

埋設管の地震時挙動

Dynamic Behavior of Underground Pipes during Earthquake

久保 慶三郎*

Keizaburo KUBO

1. ま え が き

昨年度の研究計画の1つに福井地震の水道管の被害特性と福井の地盤との相関関係の調査があった。昨年ボーリングを実施し、福井の地盤のあらましを見ることができた訳であるが、当初考えていた地層状態とは大分違った結果を得た。地盤の層厚の変化にもとづく地盤の力学的特性の相違によって被害が発生したのではないかとの当初の推定は、福井市内の地層厚さの一樣性から否定されざるをえなく、震害は地震波動によるものと考えられるが、この考え方の正当性を立証するためには震央近くの地震動の震幅の大きさを決めることが必要である。この面の研究はデータが少く、地震学の研究の発展にまつところが大きい。最近埋設管に関する研究が急速に各所で活発になり、筆者も臨時事業と直接的または間接的に関連させて埋設管の挙動を勉強してきたので、それも含めて研究の概略を述べることにする。主な題目は次の如くである。第1はサンフェルナンド地震によるロスアンゼルス市の水道管の被害特性を少し調べてみた。第2は臨時事業の純粋な研究として福井地区における地盤のボーリングデータを得、それにもとづいて福井市の地盤の確認を行なった。第3には臨時事業の研究計画の1つである加速度記録から変位記録を推定する方法の開発を行なった。3次の多項式で加速度記録を積分して得られた変位を修正して地震時の変位に関する波動をつかまえようと考えたが、現在までのところ充分に成功したとはいえない状態である。第4番目には埋設管は常に周囲の土で囲まれているので土につれてパイプも動く訳でその間には充分な摩擦がないと地盤の動きに追隨した管の動きはないことになる。摩擦が充分でなければ管と地盤とは全く別個に動くことになるので地盤が相当にゆれても管にはそれほど軸力が入らないという結果になる。動摩擦の問題も埋設管の耐震設計をする上に変重要である。それについても少し実験をやってみたが特性が部分的に解明された程度で、まだ広範囲な実験を実施しなければならない。第5番目には地下の埋設管の挙動について有限要素を用いた計算を試みた。ここでは第1、第2、第5のテーマについて述べる。

2. ロスアンゼルス市水道管の震害特性

サンフェルナンド地震で約水道管で800ヶ所、給水管で同じく約800位の被害を受けた訳であるが、これについて詳細な被害の図面をロスアンゼルス市の電力水道局からもらったので、これを使って少し統計的に調査した。被害分布図には水道管の位置と被害の個所がマークされてあったので、先ず図面を2cmのメッシュに切り、2cmのメッシュの中の被害の個数を求めた。この場合切るべきメッシュの幅が問題である。メッシュの荒さを荒くすると、被害の特性が非常にあいまいになってくるし、また細かいとこえて特徴を見失う恐れもでてくる。以上のことを考えて、適当なメッシュ幅をきめたのが2cmであって、この長さは実際の長さで1辺800m位に相当している。800mのメッシュの中の被害個数を給水の本管と供給支管とに分けて求めた。図1の数字はメッシュ内の被害個数を示しているが、この中でブランクになっているのは水道管の敷設されていないところで、西の方のブランクは住宅のない従って給水管のない所である。またサンフェルナンド市(ロスアンゼルス市と別区域)、貯水池公園地区もブランクになって、面積当たりの被害数の統計を求めるときには積算からはづしてある所である。図1の東西方向斜線で書いてあるベルトを例にとると、まずこの面積を測り面積と個数とから単位面積当たりの被害個数を調べこれを水平軸にそって計算し、東西方向のベルト当たりの被害率の分布を求めたのが図3である。図3によると地震の震央は調査対象地域の北方約40kmにあり、震央距離とともに単位面積当たりの被害率が急激に減衰していることがわかる。しかし被害率が1部凸出しているところがある。これは断層の近辺で被害個数が多かった事を現わしている。サンフェルナンド地震における震央距離と水平加速度との関係からすると、図の上端で600gal、図の下端で200gal位の値になっている。断層の影響が出ている図中の凸出部分を除くと、この様な地震の時には震央に近い所では大変被害率が高くなり、震央距離とともに急激に被害率が下っており、300gal以下の水平加速度では1km²当たり2-3、またはそれ以下の被害しか発生していない。なお図中に点線で示した被害率は管がメチャメチャにこわれて、個数が明らかでなかったのを、推定して書き足した部分である。次に単位長さ当たりの被害率の方向別特

