

I-11 スティフ・サイロの動的挙動と内容物の影響について

北海道大学工学部
北海道大学工学部
北海道大学工学部

正会員 芳村 仁
正会員 〇佐々木 康孝
堂 藤 純

1. まえがき

近年、石炭などの鉱工業用原料・穀物・飼料の貯蔵のため、大型の鋼製サイロ、鉄筋コンクリートサイロおよびスティフ・サイロが数多く建設されている。ここで「スティフ・サイロ」とは、スティフが桶や筒の側板を意味するように、コンクリートブロック(スティフ)を組合せた積上げ、外壁を鉄筋(ロッド)で締付けた壁体構造のサイロである。

このサイロは、一見すると組積造とも受けとれる。組積造構造については、レンガ・コンクリートブロックなどをモルタル目地での組合により壁体構造としたもので、圧縮強度は大きいが引張・せん断などの抵抗力が小さいため、構造的に不利な構造形態であると言われている¹⁾。しかし、スティフ・サイロは組積造と異なり、ロッドとスティフの相互作用による内圧と地震力による引張・せん断に対しても、十分に抵抗できる壁体構造であると思われる。

この貯蔵用サイロの耐震性に関して、鋼製サイロや鉄筋コンクリートサイロのような一体式構造に比べると、スティフ・サイロが不連続な壁体構造のため、その地震時挙動は若くは不明である。

本研究は、スティフ・サイロの耐震安全性の検討を目的とし、模型振動実験を行なったものである。正統波・地震波に対するサイロ壁体の加速度および動き、締付け用ロッドの動き、動圧の応答特性など、スティフ・サイロの動的挙動および内容物の影響について検討を加えた。

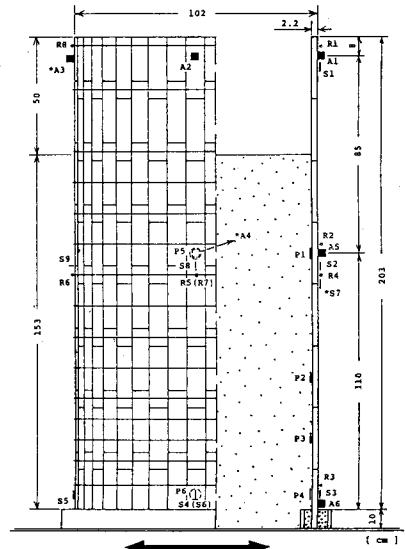


図1 スティフ・サイロ模型

2. 模型実験概要

(1) スティフ・サイロ模型 サイロ模型の設計・実験の実施に際し、慣性力と復元力に関する相似則は適用した²⁾。模型は、水平振動台(2.5m×2.5m)上で、模型用スティフを円周方向40個、高さ方向8段に積上げ外壁を5mm径のロッドで締付け組立てた。図1に、模型寸法、スティフの組合せ状況およびロッドの締付け位置を示す。模型の縮尺は1/6である。内容物は、「玄米」

表1 振動試験装置 性能諸元

- | | |
|---------------------------|--|
| 1. maximum movable load : | 10 ton |
| 2. exciting force : | sinusoidal wave 2.5 ton-G
random wave 1.0 ton-G |
| 3. frequency range : | 0.1 Hz - 100 Hz |
| 4. maximum acceleration : | 2.8 G (non-loading)
1.3 G (1 ton loading) |
| 5. maximum velocity : | 50 cm/sec |
| 6. maximum displacement : | ± 50 mm |
| 7. exciting waveform : | sinusoidal wave,
earthquake wave etc. |

および飼料を模擬した「オサグズ」を用いた。その単位重量は、それぞれ0.85, 0.40 gr/cm³である。

(2) 実験方法 本実験で使用する振動試験装置の性能諸元を表1に示す。実験は、各模型状態に対し正統波・地震波加振実験を実施した。用いた地震波は、十勝沖・広尾沖・根室半島沖の加速度記録である。相似則に従い時間軸を1/6に圧縮して入力している。計測は、加速度6点、壁体(スティフ)およびロッドの動き17点、動圧6点である。計測位置および計測量の略記号も図1に示す。

