



研究ノート

構造物，機器の疲労設計の課題

— 荷重時刻歴の影響 —

富田 康光*

はじめに

針金は引張っても一度では人間業ではなかなか切れないが、何度も折り曲げているとそのうちに切れることを経験する。このように小さい力ではあるが繰返して加えると物が壊れる現象を疲労破壊といい、日航機の事故以来“金属疲労”という言葉が身近になった。この世の色々な物は使っている間、常に繰返しの力が加わっている。この力はその物を使用している間中いつも同じ大きさの力が繰返し加わっているというよりは、力の上下限值（ピーク値）が不規則に変化する場合がほとんどである（図1参照）。

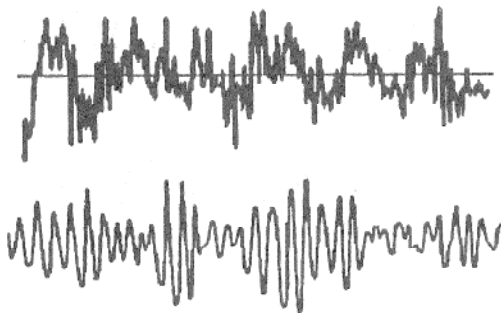


図1 実働荷重の模式例

後者の力のことを変動荷重といい、その不規則さを統計的に処理して初めて規則性が見い出される場合をランダム荷重という。疲労設計とは、ランダム荷重が加わっている色々な物がある期間使用するとき、その間に壊れないように、しかし、期間が過ぎれば壊れるように物の形とか寸法を定めることである。経済的なことを無視すれば物は壊れないように作ることは可能であるし、もちろん必ず壊れるようにも作れる。難

しいのは例えば5年間は壊れないが、5年たてば必ず、しかもすぐに壊れるように作ることにある。さて話を元に戻して、針金を折り曲げる力の大きさを同じにせず、大きさを変え、かつその加える順番を色々と変えたら針金の切れ易さはどうであろうか。すなわち荷重時刻歴の影響はどうであろうか。

疲労設計のひとつの課題

— 力が加わる順番の効果 —

物に繰返しの力が加わると物の最も弱いところに初めき裂（クラック）が発生し、それが次第に大きくなり（き裂進展、き裂成長）やがて壊れる。疲労設計は物により設計概念が若干異なる。すなわちき裂の発生を許し得ない物もあるし、少しはき裂の発生は許すことができ、途中で見つけて修復する物もある。物を作る費用（initial cost）に加え、使用中にも費用（running cost）がかかる物（船、飛行機など）と、使用中はあまり費用がかからない物があるし、また一度作ったら使用の途中では検査、点検、保修が困難な物と、積極的に検査、点検を行う物（船、飛行機、自動車など）がある。さらには、物の中でも、少しは壊れていいところと絶対的に壊れてはいけないところがある。

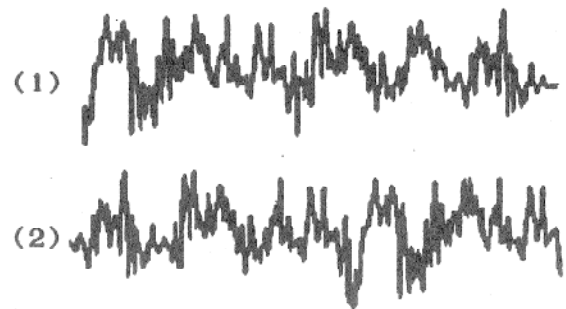
それぞれの条件で、疲労設計の方針は異なるが、疲労破壊の判定はMiner則¹⁾と呼ばれる世界中の各分野でほぼ共通に用いられている方法がある。この考え方は先の統計的処理で判った力の大きさの頻度分布（ある大きさの力 S_i が何回加わるか N_i ）が同じであれば、どんな順番で力が加わっても（針金の例では、折り曲げる力の大きさの順番を変えても）物の疲労破壊—疲労寿命すなわち何回力を加えると壊れるか—は同じであるという仮定に基づいている。正しいだろうか。ポイントは“どんな順番で力が

