

石油貯蔵タンク配管系の耐震実験について(第1報)

後 藤 繁*
 斉 藤 洋*
 菅 原 満 弘*

東京消防庁消防科学研究所 振動実験室

1. はじめに

昭和39年6月16日午後1時頃、マグニチュード7.7、震源距離100km、新潟県沖に発生した大地震は、陸上に多大な損害を与えたが、特に危険物関係施設については、タンクの沈下・傾斜・破壊等による油の流出、火災など、大きな被害を受けた。

タンクと接続配管については、タンクに沈下、変形等の被害を受けたにもかかわらず、配管自体の可撓性によって折損はなかったが、ネジ込み継手のところで破損し、油の漏洩が起っていたと報告されている。

新潟地震の教訓から、タンクと配管接続部付近に緩衝装置を設けることが、昭和40年の政令改正時に規定された。

今回は、配管系、特に少量危険物貯蔵取扱所(東京消防庁管内約58,700件)を対象とした、規模の小さなものについて振動実験を行い、次回実験する可撓式配管の耐震強度に関する研究の基礎的データとするものである。以下実験結果について報告する。

2. 実験項目

(1) 静的実験

- ア. 直状管、ループ型配管の荷重と変位
 イ. 直状管の荷重とひずみ

(2) 動的実験

- ア. ループ型配管の共振周波数
 イ. ループ型配管の共振時のひずみ
 ウ. ループ型配管の加速度と変位

3. 実験月日及び場所

昭和52年11月20日～昭和53年2月20日
 東京都渋谷区幡ヶ谷1～13～20号

4. 実験供試体

JIS規格、配管用炭素鋼管(SGP)

- (1) 直状管(口径20mm, 32mm, 全長5,500mm)
 (2) ループ型配管 大(口径32mm, 全長3,500mm)
 (3) ループ型配管 中(口径32mm, 40mm, 全長2,500mm)
 (4) ループ型配管 小(口径32mm, 全長1,500mm)

5. 実験装置

- (1) 振動試験機
 (2) ひずみ測定器
 ア. 静みずみ計
 イ. 動みずみ計
 (3) 加速度変換器
 (4) ひずみゲージ
 (5) 電磁オシログラフ
 (6) チェーンブロック
 (7) バネばかり
 (8) 加圧ポンプ
 (9) ハイトゲージ

6. 実験方法

(1) 静的実験

ア. 直状管の静荷重による曲げ実験

直状管を床上に固定し、チェーンブロックにより静荷重をかけ、床面からの変位及びひずみを測定した。

測定点は、支点より2cm, 10cm, 30cm, 40cmの位置である。(写真 1)

イ. ループ型配管の静荷重による引張実験

口径32mmのループ型配管(大型)の1端を固定し、他端に引張りによる静荷重をかけ、変位を測定した。(写真 2)