3. 実験結果のおおき考察

(1) 振動特性と内容物の影響 サイロ構造物は、壁体構造物と内容物の連成振動系を成し、両者の相互作用のもとで、ひとつの振動特性を示す。今、壁体上部での応答加速度(A1)に着目し、スチーブ・サイロ模型の基本的振動特性に対する内容物の影響を検討する。

図2は、正弦波加振振幅20 galで加振した場合の加速度共振曲線であり、それぞれ(a) Empty [内部が空]、(b) Full(SD) [オガクズ充填]、(c) Full(BR) [玄米充填]の模型状態における結果である。模型の内部が空の状態では32 Hzに共振点があり、応答倍率が30.9倍という鋭いピークを示す。これに比べ、内容物としてオガクズ、玄米を充填した状態では応答倍率が減少あるいは共振振動数の低下となり、その振動特性に内容物の存在が大きく影響することがわかる。さらには、内容物がオガクズの場合と玄米の場合とでも振動特性が著しく異なっており、両者の相違は単位重量だけではなく、内容物の種々の物性値の違いによるものと思われる。このように、不連続な壁体構造を併せたスチーブ・サイロは、その振動特性に内容物の有無、内容物の種類の違いが強く現れるという実験結果が得られた。

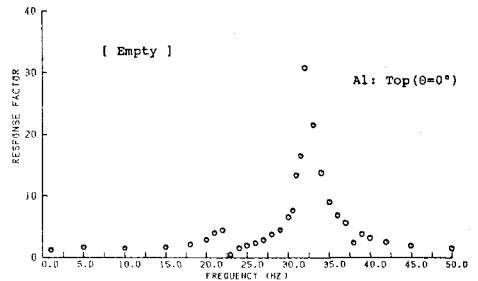
なお、各模型状態における減衰性の目安として、共振曲線から減衰定数を求めると、(a) Empty 2.0%、(b) Full(SD) 6.8%、(c) Full(BR) 4.1%であった。

また、他の計測量については、下部における壁体(スチーブ)の動ひずみ(S3)が加速度共振曲線と類似した傾向を示し、壁体上部でのロッドの動ひずみ(R1)は共振モードと強い関係がある等の結果が得られている³⁾。

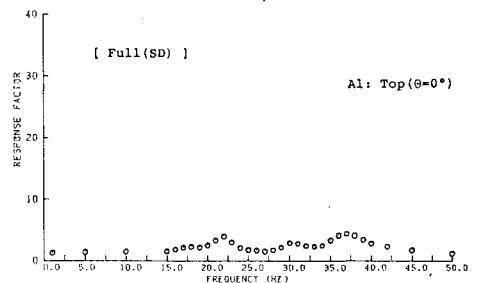
(2) 地震時応答特性と内容物の影響 地震波加振実験では、3種類(十勝沖、花尾沖、根室半島沖)の地震波を、最大加速度約100 galとして入力した。なお、地震波は前述のように時間軸を1/6に圧縮して使用している。

以下では、観測の都合上、各応答量の特徴を比較的によく現れている根室半島沖地震波に対する実験結果について検討を加えた。

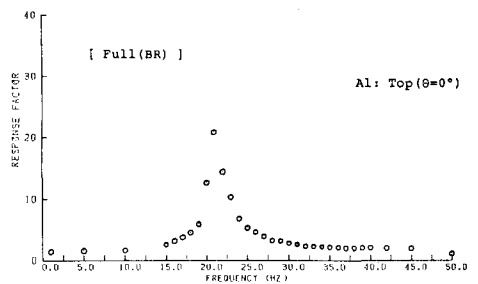
図3(a)(b)(c)に各模型状態における主な計測量の地震波応答波形を示す。なお、回転スチールは各応答波形が適当な振幅になる様に定められているため、同一計測量でも模型状態間でスチールの異なるものもある。また、表2は主な計測量の最大応答値である。ここで、*A4は高さ方向中部の円断面の中心



