円筒シェル-集中付加マス系の地震波による パラメトリック励振* (第1報, 実験)

高 柳 政 明*¹

Parametric Excitation of Circular Cylindrical Shell-Lumped Mass System Subjected to Horizontal Seismic Wave (1st Report, Experimental Investigation)

Masaaki TAKAYANAGI

An upright stainless steel circular cylinder with an attached mass at midlength is excited seismically in the horizontal direction using a shaking table. A well-known seismic wave called El Centro 1940 NS is used for the excitation of the test specimen. Fourier components over 10 Hz of the seismic wave are cut off and the duration is shortened to 30, 40, or 50%. Eccentricity of the center of gravity of the attached mass is changed and excited by the modified El Centro 1940 NS increasing the amplitude of the seismic wave incrementally. Parametric excitation is observed for each combination of eccentricity of the attached mass and time scale of the seismic wave.

Key Words: Stability, Seismic Motion, Lateral Vibration, Parametric Excitation, Circular Cylindrical Shell, Attached Lumped Mass, Experiment, Shaking Table, Sine Wave

1. 緒 言

各種プラントの容器類を想定してパラメトリック励振に関する研究^{(1)~(4)}が行われてきた。パラメトリック励振は運動方程式の剛性項に時間の関数として変動する成分があるため生ずる動的不安定現象であるが、従来の容器類のパラメトリック励振に関する研究では、時間変動が定常正弦波の場合(マシュー型の式)を対象として解析あるいは実験が行われてきた。地震波に対して調べた研究はないようである。これは次の理由によるものと考えられる。

(1) 従来、パラメトリック励振は円筒シェルなどに軸方向動荷重が加わる時に生ずる現象であると考えられていた。地震の場合は一般に上下動が該当するが、上下動は水平動に比べて影響が小さく、パラメトリック励振について検討する必要性がほとんど確認されていなかった。

(2) 近年になって、横荷重によってもパラメトリック励振現象が生ずることが、周期的水平荷重が加わる円筒シェルの実験によって示された⁽²⁾が、大学による基礎的な研究として正弦波に対する検討にとどまっ

ていた。

(3) (2)に伴い、一部では、地震時のパラメトリック励振についても関心が持たれ始めた⁽³⁾。しかし、地震波は正弦波の級数として展開はできるが、継続時間が数10秒の非定常不規則波であり、定常正弦波に比べて応答が発達しないため、パラメトリック励振は地震波のほうが生じにくいとして、定常正弦波に対する不安定境界を求めれば安全側の評価ができた。

一方、近年、合理化によるコストダウンが要求され、容器類の耐震設計においても強度限界を明らかにして余裕度を把握し、設計マージンを適正化することが重要な課題となっている。この耐震設計の高精度化のため、動的不安定現象であるパラメトリック励振の評価を可能とする。その第1ステップとして、本報では、各種プラントでよく見られる円筒シェル-集中付加マス系について振動台による加振実験を行い、地震時のパラメトリック励振現象の基礎的な知見を得る。

円筒シェル-集中付加マス系の水平方向正弦波加振時のパラメトリック励振については、すでに図1に示すスチール製の試験体(今回の試験体とは集中付加マスの大きさのみが異なり、0.5 kg)を用いた実験および解析による研究を行った。実験によりパラメトリック励振発生境界を求めるとともに、このパラメトリック

* 原稿受付 平成4年9月24日。

*¹ 正員、(株)日立製作所機械研究所(〒300 土浦市神立町502)。

ク励振発生境界を推定できる解析手法も提案し、実験結果と一致することを示した⁽⁵⁾。さらに、その解析手法を拡張し、液体が入った一様状態の円筒容器の水平方向正弦波加振時のパラメトリック励振発生境界についても解析可能とした⁽⁶⁾。Chiba らが行った実験⁽²⁾と比較し、よく一致することも確認した⁽⁶⁾。

