

株式会社 i2S2

Initiative & Integrity for Sustainable Structures

持続可能構造物のための独創性と完結性

を求めて

私共の会社は、従来になかった哲学と独創力で、21 世紀の地球環境保全のひとつとして、100 年・200 年も持続可能な構造物を提供することを企業規範としています。

私共の考え方を少しお話させて下さい。

(文責: 技術顧問 石丸辰治)

＝第一部＝

ご存知でしょうか？

消費カロリー2,500Kcal で大きな構造物が揺れていることを！

私達は 1 日 2,500 キロカロリーの栄養、すなわち、エネルギーを補給して生活しています。現代の科学技術はこのエネルギーという概念を発明して発展してきました。「熱エネルギー」「電気エネルギー」「運動エネルギー」「変形エネルギー」などです。こうした概念に則って「大地震時の構造物の振動」を考え直して見ましょう。

大地震で建物が揺れるということは大きな力が働くからですが、これを作用する力とそれによって生じた変形の両方を一緒に考えましょうというのが、「エネルギーに則った対震設計」というものです。「地震に耐える」ではなく「エネルギー消化機能を強化する」ことにより「地震に対処する」ための「対震設計」です。

建物に作用する力の単位は kN (キロ・ニュートン) です。この力によってある物体が $1m$ (メートル) 移動したとして、その作用エネルギーを「力 F 」と「変位 x 」の積で定義して「 $1kN \cdot m$ 」としています。これを「力-変形関係」で示しますと、図 1 のような斜線を施した面積になります。これは、非常に素直な定義です。

こうしたエネルギーを「熱」にも変換して考えることができるということを証明した人物

がいます。約 200 年前のイギリスの物理学者 James Prescott Joule (1818-1889)です。重錘の落下を利用して、大きな水槽の水の温度を上昇させるというとんでもない実験を遂行した人物です。これを記念して「 $1\text{kN}\cdot\text{m}$ 」は「 1kJ (キロジュール)」と定義されています。

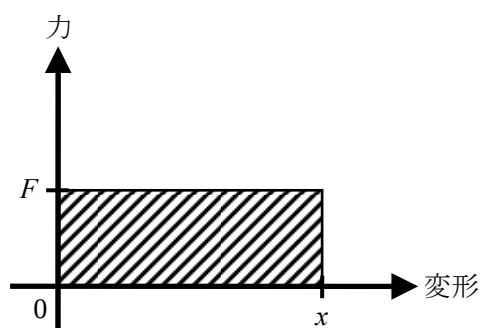


図 1 作用エネルギーの力-変形関係

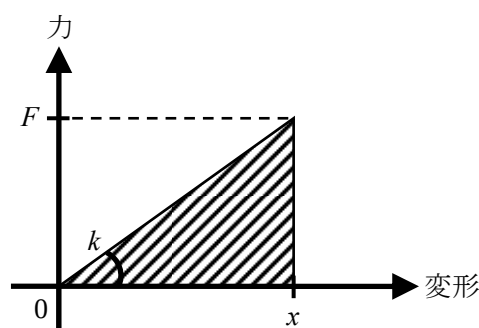


図 2 建物の力-変形関係

この研究が発端となり、いろいろな現象が「エネルギー」という視点から研究されてきました。そのおかげで、私達の身体のカロリーも「 $1\text{kcal}=4.2\text{kJ}=4.2\text{kN}\cdot\text{m}$ 」という換算が可能となりました。いま、簡単に「 $1\text{kcal}\approx 4.0\text{kJ}=4.0\text{kN}\cdot\text{m}$ 」として計算してみます。

そうすれば、「 $2,500\text{kcal}$ 」は約「 $10,000\text{ kN}\cdot\text{m}$ 」となります。

ところで、建物の力と変形の関係は、図 2 に示しますように小さな力では小さな変形しか生ぜず、大きな力では大きな変形が生じるという特性があります。これをエネルギーで見ると、同図の斜線を施した面積で表されます。すなわち、 $(1/2)F \cdot x$ という三角形の面積が「変形エネルギー」になります。傾斜の勾配 k はばね剛性といわれていますが、建物の柱・梁の太さなどで決まる、水平方向への変形のし易さを意味します。柱・梁等が太ければ変形しにくいので k の値は大きくなるわけです。図から $F = k \cdot x$ という関係がありますから、変形エネルギーは $(1/2)k \cdot x^2$ と書き直せます。

さて、「 $10,000\text{ kN}\cdot\text{m}$ 」というエネルギーにより高層構造物が 0.5m 変形したとしますと、 $40,000\text{kN}$ の重さの建物を 0.5m 変形させたということになります。建物の重さは平均的に 10kN/m^2 ですから、延べ面積 $4,000\text{m}^2$ の建物といえます。底面積 200m^2 とすれば 20 層の建物ということになります。

「本当？」という声が聞こえてきそうですが、本当です。

実は、これには時間の概念が入っていません。20 層の建物ですと、大凡 2.0 秒程度で左右に振動する特性を持っています。ゼロから右の最大変形まで 0.5 秒、そこからゼロに戻るのに 0.5 秒、左側の最大まで変形してゼロに戻るまでに 0.5 秒プラス 0.5 秒です。合計 2.0 秒で左右に振動するというわけです。片側の最大変形に達してからゼロの変位に戻るのに約 1.0 秒という時間をかけて、この「 $2,500\text{kcal}$ 」というエネルギーが利用された結果であるという意味を持ちます。

ところが、私達は 1 日で、秒換算で $24\text{時間} \times 60\text{分} \times 60\text{秒} = 86,400\text{秒}$ という時間を掛けて

このカロリーを消費しています。したがって、86,400 人の人間が一斉に力を合せれば、20 層程度の建物を $0.5m$ も揺らすことができることになります。

これは、見方を変えれば、「振動エネルギー」を消化する「機構」を建物に装着すれば、「揺れの小さな建物」を設計することができる筈です。

逆に振動エネルギーを消化できる機構がなければいつまでも揺れ続け、消化不良で建物が壊れるということになります。これが、「制震構造物」の設計の基本的な考え方です。

この度の東日本大震災で、首都圏の超高層建物がいつまでも揺れ続け、柱・梁などの主要構造部材は無被害でも、天井の落下、スプリンクラーの故障による室内水浸、エレベータの故障など、ビジネスの継続ができなくなるような多くの被害報告がありましたが、まさに「振動エネルギーの消化不良」によるものです。

エネルギーそのものは小さいのですが、非常に短い時間で消化しなければならないことが設計として大きなポイントです。

振動エネルギーの消化効率を示す「指標」は何でしょうか？

私達の建物は何故揺れるのでしょうか？

先ほど変形エネルギーは、作用している力と変形の積の $1/2$ であるとお話ししました。これをブランコの揺れから考えてみましょう。

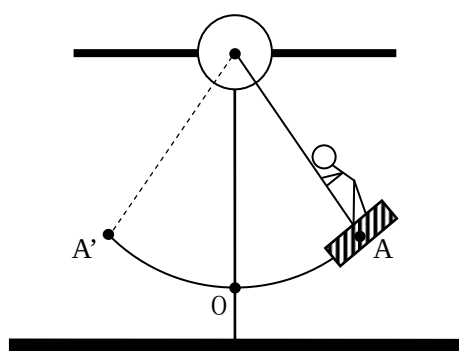


図-3a ブランコの揺れ

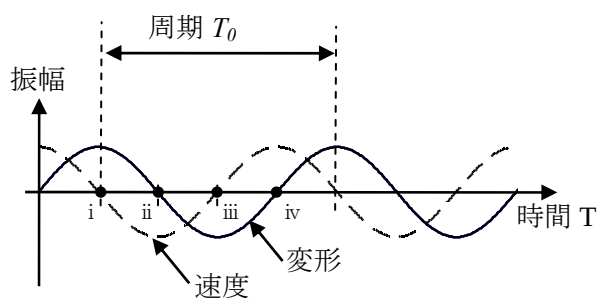


図-3b 変形と速度の時間変動

ブランコの揺れの最大点が図-3a の右側の A 点だとします。ブランコはここで静止して、逆方向の左側に揺れ始めるわけで、A 点での速度はゼロです。この時点でのエネルギーは、この場合は位置のエネルギーですが、変形エネルギーに置き換えて考えても結構です。そして、これ以後左側に移動するわけですが、その位置が 0 点の時、0 点から見た移動距離はゼロですが、その時の速度は最大となります。運動している状態としては最大の速度

