1/7~1/5 倍となっていることから、初期降伏加速

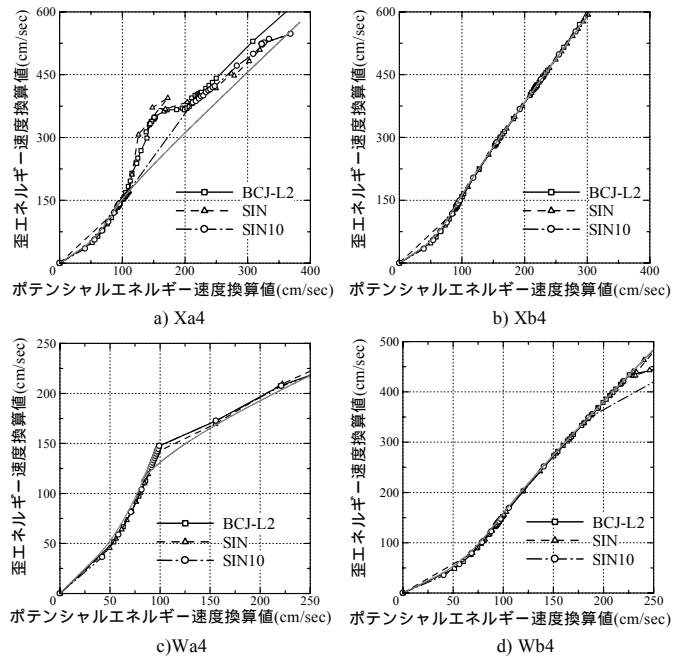


図 7 V^e と V^G の関係(速度換算値)

度は加速度応答スペクトルの関係から決まっていることが分かった。次に、解析により得られた各モデル ($v=4$) の応答歪エネルギー速度換算値とその時のポテンシャルエネルギー速度換算値との関係を図 7 に示す。図中には、静的弾塑性解析より得られた歪エネルギーとポテンシャルエネルギーの関係を実線で示している。すべてのモデルにおいて初期降伏までは静的弾塑性解析で得られた結果とほぼ等しいエネルギー関係が得られた。初期降伏後はモデルにより異なるが、圧縮降伏する Xa、Wa モデルに関しては静的解析結果より動的解析結果の方が歪エネルギーの増加の割合が大きくなり、引張降伏する Xb、Wb モデルに関しては等しくな

るか減少する傾向がある。初期降伏加速度 A_{LE} 入力時の最大応答歪エネルギー V_{LE} と静的解析での弾性限界時の歪エネルギー sV_{LE} の関係において、すべてのモデルにおいて平均比率 V_{LE}/sV_{LE} は 0.97 ~ 1.01 とほぼ 1 になっており、静的解析結果と動的解析結果ではほとんど差が見られない。動的崩壊加速度 A_f 入力時の歪エネルギーの最大応答の速度換算値 V_f と静的吸収エネルギー最大値時の歪エネルギー sV_f の関係において、静的吸収エネルギーが最大値をとった Wa モデルにおいて、平均比率 V_f/sV_f は 1.00 ~ 1.04 となっており、静的吸収エネルギーが最大値をとるモデルは sV_f が動的崩壊地震動レベルの推定値になりうると考えられる。Wa 以外のモデルにおいては引張ひずみ 3% となる時の歪エネルギー速度換算値を sV_f としたが、 V_f の時の引張ひずみが 0.55 ~ 7.44% となっているため V_f/sV_f が 0.84 ~ 1.53 となった。また、限界変形到達時の応答歪エネルギー V_{GY} と静的解析における限界耐力時の歪エネルギー sV_{GY} の関係において、Xa モデルに着目すると、安全率 v が大きくなるにつれて V_{GY}/sV_{GY} の値が大きくなっている。固定荷重が小さいと崩壊に寄与する損傷に至るまでの間、より多く繰り返し変形することによって歪エネルギーが大きくなっていると考えられる。 $\alpha=6.0$ の時の V_{GY}/sV_{GY} において、Wb 以外のモデルに関しては 0.99 ~ 1.15 と 1 より大きくなる傾向があるのに対し、Wb モデルに関しては 0.92 ~ 0.98 と 1 より小さくなっている。これは Wb モデルに関して静的解析において引張降伏を起こしているが、動的解析では引張部材が降伏した後、 $\alpha=6.0$ 付近で圧縮部材が降伏したことによるものだと考えられる。