その際、円筒シェル-集中付加マス系の正弦波加振実験結果より、パラメトリック励振発生の瞬間前後の時刻歴波形⁽⁶⁾には、次の3種類の特徴を見ることができた。

P-A: 瞬間的に発生し、速やかに定常状態に移行

P-B: P-A と次の P-C の中間、うなりが発生

P-C: 徐々に成長

3種類の発生パターンのうち、瞬間的にパラメトリック共振状態に移行する例 (パターン P-A) を図2に示す。今回の試験体も同様であるが、図1に示すように、集中付加マスの中心軸と加振軸が一致しており、ロッキングモードの刺激係数は零である。このため、図2において、ロッキングモードに対応する加速度 ($\ddot{V}$) はパラメトリック励振現象が生ずるまでは零であり、図中の三角印で示した時点からパラメトリック励振により振動状態となっている。この瞬間的にパラメトリック共振状態に移行するパターンの場合、地震のような非定常で有限な加振時間においてもパラメトリック励振が生ずることが予想される。今回の実験では上述の実験と同一の円筒シェルを用いて、パターン P-A 発生条件に近くなるよう試験体を設定し、地震波加振試験を実施することとする。

なお、パターン P-A の現象のメカニズムおよびその現象の一般性の有無は現段階では明らかにはできておらず、今後の課題の一つと考えている。

2. 試験体と試験方法

2・1 試験体およびその固有振動特性設定の考え方

本報では、図1に示す円筒シェル-集中付加マス系の試験体を用いる。これは正弦波加振試験⁽⁵⁾に用いた円筒シェルを利用し、集中付加マスの大きさを0.5 kg から3 kg へと変えたものである。加速度、ひずみの計測点は同一にしている。

緒言で述べたように、この試験体の正弦波加振時のパラメトリック励振発生時の時刻歴波形には3種類のパターンがあった。その3種類のパターンのうちには、図2に示すように瞬間的にパラメトリック励振状態に移るものがあり、この場合、地震波のような非定常な外力に対しても、パラメトリック励振現象が生ずるものと考えられる。このパターンの現象は、集中付加マ

スの径方向並進モード ($\ddot{W}$) の固有振動数よりやや低い加振振動数領域で発生した。そこで、今回の試験体では、振動台の制御範囲 (上限が約 30 Hz) と後述の入力地震波の周波数成分 (上限が 20, 25, 33 Hz) を考慮して、径方向並進モードの固有振動数が加振周波数範囲に含まれるよう約 20 Hz に設定する。このため、集中付加マスの重さを 3 kg とする。集中付加マスの重心の偏心量 (L) を 3 ケース設定し、偏心量による回転慣性の違いにより集中付加マスのロッキングモード

図1 試験体諸元および計測点

図2 瞬間的なパラメトリック励振発生の例

($\dot{V}$)の固有振動数を変化させ、偏心率によらない径方向並進モードの固有振動数との比率を変える。それぞれのケースについて次の方法により、パラメトリック励振発生境界を調べる。

なお、上述のように、今回の試験体では集中付加マスの中心軸と加振軸が一致しており、ロッキングモードの刺激係数は零である。このためパラメトリック励振が発生しない限りロッキングモードは励起されない。これにより、パラメトリック励振発生基準をロッキングモードが励起された時とする。

2・2 試験方法

2・2・1 自由振動試験 上記の考えに基づいて設定した径方向並進モードとロッキングモードの固有振動数の組合せが実現されていることを確認するためと減衰を求めておくために、予備試験として、打撃による自由振動試験を行った。その結果得られた固有振動数と減衰比を表1に示す。 $L_1 \sim L_3$ は集中付加マスの重心の偏心率である。しかし、実際には計測せず、ロッキングモードの固有振動数 f_1 の違いを調べて偏心率の妥当性を判断した。径方向並進モードの固有振動数 f_2 は、集中付加マスの質量が変わらなければ、偏心率によっては変化しない。 ζ_1, ζ_2 は減衰比である。