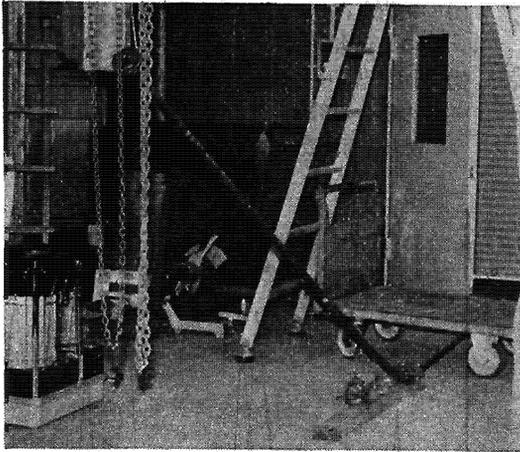


写真1 直状管の曲げ実験

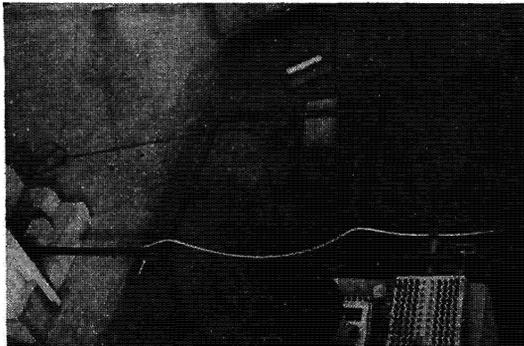


写真2 ループ型配管の引張実験

(2) 動的実験

ループ型配管の振動実験

口径32mmループ型配管，大・中・小型3種について，共振周波数とひずみの測定は，配管内に水圧2 kg/cm² をかけた状態と空の状態において，正弦波加振（70gal 一定）を行なった。

変位については，70gal の共振時と共振時以外において，加速度を700gal まで上げたときについて測定した。（写真 3）

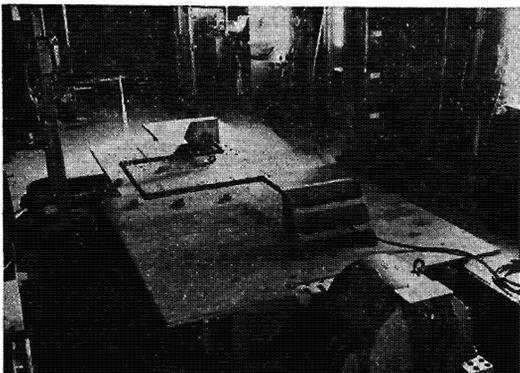


写真3 ループ型配管の振動実験

7. 実験結果

(1) 直状管の曲げ実験

図1-1，図1-2及び表1に結果を示す。

40kgまで荷重をかけて曲げたが，配管には異状は認められず，荷重を除くと元にもどった。したがって，この範囲においては，弾性限界内であるといえる。

40kg以上の荷重をかけることは，支持点の固定力の限界から測定できなかった。

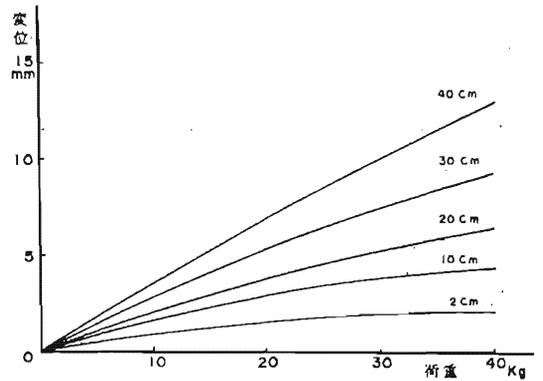


図1-1 静荷重による曲げ実験（直状管）

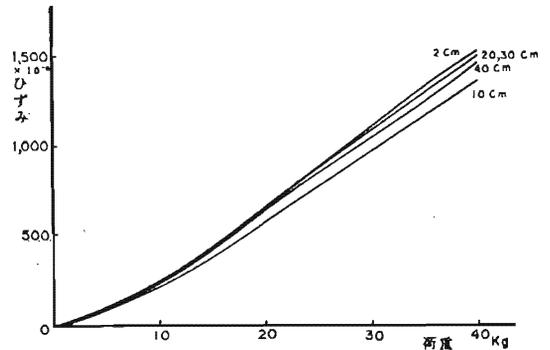


図1-2 静荷重による曲げ実験（直状管）

測定点	Cm	Cm	Cm	Cm	Cm
荷重	2	10	20	30	40
10Kg	240	210	230	230	230
20Kg	660	590	650	640	620
30Kg	1,100	970	1,080	1,080	1,040
40Kg	1,520	1,370	1,500	1,500	1,470

表1 ひずみ測定値 (×10⁻⁶ ひずみ)