* 東京大学生産技術研究所 第5部

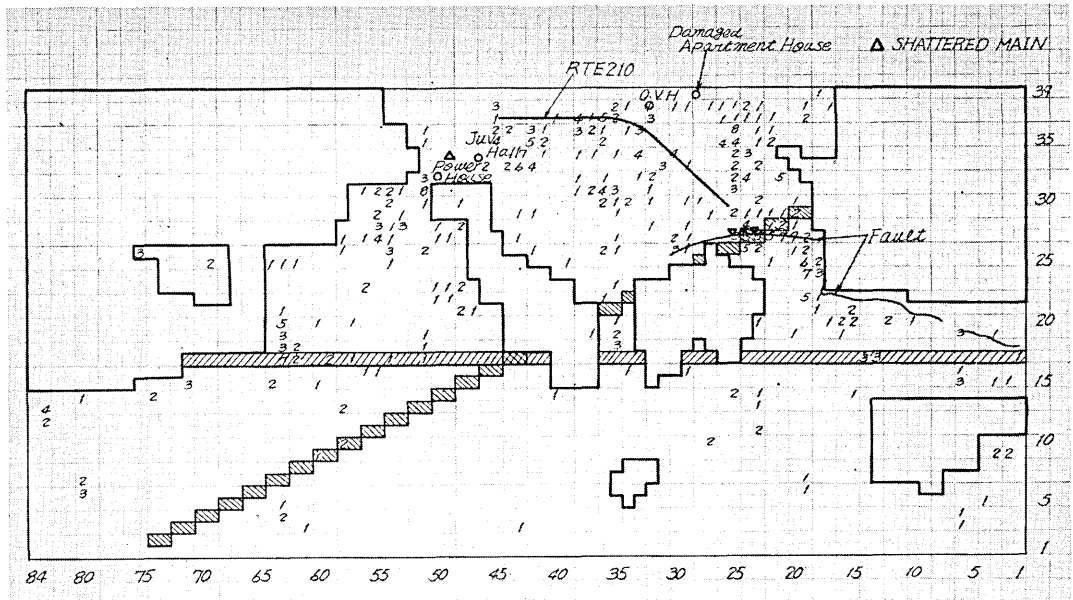


図1

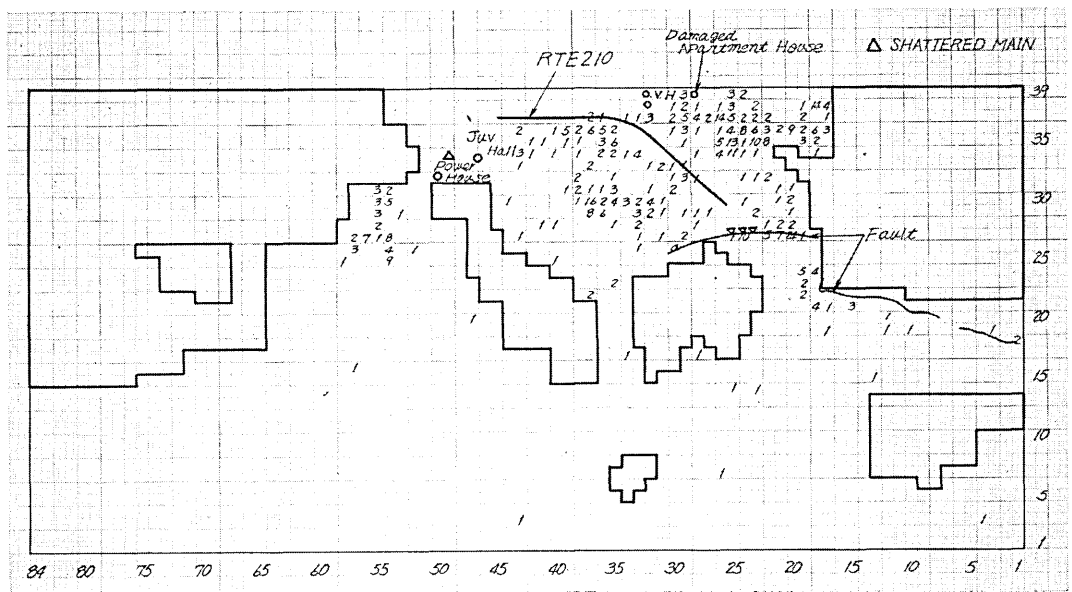


図2

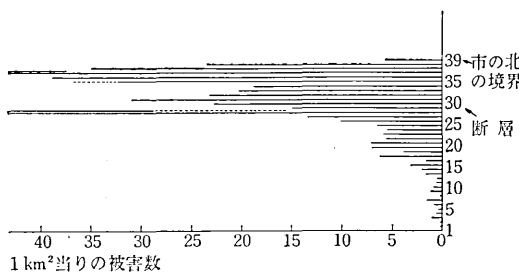


図3

性を調査した。ロスアンゼルス市の水道管の多くは通り
に平行に入っていて、南北からは45°の向き(震源はほ

ぼ真北に位置している)に入っていた。方向別の被害率
を調べたかったので45°に近い向きの管は無視して、主
として南北の方向を向いている管と東西方向の管を図中
にマークし、それについて長さと被害個数と被害地図から
拾い出してみた。これによると、南北方向の管は1
km 当たりに約3.6ヶ所被害があるが、東西方向の管
は1km 当たり1.5ヶ所位の被害率になっていることが
判明した。福井地震の震害報告書によると、南北方向の
管が非常に被害が多くて、東西方向の被害は軽微であ
ったという事と比較するとサンフェルナンドの場合も同じ
ような特性があるという事が、このデータから判る訳

である。ただし被害の少ない所では、この数値が大分減ってきて、震害の方向別による特性が明確になりにくいので、表の値は断層から北の方、すなわち被害率の高い部分についての調査結果である。東西方向の管が南北方向の管に比べて半分以下の被害個数であったという事が判った訳である。これによりロスアンゼルス市の場合は福井地震の場合と非常によく似た性質を示していると結論される。想像をたくましくすると福井地震の場合も地震波動によって地盤がひずみ、そのひずみによってパイプに破損が起こったという風に考えられるのではなかろうか。次に日本で過去の地震によって 1 km 当たり埋設管にどの位被害個数があったかという事はまだ発表されていない。そこでいくつかの地震によるガス管被害報告を集め、それについて被害の個数を調べてみた。表 1 が日本の例である。

表 1