(a)



(b)



(c)

図2 加速度共振曲線 [20 gal]

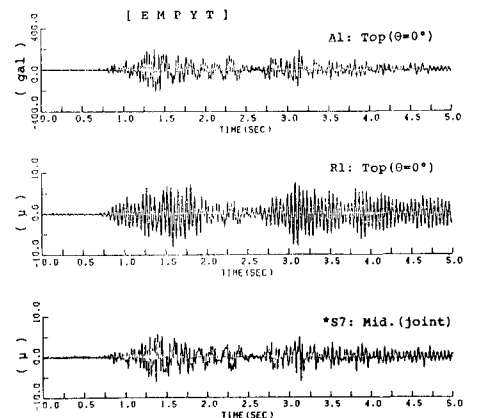


図3 (a) 地震波応答波形

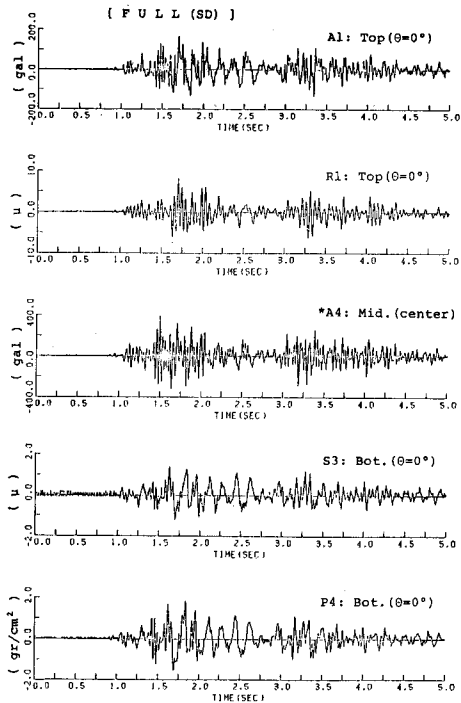


図3(b) 地震波応答波形

位置に、内容物の内部に埋込んだ加速度計の応答があり、内容物の動きを示す。P4は壁体下部における動圧力である。また、*S7は壁体中央部に位置する2個のスティフ継目に渡して揺動したひずみゲージの応答であり、そのひずみ値からスティフ間の相対変位量を算定できるわけではないが、スティフ継目の動きを表わすと考えらる。

表2を見ていくと、壁体上部の応答加速度(A1)の応答倍率は、模型、内部が空の状態は2.0倍。これに対し、オガワズを充填した状態では1.6倍と低下するが、玄米の場合は逆に3.0倍と大きくなり、内容物によっては、必ずしも減衰効果として応答倍率を低下させるわけでもないという結果がある。同じ高さでの壁体と内容物の内部の応答加速度(A5と*A4)を比べると、玄米の場合は壁体と内容物が一体となって動いていることがわかるが、オガワズの場合は、内容物の方が3倍も大きく応答している。壁体(スティフ)の動ひずみは模型状態にかかわらず、固定端で最大値を生じていない。外壁を補っているロッドの動ひずみについては、下部(R3)に比べて中央部・上部(R2・R1)の方が大きい傾向がわかる。