をもっているのが「運動エネルギー」が最大ということになります。この定義は質量 m と速度 v の自乗の積の $1/2$ で、 $(1/2)m \cdot v^2$ です。質量 m は建物の重量を重力の加速度 $9.8m/s^2 \approx 10m/s^2$ で除した値であり、 $m=1ton$ はこの地球上では $1ton \cdot 9.8m/s^2 \approx 10kN$ という重さになります。

先ほどは変形エネルギーを $(1/2)k \cdot x^2$ と書けると説明しましたが、運動エネルギーも $(1/2)m \cdot v^2$ と表現できるわけで、神様は「自乗で成立する世界」をお作りになったようです。自然の現象は誠に不思議ですね。

このような定義はともかくとして、物理的には、「位置エネルギー」もしくは「変形エネルギー」が徐々に「運動エネルギー」に変換されて、0点で「位置(変形)エネルギー」がゼロになり、「運動エネルギー」が最大となります。この「運動エネルギー」は、今度はブランコが左側に移動するために使われるわけです。つまり、「位置(変形)エネルギー」と「運動エネルギー」はお互いに交換しあっているわけで、この振動エネルギーを消化する機構がない限りこの現象は繰り返され、いつまでも振動することになります。

地震の時の建物も同様です。地震動の作用により一度振動し始めると、エネルギーを消化する機構が少なければ、地震が終わった後もいつまでも揺れ続けます。

実際の建物は、僅かにエネルギーを消化する能力をもっています。それは梁と柱の結合部分の摩擦や建物と地盤の相互の固さの比率などに起因しているといわれています。

さて、一般に地震動を受けたときの建物のエネルギー・バランスは、次のようになります。

$$\text{「運動エネルギー」} + \text{「変形エネルギー」} + \text{「減衰エネルギー」} = \text{「地震動の入力エネルギー」} \quad (1)$$

減衰エネルギーは振動エネルギーを消化する大きさを表しています。左辺の項は建物自身のエネルギーを分解して表示しており、右辺の項は文字どおり地震動が建物に与えたエネルギーの大きさを表しています。

先ほどのブランコのお話は、一旦揺れ始めたあとは右辺の入力がゼロで、減衰エネルギーの機構を持ち合わせていないときのものです。その場合には「位置(変形)エネルギー」と「運動エネルギー」はお互いに交換しあい、この振動エネルギーを消化する機構がない限りこの現象は繰り返され、いつまでも振動すると説明いたしました。この時には運動エネルギーの最大値と変形エネルギーの最大値は同一なのですから、次式が成立します。

$$(1/2)m \cdot v^2 = (1/2)k \cdot x^2 \Rightarrow \left(\frac{v}{x}\right)^2 = \frac{k}{m} \rightarrow \omega_0^2 \quad (2)$$

つまり、変形 x と速度 v が上記の状態を満足するときに生ずるのです。

実は私達が、構造物を設計する場合、「力学の世界は、弱いところに負荷が掛かるようにできている世界」であるということを認識する必要があります。

あまりエネルギーを使わなくても、弱いところ、すなわち揺れやすいところにそれが投入されるという特性を持っています。先ほど 20 層ほどの建物は、2.0 秒程度で揺れやすいと説明しました。これを固有周期と呼んでいます、まさにこれが、この建物の弱点なのです。他の周期で揺らしても揺れないのですが、この固有周期に同調させて揺らすと、建物の揺れはどんどん成長するのです。労せずして、変形エネルギーを運動エネルギーに変換できるということが、建物の弱点なのです。そしてそれは変形と速度の関係が(2)式で表現できるところに出現するというわけです。時間的に可視化しているのが図-3b の時間 T_0 ですが、これは $T_0 = 2\pi / \omega_0$ という関係にあります。図-3b の変形は三角関数の $\sin$ 関数で表されますから、 t を時間、 a を振動振幅としますと $x = a \sin \omega_0 t$ の最大値は $x = a$ 、速度 $v = a \omega_0 \cos \omega_0 t$ の最大値は $v = a \omega_0$ となります。 $\omega_0 T_0 = 2\pi$ で振動を繰り返すわけですから、この T_0 が固有周期、 ω_0 が固有円振動数というわけです。この値は建物の質量 m と水平方向の変形のし易さであるばね剛性 k のみで決まりますので、まさにこの建物の固有の値で、弱点というわけです。

さて、それでは「振動エネルギー」を消化する機構が装着された場合にどうなるのでしょうか？その消化効率を表す「指標」は、実は「粘性減衰定数 h 」というものです。

私達は、両手で掌を擦りあえば、熱が発生することを習慣として熟知しています。

大きく掌を動かせば、大きな熱になることを知っています。ですから、建物が振動した時に、この掌の機構を建物に装着すればよいというアイデアが浮かびます。

こういうエネルギーを消化する代表的なものは、皆さんがよくご存知の「車」などで利用されている「オイル・ダンパー（ショック・アブソーバー）」です。

この機構は図-4 に示すものですが、水鉄砲の原理と同じです。オイルが充填されている円筒の内部にオリフィスと呼ばれている小さな穴を通じてオイルが出たり入ったりします。その時のオイル同士の摩擦により熱が生じて、振動のエネルギーを消化するものです。

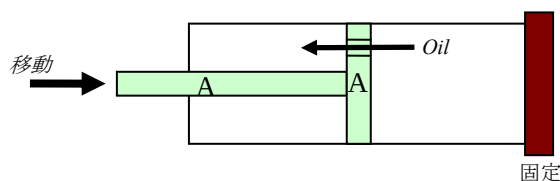


図-4 オイルダンパーの機構

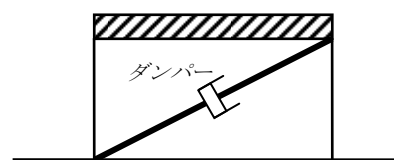


図-5 建物のダンパー装着の様子

考えて見て下さい。先ほどの 2500kcal は、具体的には、私たちの体重に相当する 50kgf の水を 0 度から 50 度にあげるという意味を持っています。私達は 36 度の体温を保ちつつ、いろいろな活動を行っているわけですが、2000kcal や 2500kcal は熱量として実感できる筈

です。私達の体温を保つ一番の要素は血流によって生ずる血液の摩擦なのですから。それにしても大地震時の建物の振動エネルギーはお風呂も沸かせない程のエネルギーでしかないというのは驚きですね。したがって、図-5のように建物内にオイル・ダンパーを装着して、振動エネルギーを熱に変換して内部のオイルを温たためて、自然に放出しても、つまり自然に冷えることにまかせても熱量が小さいので火事になる心配はありません。十分に振動エネルギーを消化できると思いませんか？

その「指標」である「粘性減衰定数 h 」は、0 から 1.0 までの値で規定されていますが、通常の建物は、0.01~0.03 程度といわれています。

この値は次のように使われます。先ほどのように固有周期で長く揺らし続けると、その揺れは「 $1/(2h)$ 」まで成長するというものです。この値を 0.01 としますと、 $1/(2h)$ は 50 になります。揺らす振動振幅の実に 50 倍です。

従来の構造物の設計では、地震動の継続時間は 10 秒とか 20 秒などと短いものという認識しかなかったものですから、揺らす振動振幅の 2~5 倍程度と考えていました。ですから 50 倍などの成長倍率などは考えていなかったのです。

この度の東日本大震災では、地震動の継続時間が 10 分以上もあった場所もあり、その振動振幅は十分に成長してしまいました。

その成長の様子は、東北の震源から遠く離れている大阪市で観測されています。52 層の建物ですが、固有周期 6.5 秒に同調して、実に最上層で 1m37cm の揺れを記録しています¹⁾。エレベータやその他の機器類の損傷が報告されていますが、振動エネルギーの消化機構が備わっていないと、このような被害にあうという具体的事例です。なお、地震動そのものが収まっても、変形エネルギーと運動エネルギーのキャッチ・ボールが続くことはいうまでもありません。