6. 終局耐震性能に及ぼす塑性仕事の効果

静的解析より得られた歪エネルギーの比率 sV_{GY}/sV_{LE} と動的解析より得られた歪エネルギーの比率 V_{GY}/V_{LE} が比例関係を満たすとして終局耐震性能の評価を行う。図 8 に sV_{GY}/sV_{LE} と V_{GY}/V_{LE} の関係を示す。図中には、直線 $y=x$ も合わせて示す。 $y=x$ からの上昇量を b として、各モデルの上昇量 b と静的解析より得られた弾性歪エネルギー sW_e と塑性変形による消費エネルギー sW_p の比率 sW_e/sW_p を表 5 に示す。各モデルの各変形性能倍率 α における sW_e/sW_p は一定であるが、安全率が大きくなるにつれて、上昇量 b も大きくなる傾向があることが分かる。これは固定荷重が小さい方がより繰り返し変形し、塑性消費エネルギーが大きくなっていることによるものである。このことより上昇量 b が安全率に比例し、固定荷重に反比例すると考えられる。引張降伏している Xb, Wb モデルにおいて、地震波、静的安全率 v に関わらず上昇量 b は総じて小さい値となっている。それに対して、圧縮降伏している Xa モデルと Wa モデルを比較すると、安全率 2,3 では大き

な違いは見られないが、安全率 4 では大きな差がある。これは Xa モデルの方が sW_e/sW_p が大きく、地震によって入力されたエネルギーを弾性歪エネルギー W_e として吸収するからであると考えられる。これより各変形性能倍率 α における sW_e/sW_p と b が比例関係を示していることが分かる。また、静的解析と動的解析で異なる降伏過程となる Wb モデルを除いたモデルに関して、 $\alpha=3.0$ より $\alpha=6.0$ の時の b が大きくなっている。これより b は α にも比例していると考えられる。ここで、さらに上昇量 b と歪エネルギーの関係を明らかにするために、各モデル各変形性能倍率 α の時の歪エネルギー E_e と弾性歪エネルギー W_e と塑性変形による消費エネルギー W_p を動的解析より求める。図 9 に静的解析より得られた歪エネルギー sE_e と弾性歪エネルギー sW_e と塑性変形による消費エネルギー sW_p と動的解析結果の差をそれぞれ静的解析結果で除したものと上昇量 b の関係を示す。図 9 より上昇量 b に対して E_e/sE_e , W_p/sW_p には相関があるが、 W_e/sW_e には相関が見られないことが分かる。 E_e/sE_e と W_p/sW_p にも相関があることより、歪エネルギーの増加は塑性変形による消費エネ

表 5 上昇量 b と sW_e/sW_p

| モデル | 安全率 | $\alpha=3.0$ | | | | $\alpha=6.0$ | | | |
|-----|-----|------------------|-------|-------|-------------|------------------|-------|-------|-------------|
| | | $y=x$ からの上昇量 b | | | sW_e/sW_p | $y=x$ からの上昇量 b | | | sW_e/sW_p |
| | | BCJ-L2 | SIN | SIN10 | | BCJ-L2 | SIN | SIN10 | |
| Xa | 2 | 0.05 | 0.02 | 0.01 | 0.21 | 0.08 | 0.03 | 0.02 | 0.15 |
| | 3 | 0.07 | 0.04 | 0.06 | 0.21 | 0.11 | 0.07 | 0.06 | 0.15 |
| | 4 | 0.57 | 0.28 | 0.25 | 0.21 | 0.46 | 0.41 | 0.47 | 0.15 |
| Xb | 2 | 0.01 | -0.02 | -0.07 | 0.30 | 0.02 | -0.01 | -0.10 | 0.12 |
| | 3 | 0.00 | -0.01 | -0.03 | 0.30 | 0.02 | 0.00 | -0.03 | 0.12 |
| | 4 | 0.02 | 0.03 | -0.01 | 0.30 | 0.05 | 0.03 | -0.01 | 0.12 |
| Wa | 2 | 0.05 | 0.02 | 0.02 | 0.06 | 0.06 | 0.02 | 0.03 | 0.04 |
| | 3 | 0.07 | 0.08 | 0.03 | 0.06 | 0.07 | 0.09 | 0.04 | 0.04 |
| | 4 | 0.06 | 0.05 | 0.07 | 0.06 | 0.07 | 0.09 | 0.07 | 0.04 |
| Wb | 2 | 0.05 | 0.04 | 0.01 | 0.29 | -0.13 | -0.14 | -0.30 | 0.12 |
| | 3 | 0.04 | 0.04 | 0.06 | 0.29 | -0.04 | -0.05 | -0.14 | 0.12 |
| | 4 | 0.04 | 0.05 | 0.02 | 0.29 | 0.05 | 0.08 | -0.11 | 0.12 |

