

土木系 大学講義シリーズ 編集機構

編集委員長

伊 藤 學 (東京大学名誉教授 工学博士)

編集委員 (五十音順)

青 木 徹 彦 (愛知工業大学教授 工学博士)

今 井 五 郎 (元横浜国立大学教授 工学博士)

内 山 久 雄 (東京理科大学教授 工学博士)

西 谷 隆 亘 (法政大学教授)

榛 沢 芳 雄 (日本大学名誉教授 工学博士)

茂 庭 竹 生 (東海大学教授 工学博士)

山 崎 淳 (日本大学教授 Ph. D.)

(2006年3月現在)

「振動学は難しい」という感覚を多くの方が持っているように思う。これには二つの理由があると感じている。一つ目は、大学の講義として「振動学」を開講している教育機関が必ずしも多くないこと、二つ目は、構造力学の延長として「振動学」がとらえられ、単位の取りにくい構造力学の印象から「振動学」を色めがねで見えてしまうことである。著者らは本書の企画を承るに当たって、この点は十分に認識はするものの「理解にやさしい振動学」として上梓することはやめることにした。なぜなら、高名な先生方が苦労され、理解しやすい振動学をとりまとめられている、いわゆるやさしい振動学の教科書はきわめて多く出版されているからである。加えて、やさしさを優先するあまり実務に使用できない、実務に結びつかない内容とならざるを得ない点が散見され、そのようなご意見もいただいたからである。現在の現場では、手順の誤り、反力の見誤り、座屈とともに、振動問題にも十分に対処すべきことが多い。しかしながら、振動が「動く」ということで非日常的で常識的な感覚の外的世界に入るため、正確な対応はきわめて難しい。例えば、10トンの荷をつり上げて揺れ始めたとき、作業員がおさえて止めようというような気になるほど揺れは軽快であるが、おさえて止めようとする行為ほど警戒すべきものはないのである。また、振動は豊富な経験のもとでつくられた構造物ではほとんど問題が起きないのに対し、新しい構造物をつくったとき、美しい造形を考案したときに初めて振動が問題となることが多い。したがって、本書の内容には、大学学部レベルの初学者には難しい内容がある。しかしながら、実際に現場で振動に関して必要となる知識はまとめたつもりである。つまり、内容的にやや難しい箇所もあるが、本書で学んでいただくと「読者にやさしい振動学」を習得することができ、まさしく「応用振動学」の知識として広く活用できると考えている。

以上が、本書を企画した著者らの考え方である。したがって、代表的な大学での講義科目である「材料力学」、「構造力学」の理解はある程度進んでおり、

ii 改訂版にあたって

大学の教養科目にもある「微分方程式」, 「関数論」, 「一般力学」の基礎は高校での教育レベルも含めて習得していることを前提としている。本書の構成は、前半3章までで、いわゆる振動学の基礎、4章以降は現場で現実問題として対処しなければならない振動問題を、交通、地震、風とかなり専門的な点にまでまとめている。これらの世界はいまもって日進月歩の分野である。巻末に挙げている参考文献も参考にされ読者各自でそれぞれの知識を拡張していただきたい。

難しいと批判されることは重々承知である。しかし、本書をきっかけとして一人でも多くの方が振動の世界に足を踏み入れ、あるいは本書を手がかりにして振動の世界に興味をいただいただければ著者らとしてもこの上ない幸せである。

最後に、このような機会を与えていただいた本書シリーズの編集委員長で著者らの恩師でもある伊藤學先生ならびに、編集委員会の方々に感謝を申し上げる次第である。

2003年9月

山田 均・米田 昌弘

—— 改訂版にあたって ——

本書の初版は2003年に発刊され、早くも10年の月日が流れた。ご存じのとおり、2011年(平成23年)3月11日には、わが国における観測史上最大の東北地方太平洋沖地震が発生して18500人ももの死者・行方不明者と31万人を超える避難者を出したことから、道路橋示方書・同解説(V耐震設計編)も2012年(平成24年)3月に規定の見直しが行われた。この規定の見直しに対処するため、本書の5章を修正・加筆した改訂版を発刊することになった。改訂された本書が学生の耐震工学教育に役立てば幸いである。