1) 大阪府総務部: 咲洲庁舎の安全性等についての検証結果, 平成 23 年 5 月、

<http://www.pref.osaka.jp/otemaemachi/saseibi/bousaitai.html>

振動エネルギーの消化機構はどうなっているのでしょうか？

さきほど、「オイル・ダンパー」が水鉄砲の原理で作動すると説明しましたが、図-4 の A 部分の軸棒の動かし方で抵抗力が異なってくるのです。早く動かせば、抵抗力が大きく、ゆっくり動かせば抵抗力は小さくなります。つまり揺れの速度に比例した抵抗力をもつ機構です。ですからある係数 c を介して、 $c \cdot v$ という抵抗力が構成されるわけです。中のオイルがさらさらしたものか、ねばねばしたものかによって係数 c の値は異なってきます。さらさらしたものならば、係数 c の値は小さくなります。

この抵抗力を図-3b の時間の変動と一緒に追いかけてみましょう。具体的には、ブランコ

の動きを抑えるために、ブランコに「オイル・ダンパー」を設けたと考えてもいいでしょう。この場合にはエネルギーは消化されるので、新たに外部からエネルギーを投入する、すなわちブランコを漕ぐという動作が必要になります。その状態で、変形エネルギーと運動エネルギーの最大値は同一という状態を考えているわけです。

点 i では変形が最大で、速度はゼロですから、その抵抗力はゼロです。これを抵抗力と変形の関係図のなかにプロットすると図-6 の i 点になります。次に図-3b の ii 点を考えて見ましょう。この場合は変形がゼロで、速度は負側で最大となりますから、図-6 の ii 点に相当します。これを iii、iv 点でも考えてプロットすると、図-6 の時計周りの楕円が画かれます。つまり、ある面積を持つこととなります。振動が繰り返されれば、その分だけ累積の面積は大きくなるわけです。

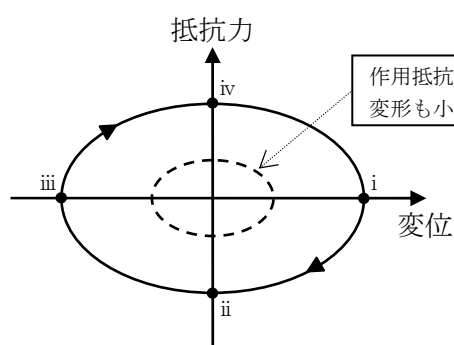


図-6 オイル・ダンパーの抵抗力－変形関係

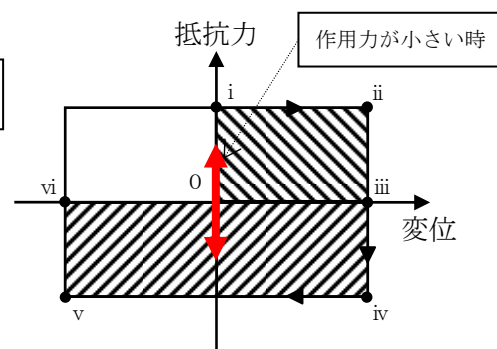


図-7 摩擦ダンパーの抵抗力－変形関係

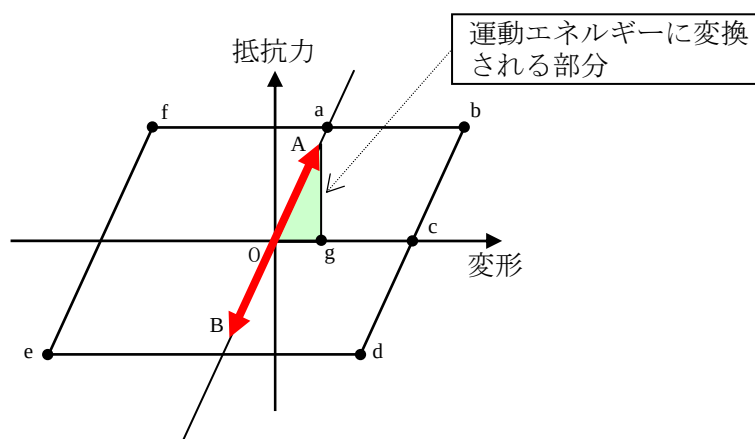


図-8 弾塑性ダンパーの抵抗力－変形関係

ところで、先ほどは掌を擦り合わせれば、熱を生じると説明しました。これを抵抗力-変形の関係で画きますと図-7 のようになります。一方の掌を固定して他の掌を右側に移動させます。これが図の 0 - i - ii - iii の長方形で表現できる面積です。今度は左側に掌を移動させ

ます。方向が反対で、力の向きも反対ですから図の iii-iv-v-vi の面積になります。この面積の総和が掌の熱というわけです。掌の動きを何回も繰り返すと、エネルギーはその累積値としてどんどん大きくなります。これは摩擦ですから、摩擦が切れてすべりを生じさせ得る力が作用しないと、熱が発生しないということになります。すべりがない場合の動きは図 7 の赤線で示すとおり、変位ゼロの軸を上下するだけです。面積を確保できず、エネルギーを消化できないのです。図-6 と根本的に異なる点です。

これは通常の耐震設計でも同じようなことが起こります。図-8 に建物の抵抗力-変形関係が画かれていますが、作用する力が a 点を越えると、それ以上の抵抗力が生じず、変形は b の方向に進みます。a 点を越えなければ、図の A~B の間を行ったり来たりしているだけです。その場合、変形エネルギーは三角形 0-A-g ですが、これは原点 0 に向って振動する時に運動エネルギーに変換され、振動エネルギーが消化されるわけではありません。

作用力が a 点を越えて、変形が b 点に向って始めてエネルギーの消化が始まります。

弾性から塑性に入った状態です。これは構造部材の 1 部の損傷を意味しています。部材の分子の並びが少し崩れて、分子同士の摩擦が生じたと考えれば理解しやすいでしょう。

僅かに熱が発生します。私達は経験として細い針金を手で曲げては延ばすという作業を繰り返していると、その部分に熱が生じ、やがては破断するということを知っています。

この現象が起きているのです。すなわち、耐震設計は構造物の一部に損傷を許容して、振動エネルギーを消化するという設計行為です。これは作用する地震動の力を正確に推定できないと、とても難しい方法であり、最近では構造物を損傷させないで、摩擦ダンパーを多用して設計する方向にあります。

しかし、摩擦ダンパーを動かすためには、ある程度以上の作用力がなければ消化機能が發揮できません。東日本大震災での首都圏は中地震動だったために、多くの超高層では作用力がそれほど小さくなく、摩擦ダンパーの消化機能が發揮できず、天井の落下、エレベータの故障やその他の器機類の故障という犠牲を払って振動エネルギーを消化するという過程をたどったわけです。しかし、その消化効率は低いものですから結果としていつまでも揺れ続いたわけです。一方、オイル・ダンパーを備えた建物の多くは振動エネルギーを消化し、損傷がないという事例がいくつも報告されています。

建物の消化効率である粘性減衰定数 h はどの程度まで設計可能でしょうか？

先ほど、振動エネルギーの消化指標としての粘性減衰定数 h について説明しました。

これを建物の弱点である固有周期 T_0 を横軸にとり、入力周期を変化させるとどのようなのかを見てみましょう。一般的にはその建物の層数の 1/10 程度が弱点である固有周期といわれています。ここでは 10 層程度の建物を対象に固有周期を 1.0 秒として、粘性減衰

定数 h を 0.05（減衰 1）、0.1(減衰 2)、0.2（減衰 3）の共振曲線を描いてみました。縦軸が成長倍率です。

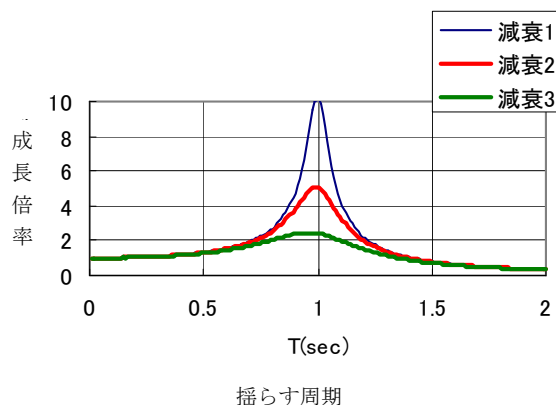


図-9 固有周期 1.0 秒の共振曲線

図-9 が、その結果ですが、固有周期 1.0 秒の位置では減衰 1 で 10 倍の成長倍率、減衰 3 で 2.5 倍の成長倍率です。現在の設計では、 h は 0.06~0.20 程度の制震構造が実現しています。設計では経済性というものが当然要求されますので、最大効率を達成できるように工夫しなければなりません。しかし、実際のところ「オイル・ダンパー」を図-5 のように建物に直接に装着しても、その効果を最大限に引き出しているというわけではありません。