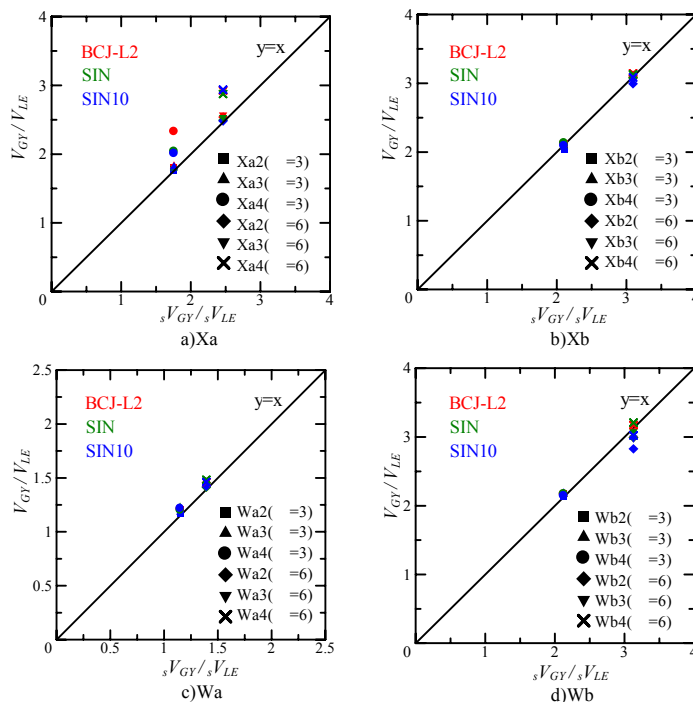


図 8 sV_{GY}/sV_{LE} と V_{GY}/V_{LE} の関係

ルギーによるものであると考えられる。各モデルにおける上昇量 b と W_p/sW_p の関係を図 10 に示す。引張降伏している Xb、Wb モデルに関して、上昇量 b に対し、 W_p/sW_p は非常に小さい値もしくは負の値となっている。それに対し、圧縮降伏している Xa、Wa は W_p/sW_p は上昇量 b に比例している。これは繰り返し変形することによる塑性消費エネルギーが圧縮部材で蓄積されていることに起因していると考えられる。また、各モデルにおいて安全率別に見ると安全率 ν が大きくなるほど、上昇量 b と W_p/sW_p がともに大きくなる傾向があることがわかった。