2013年5月

山田 均・米田 昌弘

目 次

序 章 振動問題と制御の現状

1. 振動問題とはなにをいうか	1
2. 振動による被害	5
3. 振動制御の現状	7

第 1 章 概 説

1.1 振動は難しいけれど、難しくない	12
1.2 振動の呼び方と用語	15
1.2.1 振動の様子と自由度	15
1.2.2 振動の移り変わり	16
1.2.3 強制振動と自励振動	18
1.3 固有振動と固有振動モード形	19
1.4 構造減衰	20
1.4.1 構造減衰とは	20
1.4.2 減衰比と対数減衰率	20

第 2 章 振動解析の手法

2.1 自 由 度	22
2.2 1 自由度系の非減衰自由振動	23
2.3 1 自由度系の減衰自由振動	33
2.3.1 減 衰 作 用	33
2.3.2 粘性減衰をともなう減衰自由振動	34
2.3.3 等価粘性減衰	40
2.4 周期的外力による 1 自由度系の強制振動	41
2.5 不規則外力を受ける 1 自由度系の強制振動	44

2.5.1	衝撃力による振動	44
2.5.2	重畳積分	45
2.5.3	数値積分法	46
2.6	弾性体の振動解析	48
2.6.1	梁の曲げ振動	48
2.6.2	梁のねじり振動	52
2.6.3	弦の振動	55
2.7	2自由度系（多自由度系）の振動解析	57
2.7.1	2自由度系（多自由度系）の運動方程式	57
2.7.2	固有値解析	59
2.7.3	モード分解法による強制振動解析	64

第3章 不規則振動の基礎

3.1	不規則振動とはなにか	68
3.2	1自由度系の不規則振動	69
3.3	多自由度系の不規則振動	71

第4章 移動荷重による橋梁の振動

4.1	歩行者による人道橋の振動	74
4.1.1	歩行者の歩調と歩行外力	74
4.1.2	歩行者による応答解析法	75
4.1.3	設計上の簡易計算式	77
4.1.4	使用性に対する評価	79
4.2	走行車両による橋梁の応答解析	79
4.2.1	車両の振動モデル	79
4.2.2	路面凹凸	81
4.2.3	走行車両による応答解析	82
4.3	走行車両に起因した環境振動問題	85
4.3.1	環境振動評価に必要な基本事項	85
4.3.2	地盤振動	94

4.3.3 低周波空気振動	96
---------------------	----

第5章 地震による建造物の振動

5.1 地震の基礎知識	101
5.2 耐震設計上の基礎知識	112
5.3 設計地震動	131
5.4 耐震性能の静的照査法	136
5.5 耐震性能の動的照査法（動的地震応答解析）	145
5.5.1 動的照査法の必要性	145
5.5.2 動的応答解析法	146
5.6 免震橋の基礎	151

第6章 風による建造物の振動

6.1 風による建造物の振動を扱うときになにを知っていればいいか —耐風設計の基礎知識	157
6.1.1 減衰と振動の関係	157
6.1.2 風による振動—現象面からの説明	158
6.2 振動—流体力のモデル	159
6.2.1 力学的相似パラメータ	160
6.2.2 非定常空気力	160
6.2.3 準定常理論による非定常空気力	163
6.2.4 平板翼理論による非定常空気力	166
6.2.5 非線形振動論と分数調波	167
6.3 自励振動と多自由度系	168
6.3.1 フラッター解析	168
6.3.2 多自由度系への拡張	171
6.4 耐風設計への拡張	181
6.4.1 設計風速	181
6.4.2 振動の発生推定と風洞試験	184

6.4.3 振動の評価法186

終 章 結 び と し て

参 考 文 献

索 引

振動問題と制御の現状

なかなか取り付きにくい振動の話について、まずは総説から始めたい。ただ、ただでさえ難しいと批判がある振動を現状を含めて概略的に説明しようとするとなかなか難解になってしまう。そうはいつても、枠組みがないとなかなか理解しがたい面もあるので、ここでは、構造物といっても橋梁の上部工を念頭に置いて説明を始めることにする。ただし、繰返しにはなるが、理解しがたいトピックスもでてくることはある程度仕方がないかなと思っている。そのときは遠慮なく飛ばしてもらって、後日改めて読み直すか、将来実務で必要になったときに見直してもらおうと役に立つであろう。