私たちの目的は建物の揺れを小さくすることにあります。揺れの振幅が小さくなると、とたんに効果が薄れてしまいます。掌の運動を思い出してください。私たちは、掌を小さな力でも、大きく動かせば大きな熱が発生することを知っています。掌の動きを小さくして、大きな力で動かしてもなかなか熱が発生しません。すなわち「ダンパー」は建物が大きく揺れると効果を発揮するものです。揺れが小さくなると装置が必然的に持っている構成部品同士の「摩擦」によって変位が拘束されて消化効率が落ちるからです。

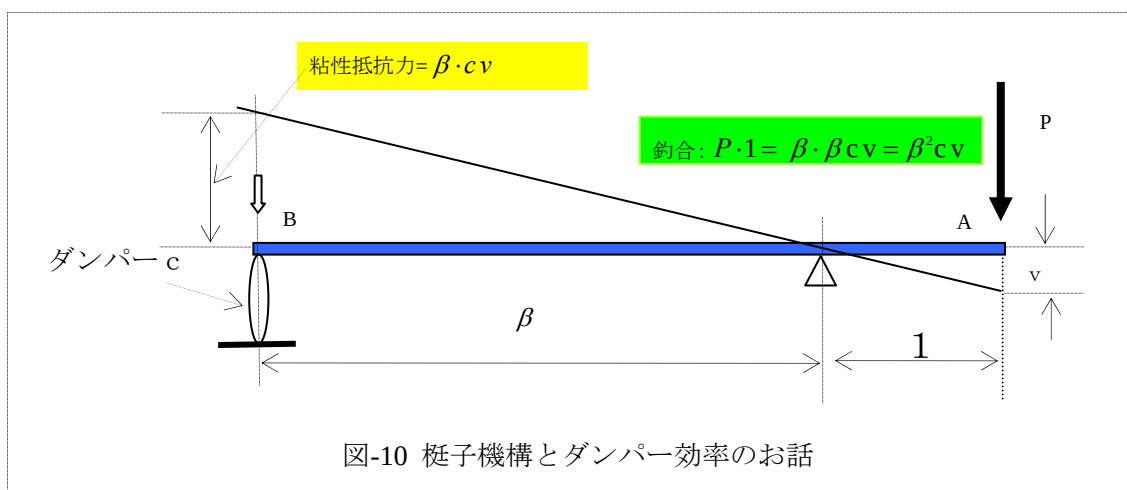


図-10 梘子機構とダンパー効率のお話

このことは、建物の揺れを小さくするために揺れを大きくする部位を作り、そこに「ダンパー」を装着するという一見、矛盾した設計行為を採用すれば、消化効率が向上するということを意味しています。なんとも奇妙な結論になるわけです。

「揺れる機構」で「揺れない建物」を作るという考え方です。

そのひとつの解決策は「梔子機構」を装着するというものです。

図-10 にその概念を示しました。いま右側の A 点で、速度 v で梔子の一端を運動させます。梔子倍率 β の他端で係数 c のオイル・ダンパーを装着すると、その抵抗力は $\beta \cdot cv$ になります。図の中の式で示すように A 点でのモーメントの釣合を考えると、A 点で押し戻される抵抗力は $\beta^2 \cdot cv$ になっています。B 点では動きが β 倍に増幅されているので、オイル・ダンパーの設計仕様は簡易になります。さらに、P 点に押し戻される抵抗力は $\beta^2 \cdot cv$ となり、係数 c は β^2 倍に拡張されているわけです。さらさらした粘性の小さいオイルをダンパー内に充填すれば係数 c は小さく出来ますのでダンパーの動きは滑らかになり、しかもその揺れは $\beta \cdot v$ と大きくなっているのです。これが、梔子機構を利用する理由です。

しかし、これで全て解決というわけではありません。「梔子機構」の設計が難しくなるからです。理由は、大きな「梔子倍率」にすると梔子に曲げ変形の度合いが大きくなるからです。梔子部材は剛で変形しないということを前提にして考えられていますから、その前提が崩れると生じた力を順調に伝達できなくなるからです。

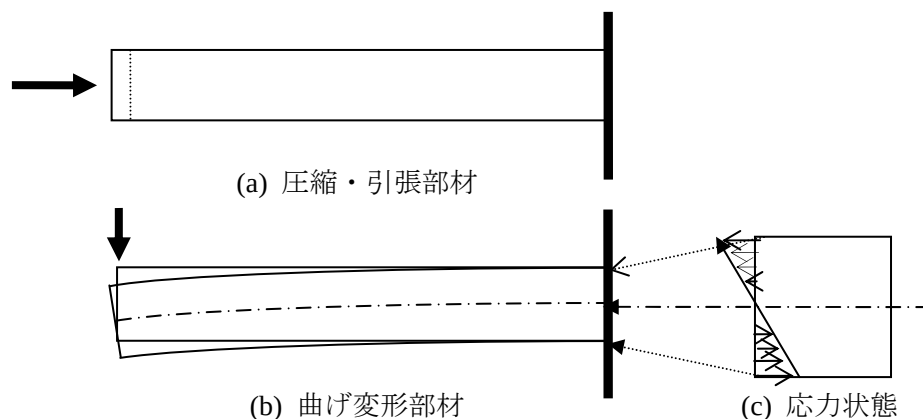


図-11 圧縮・引張部材と曲げ変形部材の抵抗（応力）の様子

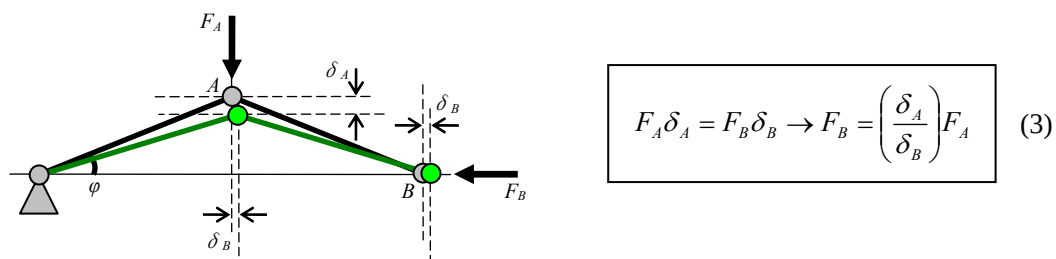


図-12 トグル機構の原理

部材に曲げ変形が生じるということは、図-11 に示すように材の上端が伸びて、下端が縮みますので、その歪に対応する応力は三角形の分布になります。断面積の部位に生ずる応力に不公平が生ずるのです。これに対して、(a)のような圧縮・引張部材は全断面積にほぼ同じ応力が生じ、各部位が同一の抵抗力で一緒に頑張っている、すなわち、材料を効率よく利用しているわけです。

では圧縮・引張部材で構成されている梃子機構があるのでしょうか？これは私達の周りに多くある「トグル機構」がそれです。腕（棒）部材 2 本を図-12 のように、各端部をピンで、すこし「くの字」にして結合したものです。実は「紙の穴あけ器」などに利用されています。いま A 点で F_A の力で押します。A 点の変位を δ_A 、B 点に生ずる力と変位を F_B 、 δ_B と置きますと、(3)式の関係ができます。A 点の移動のエネルギーは $F_A \delta_A$ 、B 点のエネルギーは $F_B \delta_B$ で、両者が釣り合うという関係を利用しています。トグル・アームの設定角度 ϕ が小さいと (δ_A / δ_B) の比率は限り無く大きくなるということは理解して頂けるとと思います。ですから、建物の揺れ δ_B が小さくなくても、これを「梃子」である「トグル機構」を介して、変形を δ_A に増幅させ、その部位に上記の「ダンパー」を装着すればよいというアイデアに繋がります。

実際の建物の実施例は？

写真-1 は実際のトグル機構にオイル・ダンパーを装着した制震改修の例(2010 年)です。東京都内の繁華街にある昭和 42 年竣工のデパート(9 階建ての鉄骨鉄筋コンクリートの構造)内のトグルの写真です。構造物自身の損傷によりエネルギーを消化する耐震構造として設計されていますが、この改修によって主要構造部材が損傷を起こしていない弾性状態でのエネルギー消化効率の h はゼロから 0.075 に改善されています。