(2) ループ型配管の引張実験

図2により結果を示す。荷重80kgあたりから配管の直状部分が弓状に変形し，荷重120kgで配管は破壊し

た。破壊箇所は、図3-1における測定点18部分の配管ネジ切り部であった。

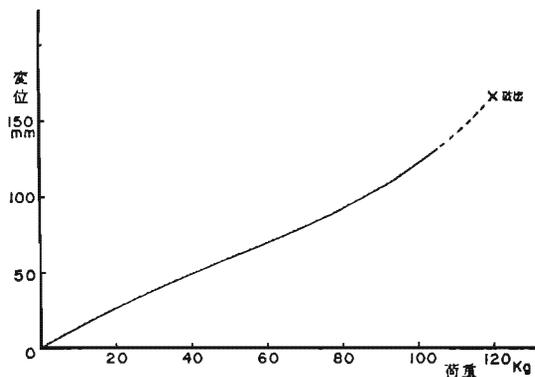


図2 静荷重による引張実験 (ループ型)

(3) ループ型配管の振動実験

ア. 図3-1, 図3-2にひずみ測定点及び加振方向を示す。

大型及び中型配管については、X方向における共振周波数の測定ができたが、小型については、X方向において周波数を上げていったが配管に振動が認められず、Y方向により、測定を行なった。

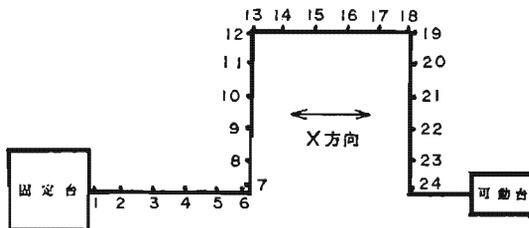


図3-1 ひずみ測定点 (大, 中型)

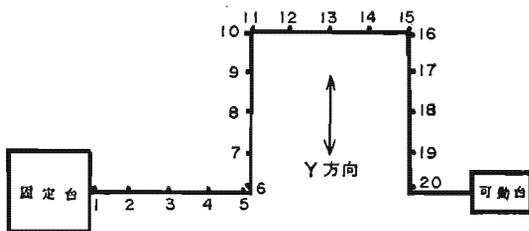


図3-2 ひずみ測定点 (小型)

イ. 大・中・小型配管の共振周波数は、図4による。

ここで a_0 は振動台の加速度、 a は配管の加速度を示す。

(ア) 大型配管………空の場合 2.5Hz, 水圧 2 kg/cm²の場合 2.3Hz

(イ) 中型配管………空の場合 4.5Hz, 水圧 2 kg/cm²の場合 4.2Hz

(ウ) 小型配管………空の場合 3.4Hz, 水圧 2 kg/cm²の場合 3.3Hz

以上各周波数において共振した。

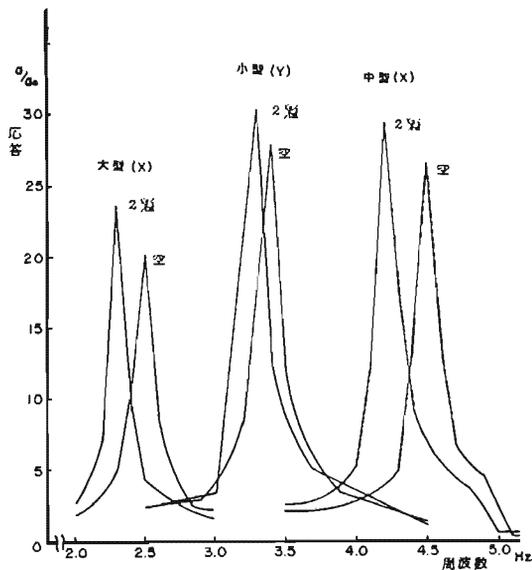


図4 周波数と応答

図4からわかるように、各配管とも、水圧 2 kg/cm²をかけた場合が共振周波数が低く、応答倍率のピークは高くなっている。

このことは、同じ配管系においては、管内に内容物が充たされている場合が、より低周期にて共振し、応答倍率が大きくなり、固定部に強い力が加わる。したがって空の場合より破壊の被害を受けやすくなる傾向を示すことが予想される。