1. 振動問題とはなにをいうか

「振動問題とはなにをいうか」というような構えた標題をつけると、振動問題はきわめて特殊で、改めてじっくり見直さなければならぬように感じるだろう。本当にそうだろうか。振動というと、おそらく99%の方は「揺れること」と思うにちがいない。一方、揺れない振動はあるのだろうかという斜めに構えた質問がきそうである。禅問答のように感じるかもしれないが、揺れない振動問題はもちろんある。そこら辺の話から本書を始めたい。

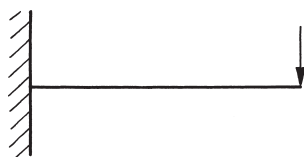
大学では学生実験と称して、学生に各分野で特色ある種々のテーマを与えて実際に実験を自ら手を下して行う、あるいは実験している状況を観察するなど形の違いはあるが、実験を体験させている場合が多い。必修の科目として単位

2 序章 振動問題と制御の現状

を与えている場合も多いように見受けられる。限られた量の材料を与えて、あるスパンをわたる橋梁を設計させ、強度、使用材料などの観点からのコンテストを行い、実験としている例もある。著者の関係する大学でも、鋼棒で作った単純梁とひずみゲージを与えて、構造力学で修得したはずの諸原理を実際に確認する課題を課している。どのレベルの実験であれ実験のポイントは、実物の挙動が目の前に現れてしまうことにつきる。対称であるはずのひずみ分布が対称にならなかったり、集中して載荷しているはずの力が集中荷重になっていなかったり、「こうなるはず」のものが、そうならない例は枚挙にいとまがない。そういう事実を目の前にした場合、よく耳にする意見は、「実験には誤差が多い」とか、「実験は難しい」とか、はたまた「さっきの実験は失敗した。理由はよくわからない」といってつぎも同じ結果を手にしたたり、おおよそ理論的な解は正解に近く、実験が誤っているという感覚を背景にするものがほとんどである。理論解の背景となる設定と実際に実験して操作している状況との食い違いに少しでも目を向ければ新しい世界が開けるのに、それに気づく場合はさほど多くない。本論から少しはずれてしまった。話を元に戻そう。ここで、実験をすることを想定しよう。実験の条件は単純な方がいいので、「一様な材料である長さの片持梁をつくり、水平に据え付ける。そして、自由端に集中荷重を作用させて、変位を求めよう」ということでどうだろうか。構造力学での知識によれば、スパンを l 、使った材料のヤング率を E 、断面の断面二次モーメントを I 、自由端の集中荷重を P とすると、先端のたわみ δ は、 $\delta = Pl^3/3EI$ となり、このとおりになればいい。少し難しくなるが、起きそうな状態を想定して、少し専門的な説明を加えてみよう。

(1) 「力を加えたら埋め込んでいる根元で折れてしまった」

構造力学で習ったように、この場合、曲げモーメントが一番大きくなる。し



・片持梁の実験

たがって、材料の破断応力を超えたので折れたとみることができる。

(2) 「集中荷重におもりを使ったら、落ちてしまって、変位が測れない」

この場合、荷重点でのたわみ角が大きくなって、梁とおもりとの摩擦より傾斜により滑る力が大きくなって、落ちてしまったのだろう。大学学部で習うような梁理論では微小変形を前提にしているのだから、滑るようなたわみ角が生じた場合に適用できるかどうかは保証の限りではない。しかし、見た目には大きな変位が生じている場合でも、いくつか影響が大きい要因がほかにもあるので、比較すれば当てはまりは決して悪くない。一方、たわみ角の大きさを気にして、梁の軸とつねに直角を保つように力を加える場合も想定できる。どんどん力を加えていって、また破断しないとすれば、最終的にはらせん状になるわけで、これは当然、微小変位の問題ではない。

(3) 「薄い梁を立てて使ったら、ねじれてしまった」

普通実験をするときには梁を固定し、荷重しやすいように断面弱軸方向に荷重方向を想定することが多い。この例はおそらく強軸方向に教科書に書いている例に従って、力をかけたのであろう。この例はたぶん幸運な例であろう。横倒れ座屈が起きている。