写真-1 トグル機構を利用した制震改修

制震改修の設計は i2S2、施工は東急建設です。この度の東日本大震災では、震度 5 強の地震動に対して室内の展示物に落下はなく、オイル・ダンパーの効果をいかんなく発揮したものです。幾つかの隣接建物では、室内は多くの品物が散乱しその後始末に大わらわという状態だったということを考えると、本構造システムの建物は地震後も「事業継続」が可能という大きなメリットをもたらしています。



写真-2 事務室内のトグル(2009 年)



写真-3 集会室・入り口の設置例(2009 年)

写真-2 及び写真-3 はいずれも i2S2 設計の制震改修でのトグルの配置例です。耐震壁などで補強するよりは、室内空間を圧迫しないものとして好感されています。



(a) 外観パース



(b)内部のトグル制震装置

写真-4 トグルによる制震構造の建物（日本大学理工学部駿河台 1 号館：2003 年竣工）

実はトグル制震装置を本格的に設置した最初の例は、写真-4 に示す 2003 年に竣工した 7 階建ての日本大学理工学部駿河台 1 号館です。理工学部内に設けられた駿河台 1 号館建設委員会（委員長：高宮眞介教授）が組織され、大学本部から佐藤総合計画に設計業務が委託され、この二つの組織が有機的に設計組織を構成し設計にあたったものです。施工は大成建設です。

トグル制震装置は、長辺(x)方向、短辺(y)方向にそれぞれに 70 基ずつ 140 基を装着しています。固有周期は長辺 1.0 秒、短辺 1.15 秒です。計画は振動エネルギーの消化率の粘性減衰定数 h の目標を 0.2 以上としたのですが、やはり経済性から 0.17 程度に収めざるを得ませんでした。

写真(b)に内部のトグル制震装置が載せてありますが、トグルの梃子倍率は 2.0 倍、オイル・ダンパーの最大減衰力は 500kN です。装置はほとんど壁内に収納されていますが、写真-6 に示すように 6 階の 1 部にデザインとして見られる箇所が設けられています。



写真-5 6階大講堂前のトグル制震装置

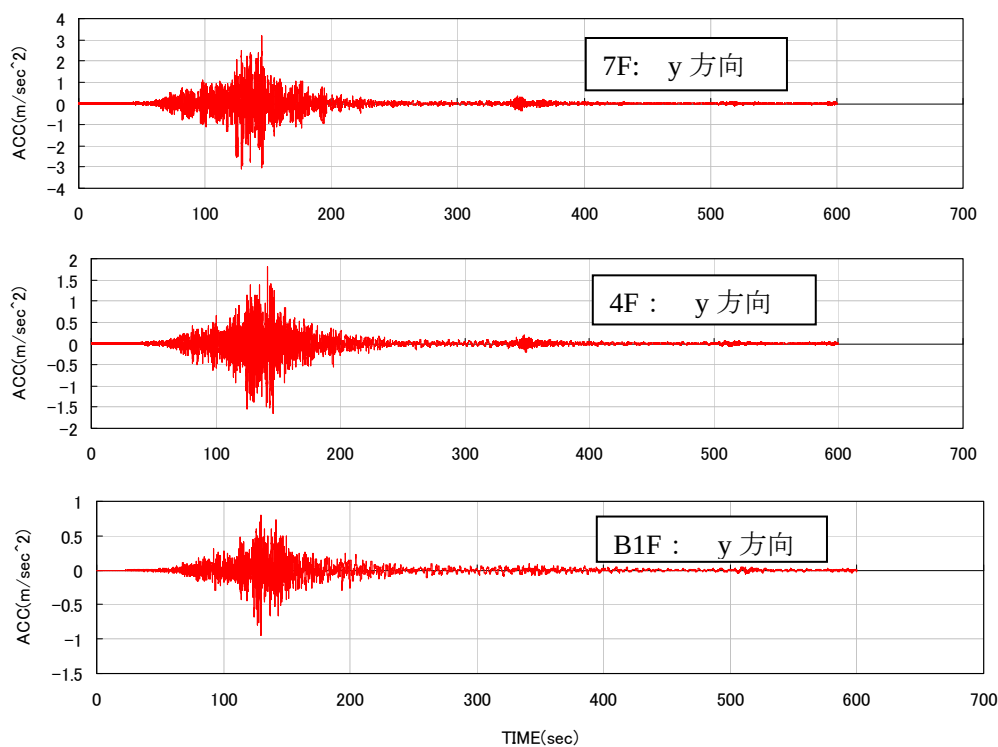


図-13 東日本大震災時の日本大学理工学部駿河台1号館の記録

今度の東日本大震災での本建物では、10 分以上の地震動を観測記録しました。その一部を図-13 に示します。7F、4F の記録は B1F のそれと比較すると、揺れの大きさは異なりますが、時間的な推移はほぼ同じです。B1F のそれはこの建物への入力と考えられますから、7F、4F には後揺れの現象が見られず、エネルギー消化効率が高いことが分かります（参考：図-18）。表-1 はその最大値を整理したものです。

表-1 東日本大震災・本震の駿河台 1 号館の地震動記録（y 方向）

階	加速度(m/s^2)			速度(m/s)			変位(m)			粘性減衰定数
	絶対	相対	倍率	絶対	相対	倍率	絶対	相対	倍率	
7	2.56	1.61	1.7	0.36	0.273	3.13	0.054	0.041	3.19	$h \approx 0.08$
4	1.80	0.85	-	0.22	0.09	-	0.033		-	
B1	0.95		1.0	0.087		1.0	0.013			

一番右側の項は計算により算出した粘性減衰定数です（コメント参照）。

当初の設計計画で目指していた値を満足していませんが、これは機構の中に存在する初期摩擦や若干の曲げモーメント、建物内の 2 次部材の摩擦などによるものと考えています。トグルという増幅機構を採用しても、入力の小さい時にはこの程度の効率低下を起こしてしまうのですから、直接に建物にダンパーを装着している場合には注意が必要になるでしょう。

（注意・計算に対するコメント）

ここでの計算は右欄の速度・変位の項に示しましたように、得られた絶対加速度波形を速度波形、変位波形に変換して 7F と B1F 間の相対速度、相対変形の算出を出発点としています。これは、絶対加速度が高次モードの影響が入りやすいため相対速度、相対変形で判断の方が誤差の混入が小さいと考えられるためです。なお、7F の周波数解析から、卓越周期（固有周期）0.95 秒が求められています。次に粘性減衰定数を仮定して、B1F での記録波形に対して求められた固有周期を持つ 1 質点系の応答解析を行い、相対速度 0.27(m/s)、相対変形 0.041(m)に大凡一致するまで h の値を収斂させていったものです。なお、表の B1F の括弧内の値は固有周期 0.95 秒における粘性減衰定数 $h = 0.4$ の場合の加速度、速度、変位の値です。

これからも分かりますように設計には、入力の大きさに応じた性能を明確に示しておくべきであることが重要です。今回の首都圏での地震動の大きさは震度 5 弱でしたが、機構などに含まれている「摩擦」の影響を少しでも軽減できるように設計・施工を注意深く行うべきです。

図-14 は 2004 年に竣工した日本大学船橋校舎 14 号館の東棟の構造軸組図です。トグル機構の節点を改良してピロティ形式の建物に採用した列柱のデザインとして制震装置が組み込まれています。これも大学内の設計委員会(委員長：高宮眞介教授)を中心に進められました。設計は日本設計、施工は大成建設です。固有周期は長辺(y)方向 0.6 秒、短辺(x)方向 0.8 秒で、性能目標は粘性減衰定数 $h=0.15$ です。