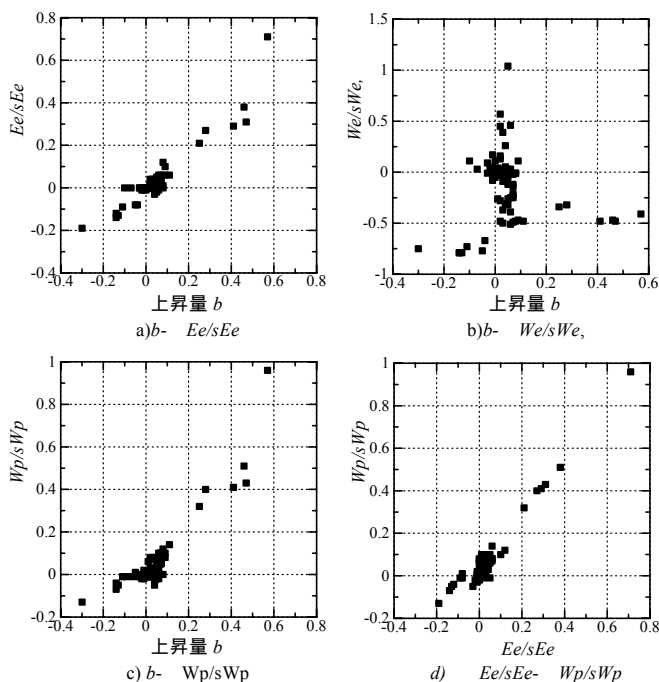


図 9 上昇量 b , $Ee/EsEe$, $We/EsWe$, Wp/sWp の関係

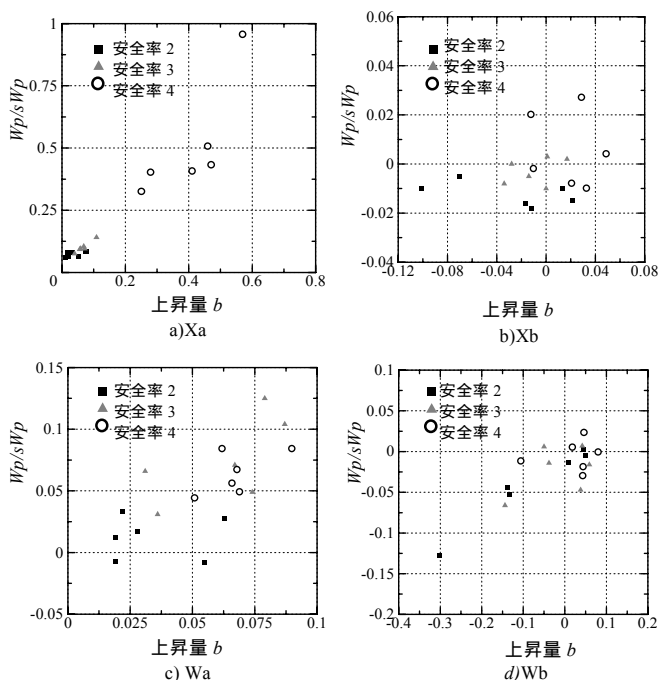


図 10 上昇量 b と Wp/sWp の関係

7. 終局耐震性能の評価

前章までに得られた結果より、上昇量 b は静的安全率 ν にも影響を受けていると考えられるので、既往の研究⁵⁾で提案された予測法に基づいて図 11 に全モデルにおける静的安全率別の上昇量 b と $\alpha \cdot sWe/sWp$ の関係を示す。図には、上昇量 b が小さくなる引張降伏するモデル以外の解析結果を $y=kx$ (k :実数)で近似した直線も合わせて示している。この k の値は安全率に反比例していることが分かる。言い換えれば、固定荷重に比例していると考えられる。本論では、安全率 $\nu=2,3,4$ のモデルについて扱ったが、さらに安全率 ν と近似直線 $y=kx$ の傾き k の関係を明らかにするため、既往の研究⁵⁾の結果を整理しなおしたものを表 6 に示す。PR2 モデルにおいて、静的解析で引張降伏となるにも関わらず KOBE 地震波入力時の $y=x$ からの上昇量 b は大きな値となっている。これは KOBE 地震波において鉛直上向きの加速度が加わった時に、PR2 モデルが静的解析結果とは異なる部材で圧縮降伏し、塑性仕事により歪エネルギーが増大したためであると考えられる。また、P2 モデルにおいても地震波特性により降伏部材が異なっており、上昇量 b にばらつきが現われたと考えられる。図 12 に圧縮降伏している全モデルの上昇量 b と $\alpha \cdot sWe/sWp$ の関係を示す。図には、各モデルの静的安全率 ν と近似直線 $y=kx$ (k :実数)の傾き k の値も合わせて示している。

