

## **Taylor Fluid Viscous Damper**

**Yuji WASHIYAMA** , *Meiyu Airmatic Co., Ltd.*

*2-12-2 Shin-Yokohama Kouhoku-ku Yokohama City 222-0033*

*Fax: +81-45-473-1885*

**Douglas P. TAYLOR**, *Taylor Devices, Inc*

*90 Taylor Drive P.O. Box 748 North Tonawanda, NY 14120-0748*

*Fax: +1-716-694-0800*

**Keywords:** Damper, damping, structural, response, fluid, viscous

### **SUMMARY**

The end of the Cold War in 1990 heralded a restructuring period for the American military and defense industry. One of the outcomes of this new era was that political and economic change allowed previously restricted technologies to become available to the general public. This conversion of defense technology is typified by highly advanced products and services that suddenly appeared in the marketplace, seemingly out of nowhere. Perhaps the best known of these is the now ubiquitous Internet, which in reality came from 1970's defense technology intended for use

by government agencies in the event of nuclear war.

In the civil engineering field, high capacity fluid dampers have transitioned from defense related structures to commercial applications on buildings and bridges subjected to seismic and/or wind storm inputs. Because fluid damping technology was proven thoroughly reliable and robust through decades of Cold War usage, implementation on commercial structures has taken place very quickly. This presentation is a broad overview.

## テイラーフルード粘性ダンパー

鷺山友二（明友エアマチック株式会社）  
ダグラス P. テイラー（テイラーデバイス社）

### 1. ダンパー概論：定義と機能出力

構造システムにおける減衰という概念は各工学分野によって異なった意味を持つことがある。土木技術者にとっての減衰は地震や風のスペクトル図に示された単なる参照特性にすぎない。その最も一般的な表記法は「5%の減衰スペクトル」といったものだ。構造物設計技術者にとっての減衰は衝撃や振動を受けた構造物内部の総応力の変動を意味する。構造物が「2%、3%、4%と、5%以下の」構造減衰率を示すかどうか、しばしば論議的となる。他方、機械技術者は必ずしも減衰を良好な特性とはみなしていない。定義上、機械はエネルギーを損失することなく、効率的に力や運動を伝えるものと想定されている。したがって、機械において減衰が必要になることは工学設計エラーが生じたことを意味する場合が多い。

最も便利で、最も一般的なダンパーの機能出力方程式は古典的なシステム理論に基づいたもので、「線形」または「粘性」ダンパーの機能出力方程式と呼ばれている。

$$F = C\dot{X}$$

この場合、 $F$  = ダンパーの抵抗力

$C$  = 減衰定数

$\dot{X}$  = 構成要素の端間速度

油圧コンポーネントは二乗法則に従ってその出力を変動させるので、いわゆる「油圧減衰構成要素」あるいは「ダッシュポット」と呼ばれる。基本的油圧減衰構成要素の出力は次の式で表わされる。

$$F = CX^2$$

数十年前、技術者たちがフルード・ダンパー内蔵

型システムの設計と解析を初めて開始した時に、まず解決すべき問題は単純な油圧流の実態よりもシステム理論に沿った出力が得られるようなダンパー設計を行うことであった。そのため、解析チームにまず資金が供与され、設計チームに対する資金供与は二の次で、ぼちぼちといった程度だった。莫大な研究資金が必要だったため、最終的には高性能のダンパー製品の開発資金は米国の国防予算から充当され、その技術の一般公開と一般の利用は制限された。こうした研究の結果、システム理論の求める線形出力を達成できるか、あるいは少なくとも模擬できる数種のダンパー内部構造が開発された。最終的には、解析方法もダンパー設計も、衝撃問題と振動問題に対する最適の解決策を提示できるまでに進展し、1960年代と1970年代には飛躍的に進歩した。その結果、今日建物に採用されている各種ダンパーは「低指数」型と呼ばれるものになった。その出力方程式は次のようになる。

$$F = CX$$

ほとんどの場合、 $C$  は 0.3~1.0の範囲内の特定値を持つ指数である。今日の耐震建築設計においてかなり通用している  $C$  値は 0.4~0.5の範囲である。