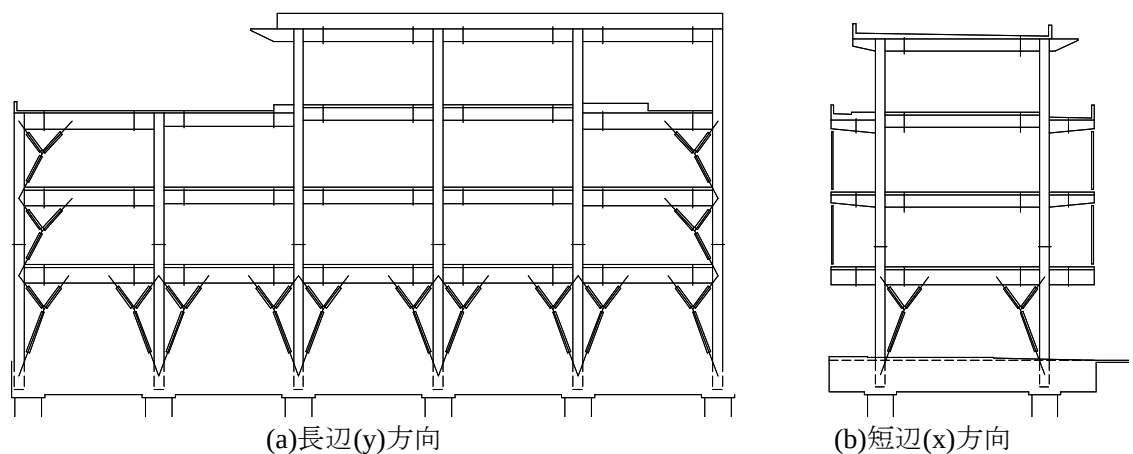


図-14 日本大学理工学部船橋校舎 14 号館東棟



写真-5 日本大学理工学部船橋校舎 14 号館東棟

通常、ピロティ形式の構造は「耐震構造」としては不適格といわれていますが、「制震構造」では「エネルギー消化」の効率を高めることのできる構造システムなのです。逆の言い方をすれば、「制震改修」は容易であるということです。

いずれにしても、トグル機構はデザインとしても採用できるシステムといえます。図-15はそうした1例です。既存不適格構造でしたので、目標粘性減衰定数 h は0.075です。なお、トグル機構を複層仕様にするにより効率が上がりますが、それは第二部でご紹介いたします。

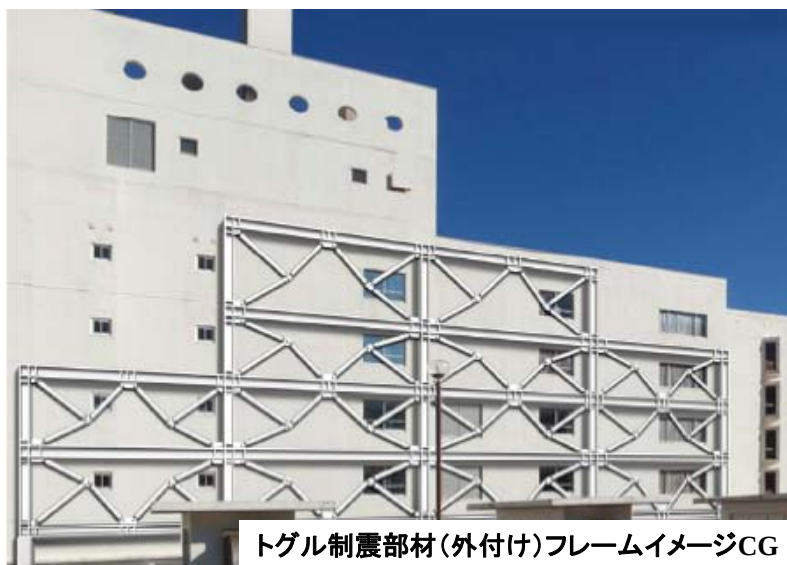


図-15 トグル制震システムによる制震改修例



(a) 香積台全景

(b)内部のトグル制震装置と亀壁

写真-6 横浜・總持寺・香積台のトグル機構と亀壁(2000年改修)

写真-6は、変位増幅装置として「亀壁」と「トグル」の最初の実施例です。横浜市の曹洞宗・大本山・總持寺・香積台（200年前の建造物）の制震改修に装着されたものです。いずれの装置も「魚津社寺工務店」と「飛島建設」と共同で開発したものです。この新しい装置の装着を「伝統的社寺建築」に採用して頂いたことは望外の喜びでした。関係各位に深く感謝しております。

実は「エネルギー消化」についての考え方に確信を持ちましたのは、「伝統的社寺建築」で勉強させて頂いた結果であります。

奈良・平安時代に建造された「伝統的社寺建築」には、肘木（ひじき）や斗栱（ときょう）などの多くの組み物と「頭貫」、「飛貫」、「腰貫」などが多重に設けられた「貫（ぬき）」による軸組により大地震に耐えてきました。これらの部材は「釘」などで拘束されていませんから、大地震の際には大きな軋み（きしみ）音を発しながら、揺れるのです。

これは木材同士が振動により「擦れあって」、揺れを止めるように作用しているためで、実にうまい「エネルギー消化器官」だったわけです。もうご承知のように、木材同士が擦れあう場所が多ければ多いほど、地震に対する安全性が高まることになります。

近世に建造された社寺建築は、奈良・平安時代のものに比べますと、「擦れあう部位」が極端に少なくなっています。「亀壁」はこうした窮状を改善するために考案されたもので、単純に木材同士が「擦れ合う」場合よりも効率よく「擦れ合う装置」にしたものです。

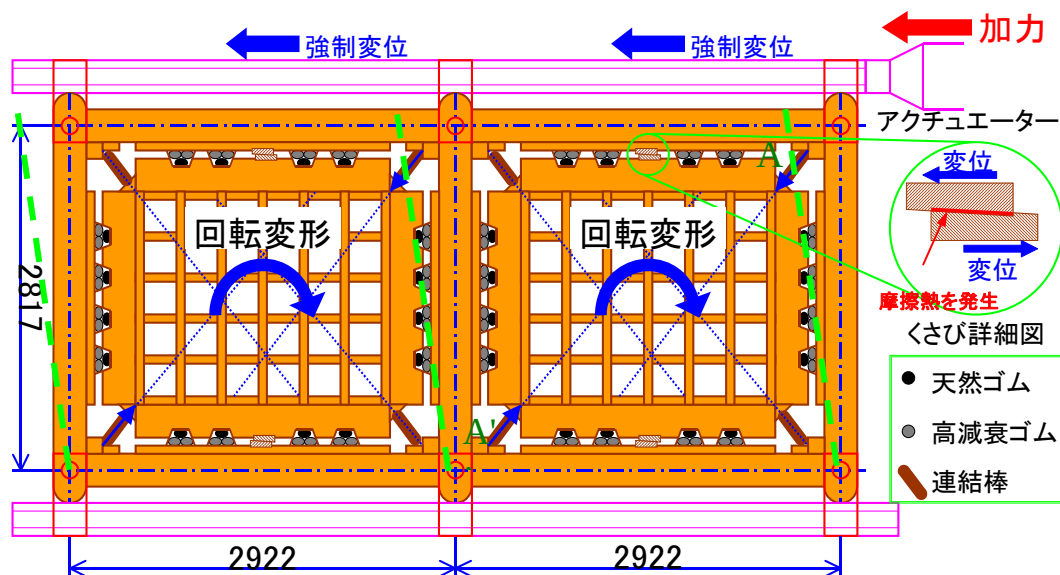


図-16 亀壁のエネルギー消化機構

図-16 にその機構の挙動が説明されています。梁・柱とは切り離されている剛な格子壁がありますが、その4隅に連結棒が「斜向え(はすむかえ)」に設置してあります。図では梁上部に左向きにアクチュエーターという油圧装置で加力している様子が画かれていますが、柱は緑色の点線のように変形いたします。そうすると、「斜向え」のAとA'の連結棒は

剛な格子壁を圧縮するように働きます。「斜向え」の構成になっていますから、結局、格子壁はこの状態では時計周りに回転するようになります。したがって、梁と格子壁の上端・下端に「楔（くさび）」を打ち込んで「摩擦」を生じさせるように仕向ければ、「伝統的社寺建築」の「貫構造」のような作用が期待できるというわけです。



写真-7 意匠としての亀壁制震装置

写真からも類推できると思いますが、既存の梁・柱のいわゆる軸組に沿わせるように新しい軸組を設け、そこに亀壁制震装置を取り付けたものです。なお、「亀壁」という名称は私共の造語です。伝統的社寺建築は、粘土などでしっかり固めた土台を構築して、その上で上部構造が建設されていますが、この土台を「亀腹」と呼ばれているところに困んでいます。格子壁は亀の甲羅に似ているところと、「長寿構造物であれ」と願う気持ちがこの名称を思い付かせました。

写真-7 は、内部の亀壁ですが、落ち着いた風格は昔からの造りのようで、「魚津社寺工務店」の代表的作品のひとつになっています。なお、「トグル」も装着されていますが、「亀壁」の補完として設けたものです。