2・2・2 正弦波加振試験 地震波加振試験の前に、正弦波加振試験を行ってパラメトリック励振が発生することを確認する。これは、一般的には、正弦波加振のほうが地震波加振の場合よりもパラメトリック励振が発生しやすいことが予想されるため、まず、パラメトリック励振が発生することを確認しておくためである。

加振は振動台を用いて行う。加振振動数を一定に保ち、加振加速度をゆっくりと上昇させて、振動台の加振振動数の1/2の振動数のロッキングモードが発生する加速度をパラメトリック励振発生境界とする。加振振動数を変えて同様の操作を行い、パラメトリック励振が発生する領域を調べる。

2・2・3 地震波加振試験

a. 入力地震波選定の考え方 地震波加振試験

表1 試験体の固有振動数と減衰比

Eccentricity mm		L_1	L_2	L_3
Natural frequency Hz	f_1	9.5	9.0	7.5
	f_2	20.0	20.0	19.5
Damping ratio	ζ_1	0.0127	0.0207	0.0095
	ζ_2	0.0034	0.0070	0.0027

f_1, ζ_1 : Rocking motion about vertical axis

f_2, ζ_2 : Translational motion in radial direction

の際、最も問題となるのは入力地震波としてどのようなものを選定するかということである。地震波の特性として重要なものは、振動数成分の分布とそれぞれの成分の加速度振幅であり、これらと構造系の振動特性の関係によって、応答特性が異なってくる。今回の地震波加振試験も、その特性を変え、パラメトリック励振が発生するか否かを調べようとするわけであるが、

図3 試験用入力地震波時刻歴波形

図4 試験用入力地震波のフーリエスペクトル

そのやり方として次の二つの方法が考えられる。

① 数多くの種類の、特性の異なる地震波を用いる。

② 代表的な種類の地震波を選定し、時間軸と振幅を変えて、特性の異なる入力波を実現する。

今回は、前述のように、構造系の特性を3ケース設定しており、地震波の種類も変えると条件が多くなりすぎるので、②の方法をとることとする。その際、ベースとなる地震波は一般に認められているものとする。

b. 選定した地震波および試験用に変換した入力波特性 今回の試験のため選定した地震波を図3に示す。今までに計測されている自然地震波としては最も有名と思われ、解析あるいは実験でしばしば用いられる El Centro 波であり、時間軸を30%まで短縮(振動数を3.3倍)するので、振動台の制御を考慮して、オリジナルの波の10 Hz以上の振動数成分をカットしている。時間軸は、上述の30%も含めて、3種類設定し、それぞれについて加速度レベルを変えて入力する。3種類の時間軸の場合の周波数分析結果を図4に示す。 γ はオリジナルの波の時間刻み Δt_0 に対する、時間軸短縮後の時間刻み Δt の比である。振動台の制御上の誤差により、カットした振動数成分の振幅が完全に零とはなっていない。パラメトリック励振発生限界に対し影響が大きい径方向並進モードの固有振動数の位置も横軸に三角印で示す。

c. パラメトリック励振発生判定 パラメトリック励振が発生したか否かは、時刻歴波形および周波数分析結果を各加振レベルで調べ、ロッキングモード($\dot{V}$)の成分が生じた段階で発生したものとする。これは、前述のように、本試験体ではロッキングモードの刺激係数が零であり、パラメトリック励振が発生しない限りロッキングモードが現れないことによる。

3. 試験結果および結果に対する検討

3・1 正弦波加振試験 定常な正弦波加振のほうが非定常な地震波加振の場合よりもパラメトリック励振が発生しやすいことが予想されるため、まず、正弦波加振試験を実施した。その結果得られたパラメトリック励振領域を図5に示す。ここに α は集中付加マスの径方向並進モードとロッキングモードの固有振動数の組合せにより定まるパラメータで、次式により表される。

$$\alpha = (2f_1/f_2)^2 \dots\dots\dots (1)$$

f_1, f_2 は打撃による自由振動試験により求め、表1に示した。今回の試験では、図中に示すように $\alpha=0.59, 0.81, 0.90$ になっている。 α が1に近いほど径方向並進