地震名	1 km 当りの破壊件数	材 料	被害地
KANTO	2.55	CAST IRON	TOKYO
KANTO	0.94	STEEL	TOKYO
KANTO	9.83	CAST IRON	YOKOHAMA
HYUGANADA	0.22	STEEL	MIYAZAKI
NIIGATA	0.88	STEEL	NIIGATA
NIIGATA	2.39	CAST IRON	NIIGATA
TOKACHI-OKI	0.55	CAST IRON	HACHINOHE
TOKACHI-OKI	0.99	STEEL	HACHINOHE
TOKACHI-OKI	9.21	CAST IRON	TOWADA
TOKACHI-OKI	0.90	STEEL	TOWADA
TOKACHI-OKI	0.49	STEEL	HAKODATE
TOKACHI-OKI	0.34	CAST IRON	HAKODATE

ガス管は水道管に比べると施工が可成り注意して行なわれているので、却って地震の被害を調べるには、水道管より良いのではないと思われる。表の最も左の列は地震の名前を示している。関東とか福井とか日向灘、十勝沖、などである。第 3 列は鑄鉄管か鋼管かの材質上の仕分で、被害率も埋設管の材質別に整理した方がよいと考えた。同じ東京でも鑄鉄管と鋼管といろいろ使われていて、その材料別もいろいろと分類してみた。一番右の列はその時に被害のあった市の名前である。同じ十勝沖でも八戸で被害が起こった場合と、十和田で起こった場合と函館で起こった場合とに分けて整理した。表 1 で特徴的だと思われるのは鑄鉄管と鋼管との被害率が可成り違っている点である。同じ関東地震で鑄鉄管の 2.6 に対して鋼管はせいぜい 1 位という事である。ただ逆の事もあり、例えば十勝沖地震のように鋼管の方が逆に多くなっているという例もないわけではない。これは地質条件も関係していると思われる。全体の平均で判断すると大体鋼管の場合は 1 km 当たりの被害件数が 1 近辺の値に対し鑄鉄管の場合は 2 を越す被害が出ているといえると思う。