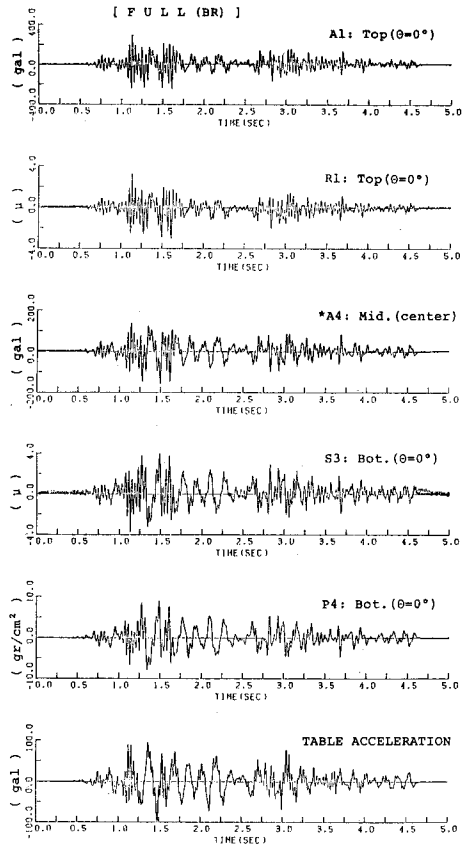


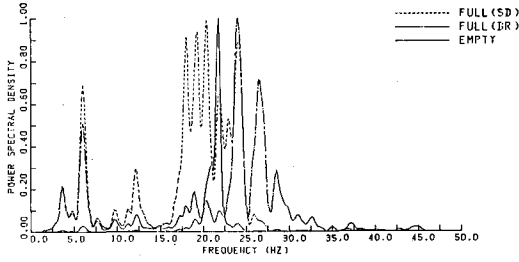
図3(c) 地震波応答波形

表2 地震波最大応答値 [榎橋沖, 100 GAL]

MEASURED POINT	Empty	Full (SD)	Full (BR)
ACCELERATION (gal)			
A1: Top (θ=0°)	208	165	294
A2: Top (θ=90°)	74	41	45
A5: Mid. (θ=0°)	130	126	158
*A4: Mid. (center)	—	389	159
TABLE ACCELERATION			
	102	102	98
STRAIN OF STAVES (μ)			
S3: Bot. (θ=0°)	1.1	1.4	3.9
*S7: Mid. (joint)	6.2	9.5	17.2
STRAIN OF RODS (μ)			
R1: Top (θ=0°)	8.2	8.1	3.3
R2: Mid. (θ=0°)	2.8	4.5	3.9
R3: Bot. (θ=0°)	1.2	1.1	1.4
LATERAL PRESSURE (gr/cm²)			
P1: Mid. (θ=0°)	—	1.0	3.3
P4: Bot. (θ=0°)	—	1.8	8.9

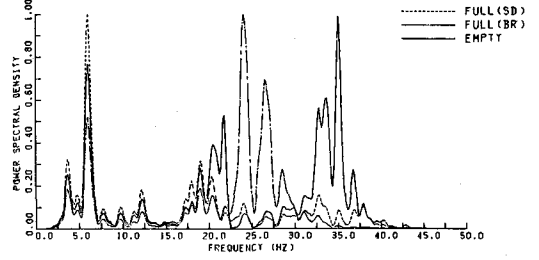
NEMUROHANTOU

R1: Top ($\theta=0^\circ$)



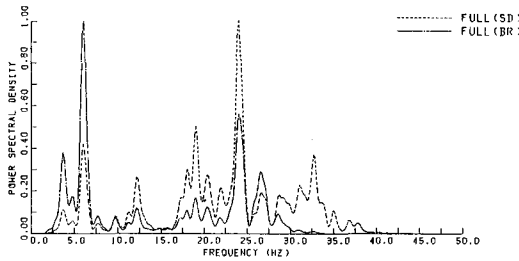
NEMUROHANTOU

A1: Top ($\theta=0^\circ$)



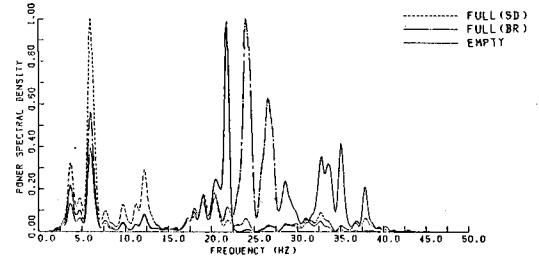
NEMUROHANTOU

*A4: Mid. (center)