(4) 「いろいろな量を精度よく測ったのに、実験と理論が微妙にあわない」

種々の原因が想定できるが、よくいわれる例のみ挙げることにする。受込み端に問題がある場合がある。理論的にはモデル化した棒材の埋込み端は簡単な境界条件できわめて使いやすい。しかし、応力分布などの理由で実現するにはきわめて難しく、「埋込み端での固定点はどこだ」なんていう困ったことを本気で調べたりしたくなる専門家もいるほどである。棒材の支承条件を実験で再現することは容易でない場合も多く、棒材モデル化に起因する影響を頭の隅に置いておくことは問題の整理に有効である。逆の問題として実際の支承条件を理論に盛り込む場合も簡単でないことも多い。

さあ、ここまでがいわゆる構造力学で比較的まっとうな困りごとである。これから本論である。

(5) 「静かにおもりを乗せるようにいわれたけれど、揺れが起きてしまっ

た」

力がかかることによる変位を調べるためには、力がかかっていない状態をベースにし、それに力をかけて変位の差をもとめる。初めから荷重がかかっていて、絶対変位を求めるなんてことはしない。構造力学で扱う力のかけ方は静的載荷で、丁寧な物理実験書などでは準静的載荷をしなさいと記述されている。つまり、きわめてゆっくり、少しずつ力をかけ、十分に時間をかけて、目標とする力を載荷する必要がある、静的載荷を実現するためには必要になる。この力をかける度合いのことを載荷速度という。載荷速度が大きいとき、なにが起きるかという、これは条件によって異なる。発生する応力が弾性範囲内であれば、載荷速度が大きくて揺れが起きたとしても、いずれ収まり、結果として静的載荷と変わらない状態になる場合がほとんどであろう。静的載荷と静的でない載荷の違いは、力を加える過程にある。力を加え、目標に達する時間がどれほど必要なのか。われわれの構造物でいえば、死荷重に相当するもの、雪荷重、温度荷重は、載荷速度が遅いので静的載荷が実現されているように感じる。活荷重、衝撃荷重、地震荷重、風に相当するものは静的でない載荷と見るのが自然であろう。となると、静的荷重として扱われているこれらの荷重は、モデル化が進んで荷重効果が結果として等価になる荷重として決められていると考えるべきであろう。

つまり、振動問題はどこにでもある一般的なものであって、「風が吹けばカーテンが揺れる」といったわれわれが目にするごく日常的なものである。しかも、理論的には親しみやすい静的載荷の例は、実際にはそれほど多くない。それでは「なぜすべての効果を振動問題として扱わないか」という疑問がわいてくる。ストレートないい方をすれば、振動として扱う必要が大きいからであり、先に挙げた等価な静的荷重として考えれば、多くの場合、必要にして十分な配慮ができるからである。時間とともに変化する揺れを扱うためには、静的な扱いよりも面倒な手順を踏まざるを得ない。同じ結果が得られる保証が得られるのなら、面倒でない方がいいというのは明らかであろう。実際にはその保証を得ることがなかなか難しく、振動にともなう事故もそこから起きてい

ることが多い。

2. 振動による被害

振動による被害は大ききわめて例が多い。土木構造物だけに限っても、地震による高架橋の崩壊、風による吊橋の落橋などの例がある。ただ、振動が起きて被害がでたことは同じであっても、主要因とすることは異なる場合も少なくない。したがって、振動が起きやすいから、被害が起きたと短絡的に結びつく例はきわめて少ない。

まず、振動の教科書によく引用される例として、1850年のアンガースの吊橋でのフランス軍隊の行進で起きた崩壊がある。行進のリズムと吊橋の固有振動数が一致して共振したとされている。崩壊には至らないものの、東京近郊の競艇場にある歩道橋で歩道橋の水平振動に歩行者の動きが調子を合わせ顕著な振動を発生させている例もある。同様な例は比較的剛性が小さい歩道橋で起きることが多い。吊り形式橋梁だけでなく、振動実験に立ち合い、振動している橋の上を歩いてみると妙に橋の振動と、意識もしないのに調子が合ってしまうのを感じる。歩行のペースと橋梁の固有振動数の一致は不快な振動をもたらすことが多く、特に例が多い歩道橋の設計ではこれに対する考慮がなされる。