3. 福井市内の地盤調査

福井市の場合には震央が市から北に数 km 離れた所にあった。地震当時 (昭和 23 年) の水道管は大体 2 km 四方の所に敷設されていた。昨年、市内のボーリングのデータを集め、資料不足の 4 点を選んで新たにボーリングデータをとった。大体当初考えたのは、福井市の南側に小高い山があり、北方に九頭竜川が流れているのでおそらく沖積層が北に向って、次第に深くなるだろうと考え、この沖積層の厚さの変化が原因して、市の水道管が南北方向に非常に被害を受けたと想像した。まず既往のボーリングのデータを集めた。しかし集めたデータでは沖積層厚はほぼ均一 (一部に急変しているデータもあった) で、予想と全然異なっていた。それで市内 4 ケ所のボーリングを臨時事業費で追加して行い、十分地層を精査することにした。その結果によっても実はあまり特殊な現象は出てこなかった。図 4 に 4 地所の柱状図を示す。大体地表から 35 m ~ 31 m の所に固い砂礫層が出ていて、その上はシルトと砂との互層になっている。既往のボーリングデータなどを総合すると福井市内の地盤は大体 30 m 位の所に固い砂礫層があり、その上は砂とシルトの互層になっているという事が非常にはっきりしてきた。このために当初考えたこの地盤の差が震害の原因であるとするには矛盾があり結局サンフェルナンド地震と同じで、震源から出た地震波が非常に大きな振幅で地盤を振動させ、その結果地盤のひずみと一緒にパイプもひずんだという風に考えるべきではないかと考える。ところが、そこで問題は震央から距離が近い所で地盤がどれ位ひずむかということであって、しかもこの問題は地震学でもあまり進んでない領域である。そこで止むを得ず、ひずみもとのデータになる地盤の変位を加速度記録を使って何とか探り出そうという作業を一方において行なった。加速度記録を 2 度積分して出てくるドリフト分を 3 次の多項式で除く方法を開発し、十勝沖地震における八戸、青森、函館の 3 つの加速度記録を積分し、補正法を適用して変位振幅を求めたが、満足な解が得られなかった。現在開発した補正後の問題点の探究と解決に努力しているところである。まず使用した加速度記録の長さ (時間的) と誤差との相関関係について調べることにしている。

4. 埋設管の軸方向ひずみの解析

水道管の震害の原因には 2 種類あることは生産研究の臨時事業に関する報告中にも述べたとおりである。1 つは地震波が伝わり、特に震央から距離があまりない所では地盤が可成りひずんできて、地盤のひずみによって管がひずんで、破損に到るものである。他の 1 つは震央からの距離は可成り大きくても関東地震級になると地盤の変位応答が表層の相違によって変化し、管に軸方向のひずみが生じ、震害が出てくるものである。例えば関東地震における水道管の被害特性を見ると丸の内から

調査名: 福井市内地質調査 (三秀プール)
 ボーリング地名: 福井市照手 3-1-1
 調査期間: 46 年 11 月 (8 日間)

調査名: 福井市内地質調査 (旭小学校)
 ボーリング地名: 福井市手寄 2-2-5
 調査期間: 46 年 11, 12 月 (6 日間)

調査名: 福井市内地質調査 (小学校)
 ボーリング地名: 福井市東明里 13-14
 調査期間: 46 年 12 月 (8 日間)