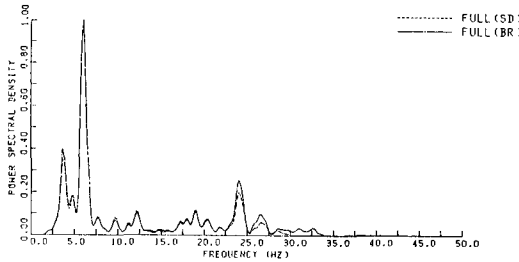
NEMUROHANTOU

*S7: Mid. (joint)



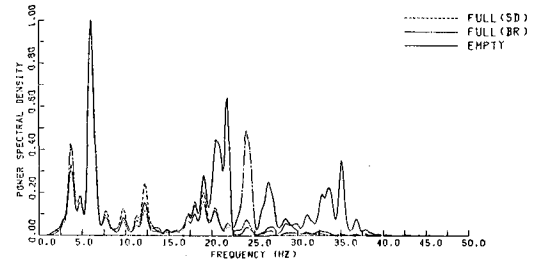
NEMUROHANTOU

P4: Bot. ($\theta=0^\circ$)



NEMUROHANTOU

S3: Bot. ($\theta=0^\circ$)



地震時の応答特性を振動数領域で検討すると次のようである。図4に各地震波応答波形のパワー・スペクトルを、模型状態がEmptyの場合を除き、Full (SD), Full (BR) の場合はそれぞれ点線、一点鎖線で示す。なお、模型状態間の比較を容易にするために、縦軸のパワー・スペクトル密度は最大値を1.0に正規化している。また、入力波である根室半島沖地震の、北海道東部厚岸を震源とした加振記録は、6Hzに卓越振動数を持つ（ただし、時間軸1/6圧縮）。

まず、内容物なし（*A4、内容物内部の応答加速度）について見ると、パワー・スペクトルを充填した状態では、

NEMUROHANTOU

TABLE ACCELERATION

BANDWIDTH 0.80 (HZ)
MAX. VALUE=118.5022

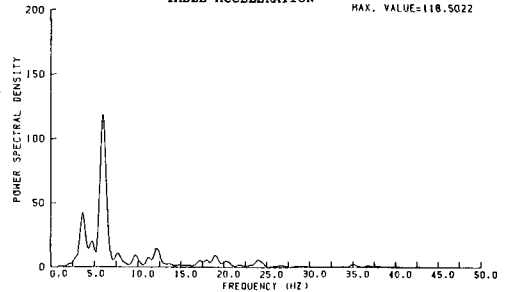


図4 パワー・スペクトル [Empty, Full (SD), Full (BR)]

24Hzの成分が卓越する。玄米の場合は、入力地震波の卓越振数である6Hzのほか、オガクズと同じ24Hzにもピークを有する。壁体上部での応答加速度(A1)は、玄米が充填された状態で前述の24Hz成分が卓越しているが、オガクズの場合はこの成分が殆ど生じない。地震時に壁体と内容物が異なる挙動を示している。

スティフ継目の挙動(*S7)については、模型状態によらず壁体の応答加速度(A1)と類似した応答特性がある。この結果と、さらに壁体のひずみが殆ど生じていない事を考慮すると、不連続な壁体構造を併用スティフサイロの壁体の動的挙動は、スティフ継目の動きによるものと推測される。この壁体構造において重要な役割を担う補付け用ロッドの動ひずみ(R1)について、模型の内部が空の場合は以前に発表した³⁾すなわち、22Hzをピークとする振動モードとなり、ロッドの挙動は振動モードと強い関連がある。さらに、内容物が存在する場合を見ると内容物の動きと関連があり、特にオガクズの場合はその計測値とかなり異なった応答特性を示している。壁体下部における動ひずみ(S3)および動壁圧(P4)は、入力地震波の卓越振動数成分が支配的である。また、中央部での内容物の動きが、下部における動壁圧にそれほど影響しないことがわかる。