2. 構造物に対するダンパー付設の一般的効果  
地震、台風、その他の種類の瞬発的な衝撃や振動による外乱を受けた場合でも構造物が最適性能を達成できるような方法はこれまでも多数提案されてきたが、減衰もそうした方法の一つである。従来のアプローチは、強度、柔性、変形性、エネルギー

ギー分散の組み合わせを通して瞬時入力の影響を受動的に減衰または分散させることを構造物に指定するものだった。在来型構造物における減衰レベルは非常に低い。そのため、瞬発的外乱時のエネルギー分散量も極めて少ない。地震のような強い運動時には通常、在来型構造物は弾性限界をはるかに越える変形を示すが、非弾性変形能力がある場合のみそこなわれない。したがって、消散エネルギーの大半は構造物自体により吸収され被害は局部化される。

構造物内部へのダンパー付設というコンセプトは瞬発現象から構造物へのエネルギー入力の一部を、構造物自体ではなく、むしろ補助ダンパーに吸収させることを想定したものである。理想的な補助ダンパーの形状は構造物の総応力を増大させないように、適正な大きさの力を適時にダンパーから発生させるような形状である。適正に使用した場合、理想的ダンパーは構造物の応力とたわみを同時に減少できるものでなければならない。

一時的な地震動を条件にした補助ダンパー付設効果を、Fig.1 と Fig.2 のテスト結果で示す。テスト構造物はラーメン構造を使用した1階建ての鉄骨ビルである。Fig.1 は 1940 年エルセントロ地震の 33% 規模の入力下に置かれたテスト構造物の応答を示す。Fig.1 には小さな履歴ループがはっきりと認められ、テスト構造物が降伏開始点にあったことを示している点に注目されたい。鉄骨構造の減衰率は 1.5~2% の範囲であった。比較上、Fig.2 は同じ構造物に筋交い材として小型線形フルード・ダンパー 2 基を付設して 20% の追加減衰率を得た場合である。付設ダンパーの大きいエネルギー消散量は構造物のパネ率曲線上に重なっている「フットボール」形減衰曲線からも明らかである。また、Fig.2 の入力は全 100% のエルセントロ地震だが、鉄骨ベースのせん断とたわみは Fig.1 のダンパー無設置ケースと事実上変わらない。し

たがって、この場合は 20% の追加減衰率を構造物に追加したことが追加減衰率なしの同一構造物に比べ、その耐震力を 3 倍に高めている。最も重要な点は、この 3 倍の性能向上が構造物の応力やたわみを増大させずに得られたことである。事実こうしたとてつもない性能向上が構造工学用フルード・ダンパーに対する関心を大幅に高めてきた。ボディビルダーの言葉を借りると、まさに「ダンパーのおかげで、何の苦痛もなく大幅に筋力を増した！」というわけだ。

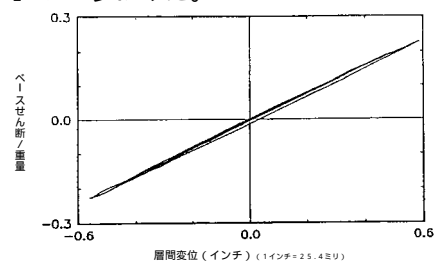


Figure 1 One-Story Structure, No Dampers- EL CENTRO 33.3%

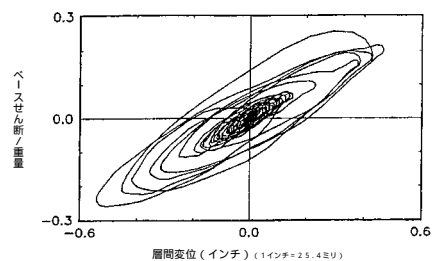


Figure 2 One-Story Structure, Two Dampers- EL CENTRO 100%

Fig.1 と Fig.2 のテスト結果はテスト入力として 1940 年のエルセントロ地震の瞬時入力を使用している。Constantinou 氏及び Symans 氏により初めて公表された 1992 年のテスト結果には、その他の有名地震時の瞬時記録から入手した同じような性能を示すテスト結果も含まれていた。しかし、その数年後には 1994 年のカリフォルニア州ノースリッジ地震や 1995 年の日本の神戸地震、その他実際