写真-8 は 1767 年に建立された海蔵寺です。1945 年に三河地震を経験していますが、構造体に大きな被害を受けた様子はなく、地震直後に屋根の改修・葺替工事が実施されたということでした。今回の工事は、やはり「魚津社寺工務店」の施工で行われたものですが、屋根の葺替工事を主とした平成の大修理の一貫として、近い将来起こりうる中部・東海地方の大地震に備えたものです。制震設計の方針としては、總持寺と同様に、既存の軸組に沿わせるように新しい軸組を新規に設置して、鉛直荷重の支持能力を向上させるとともに、新旧軸組間に制震装置を配置することにより

地震時の振動エネルギーの消化効率をあげたものです。トグルはターンバックルで引張型の機構とし、固有周期は 0.5 秒で、トグル・亀壁制震装置の目標粘性減衰定数は 0.15 としています。



写真-8 海蔵寺の制震改修(2002 年)

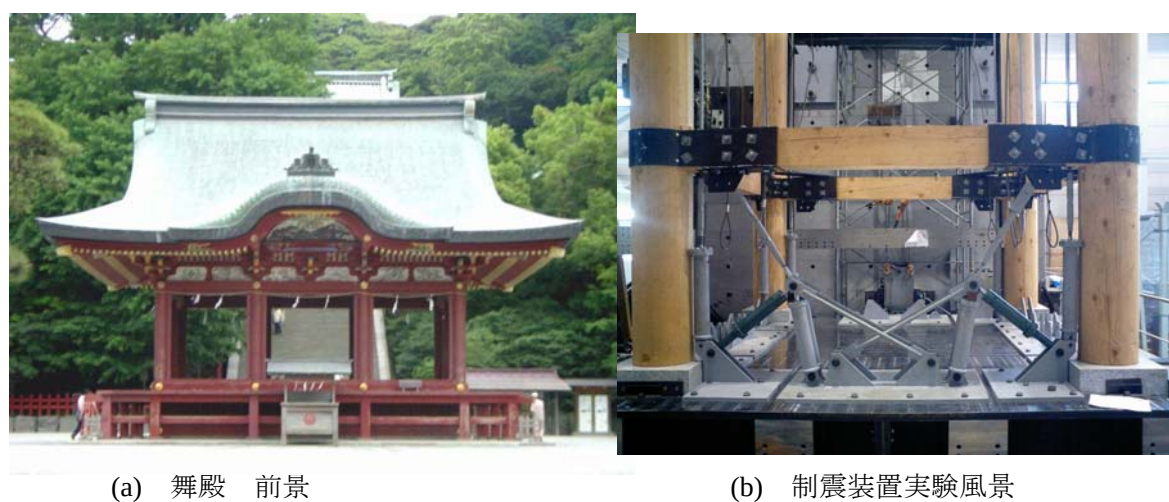


写真-9 鶴岡八幡宮の舞殿の制震改修(2006 年)

写真-9 は鎌倉・鶴岡八幡宮の舞殿です。床下に引張型のトグル制震装置が組み込まれています。竹中工務店と魚津社寺工務店の施工です。i2S2 でトグル機構を設計しています。

以上のように、変位増幅装置にはいろいろな変化に富んだ組込方法があります。力を分散させる機能もあり、設計の自由度は非常に高いことが分かって頂けると思います。

参考： 位相差の話

現在の規準で言えば、震度 6 弱相当の「BCJ-L2」という設計入力地震動が用意されていますが、今回の東日本大震災での首都圏での揺れの大きさは「BCJ-L2」の半分にも達しないものでした。震度でいえば「震度 5 弱」の地域が多かったようです。

したがって前述しましたように、「摩擦ダンパー」型のエネルギー消化機構を有する建物の多くはその能力を発揮することができませんでした。通常「弾塑性ダンパー」や「座屈拘束ブレース」と言われているものはこの範疇に入ります。また、免震構造でも「鉛プラグ入り積層ゴム支承」もこの範疇に入るでしょう。

これが「オイル・ダンパー」と「摩擦ダンパー」系の違いですが、もうひとつ大きな違いがあります。

それは上記の 3 倍程度の地震動に対して、「オイル・ダンパー」系を活用していると「主要構造部材」や「基礎構造」の経済設計が可能になるということです。

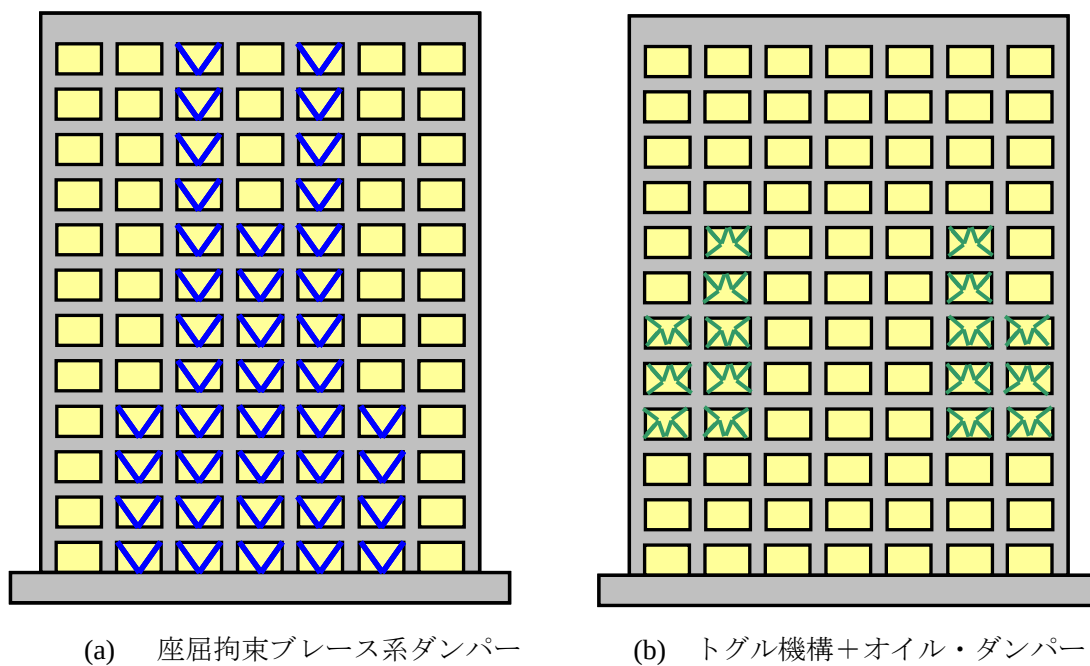
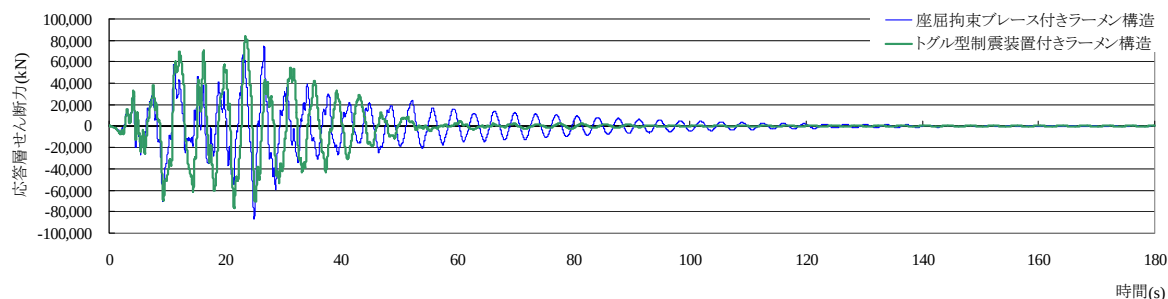


図-17 制震構造の装置装着箇所のイメージ

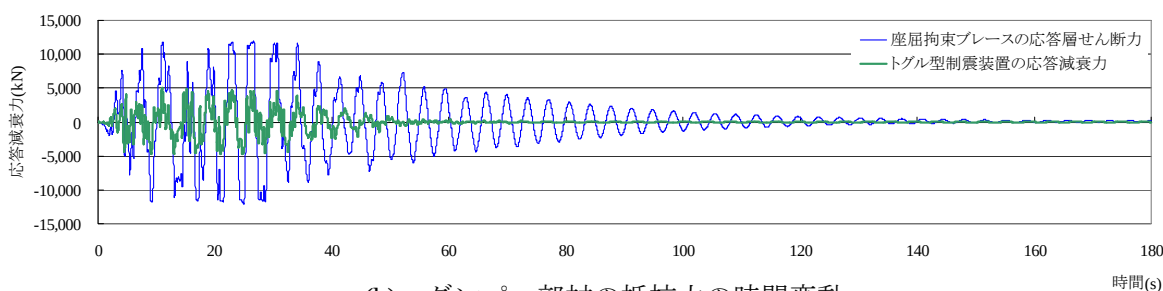
図-17 は制震構造のダンパー装着イメージを図示したもので、(a)が座屈拘束ブレース系、(b)がトグル機構にオイル・ダンパーを装着した場合です。