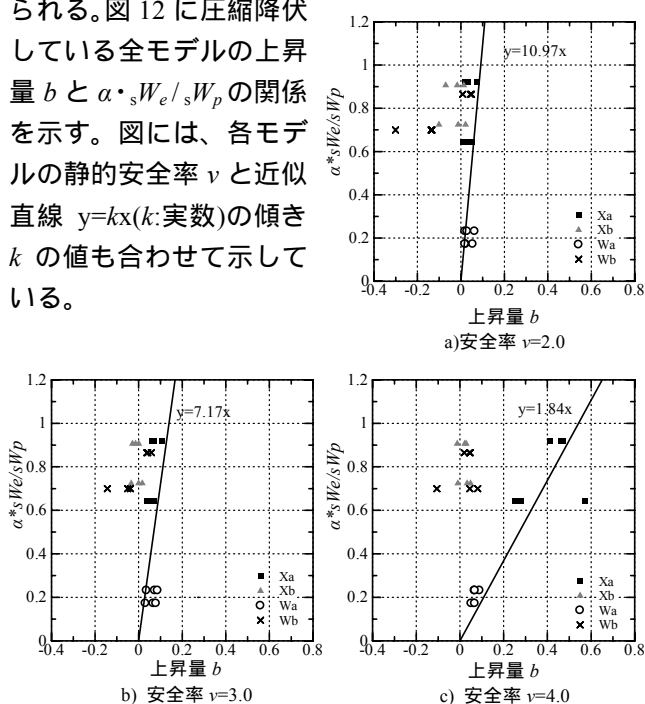


図 11 上昇量 b と $\alpha \cdot sWe/sWp$ の関係

表 6 既往研究モデルの解析結果

| モデル | 安全率 ν | V_{GR}/V_{LE} | | | | $y=x$ からの上昇量 b | | | sWp/sWp | |
|------|-----------|-----------------|--------|------|------|------------------|------|------|-----------|-----|
| | | V_{GR}/V_{LE} | BCJ-L2 | KOBE | TAFT | BCJ-L2 | KOBE | TAFT | | |
| P1 | 9.68 | 1.74 | 1.82 | 1.89 | - | 0.08 | 0.15 | - | 0.01 | 3.0 |
| | | 1.99 | 2.80 | 2.64 | - | 0.80 | 0.65 | - | 0.01 | 6.0 |
| | | 1.29 | 1.48 | 1.55 | - | 0.19 | 0.27 | - | 0.07 | 3.0 |
| P2 | 10.51 | 1.58 | 2.01 | 1.78 | - | 0.44 | 0.21 | - | 0.02 | 6.0 |
| | | 1.28 | 1.33 | 1.47 | - | 0.06 | 0.19 | - | 0.03 | 3.0 |
| PR1 | 5.17 | 1.58 | 1.61 | 1.73 | - | 0.04 | 0.15 | - | 0.01 | 6.0 |
| PR2 | 3.56 | 2.08 | 2.07 | 2.71 | - | -0.01 | 0.63 | - | 0.29 | 3.0 |
| | | 3.05 | 2.93 | 3.85 | - | -0.12 | 0.81 | - | 0.14 | 6.0 |
| SSR1 | 6.34 | 1.51 | 2.61 | 2.46 | 2.49 | 1.10 | 0.95 | 0.98 | 0.13 | 3.0 |
| | | 1.97 | 3.08 | 2.65 | 3.36 | 1.11 | 0.68 | 1.39 | 0.05 | 6.0 |
| SSR2 | 6.99 | 1.42 | 2.65 | 2.21 | 2.11 | 1.23 | 0.79 | 0.70 | 0.10 | 3.0 |
| | | 1.82 | 2.65 | 2.42 | 2.29 | 0.83 | 0.60 | 0.47 | 0.04 | 6.0 |

安全率 ν が大きくなるにつれて、傾き k の値は小さくなっている。安全率が大きい場合、崩壊に寄与する損傷に至るまでの間より多く繰り返し変形することによって塑性変形による消費エネルギーが多くなり、結果として上昇量 b は大きくなっていると考えられる。静的安全率 ν と傾き k の逆数の $1/k$ の関係を図 13 a) に示す。 $1/k$ と静的安全率 ν の関係において近似曲線が 2 次曲線となったため、 $1/k$ は静的安全率 ν の 2 乗に比例すると考え、 $1/k$ と静的安全率 ν の 2 乗との関係も図 13 b) に示した。それぞれの関係において決定定数 R^2 が 0.98, 0.94 となっており、精度良く近似出来ていると考えられる。

これまでに述べたことから、 $y=x$ からの上昇量 b と $\alpha \cdot sW_e / sW_p$ の値には (3) 式に示すような関係があると考えられる。

$$\alpha \cdot \frac{sW_e}{sW_p} = k \cdot b \quad (1/k \propto \nu^2) \quad (3)$$

静的弾塑性解析から sW_e / sW_p の比率と変形性能倍率 α を求め、この近似直線を用いて上昇量 b を算出することで、終局耐震性能を評価できると考えられるが、より多くの静的安全率・モデル形状に対して考察・検討していく課題が残っていると言える。

