

(127) 粒状体貯蔵サイロにおける内容物の質量効果と地震時壁面圧力について

北海道大学工学部 正会員 佐々木 康彦
北海道大学工学部 正会員 芳村 仁

1. まえがき

我が国では穀物や石炭などの粒状体を大量に貯蔵するため、大規模な鉄筋コンクリート製サイロあるいは鋼板製サイロが多数建設されている。このようなサイロ構造物の耐震設計を合理的に行なう上で、地震時における内容物の質量効果・減衰効果を推定すること、並びに内容物による地震時壁面圧力を適切に評価することが重要な問題となる。粒状体貯蔵サイロの振動特性に関しては、石炭サイロを対象とした模型振動実験による研究成果^{1)~4)}が得られているが、地震波加振時の内容物の質量効果や動的壁面圧力（以下、動壁圧と呼ぶ）に着目した報告例は少ないようである。

本研究では、モルタル製円筒状サイロ模型及び粒状体の内容物としては米を用いて、水平振動台による正弦波・地震波加振実験を実施した。これらの振動実験結果に基づいて、地震時における内容物の質量効果や減衰効果、さらには内容物による壁面圧力の地震時応答特性・分布性状及び内容物の動的挙動との関連性について検討を行なった。

2. サイロ模型実験概要

模型実験では直径6.4m、壁体高16.0m程度の鉄筋コンクリート製サイロを想定し、直径約0.8m、高さ約2.0m、幾何学的縮尺1/8となる比較的大型のサイロ模型を設計した。また、サイロ壁体と内容物の動的相互作用に関しては「壁面摩擦」が重要な要因となるため、このサイロ模型は実物に近いモルタル製とした。但し、壁体は無筋であるため、外壁を32本のフープ（4mm径の軟鋼線材）で締付けてある。モルタル製サイロ模型の主な材料定数は単位体積重量 2.26gf/cm^3 、弾性係数 $2.61 \times 10^5\text{kgf/cm}^2$ 、ポアソン比0.195、圧縮強度約 470kgf/cm^2 である。模型の下端は、水平振動台（ $2.5\text{m} \times 2.5\text{m}$ ）上の鋼板に溶接した異形鉄筋を二重に囲み、間隙にモルタルを充填して固定した。内容物は「米（単位容積重量 $0.70 \sim 0.75\text{gf/cm}^3$ ）」を使用し、詰込み深さは模型高さの80%とした。模型の形状・寸法及び内容物の詰込み状況を図1に示す。

振動実験としては最初に、このサイロ模型の基本的振動特性と内容物の効果を把握するため、模型内部が空の状態及び内容物を80%詰込んだ状態で、それぞれ正弦波加振実験及び各共振点での円周方向・高さ方向振動モード測定実験を行なった。地震波加振実験の概要については後述する。計測は壁体外壁及び内容物表面・内部の加速度（A1～A6、*A7～*A9）9点、内容物による動壁圧（P1～P5）5点である。

図1には略記号を用いて各計測と測定位置も示してある。

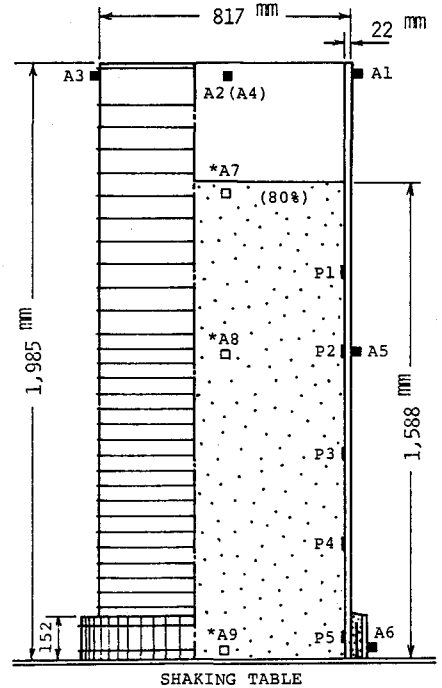


図1 サイロ模型と変換器の配置状況

3. 正弦波加振実験結果及び考察

図2は正弦波定常加振(振幅20gal)による模型上部での加速度(A1)共振曲線を、模型内部が空の状態: [Empty] と内容物80%詰込み状態: [Full (80%)] とで比較したものである。同図から、共振振動数が46Hzから30Hzまで低下し、内容物の質量効果が顕著に現れていることがわかる。また、共振点での応答倍率は42.7倍から11.2倍となり、模型内部が空の状態での約26%まで激減し、内容物の減衰効果も著しい。なお、応答倍率値から減衰定数を算定すると、模型内部が空の状態では1.2%、内容物詰込み状態では4.5%であった。以上のように正弦波加振時においては、内容物の質量効果・減衰効果が著しいという実験結果が得られた。