ウ. 配管各部のひずみ測定値、ひずみ分布をそれぞれ表2及び図5(5-1~5-6)に示した。

これらの結果から、各配管とも全体的にはほぼ同様な傾向を示していることがわかる。

空の場合と水圧をかけた場合の値を比較してみると、大型及び小型については、両方とも水圧をかけた方が大きくなっている。

中型については、部分的に逆転している。

これらの分布図によって、振動時における配管各部の力の配分がわかる。

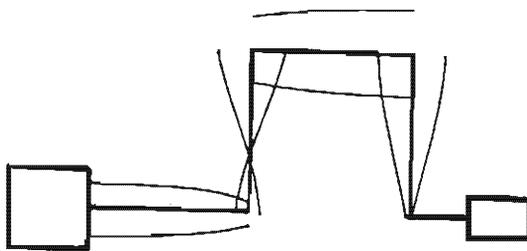
ひずみ値が最大となる箇所は、X方向(大・中型)では測定点18の部分である。

Y方向(小型)については、測定点2の部分である。したがって、これらの箇所が最も力がかかる部分であると言える。

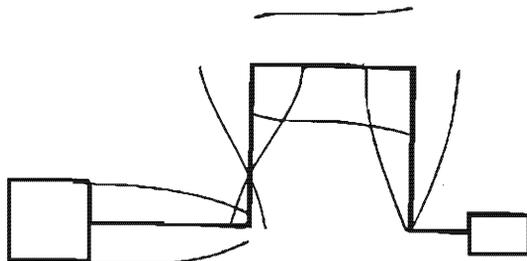
測定点		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
大型	空	320	327	321	260	245	147	126	112	41	349	356	453
	2% ₁	479	480	460	397	330	182	196	167	43	431	593	643
中型	空	281	276	241	222	202	113	114	74	81	137	228	254
	2% ₁	274	275	253	239	232	144	89	66	73	109	191	195
小型	空	483	518	481	407	236	277	334	328	349	403	365	346
	2% ₁	578	598	546	487	419	307	398	384	402	465	410	398
測定点		13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
大型	空	380	438	468	508	468	558	393	408	358	181	87	34
	2% ₁	582	657	669	649	705	777	562	572	505	206	124	49
中型	空	302	326	317	348	358	295	350	288	216	148	67	30
	2% ₁	284	277	306	320	314	264	409	332	285	184	106	39
小型	空	302	280	210	231	208	179	164	158				
	2% ₁	328	267	281	250	217	195	170	174				

表2 ひずみ測定側 (×10⁻⁶ ひずみ)

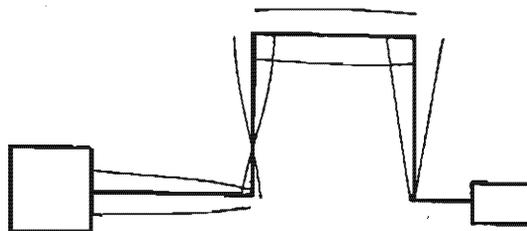
図5 ひずみ分布



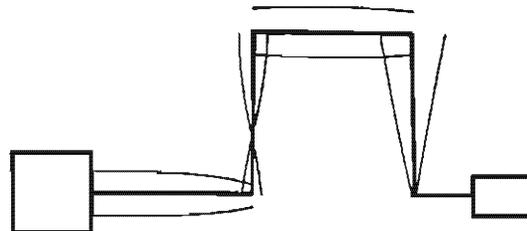
5-1 大型 空 (X)



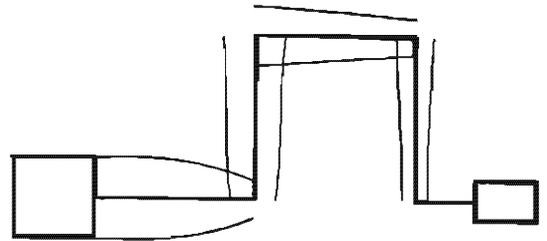
5-2 大型 2 kg/cm² (X)