*富田康光 (Yasumitsu TOMITA), 大阪大学工学部, 船舶海洋工学科, 教授, 工学博士, 造船学, 材料構造強度学

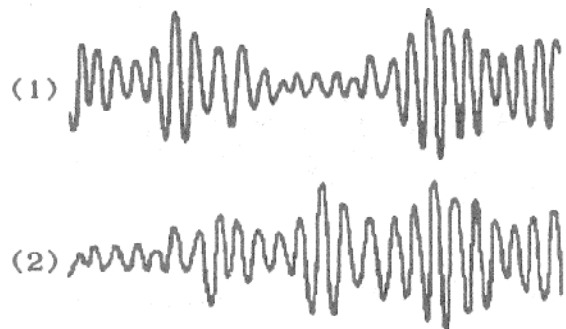
加わっても”のところでこの部分はボクシングを例に採ると考え易い。12ラウンドの間（使用期間中）種々の強さのパンチ S_i をそれぞれ N_i 回受けたとする（パンチの強さの頻度分布）。強さが違うパンチを受ける順番が異なってもボクサーが受けるダメージは同じであろうか。第1ラウンドにカウンターパンチ（強いパンチ）が当たると、そのダメージにより、その後のジャブ（弱いパンチ）の効き目はカウンターパンチが当たっていないときに比べ大であろう。あるいは連打といわれるように、強い目のパンチを続けて当てる方が単発より効き目がある。疲労設計の難しさもここにあり、力の加わる順番とその効き目（ダメージ）の関連を明らかにしないと、信頼性の高い設計は望めない。この点に関してはこれまで非常に多くの研究がなされてきたが、定量的には今も明らかでない。従って各分野では事故などの経験を踏まえ、Miner則の使い方に工夫を凝らしている。元々Miner則では変動する力が加わったときの物の真の強さ（寿命）を求めることはできず（予測はできるが、予測値が数多くあり、そのうちのどれかひとつを選ぶ根拠がない）、真の強さを求めるには、別の方法—物に実際に加わっている力を計測して、その力を物に再現して加える（実働荷重疲労試験という）か、実際に加わっている力を等価にシュミレートした力を物に加える（ランダム荷重疲労試験という）—によらねばならない。先の事故の経験は、まさに現場での実働荷重疲労試験結果である。物に対する力の加わる順番の効果はボクシングのように簡単ではない。前述のき裂発生、き裂進展の2つの現象に対し、力の加わり方の順番による効果は必ずしも同じでない。例えばき裂発生に対してはボクシングと同様カウンターパンチの効き目は大きいですが、き裂進展にはカウンターパンチ（大きい力）が加わると、その後のある期間はジャブ（小さい力）の効き目がカウンターパンチを受けていないときに比べ減少する。（従ってもし可能ならある期間ごとに、適切な大きい目の力（カウンターパンチ）を加えることでき裂の進みを遅くすることもできる。）

実際の場合での物に対する力の加わり方はふつ

う相手方（例えば自然界の地震、風、波浪、など）から与えられるもので、まず、力の加わり方の時間に対する記録—荷重時刻歴—を計測しなければならない。力の加わり方の順序は計測ごとに異なりいつも同じでないので、でたらめらしい力の加わり方の統計的規則性を調べ、この規則性に従って、力の順番の効果をはっきりさせねばならない。力の加わり方の規則性は大きく2つに分けられる（図2参照）。それは図2(a)のように力のピーク値の出現過程が独立な場



(a) 荷重の出現順序が独立



(b) 荷重の出現順序が従属

図2 荷重履歴について

合と、図2(b)のように n 回目の力のピーク値はそれ以前のピーク値に依存する（マルコフ過程的）場合である。力の加わり方の順番の効果は力のピーク値の出現過程が独立（図2(a)）と独立でない（図2(b)）場合について及びそれぞれの過程において図2の(1)と(2)のようにピーク値の出現順序が異なる場合について明らかにされねばならない。この点に関しては今のところ全て実働荷重またはランダム荷重疲労試験で調べねばならないが、この実験に要する時間が極めて長くなり、実際上は困難である。筆者の研究室では数年前からこの種の試験法を改善し計

算を組み込んだ迅速試験法²⁾を提案し、上記疲労試験法を実用域まで速めてきた。

そして図2(a)の力の加わり方で(1)と(2)すなわちピーク値の出現が独立のとき、そのピーク値の現われる順番が変わってもき裂発生、き裂進展の寿命はほとんど差がない、効き目は順番が変わっても同じであることがワイブル分布形の頻度分布の力については判った。しかし未だ図2(a)と(b)の加わり方及び図2(b)の(1)と(2)の加わり方による効き目の差は明らかにできていない。疲労設計の分野では、この部分の解明が遅れている。

おわりに

船舶あるいは海洋構造物に加わっているカー波浪荷重、ワイブル分布形—は図2(b)に分類できる。(晴天時と暴風雨時の波浪荷重で例えば暴風雨時波高10mの波に続くのは波高が10mに近い波であり、晴天時波高0.5mの波に続いて

突然波高10mの波が現われることはない。しかし、図2(a)の独立過程なら波高0.5mの波に続いて波高10mの波が現われ、続いて波高1mの波が現われてもよい) 図2(b)を図2(a)の力の加わり方で代用すると、定性的には、特にき裂進展過程で危険側(図2(a)のほうが図2(b))の過程に比べき裂成長が遅い)になる。

図2の力の加わり方の資料を種々の構造物、機器について充分集め、それらを統計的に分類し、分類に従ってその効き目を定量的に求めることが疲労設計の精度、信頼性を高めるために、更に保守、点検の精度向上にも強く望まれている。

参考文献

- 1) M. A. Miner "Cumulative Damage in Fatigue" J. Appl. Mech. 12 (1945) A-159.
- 2) 八木順吉他 "ランダム荷重下での疲労挙動に関する研究(第3報)" 日本造船学会論文集 vol.158(1986).