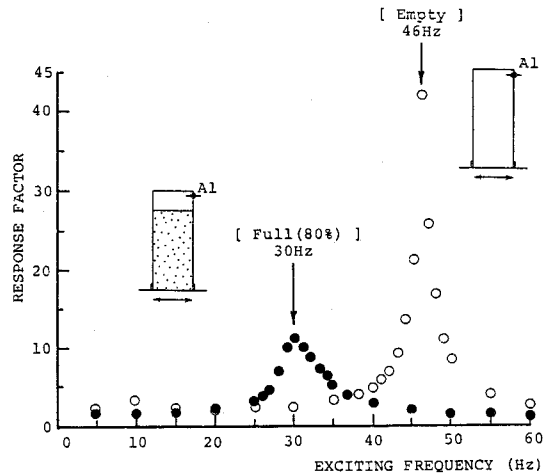


図2 模型上部での加速度共振曲線の比較

4. 地震波加振実験結果及び考察

この振動実験では二種類の地震波を交互に用いて、その最大加速度レベルを段階的に増大させながら、模型内部が空の状態及び内容物80%詰込み状態のサイロ模型を加振した。使用した振動台入力地震波は、十勝沖地震(1968-5-16)の八戸でのEW成分及び根室半島沖地震(1973-6-17)の厚岸での厚岸大橋橋軸直角方向成分の加速度記録である。これら二種類の入力地震波の時刻歴波形を図3に示す。但し、模型実験では相似則に従って、時間軸を1/8に圧縮した波形を用いた。

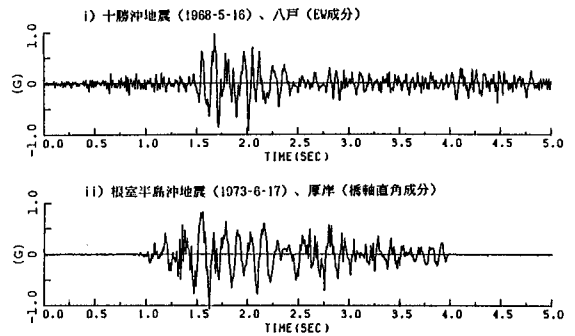


図3 入力地震波の時刻歴波形 [時間軸1/8圧縮]

4.1 地震波加振時における

内容物の減衰効果・質量効果

入力地震波の最大加速度レベルの増大に伴う、壁体上部での加速度応答倍率(=最大応答加速度/最大入力加速度)の推移を図4に示す。同図はそれぞれ、十勝沖・根室半島沖地震波に対する内容物詰込み状態、模型内部が空の状態での実験結果である。模型内部が空の状態では、入力加速度が約250galレベルを越えると、地震波の種類によらず応答倍率がほぼ一定値となっている。これに比べて、内容物詰込み状態では、入力加速度レベルの増大に伴って応答倍率が減少傾向を示し、内容物の減衰効果は漸次増加していることがわかる。

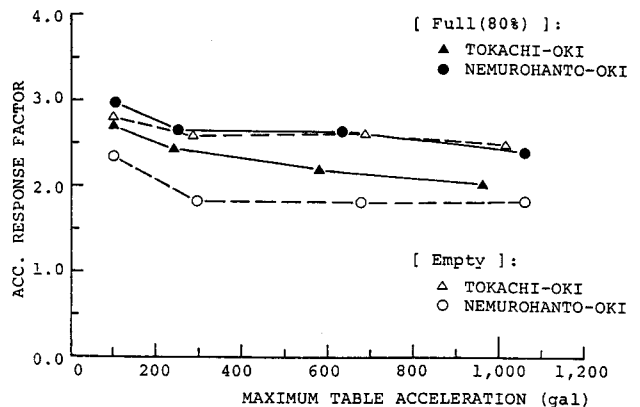


図4 入力加速度レベルの増大に伴う地震波応答倍率の推移

図5は、壁体上部(A1)及び内容物表面・内部(*A7,*A8)での応答加速度と、それぞれ壁体下部、内容物底部に対する相対変位を直交軸上にプロットしたものである。これらの図から、壁体自身が塑性化する以前に、内容物表面部分が履歴性状を示すことで振動エネルギーを吸収し、減衰効果をもたらすことが読取れる。