吊橋と風の組合せは、吊橋の近代化は風との戦いであるといってもいいほど、多くの振動事例がある。

1940年に起きたワシントン州タコマナローズ橋の落橋は、建設当時から振動の発生が報告されていたため、崩壊の逐一が映画に撮影され、現在でもショッキングな映像として紹介されている。20 m/s 弱というさほど強くない風での崩壊はきわめて大きな衝撃を与え、以降の吊橋事業にきわめて細心な検討を必要とされるようになった。ただ、タコマナローズ橋の例は、吊橋解析技術の飛躍的進歩があった直後であり、それにとまなう風による振動問題が表面化したものである。表に示すように風で生じた振動による落橋はタコマナローズ橋だけではない。最近でも例はないわけではない。崩壊に至らないまでも、完成後、架設中を問わず、振動事例は少なくない。最近でも東京湾横断道アクア

6 序章 振動問題と制御の現状

ラインでの事例があり、それぞれ有効な対処方策が施されている。風による振動は、部材でも起きる。斜張橋ケーブルのような斜めのケーブルに降雨下で生じるレインバイブレーション、斜張橋ケーブルや送電線が複数のケーブル配置をとる場合に風上のケーブルの後ろの流れに影響されるウェークバイブレーションなど、耐風工学の専門書を開くと、深刻な議論の跡が見える。

・風による振動事例

静的風力		
1879年	Tay Bridge (UK)	風力と列車事故
動的問題		
1823年	Brighton Chain Pier Bridge (UK)	ねじれ振動
1826	Menai Strait Bridge (UK)	床組修復
1830	Nassau Bridge (D)	チェーン破損
1850	Niagara-Lewiston Bridge (US)	破壊
1932	George Washington Bridge (US)	たわみ振動、トラス補強
1937	Golden Gate Bridge (US)	閉断面トラスに変更
1938	Thousand Island Bridge (US)	たわみ振動
1939	Deer Isle Bridge (US)	たわみ振動、 ステイケーブル取付け
1939	Bronx Whitestone Bridge (US)	トラス補強
1940	Tacoma Narrows Bridge (US)	ねじれ振動を起こし崩壊

UK：イギリス，US：アメリカ合衆国，D：ドイツ

風による振動で少々趣が異なるのが、簡易な高欄の振動事故である。簡単にパイプを組み合わせて作るような作業用通路の高欄の場合、固有振動数は100 Hzに及ぶことがある。多くの場合、円形断面の小径パイプを使い、また固有振動数が低くないため、風により誘起される振動の一つである渦励振がさほど高くない風速で生じる。例えば、振動が発生する風速の継続時間が1時間とすると、100回毎秒×1時間(3600秒)=36万回となり、典型的な疲労破壊を生じることになる。

風による振動の場合、当然のことであるが、風が吹かなければ振動しない。つまり、風が吹いて、振動を起こすような力(風圧の分布)が作り出されなければ、風による振動は起きない。風による振動の対処が、風洞実験を活用して形の微妙な調整で振動を防ごうとしているのは、このためである。

同じ振動でも、地震は少々趣を異にする。地震による橋梁の被害では、阪神

〔あ〕		オクターブバンドレベル	87	クロススペクトル密度関数	71
アイソレーター	152	音の大きさのレベル	91	〔け〕	
RMS 法	151	音の強さ	90	形状係数	154
暗騒音補正	89	音の強さのレベル	90	継続時間	122
安定なリミットサイクル	168	音 圧	85	計測震度	110
〔い〕		音圧実効値	86	結合モードアクセプタンス	72
1 自由度系	23	音圧レベル	90	限界風速	165
1 自由度フラッター	173	〔か〕		減衰自由振動	36
一般化外力	65	カイン	112	減衰振動	17
一般化外力—速度同相	173	過減衰	35, 157	減衰定数	34
一般化外力—変位同相	173	ガスト応答	158	減衰比	20
一般化減衰	65, 173	加速度応答スペクトル	124	減衰マトリックス	58
一般化剛性	65, 173	可聴音	96	減衰率	160
一般化質量	65, 69, 173	活断層	102	限定振動	158
一般座標	49, 64	カットオフ周波数	82	弦の振動	55
〔う〕		過渡振動	42	〔こ〕	
渦励振	6, 158	ガ ル	112	高架橋からの地盤振動	94
〔え〕		カルマン渦	159	高減衰ゴム支承	153
A 種の橋	118	感覚いき値	97	剛性比	160
A 特性	92	完全弾塑性モデル	127	剛性マトリックス	58
液状化	111	環太平洋地震帯	102	構造減衰	20
SRSS 法	151	〔き〕		構造的に連成	171
S 波	105	幾何学的非線形解析	125	剛体部分 (2 次元) 模型	181
x % 時間率振動レベル	94	基準関数	49	固有円振動数	25, 170
エネルギー一定則	128	基準座標	49, 64, 69, 71	固有音響抵抗	90
エネルギー保存の法則	25	気象学	157	固有振動数	25
M - ϕ 曲線	129	気象庁のマグニチュード	106	固有振動モード	61
〔お〕		逆断層	103	固有振動モード形	19
欧亜地震帯	102	ギャロッピング	158	固有値	60
応答振幅	170	共 振	22	固有値解析	59
応答スペクトル	124	強制振動	18	固有モード形	19
応答スペクトル法	150	極慣性モーメント	29	〔さ〕	
応答塑性率	126	許容振幅	187	載荷速度	4
オーバオールレベル	87	許容塑性率	126	材料減衰	20
オールパスレベル	87	緊急地震速報	110	材料非線形	125
オクターブバンド	86	〔く〕		1/3 オクターブバンド	86
		空間相関情報	72		
		クーロン摩擦	33		