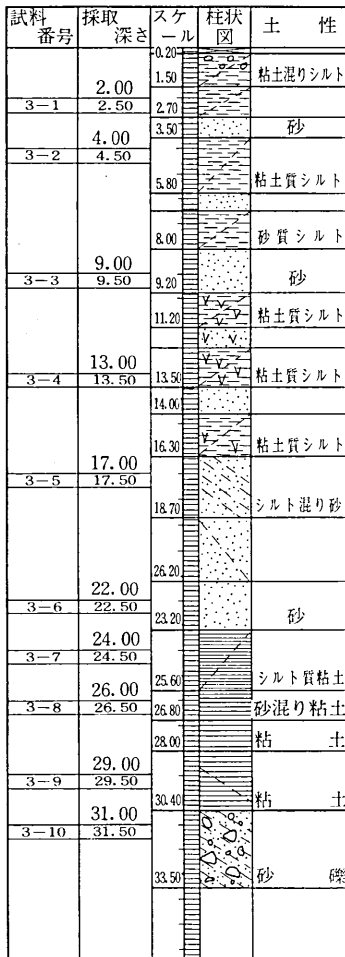


図 4-1

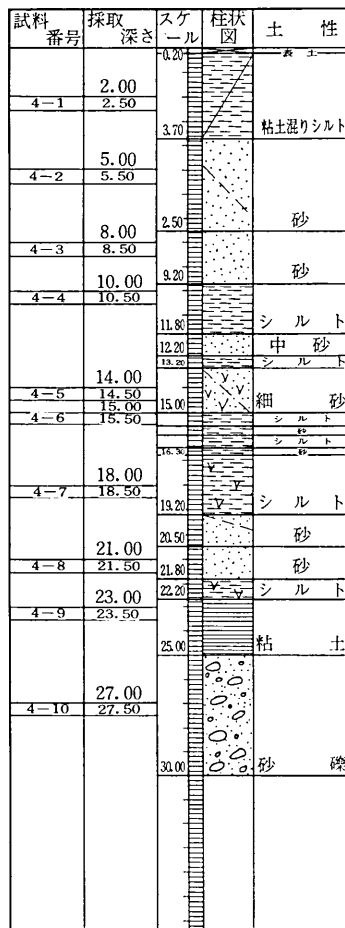


図 4-2

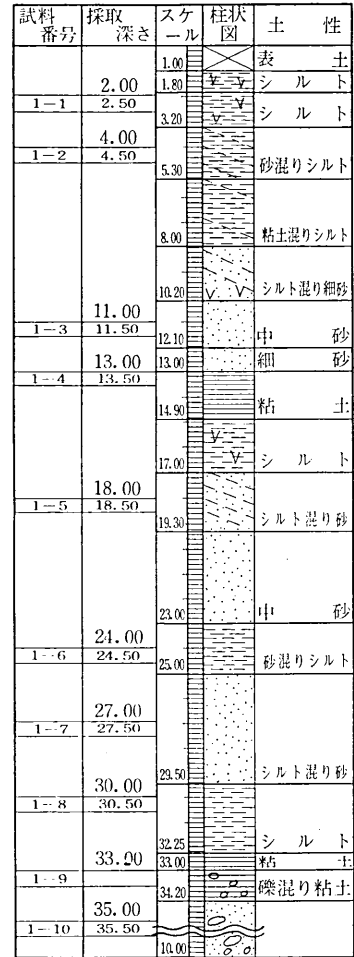


図 4-3

芝にかけて被害率が非常に高かったのは、この地域がローム層から沖積層に移る中間の領域にあり、そのために地震動が異なっていたためと考えている。また同様な例は十勝沖地震(1968 年)の青森の水道管の震害についても発生している。平面的に相異なる 2 層の地盤があり一方の地盤が非常に硬い地盤で、他の方が、非常に軟らかい地盤だったとし、両者をパイプラインが貫通しているとする。地震の時に硬い地盤の変位振幅が小さく、軟らかい地盤のそれが大きくなるので両者を貫通している管には大きい軸力が発生する。ここに述べる計算は第 2 の原因に属する性質を調べるために行なったものである。前回には¹⁾、仮りに第 1 の原因の地震波動と第 2 の原因の地盤の硬軟の相異による相対変位とは影響範囲および振幅が同じであるとした時に管の曲げひずみにより軸ひずみの方が大きくなることを述べた。今回は軸ひずみの

みに注目して、地震入力地層の下面から入るとして地表の振幅がいくらになるだろうか、また影響範囲は一体どの程度であるかという事を求めるために行なったのが次に述べる計算である。シュミレーションモデルとしてあまり仮空な物でも具合悪いので、硬い方の地盤は大体三浦半島を主に形成して居る土丹層が、軟らかい地盤は沖積層みたいなものを考え、その下の面は土丹層があると仮定した。沖積層としては下町の木所深川の地盤というものを想像してモデルに作っている訳で、層厚は一定と考えた。計算には矩形を単位とする有限要素法を用いたわけであるが、弾性係数の値をどうするかという事が一番重要であった。弾性係数はせん断波の速度から決めた。せん断波の速度については多くのデータがあり、土丹層は 600m/sec とした。だんだん地盤が軟らかくなってきてヤング係数が減ってくと卓越振動周期が伸びてきて、地震による応答が変わってくるので、軟らかい地盤の方は 65 m/sec からはじまり 120, 160, 200 m/sec の