(3) 非線形挙動および耐震性 以上の模型振動実験から引き続き、加振振幅の増加に伴う応答特性の解明およびこの不連続な壁体構造の破壊状況・破壊過程の観察、耐震性の検討を目的とした動的破壊実験を行なった。この実験では、最大加速度を段階的に上げた十勝沖・根室半島沖地震波を交互に入力し、玄米を充填した状態のサイロ模型を加振した。以下で述べる根室半島沖地震波の場合の入力最大加速度は、98, 208, 308, 545 galである。

図5は、併時的な応答を示した模型下部における壁体(スティフ)・ロッドの動ひずみ および動壁圧(S3, R3, P4)で、最終段階545 galに対する結果である。

表3に、入力最大加速度の増大に伴う応答倍率の推移を示す。ここで、壁体(スティフ)・ロッドの動ひずみ、動壁圧の応答倍率とは、それぞれその応答値を入力最大加速度で割った1 gal当りの応答量であり、数値はその1/100を単位としたものである。壁体上部の応答加速度(A1)を見ると、加振振幅の増加に伴う応答倍率が3.0倍から2倍程度にまで順次低下し、耐震的に有利な方向へ非線形挙動を示している。また、スティフ継目の挙動(*S7)も同様の傾向を示し、前述したサイロ壁体の挙動は継目の動きによるという推測を裏付ける結果である。これらの計測値に比べ、模型下部における壁体の動ひずみ(S3)は、ほぼ応答倍率が一定となっている。ロッドの動ひずみについては、中央部(R2)の応答倍率がほぼ一定であるのに対し、下部(R3)のものは、ある

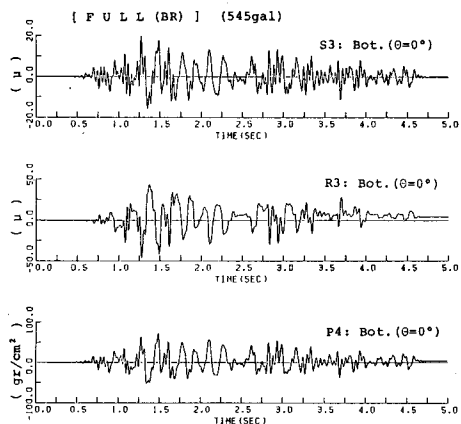


図5 地震波応答波形[545gal]

表3 加振振幅の増加に伴う応答倍率変化[Full(BR), 確信中]

MEASURED POINT	TABLE ACCELERATION (gal)			
	98	208	308	545
ACCELERATION (non-dimension)				
A1: Top (θ=0°)	3.00	2.82	2.21	1.97
A2: Top (θ=90°)	0.46	0.53	0.70	0.65
*A4: Mid. (center)	1.62	1.48	1.32	1.19
STRAIN OF STAVES (*1/100-μ/gal)				
S3: Bot. (θ=0°)	3.98	3.80	3.83	3.60
*S7: Mid. (joint)	17.6	12.4	10.8	10.9
STRAIN OF RODS (*1/100-μ/gal)				
R1: Top (θ=0°)	3.37	3.99	3.99	7.50
R2: Mid. (θ=0°)	4.39	4.23	4.12	4.07
R3: Bot. (θ=0°)	1.43	5.82	9.25	8.59
LATERAL PRESSURE (*1/100-gr/cm²/gal)				
P1: Mid. (θ=0°)	3.37	2.45	2.92	3.80
P4: Bot. (θ=0°)	9.08	12.6	15.6	13.5

入力レベルから数倍するため、高さ方向の分布状況が変化する特徴がある。

図6に各入力加速度レベルでの動壁圧分布を示す。なお、同図中にはオガクズを充填した状態における 100 gal レベルの結果も表示してある。この結果は、入力レベルの増大に従って各計測量が同様に増加せず、かなり希薄な分布性となつてゐる。しかし、この場合も下流側の動壁圧(P4)が最大の応答値を示す。比較のため、図7に玄米、オガクズを充填による静壁圧分布を記載した。これより、地震時動壁圧との分布性の相違がわかる。また、同図にはJMS式による計算結果を一点破線として示してある。JMS式とは、NSAのステイブ・サイロ設計基準において推奨されている式であり、基本的にはRankine理論に依つてゐる⁴⁾。なお、計算に必要な玄米・オガクズの初性値について、単位重量計測値である 0.85, 0.40 gr/cm^3 を、安息角はそれぞれ 30.0° , 45.0° を使用してゐる。⁵⁾