に発生した地震、さらに「大きな純衝撃震動」や「ゆっくりとした正弦波状横揺れ」のような想定入力も含め、その他の地震入力にもフルード・ダンパーがうまく機能するかどうかという疑問が生じてきた。さらに、台風関係の顧客も、地震ダンパーが風の中でうまく機能するかどうかを知りたいようになり、政府関係の顧客も、テロ襲撃による建物の被害をダンパーで軽減できるかどうかを知りたいようになった。実際に生じている疑問は、「フルード・ダンパーは有用な工学部分品のように見えるが、あらゆる種類の衝撃入力や振動入力に対しても実際に役に立つのか？」という点に尽きる。そうした疑問に対しては、はっきりと「役に立つ」と断言できる。瞬時パルス的一般的特性を検討すれば、その点を実証することは比較的容易である。

Fig. 3 は、大災害を引き起こす入力の最大速度と最大加速度のデータ表である。

最大速度と最大加速度のデータ表		
	ピーク加速度	ピーク速度
ノースリッジ地震	0.9G	130 cm/s
神戸地震	0.8G	90 cm/s
船舶、係留機雷	25.G+	230 cm/s +
地下ミサイル格納庫、核爆弾の空中爆	80.G+	1,140 cm/s +
潜水艦、核爆雷攻撃	600.G+	1,270 cm/s +

Figure 3 Catastrophic Transients

### 3. ダンパー及び構造物に対するダンパーの影響

フルード・ダンパーは瞬発現象にさらされた構造物内部の応力とたわみを同時に減衰するという特異な能力をもっている。それはフルード・ダンパーが速度のみに応じてその減衰力を変動させ、本来構造物のたわみによる各種応力と位相を異にする応答をするからである。フルード・ダンパー特有の位相ずれ応答は地震や台風の発生時に建物が横揺れすることを考えれば容易に理解できよう。

柱の応力は建物がその正常位置から最大量のたわみを示した時にピークに達する。このピーク点に達すると、たわんだ柱が方向を逆転し反対方向へたわむ。建物にフルード・ダンパーを付設すればこの最大たわみ点で減衰力がゼロに低下する。それは柱が方向を逆転するにつれて、ダンパーのストローク速度がゼロへ近づくからである。建物が反対方向へたわむと、柱がその正常な直立位置からたわむ時に発生する最大速度でダンパーの最大減衰力が発生する。この時点で柱の応力も最小になる。フルード粘性ダンパーの最も望ましい設計面がこの位相ずれ応答である。

### 4. 過去15年間 - 防衛技術の民間移転

冷戦が終結すると、防衛企業は従来の市場で新しい商機をほとんど見つけられなくなった。規模縮小化を図る企業や、しばしば苦しまぎれの合併や整理統合により売上レベルを維持する企業も出てきた。自社技術を商業市場へ移転できる企業は比較的少なかった。ニューヨークに本拠を置くテイラーデバイス社も、軍事防衛用エネルギー吸収製品のメーカーだが、1987年からその防衛製品の販路開拓に着手した。