モードの影響が大きく(内部共振)パラメトリック励振が生じやすい。 α を1より小さく設定しているのは、緒言でも述べたように、瞬間的にパラメトリック励振現象へ移行し、非定常な地震波によってもパラメトリック励振が生ずる可能性が大きいのは径方向並進モードの固有振動数より低い加振振動数領域であることによる。

正弦波加振の結果次のことが言える。

① 設定した3ケースの α すべてについてパラメトリック励振が発生する。

② $\alpha=0.90$ が1に最も近くパラメトリック励振が生じやすいはずであるが、パラメトリック励振領域は

図5 正弦波加振時のパラメトリック励振領域

$\alpha=0.81$ よりも狭くなっている。これは、今回のようなパラメトリック主共振現象では、加振振動数が $2f_1 (=19 \text{ Hz})$ を越えるあたりから、パラメトリック励振を発生させるために必要な集中付加マスの径方向慣性力が增大するのに対し、図6に示すように径方向並進モード ($\ddot{W}$) の周波数応答曲線の応答倍率が急激に減少

図6 径方向並進モードの周波数応答曲線 ($\alpha=0.9$)

図7 パラメトリック励振前後の時刻歴波形 ($\alpha=0.81, \gamma=0.4$)

し、必要なだけの慣性力が生じないためである。この応答倍率の急激な減少の理由としては試験体の円筒シェルの非線形性の影響が大きいものと考えられるが、その詳細なメカニズムは明らかにはできておらず、今後の課題の一つである。

3・2 地震波加振試験 正弦波加振でパラメトリック励振が発生することを確認した後、前述の考え方に基づいた入力地震波による加振試験を行った。すなわち $\alpha=0.59, 0.81, 0.90$ の3ケースの試験体条件に対

図8 パラメトリック励振現象の再現性の時刻歴波形による比較 ($\alpha=0.9, \gamma=0.4$)

図9 地震波の加速度レベルによる応答値の変化

し、入力地震波の時間軸 (= 振動数成分) を 3 種類 ($\gamma = 0.3, 0.4, 0.5$) 変えて、計 9 通りの場合を設定し、それぞれの組合せに対し、加振加速度レベルを変えてパラメトリック励振が発生する境界を調べた。パラメトリック励振が発生したか否かは、時刻歴波形および周波数分析結果を各加振レベルで調べ、ロッキングモード ($\dot{V}$) の成分が生じた段階で発生したものと判断した。これは、前述のようにロッキングモードの刺激係数が零であり、パラメトリック励振が発生しない限り、ロッキングモードが現れないことに基づいている。図 7 にパラメトリック励振が発生する前後の加振レベルの時刻歴波形を示す。また、再現性の有無についても時刻歴波形およびその周波数分析により調べた。図 8 に $\alpha = 0.90, \gamma = 0.4$ の場合について同一加速度レベルで加振した時の時刻歴波形を示す。2 回の加振により、ほとんど同一の時刻歴波形が得られており、再現性があることが確認された。

図 9 に径方向並進モードおよびパラメトリック励振により生ずるロッキングモードの加振レベルによる応答値の変化の一例を示す。パラメトリック励振発生境界を越えても応答値はほぼ直線的に変化している。他の α, γ の組合せについても同様の傾向となっている。また、これらをまとめて図 10~12 にパラメトリック励振発生境界を示す。以上の結果から次のことが言える。

① 内部共振に最も近い $\alpha = 0.90$ の場合は、正弦波加振では必ずしもパラメトリック励振発生境界が最も低い結果とはなっていないが、地震波加振では最も低い加速度レベルでパラメトリック励振が発生しており、妥当な結果となっている。

② 逆に、正弦波加振ではパラメトリック励振発生

境界が最も低加速度レベルにあり、不安定領域も広がった $\alpha = 0.81$ のケースは、地震波加振ではパラメトリック励振が最も生じにくい結果となっている。