内容物詰込み状態及び模型内部が空の状態での、壁体上部における地震波応答加速度は、入力地震波の卓越振動数成分のほか、前述した正弦波20galの低共振レベルにおける各々の共振振動数成分が卓越していた。この意味では内容物の質量効果が生じている。しかし、内容物の有無によらず、入力加速度レベルが増大しても、それらの卓越振動数には全く変化が見られなかった。

4.2 地震波加振時における

動壁圧の分布性状と応答特性

地震波加振実験から、内容物による動壁圧の最大応答値分布が図6のように得られた。この図は十勝沖地震波に対する結果であり、入力加速度レベルの増大に伴う動壁圧の高さ方向分布性状の推移を表わす。なお、動壁圧の各計測点P1～P5の位置は内容物表面からの距離(深さ)で、それぞれ28cm, 59cm, 90cm, 120cm, 151cmである。この図から、地震波加振時の動壁圧は内容物底部から表面に近づくに従って大きな値を示し、入力加速度レベルの増大に伴って、この傾向が著しくなることがわかる。また、根室半島沖地震波に対する結果も全く同様な分布性状を示した。

図7は、入力加速度960galの十勝沖地震波に対する動壁圧(P1,P2,P5)応答波形及び壁体上部・中央部(A1,A5)、内容物表面・内部・底部(*A7,*A8,*A9)の加速度応答波形である。この入力加速度レベルになると、内容物表面に近い動壁圧P1、P2は負号側(内容物による静壁圧を減少させる方向)の応答波形がカットされた様な性状を示す。この点を除くと、中央部・下部での壁体と内容物の加速度及び動壁圧が、それぞれ非常に類似した応答波形を示すことが特徴的である。

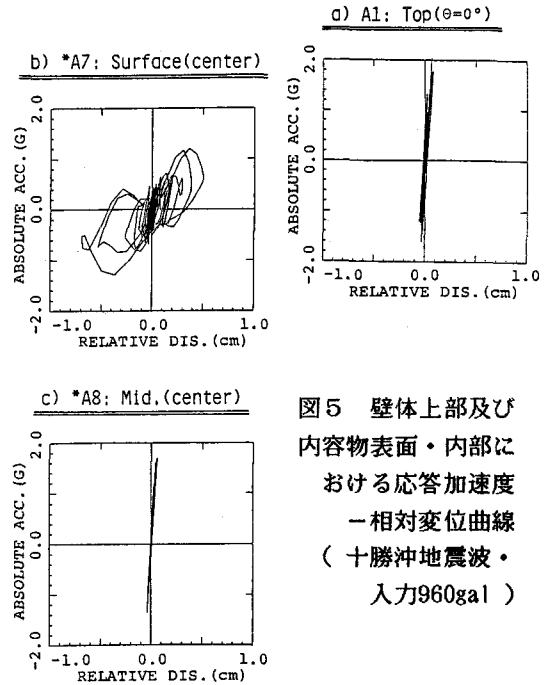


図5 壁体上部及び内容物表面・内部における応答加速度—相対変位曲線(十勝沖地震波・入力960gal)

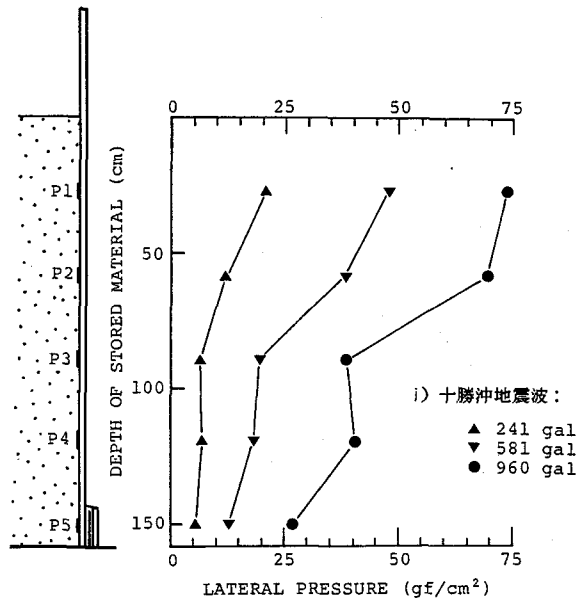


図6 入力加速度レベルの増大に伴う動壁圧の最大応答値分布の推移 [十勝沖地震波]