テイラーデバイス社の防衛技術はミサイル、電子システム、大型構造物などを兵器爆発の影響から防護する大型フルード・ダンパー装置の設計と製造に関するものである。同社の経営陣は地震や台風に対する構造物防護に関連のある商業的用途を開拓するという選択を行った。選定したダンパーのスタイルは1970年代にさかのぼり、米空軍のMX弾道ミサイルと米海軍の巡航ミサイル「トマホーク」に装備するために、同社が単独で開発したものだ。後者の開発計画では戦艦発射用ミサイル「トマホーク」に装備するフルード・ダンパー29,000基以上を製造した。

国立地震工学研究センター(MCEER)と共同でフ

フルード・ダンパー装備の建物及び橋梁構造物に関する研究を進める決定も、早くから行っていた。MCEER はニューヨーク州立大学バッファロー・キャンパス内という、テイラーデバイス社にも近い便利な場所にあった。研究では従来の軍用フルード・ダンパーを採り上げ、土木構造物の縮尺モデル上に補助部品として設置した。同大学の大型地震振動テーブル上にその構造物を載せ地震動試験を行った。すべての試験は大成功を納め、フルード・ダンパー設置による追加減衰率 15~40%の範囲で応力とたわみを大幅に削減化できた。

一般的に構造物に 20% の減衰率を加えると、応力やたわみは増大させずに耐震力が 3 倍に増大することが明らかになった。MCEER と同大学では、フルード・ダンパーから得られる改良例を記載した多数の報告書を公表している。米国国防総省も非常に協力的で、研究に使用した各種ダンパーの出所や適用できる設計概念の開示をテイラーデバイス社に許可した。

例えば、鉄骨構造物の試験では B-2 型ステルス爆撃機向けに現在製造中のフルード・ダンパーを使用した。コンクリート構造物の試験ではミサイル「トマホーク」のダンパーを使用した。橋梁構造物の試験では米国中央情報局(CIA)の有名な調査船「グロマー・エクスプローラー」のダンパーを使用した。その他の橋梁構造物には潜水艦搭載の魚雷から取りはずしたスプリング・ダンパーを取付けた。

テイラーデバイス社製ダンパー製品の商業的利用にはいかなる障害もないことが明らかになった。

5. 建物及び橋梁構造物用フルード・ダンパー  
フルード・ダンパーの主要設計要素は比較的少ない。だが、こうした設計要素の詳細な説明は多岐に渡り、しかもむずかしく複雑になる場合もある。Fig.4 は標準的フルード・ダンパーとその構成部品

を示す。図からも明らかなように、ピストン・ロッドを前後に移動させるだけで、ピストン・ヘッドのオリフィスを通して流体が押し出され減衰力を発生させる。

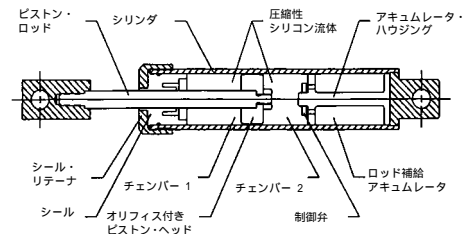


Figure 4 Fluid Damper

6. 取り付け方法とブレーススタイルに関して  
建物や橋梁の構造物にダンパーを取付ける方法は、基本的には 3 通りある。

1. 免震用ダンパーは両端にクレビスと球面ベアリングを備えている。
2. シアリンク・システム用ダンパーは両端にクレビスと球軸受を備えている。
3. 筋交いブレース・システム用ダンパーはその一端に球軸受けクレビス、他端にブレース拡張管を取付ける。