1) 久保慶三郎 “生産研究”

調査名: 福井市地質調査 (西公園)
 ボーリング地名: 福井市花月 1 丁目 3 地系
 調査期間: 46 年 11 月 (8 日間)

試料番号	採取深さ	スケール	柱状図	土性
		0.15		シルト
		1.00		粘土
	3.00	2.10		砂混りシルト
2-1	3.50	2.90		
		3.60		シルト
	5.00	4.50		
2-2	5.50	6.30		粘土
	7.00			
2-3	2.50	8.60		砂
		11.40		シルト
	13.00	12.30		砂
2-4	13.50			
		15.00		シルト
		15.60		砂混りシルト
		16.20		シルト
		12.50		砂
	19.10	19.10		シルト混り砂
2-5	19.50	20.10		砂
		21.00		シルト
	22.00	21.20		砂
2-6	22.50			
	24.00	23.50		砂礫シルト
2-7	24.50			
		26.00		シルト混り砂
2-8	27.50			
	29.00	29.00		粘土
2-9	29.50	30.10		砂混り粘土
	31.00			
2-10	31.50			
		33.50		砂 礫

図 4-4

4 種の速度について、計算を行なった。せん断波の速度が決まり、ポアソン比を 0.452 (多くの実験値から推定した) とするヤング係数が自ら決まり、約 200~2,000 kg/cm² までのヤング係数を用いて計算したことになる。硬い地盤のヤング係数は 14,000 kg/cm² となる。層厚が 25 m の沖積層を考えているので卓越周期は約 1.5 秒からはじまり 0.5 秒までになる。入れた地震波はエルセントロ記録の NS 成分 (1948 年 5 月 16 日) を最大加速度=100 gal として用いた。地盤の振動加速度を述べると、下底に 100 gal で入れた時、地表の加速度は約 120, 200, 270, 370 gal という値であった。結局卓越周期が短くなる、換言すればだんだん硬くなると地盤の表面の加速度も上ってくる。矩形エレメントを用いた有限要素法で、ある時間におけるパイプの軸力の分布を計算した結果を図 5 に示す。