〔し〕		震度法	136	ダランベールの原理	23
CQC 法	151	振 幅	17	単位衝撃応答関数	45, 69
C 特性	92	〔す〕		弾性体	23
時間率振動レベル	94	スケルトンカーブ	127	弾塑性地震応答解析	146
刺激係数	149	スペクトル強度	125	弾塑性復元力特性	127
支承部	114	〔せ〕		ダンパー	152
地震応答スペクトル	124	正減衰	17	〔ち〕	
地震時水平力分散構造	114	制 振	7	地表状態	182
地震時保有水平耐力法	139	正断層	103	中央値 L_{50}	94
実体波	105	静的載荷	4	中心周波数	86
車両の振動モデル	79	静的でない載荷	4	超音波	96
周 期	17, 122	設計振動単位	122	重畳積分	46
集中質量マトリックス	58	絶対加速度応答スペクトル	124	超低周波音	96
自由度	15, 22	絶対変位	4	長周期地震動	110
主要動	106	〔そ〕		直交性	62
準静的載荷	4	騒音レベル	92	〔つ〕	
準定常理論	163	走行車両による応答解析	82	津 波	111
ジョイントモードアクセプ		相 似	178	〔て〕	
タンス	72	相似モデル	179	TMD	63
衝撃係数	80	相対速度応答スペクトル	124	低周波音	96
常時微動	111	相対変位応答スペクトル	124	低周波空気振動	96
使用性に対する評価	79	速度応答スペクトル	124	定常振動	42
初期微動	106	側方流動	111	定常調和振動	17
怒限度	187	塑性ヒンジ	117	テオドルセン関数	166
自励外力	18	塑性率	126	デシベル	87
自励振動	18, 158	粗度区分II	182	デシベルの計算	88
震 央	101	〔た〕		デュアメル積分	46
震央距離	101	大気境界層	182	〔と〕	
震 源	101	大気境界層の構造	182	等価質量	180
震源距離	101	耐震性能	116	等価粘性減衰	40
震源深さ	101	耐震設計	151	等価風洞試験モデル	177
人体に及ぼす影響	98	耐震設計上の基盤面	119	等感曲線	92
人体への影響	95	耐震設計上の地盤種別	120	動吸振器	63
震 度	107	耐震設計上の地盤面	119	動的増幅率	80
振 動	1	対数減衰率	20, 37, 170	等ラウドネス曲線	92
振動学	157	タイプI	112	トリリニア型	128
振動加速度レベル	92	タイプII	112	〔な〕	
振動状態別解析	19	武田モデル	128	鉛プラグ入り積層ゴム支承	153
振動数伝達関数	72	多自由度系	23	〔に〕	
振動数方程式	50, 60	多自由度系の運動方程式	57	2次音	98
振動の状況	19	たたみ込み積分	46		
振動モード	50	ダッシュポット	33		
振動モード形関数	71				
振動レベル	93				
震度階	107				