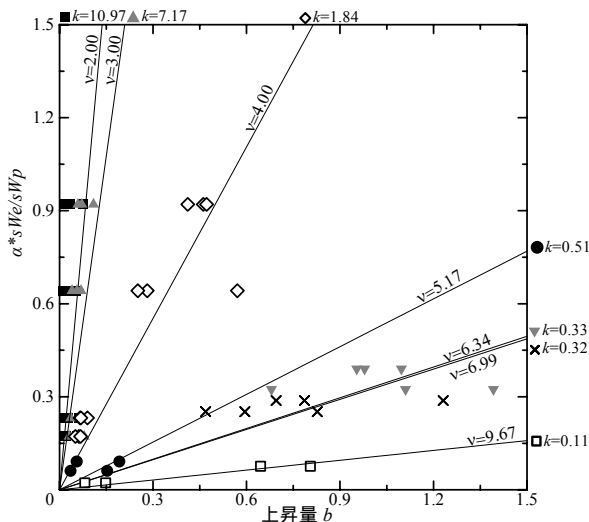


図 12 上昇量 b と $\alpha \cdot sW_e / sW_p$ の関係

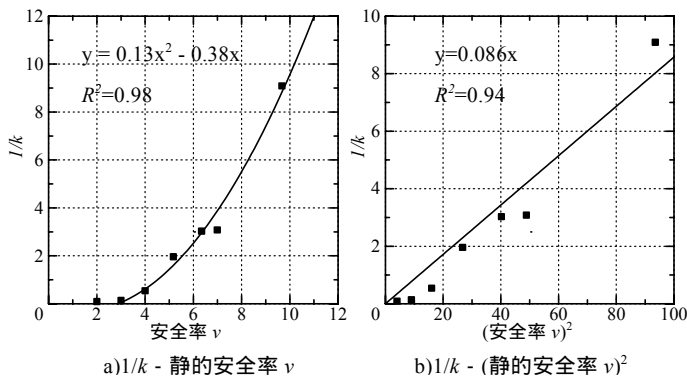


図 13 静的安全率 ν と $1/k$ の関係

8. 結

- (1) 静的安全率 ν による効果を考慮することにより動的地震動レベル V_f の予測の精度を向上することができる。
- (2) 動的地震動レベル V_f の上昇効果は塑性履歴吸収エネルギーによるものである。静的安全率 ν が大きい場合、引張降伏する場合は、この効果はあまり期待できない。
- (3) 図 14 に示す方法によって、時刻歴応答解析を行うことなく、終局耐震性能の評価をすることができる。

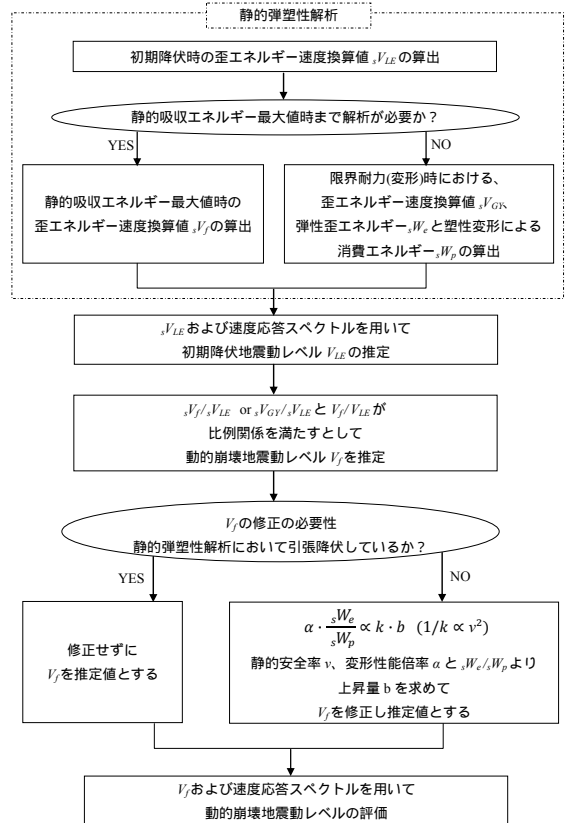


図 14 終局耐震性能の評価法

[参考文献]