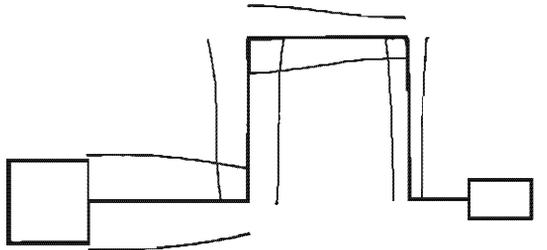
5-3 中型 空 (X)



5-4 中型 2 kg/cm² (X)



5-5 小型 空 (Y)



5-6 小型 2 kg/cm² (Y)

エ. 図6は、ひずみ測定値から作成した、ループ型配管の振動形態を示す概念図である。(X方向の振動に関する。)

太線部分は、平常状態であり、細線で伸びと縮みの状態を示している。

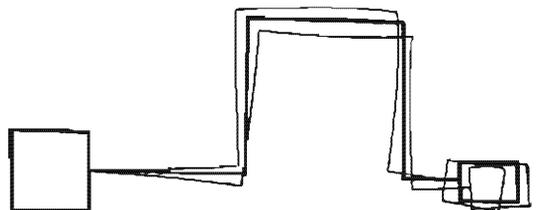


図6 振動概念図

オ. 図7では、口径32mm及び40mm中型配管の加速度と変位の関係について示した。

正弦波 70gal 一定で、共振時における変位と共振時以外において加速度を変化させていった時の変位について比較した。

図7から、両配管とも 70gal 共振時の変位が最大となり、共振時以外の場合、10倍の 700gal まで加速度を上げて加振したが、共振時の変位までは到らず、一定化していく傾向を示している。

このことから、地震動に配管の動きが共振したときが、最も激しく揺れることが確認できた。

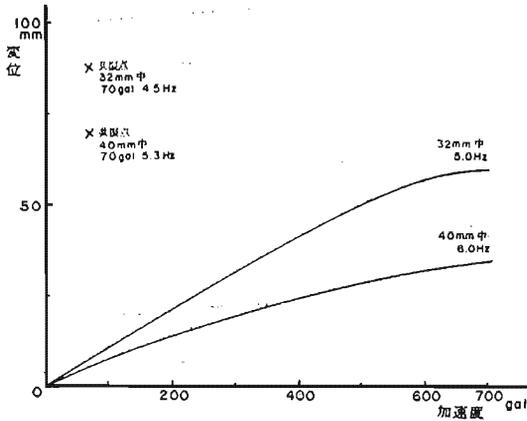


図7 共振時及び共振時以外の加速度と変位

8. 考 察

SGP (JIS規格)の直状管、ループ型配管について、静荷重実験と正弦波による強制振動実験を行なった。

正弦波は地震波に比べると、約1.5~2倍の地震波に相当すると言われており、正弦波による実験は安全側と考えられる。

1964年3月27日、大規模なアラスカ地震が発生し、各地に多大なる被害をもたらしたが、地震後の建築物に付属している設備の被害状況について報告⁽⁷⁾されている。

今回、われわれが行なった実験結果とアラスカ地震における、配管設備の被害状況を比較してみると、合致する点が多くみられるので合わせて検討してみると次のとおりである。

(1) 静的実験

直状管に荷重40kgを加えたが弾性範囲内であり、配管にはなんら異状は見られなかった。

写真4-1、写真4-2では、口径32mmループ型配管(中型)の引張実験において、荷重100kgで変位は120mm、荷重115kgでは変位154mmとなった、さらに荷重120kgを加えたところ、図3-1測定点18のネジ切