BCL-L2 の標準地震動を対象としたときのイメージですが、(b)の方が設置箇所は半分以下になっています。ただし、ダンパー総体の金額は、現在の価格相場ではほぼ同等です。

それにも拘わらず(b)を推薦する理由は、入力が小さくとも効果を発揮するということと、前述したように「主要構造部材」や「基礎構造」の経済設計が可能になるということです。



(a) 主要構造の抵抗力の時間変動



(b) ダンパー部材の抵抗力の時間変動

図-18 構造主体とダンパーの抵抗力の時間変動

具体的には次のような理由によります。

図-18 は高層構造物の中間階の揺れの時間変動を示したものです。地震動として標準地震動である「BCJ-L2」に対して計算したものです。ここでは全体的な特徴をお話することが目的ですので、建物の諸元については省略します。ただし固有周期は約 3.5 秒です。(a)が主要構造の揺れ、(b)がダンパーの抵抗力の揺れです。いずれも青色は「座屈拘束ブレース」という「摩擦ダンパー」系の応答、緑色が「トグル機構+オイル・ダンパー」の応答です。全体としての応答は(a)と(b)を加えたものになります。

(a)で特徴的なことは地震で強く揺れている時はほぼ同等の大きさですが、地震動が終息した時のいわゆる「後揺れ」が緑色の応答には見られないということです。

(b)で特徴的なことは「緑色」のオイル・ダンパーの抵抗力が、「青色」の座屈拘束ブレースに比較して 1/2 以下になっているということです。これはトグル機構に装着していることから生じている現象ですが、梲子倍率 2 倍を乗じて「座屈拘束ブレース」のそれが大きいのということです。装着箇所が 2 倍以上あっても、それぞれが分担するエネルギー消化としての摩擦ダンパー系の抵抗力は、トグル・システムのそれよりも大きくなっています。これは、実は、オイル・ダンパー系でシステムを構成するときの一番の特徴なのです。

図-19 にオイルダンパー・システムの主体構造とダンパーの抵抗力を、最大値を 1.0 に基準化して重ね合わせで描いたものです。「赤色」がオイル・ダンパーの抵抗力、「青色」の波形は主体構造の抵抗力の時間変動です。

波形に時間的なずれが生じているのがお分かりかと思います。トグル・システムの抵抗力の波形が先行して、その後に主体構造の抵抗力が続きます。

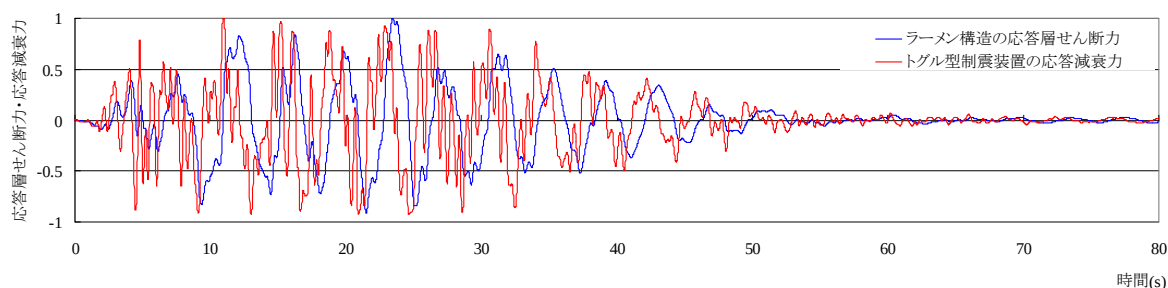


図-19 トグル制震システムの主体構造と制震装置の抵抗力の時間変動

これは図-3b 及び図-6 で説明した性質が反映されているからです。オイル・ダンパー系は、その運動速度に比例した抵抗力を発揮します。これは建物の変形が最大となるときの抵抗力はゼロ、変形がゼロのときに速度が最大となりますから、そのときに最大の抵抗力を発揮するということです。

一方、主体構造のばねは、摩擦ダンパー系と同様に、変形に比例した抵抗力ですから、変形が最大のときに抵抗力も最大、ゼロのときは抵抗力もゼロということです。

このように、オイル・ダンパー系の制震構造は、抵抗力が時間的に分散されるシステムですが、摩擦ダンパー系の制震構造は、主体構造とダンパーの抵抗力の最大値は同時に発生するシステムであり、その和に対する安全性の検討が必要ということです。

図-20 に作用力の模式図を示しましたが、合力の処理の難しさは自明だと思います。減衰力と主体構造抵抗力が同じ大きさの場合、図から基礎構造に及ぶ力は $\sqrt{2}:2$ という比率で異なってくるということです。工事費に大きな差が生じることがお分かりかと思います。耐力のみを増強する耐震改修の場合には、基礎構造には大きな力が伝達されるので、それに注意を払わなければならないことはいうまでもありません。

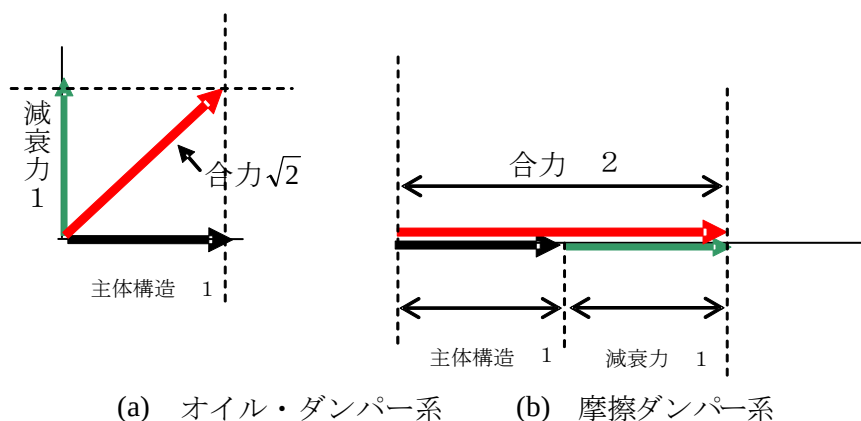


図-20 主体構造の負担する抵抗力とダンパーの抵抗力の組み合わせの違い

平成 7 年（1995 年）、兵庫県南部地震という大事件が起きました。
あの累々と続く崩壊した建物群に圧倒され、多くの構造技術者・研究者がそうであったように、私も一体なにをやってきたのだろうと、涙が止まりませんでした。
この悲惨な災害を目の当たりにして、大学に居るだけで社会貢献は何もしていなかったではないかという反省であります。
あの累々とした瓦礫の山は、構造物を壊してはいけない、損傷させてはいけないという思いを強くさせるとともに、それを達成できる「エネルギー消化制御」技術を、それも一般の方々に分る言葉で説明する義務があるのではないかと意識させたものです。と同時に、今までの研究成果を研究室や学会誌などに閉じ込めておくのではなく、一般の構造技術者にも分るように具体的な形として実際設計の例として開示していくべきだと考えました。

こうした考えを具体的に実施すべく、平成 15 年 10 月に大学発ベンチャー i2S2（アイツエスツー：Initiative & Integrity for Sustainable Structures）を立ち上げました。
具体的には、大学及び設立会社の所有する技術を社会に公開する講習会・シンポジウムの開催・産学官連携による研究開発事業への参加および関連企業の参加による知的財産の実用化事業の展開を行うことで、社会貢献していこうということでもあります。
一方において会社での利益の一部を大学の研究費に還元、開発された新しい技術を会社に移転し、もって会社の発展を図るという意図でもあります。

こうした考え方に賛同してくれた長年の付き合いである公塚正行氏を中心に活動しており、その輪を広げるところまでようやくたどり着いたところです。

こうした状況に、この度の東日本大震災です。震度 7 の地震動はもはや「想定外」ではありません。真摯にそれに向かい合うべきです。設計技術を向上させるのは構造技術者の義務であります。皆様と共に新しい技術を介して社会資本の充実に一歩でも貢献できればと思っております。