- 1) 秋山宏「地震動の不可知性に対処した建築物の耐震設計」日本建築学会構造系論文報告集 第 643 号 pp.1685-1690 2009.9
- 2) 多田元英, 米山隆也「建築物の屋上に設置された 2 層立体トラスの鉛直地震応答性状」日本建築学会構造系論文報告集 第 452 号 pp.77-86 1993.10
- 3) 萩原伸幸「自由振動解を用いた非線形系のエネルギー応答推定に関する基礎研究 周期外乱に対する Duffing 系のエネルギー応答」日本建築学会構造系論文報告集 第 587 号 pp.93-100 2005.1
- 4) 萩原伸幸「自由振動解を用いた非線形系のエネルギー応答推定に関する基礎研究 分数調波振動の影響と地震波によるエネルギー応答」日本建築学会構造系論文報告集 第 618 号 pp.105-111 2007.8
- 5) 松浦由紀, 谷口与史也, 福島理沙「屋根型ラチスアーチ・シリンドラーの耐荷性能と動的崩壊地震動レベルの関係について」日本建築学会学術講演梗概集 pp.809-810 2010.9

討 議 等

討議 [大内 一 教授]

動的荷重と静的等分布荷重を置き換えて、終局耐震性能の評価に用いていいのか。また、動的解析における慣性力分布はどのようになっているのか。

回答：構造物において慣性力は崩壊には直接結びつくものではなく、変位によって崩壊につながります。静的等分布荷重による変形モードと動的解析の振動モードはおおよそ対応しているので、静的分布荷重の変形モードを使うことに妥当性があると思います。振動モードを一致させるために静的解析の荷重条件を変更してもいいです。

討議 [鬼頭 宏明 准教授]

終局耐力の指標は何か。また、塑性仕事の効果を積極的に使うことによって終局耐力が向上するのか。

回答：終局耐力の指標は変形性能と耐荷性能の両方です。本研究は終局耐震性能を議論するものです。したがって、終局耐震性能に及ぼす塑性仕事の効果について調べました。塑性仕事の効果により動的崩壊地震動レベルは上昇するが、図 15 のように塑性仕事の効果があまりない引張降伏している b モデルの方が圧縮降伏している a モデルより動的崩壊地震動レベルは大きくなっています。よって、塑性仕事の効果を利用することにより終局耐力が向上するという訳ではありません。

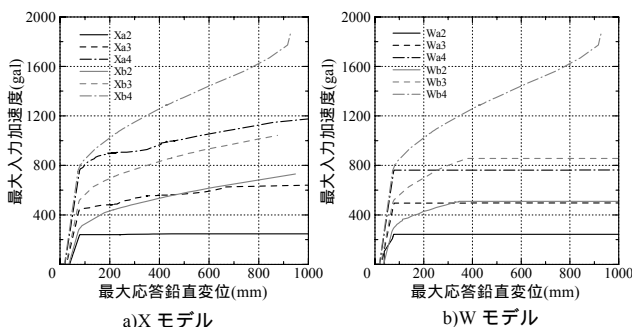


図 15 最大入力加速度と最大応答鉛直変位の関係(BCJ-L2)

討議 [谷池 義人 教授]

塑性仕事の効果により耐震性能が上がるとしても、座屈した時点で塑性履歴吸収エネルギーは見込めないのか。また、引張降伏しているモデルで復元力はループしないのか。

回答：予測値からの上昇量は塑性仕事の効果によるもので、引張降伏モデルにはほとんど現れませんが、動的崩壊地震動レベルは図 15 に示すように引張降伏モデルの方が大きくなります。また、引張降伏しているモデルでは復元力はループしないため塑性履歴吸収エネルギーの効果は見込めません。

討議 [谷口 徹郎 准教授]

図 7 に示されている歪エネルギー速度換算値とポテンシャルエネルギー速度換算値の関係が意味しているものは何か。

回答：塑性仕事の効果が大きいものに関しては、静的解析より得られた結果に比べ、ポテンシャルエネルギー速度換算値に対する歪エネルギー速度換算値の増加量が大きくなる傾向があることを示しています。

討議 [松村 政秀 講師]

上昇量 b とは何か。また、絶対量であるのか。

回答： ${}_sV_{GY}/{}_sV_{LE}$ と V_{GY}/V_{LE} の差であり、無次元量です。