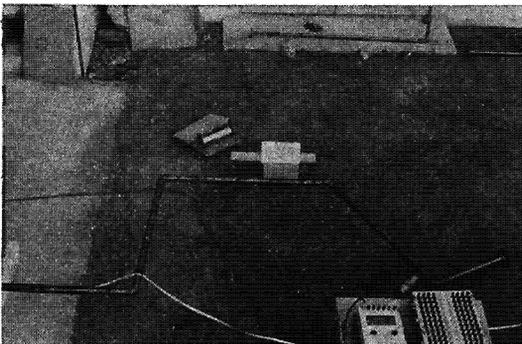


写真4-1 ループ型配管の破損状況

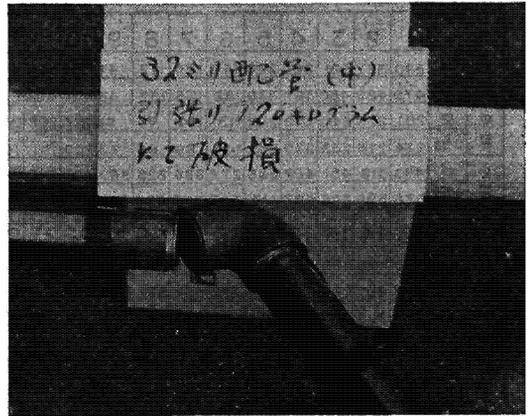


写真4-2 破損部分

り継手部において破壊した。

アラスカ地震において、配管系が被害を受けた箇所は、構造体が完全にやられたところを除けば、大部分継手部分で起こっている、配管そのものが破壊されたものはほとんどないと報告されている。

(2) 動的実験

口径32mmループ型配管の共振周波数を測定した結果、地震時の振動数範囲内(一般に10Hz以下と言われている⁽¹⁰⁾)であるという値が出た。

また、大・中型配管ではX方向加振(図3-1)で測定できたが、小型配管については周波数を1から10Hzまで上げていったが振動せず、15Hzあたりから微動しはじめた、この点については、配管系が短かく堅固なため振幅がゆるい(少ない)低周波数では応答しないと云える。

写真5では、口径20mmループ型配管(中型)を70galの共振時(2.5Hz)において正弦波加振したところ、配管の振れが急に小さくなったので点検したところ、図3-1測定点18の継手ネジ切り部で亀裂していた。

共振時のひずみ測定の結果、大・中型配管(X方向加振)が測定点17、18の値が大きく力が最も加わる点

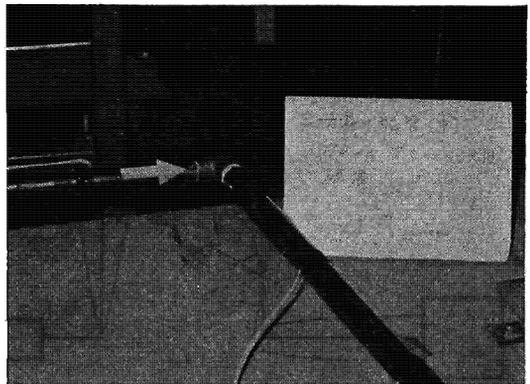


写真5-1 ループ型配管の振動実験による破損

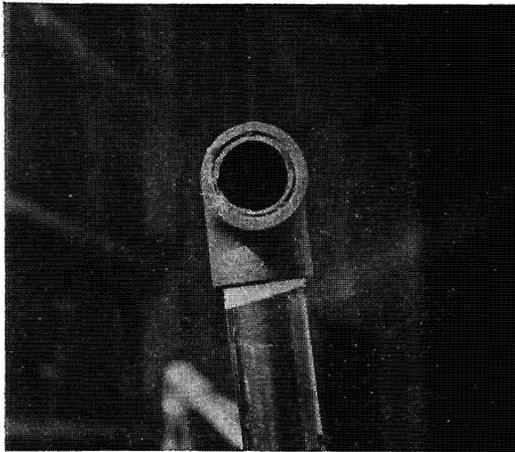


写真 5-2 破損部分

と思われる。このことについて、前記実験により測定点18部分にて配管が破壊したことにより証明されたといえる。

小型配管については（Y方向加振）、固定台と配管接続部のひずみが最大となった。

加速度と変位の実験では、口径32mmループ型配管（中型）の70galにおける共振時（4.5Hz）の変位は87.7mmであるのに対して共振外（5.0Hz）にて700galでの変位は60.0mmであった。