この動的破壊実験により、サイロ模型壁体の下部を中心に十数箇所微小なひびわれが発生した。しかし、そのほとんどがステイブ組合せ部分に生じること、さらに、ひびわれは継目位置より進まずに1個のステイブ内にとどまるため、全体としてのステイブ組合せ部分の働きには影響しないことがわかった。根室半島沖の場合の入力レベル 545 gal は、相似則から算定すると震度階が震度5(強震)に相当する。この地震波を受けても、ロッドの破断、壁体の崩壊、サイロの転倒という現象は起こらず、この不連続な壁体構造を併用ステイブ・サイロはかなりの耐震性を示した。

4. あとがき

大型サイロ模型実験から、不連続な壁体構造があるステイブ・サイロの振動特性・地震時応答特性と内容物の影響、非線形挙動およびその耐震性に関するいくつかの結果が得られた。現在、小型ステイブ・サイロ模型実験により、この壁体構造の併用壁面耐力特性と耐震性との関係について検討を進めている。

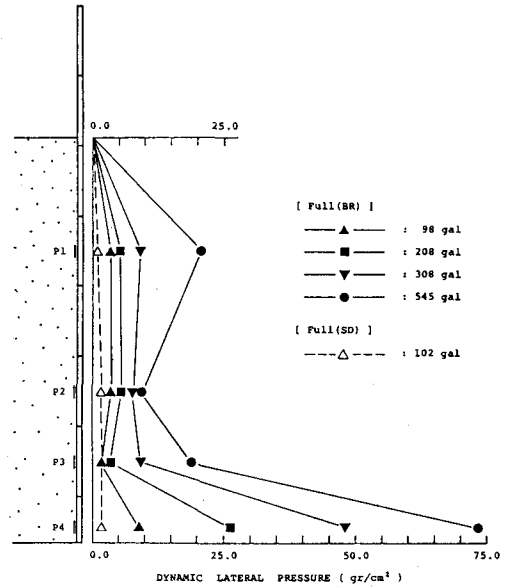


図6 地震時動壁圧分布

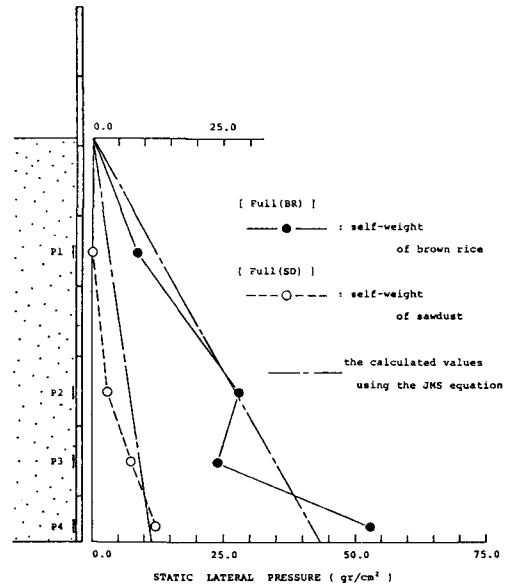


図7 内容物による静壁圧分布

参考文献

- 1) たとえば、日本建築学会編：建築学便覧Ⅱ(構造)，p.569，文芸，1977
- 2) 江村一郎，田中シュール：模型実験の理論と応用，技報堂，1973
- 3) 芳村仁，佐々木孝：ステイブ・サイロ(外鉄組式コンクリートサイロ)の動的挙動に関する模型実験について，第16回地震工学研究発表会講演概要，1981.7
- 4) NSA(National Silo Association)：Design Standards for Concrete Stave Silos，July，1974
- 5) 又保輝一郎他：粉体—理論と応用—，文芸，1979