図中に + と出ているのは引張りで、点線が圧縮であ

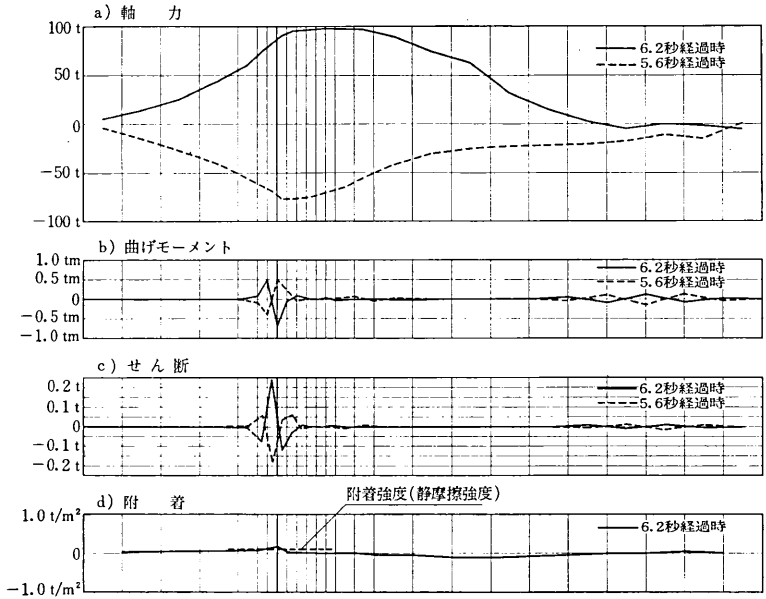


図 5

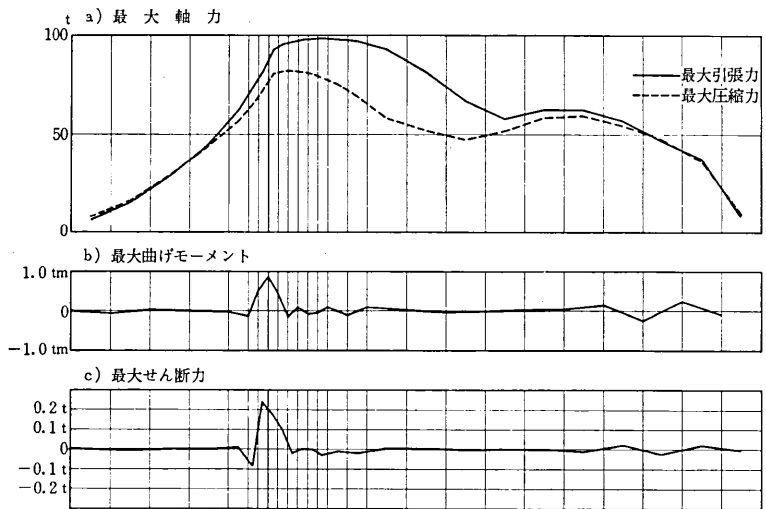


図 6

る。計算による軸力は最も地盤が軟らかいときに 110 ton 位の値が出ている。地盤が硬くなるに従って軸力が減少する傾向にある。これは 2 つの作用に原因すると考えられる。1 つは加速度は確かに上ってくるが、地盤が硬くなるに従って変位応答は小さくなっていく。他の 1 つは後で述べるように地盤が硬くなると影響範囲が伸びてくるためである。以上の 2 つの作用で地盤が良くなるに従って軸力が 110 ton から 77 ton 位まで減ってきているという事が判る。図 6 は時間に無関係に最大値のみの分布を示したものである。

軸力の分布を見ると、硬軟の境界近くで最大値がでて、境界から離れるにつれて軸力は減少している。硬軟地盤の相対変位によって軸力が発生し、境界面から離れるに

つれて軸力は減少しているの、地盤によって軸力への影響範囲が変わる傾向を示している。影響範囲を数値化するため、有効長 L を次のように定義した。すなわち地盤の差異による相対変位 S が与えられたとき、軸力 N を生ずるに必要な換算長さを L とすると、 $L = EAS/N$ (E はヤング係数、 A は断面積) で表わされる。

地層厚 25m の本計算例の場合は、次表のごとくなる。地盤のせん断波速度 V_s とパイプの換算長 L との関係を示したのが図 7 で、せん断波速度が 65 m/sec より小さい範囲では、どこまで外挿できるか問題であるが、本計算のような仮定では地盤が軟らかくなっても換算長はそれほど減少しないように思われる。

表 2

V_s (m/sec)	65	120	160	200
L (m)	71.5	88.9	130	165

この結果から、地層厚が厚くなると、地盤が軟らかくなったのと同じ効果があるので、有効長は短くなる傾向にあると考えられる。いずれにしても、有効長は可成り長いので、埋設管の軸応力としては降伏点応力以上になるためには相当に大きい地盤の相対変位を必要とすることになる。

5. あ と が き

シュミレーションモデルによる軸力の計算は地盤を弾性としていること、および周囲の土と管との間には相対ずれがないものと仮定しているなど、不十分な点があるが、地盤の悪い方が大きい軸ひずみが発生する特徴を明

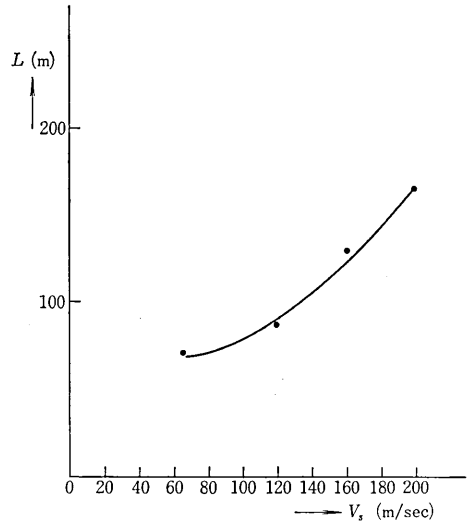


図 7

らかにできたのは過去の震害経験と符合する点は興味がある。

また、砂と鋼管との動摩擦についての実験を行なったが、実験が緒についたばかりであるので、詳細の発表は次回に行ないたい。加速度記録から変位振幅を求める方法についても、方法論的検討を行なっていて、まだ実用化には至っていない。この問題も早く解決し、埋設管の耐震設計の有力な資料にしたいと考えている。なおパイプの軸方向の計算については日本交通技術 KK の中島忠行氏に負うところが大きい。この紙面を借りて深謝する次第である。 (1972 年 12 月 15 日受理)