2自由度系	23	負減衰	17	モード寄与率	149
2自由度系の運動方程式	57	ブッシュオーバー解析	143	モード分解法	64
ニューマークの β 法	46	部分弾性模型	180	モーメントマグニチュード	106
〔ね〕		フラッターデリバティブ	161	〔ゆ〕	
ねじれフラッター	158, 163	フルード数	160	有効質量	149
粘性減衰	33	プレート間地震	102	揺れない振動	1
粘性減衰係数	33	プレート境界地震	102	〔よ〕	
〔は〕		プレートテクトニクス	101	余耐力	117
倍振幅	17	プレート内地震	102	〔ら〕	
倍数調波	168	分数調波	168	落橋防止システム	115
バイリニア型の復元力特性	127	〔へ〕		ランバーク・オズグッド型	128
剝離流体力学	157	平衡法	23	〔り〕	
ハザードマップ	112	変位一定則	129	力積応答関数	45
80%レンジの下端値	94	変位応答スペクトル	124	リダンダンシー	119
80%レンジの上端値	94	変動空気力	161	リヒターによるマグニチュード	106
バッキンガムの π 定理	160	〔ほ〕		リミットサイクル	168
発散振動	17, 18, 159	歩行外力	74	流体減衰	20
発生風速域	158	歩行者による応答解析法	75	流動化	111
波動方程式	56	〔ま〕		履歴減衰	130
パフエーティング	158	摩擦減衰	20	臨界減衰	36, 157
梁のねじり振動	52	マッハ数	160	臨界減衰係数	36
梁の曲げ振動	48	窓や建具に及ぼす影響	98	臨界状態	36
パワー差	89	〔み〕		〔れ〕	
パワースペクトル密度関数	70	右横ずれ断層	103	レイノルズ数	160
パワー平均	89	密度比	160	レイリー減衰	65
パワー和	89	〔む〕		レイリーの手法	29
〔ひ〕		無減衰	17	レベル	88
B種の橋	118	無次元振動数	160	レベル1地震動	112, 131
$P-\Delta$ 効果	131	無次元風速	161	レベル2地震動	112, 133
P波	105	〔め〕		レベル2地震動(タイプI)	139
非減衰固有円振動数	25	メカニカルアドミッタンス	72	レベル2地震動(タイプII)	141
非線形地震応答解析	146	免震橋	152, 154	連成項の影響	173
左横ずれ断層	103	免震支承	153	連成フラッター	158, 173
非定常空気力	160	免震設計	151	〔ろ〕	
表面波	105	〔も〕		路面凹凸	81
表面波マグニチュード	106	モーダルアナリシス	19, 64, 147	路面の空間周波数	81
〔ふ〕		モーダルアナリシスの手法	75		
不安定なリミットサイクル	168	モーダルマトリックス	62		
不規則	17	モード	19		
不規則振動	157				
不規則振動理論	157				
複素固有値解析	170				

——著者略歴——

やま だ ひとし
山 田 均

1978年 東京大学工学部土木工学科卒業
1981年 東京大学大学院博士課程中退
1981年 横浜国立大学工学部土木工学科助手
1984年 工学博士（東京大学）
1986年 横浜国立大学助教授
1998年 横浜国立大学教授
2001年 横浜国立大学大学院教授
現在に至る

よね だ まさ ひろ
米 田 昌 弘

1978年 金沢大学工学部土木工学科卒業
1980年 金沢大学大学院修士課程修了
1980年 川田工業株式会社入社
1988年 工学博士（東京大学）
1997年 近畿大学助教授
2002年 近畿大学教授
現在に至る

応用振動学（改訂版）

Applied Structural Dynamics

© Yamada, Yoneda 2003, 2013

2003年10月31日 初版第1刷発行

2013年7月5日 初版第3刷発行（改訂版）

検印省略

著 者 山 田 均

米 田 昌 弘

発 行 者 株式会社 コロナ社

代 表 者 牛来真也

印 刷 所 三美印刷株式会社

112-0011 東京都文京区千石 4-46-10

発行所 株式会社 コロナ社

CORONA PUBLISHING CO., LTD.

Tokyo Japan

振替 00140-8-14844・電話 (03) 3941-3131 (代)

ホームページ <http://www.coronasha.co.jp>

ISBN 978-4-339-05551-1

（高橋）

（複製本印刷）

Printed in Japan



本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製・転載は著作権法上での例外を除き禁じられております。購入者以外の第三者による本書の電子データ化及び電子書籍化は、いかなる場合も認めておりません。

落丁・乱丁本はお取替えいたします