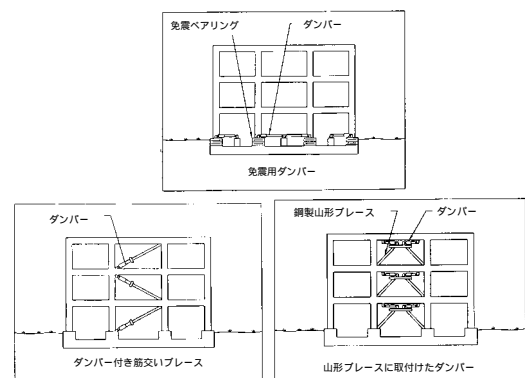


Figure 5 Basic Mounting Attachment Styles

## 7. 減衰力特性と各種依存性試験結果

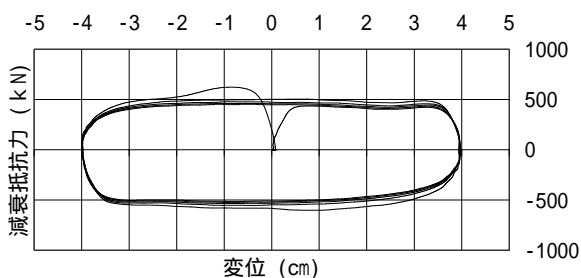


Figure 6  $F=CV$  ( $C=0.3$ ) 0.3Hz F-D loop

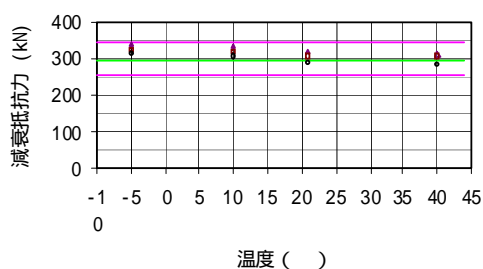


Figure 7 Temperature Dependency

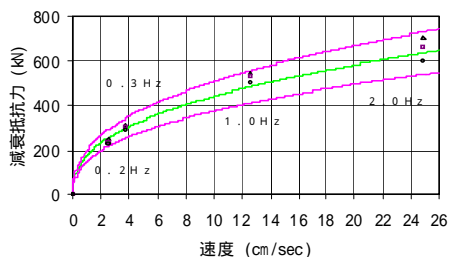


Figure 8 Frequency Dependency

## 8. 保守と検査

性能上、地震及び風による建造物の振動を減衰するように適正に設計かつ製造されたフルード・ダンパーならば、保守は不要である。大型地震など発生後にダンパーの目視検査はすべきである。

## 9. 結論

商業用及び公共用建造物の防震防風対策としてのフルード・ダンパー使用は、1990年から現在に渡って広く行われてきた。他の技術に比べ、その実用化は急速に進められた。その主な理由は冷戦

時代の防衛軍事計画の下でこうした製品が広く普及した点にある。冷戦終結と同時にフルード・ダンパー技術の多くが機密リストから削除され、商業用として民間に移転された。冷戦時に莫大な税金を注ぎ込んでダンパーの最適設計開発を行ってきたため、土木建造物にダンパーを活用する際にもほとんど開発を行う必要がなかった。こうしたダンパーは軍事防衛部門において広範な試験を通して実証され、幅広く使用されてきたものである。

フルード・ダンパーを防震防風用に使用すると、建造物の応力とたわみを予想通り減衰できる。こうした応力とたわみの同時減衰こそ、フルード・ダンパー特有の特長である。最適性能は、建造物のタイプと所要性能レベルに応じて異なる。

今日、世界の建物と橋梁にテイラーフルード粘性ダンパーが使用されている。21世紀の建造物の防震防風対策に欠かせない最大の解決策の一つと言えよう。より簡潔に言い表わすならば、建造物設計技師の言葉を借りて、こうなる。“疑問が生じたら、まずダンパーで解決しよう！”

## 参考文献

- Constantinou, M.C., Symans, M.D., (1992) "Experimental and Analytical Investigation of Seismic Response of Structures with Supplemental Fluid Viscous Dampers" Technical Report NCEER 92 - 0032, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York.
- Douglas P. Taylor(1999) "BUILDING: DESIGN FOR DAMPING"
- Douglas P. Taylor(2002) "HISTORY, DESIGN, AND APPLICATIONS OF FLUID DAMPINGS IN STRUCTURAL ENGINEERING" "パッシブ制振構造シンポジウム 2002 p p 17-33"