図7 壁体・内容物の加速度応答波形
及び動壁圧の応答波形
(十勝沖地震波・入力960gal)

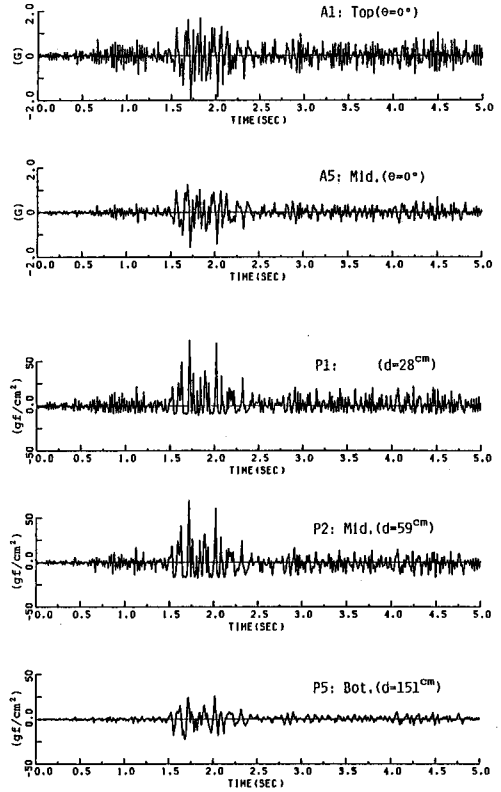
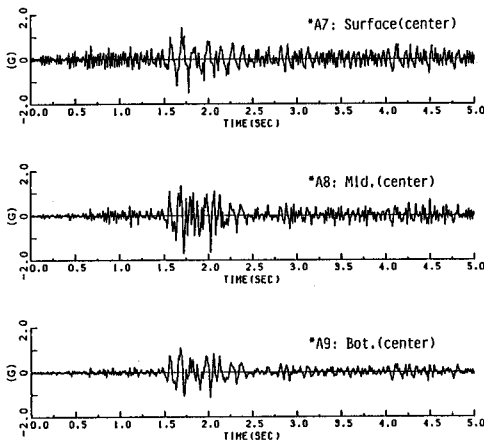


図8は、同一時刻における内容物の加速度 (*A7~*A9)と動壁圧(P1~P5)の分布性状を示す。これは図7と同じ入力加速度960galの十勝沖地震波に対するものであり、最大応答値を含む1.7~1.8sec間を0.05sec間隔で描いている。内容物表面(*A7)の加速度が内部・底部(*A8、*A9)のそれと逆位相であり、内容物表面により近い位置での動壁圧が最大値を示すこととの関連性が示唆される。

《 参考文献 》

- 1) 森 翠他：粒状物サイロの模型振動実験、川崎技報、第69号、pp.58-64、1979.
- 2) 河添 齊他：石炭サイロ模型の振動台実験とその解析、Proc. 6JEES、pp.961-968、1982.
- 3) 表 佑太郎他：石炭サイロの動的挙動に関する基礎的研究、大林組技術研究所報、No.26、pp.15-22、1983.
- 4) 坂井 正美他：石炭サイロの開発、日本鋼管技報、No.103、pp.36-47、1984.

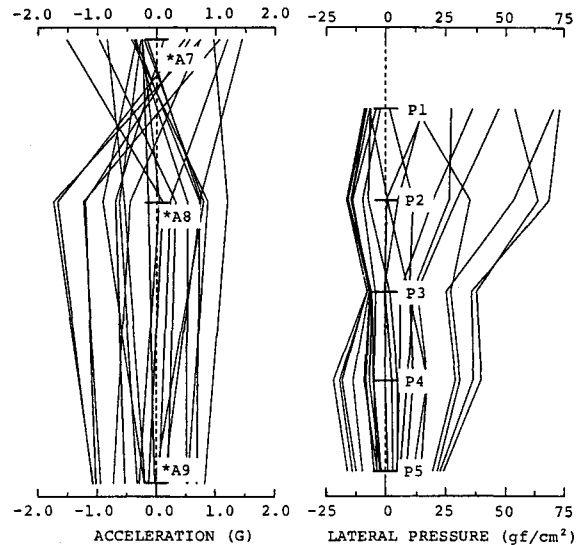


図8 同一時刻における内容物の加速度
及び動壁圧の分布性状
(十勝沖地震波・入力960gal)