③ 今回の実験の系では不安定振動の加速度 ($\dot{V}$) のほうが、それを励起する径方向の並進モードの加速度 ($\dot{W}$) より小さくなっている。これは、パラメトリック励振により生ずるロッキングモードの固有振動数が径方向モードの固有振動数の $1/2$ より小さい条件の系に設定しているためと考える。すなわち、パラメトリック励振が発生する前後で、トータルなエネルギーはほぼ等しいものとしてよいから、今回設定した内部共振の条件 ($\alpha \approx 1$ つまり $f_2 \approx 2f_1$) を満たす場合について、運動エネルギーの最大時点で二つのモードの変位振幅の比を求めてみると 1 次モードと 2 次モードの比は $2:1$ である。加速度の比は、振動数の比 ($1:2$) を考慮すると $1:2$ になり、不安定振動のほうが小さく

図 11 地震波加振時のパラメトリック励振領域 ($\alpha = 0.81$)

図 10 地震波加振時のパラメトリック励振領域 ($\alpha = 0.59$)

図 12 地震波加振時のパラメトリック励振領域 ($\alpha = 0.90$)

なる。

④ 地震波は非定常な入力であるため、不安定振動の継続時間は短い。

⑤ パラメトリック励振発生境界を越えても、径方向並進モードおよびパラメトリック励振により生ずるロッキングモードの加振レベルによる応答値の変化はほぼ直線的である。

4. 結 言

円筒シェル-集中付加マス系の試験体を地震波で加振し、パラメトリック励振現象について調べた。その結果を要約すると次のようになる。

(1) 従来、容器類の地震時のパラメトリック励振現象について、調べたものはほとんど見かけられなかったが、今回、1種類の地震波ではあるが、その時間軸を変えて振動台による加振実験を行い、地震時にもパラメトリック励振が生ずる場合があることを実験により示した。

(2) 地震時のパラメトリック励振現象について、いくつかの知見が得られた。

① 正弦波加振時にパラメトリック励振が生じやすい条件のほうが、地震時にも生じやすいとは限らない。

② 今回の実験条件 ($\alpha \leq 1$) では、パラメトリック励振による不安定振動モードのほうが、それを励起した線形の振動モードよりも、激しく振動することはなかった。

③ パラメトリック励振発生境界を求めることは線形問題として扱えるという知見が一般的であったが、今回の系を正弦波加振したときの結果から、パラメトリック励振発生前に非線形性も考慮すべき場合があることがわかった。

今後の課題としては、地震時のパラメトリック励振発生境界を解析により求めることが挙げられる。

最後に、本研究に関し有益な助言をいただいた横浜国立大学の柴田碧教授、工学院大学の小久保邦雄助教授、実験に協力いただいた日立機械研の堀内敏彦氏、日立オートモティブの玉城弘氏に感謝の意を表す。

文 献

- (1) 千葉・谷, 鉛直加振による円筒貯槽の動的安定性に関する研究, 機論, 51-471, C (1985), 2980.
- (2) Chiba, M., Tani, J., ほか2名, Dynamic Stability of Liquid-Filled Cylindrical Shell under Horizontal Excitation, *J. sound Vib.*, 104-2 (1986), 301.
- (3) 谷・ほか2名, 流体連成二重円筒殻の動的安定性, 機論, 55-512, C (1989), 870.
- (4) Liu, W. K. and Uras, R. A., Transient Buckling Analysis of Liquid-Storage Tanks-Part I : Theory, *ASME PVP-Vol. 157* (1989), 35.
- (5) Takayanagi, M. and Yamate, Y., Parametric Resonance of an Axisymmetric Shell-Lumped Weight System, *JSME Int. J., Series III* 33-2 (1990), 198.
- (6) Takayanagi, M., Parametric Resonance of Liquid Storage Axisymmetric Shell Under Horizontal Excitation Trans. ASME, *J. Press. Vessel Technol.*, 113-4 (1991), 511.