また、口径40mmループ型配管は、共振時（5.3Hz）において69.5mm、共振外（6.0Hz）では36.8mmの変位であった。

このことから、配管系が大きな力を受けるのは、加速度の大きさよりも、地震動に共振した時であると言える。

アラスカ地震における被害状況は、地震時に配管にかかる曲げの繰り返しによって、ネジ込み継手のネジ山が完全にこわされた。

配管が建物の固有振動数と共振して異常に大きく動き、配管と機器の接続部・ネジ込み継手部及び鉄と非鉄管の間の電食防止用のもろい非金属部において破壊されている。

また、逆に被害の少なかったのは次の箇所であった。

- 配管自体（接続等のない直状部）
 - 配管接続に溶接を行なったところ
 - 地震のために、建築構造の伸縮継手部分に十分なループ状配管がされていたところ
 - 配管のつり手または支柱に水平ブレースングが取り付けられてあったところ
 - スプリンクラ設備においては、NBFU規格により施行されたもの
- ここにNBFU（National Board of Fire

Underwriters）規格⁽⁷⁾の考えを示す。

水平配管を床等に堅固に取り付け、配管のみの振動を防ぎ、構造体とともに振動させる。立て配管がスラブを貫通するときには、スラブの上下にたわみ継手を入れて、上下床の異なった動きに自由に対応できるようにする。壁や床を貫通する配管は、貫通部にすきまをとるか、たわみ継手を入れる。水平ブレースングをとる。等が規定されている。

以上実験の結果とアラスカ地震の被害状況を通じて次のことが言える。

鋼管自体は、強度と弾力性が強い安全であると考えられるが、配管接続部が弱く、特にネジ切りによる接続は破壊する恐れがある。（配管接続は溶接による方法が良いであろう。）

建築物の固有振動数と共振すると、振動は不安定となり増幅するため、配管系の固有振動数を大きくはずしてやる必要があると思われる。（配管系の異常増幅作用を押えるストップ等を設ければ良いであろう。）

建築物相互間に渡る配管系及び壁や床を貫通する部分の配管については、相当大きな力が加わると考えられるので、可換式配管の取り付けまたは自在性を持たせた配管方法が必要であると思われる。

9. おわりに

配管系の振動解析は、モーダルアナリシス法⁽⁶⁾等を用いた応答計算により原子力プラントなどの耐震設計がすでに実用化されている。

今回の振動実験においては、立体的かつ現実的な方法ではなく、平面的な配管を設定し、配管の固定については無視した、苛酷な条件のもとに加震実験を行なった。

はじめに述べた通り、昭和53年度実施する可換式配管の耐震強度に関する研究についての基礎的なデータを得心することができた。

なお、本実験に際し御指導、御協力をいただいた高輪消防署川田 孝、第三研究室伏見 英両氏に謝意を表します。

10. 参考文献

- (1) 中村：地震学
- (2) 武藤：耐震計算法
- (3) 山崎 裕：地震の基礎知識（1977. 7）
- (4) S. シュワイゲラー：配管工学ハンドブック I. II
- (5) 丸善：配管 No. 3
- (6) 藤川猛・黒橋道也・井上喜雄：モーダルアナリシスによる配管系の振動解析
- (7) 向野元昭、訳：1964年アラスカ地震による建築設備の被害報告

- (8) 柴田 碧：産業施設の耐震設計基準の現状とあり方 (1976)
- (9) 東京消防庁：大震火災時における危険物施設等の

延焼性状に関する調査研究報告書 (1974)

- (10) 東京消防庁から火災学会へ研究委託：消防設備等の耐震措置に関する調査研究報告 (1976)