

軟弱地盤におけるコルゲートパイプの現場実験

熊本大学工学部	教授	吉	村	虎	藏
”	助教授	川	本	朧	万
”	”	平	井	一	男
九州地方建設局	技官	江	崎	正	敏

緒 言

コルゲートパイプの国内における使用状況は逐次高まりつつあるが、これに関する実験資料としては本邦では日本道路公団と富士製鉄KKとの共同実験が見られるだけのようである。米国では戦前から広くこの工法が採用されていることが幾多の文献で見られるにもかかわらず、本邦ではこの工法に対する信頼度が現在必ずしも高く評価されていないように思われる。このような事情であるので今般、二級国道島原宇土線の軟弱地盤に施工の長径3.15m、短径2.20m、板厚3.2mmのパイプアーチ型6セグメント組合せのコルゲートパイプについて一連の現地実験を行い、今後この種工法の設計施工の参考に資するためこの実験を行つた。

実験は、パイプ設置後盛土完了までの期間におけるパイプ軸線のキャンパーおよび内径の変化、完工後の自動車あるいはブルドーザー荷重によるパイプの応力変形の測定、および一連の土質試験に大別される。

I. コルゲートパイプ工事の概要

現場附近はいわゆる宇土軟弱地盤地帯であるため、昭和34年11月より12月末に至る期間既にサンドパイルが施工され、逐次盛土工事が進められていたが一次圧密沈下は未了の状態にあつた。また図-1に示す如く、パイプ設置位置は灌漑用水路であるためサンドパイルは施行されていない。パイプ設置にあつては、まづ水路締切の後パイプ底面より約1.5mをopen cutし、パイプ基礎を厚さ0.6mの緑川砂によつて置換改良し、昭和35年2月12日にパイプが設置された。パイプの組立およびキャンパー、鉛直内径の上げ越量の決定等はメーカーの技師の監督指導によつて行われたが、木材支柱挿入にあつてはジャッキ等を用いなかつたようである。これらの工事中の写真-1、2に示す。なお簡単な止水鋼板がパイプの両端の中心の3ヶ所に設けられた。

パイプ埋戻し時には、150kgパイプロランマーによつて1層30cm厚さ毎に締固めが行

われ。パイプ天端より上部の盛土はダンプカーおよびブルドーザー (D-80) によつて盛土・締固めが行われた。この場合土運搬の都合上、道路中心より北側半分の盛土工事が先に着手され、この半分側の盛土がパイプ天端まで進捗した後、南側のパイプが設置完了した。盛土高はパイプ天端より2.3 m、この盛土工事の期間中数回にわたつて、パイプの沈下状態およびその内径の変化の測定が行われ、またこの状態 (路床土・舗装なし) で3月15日に自動車等による載荷試験が実施された。

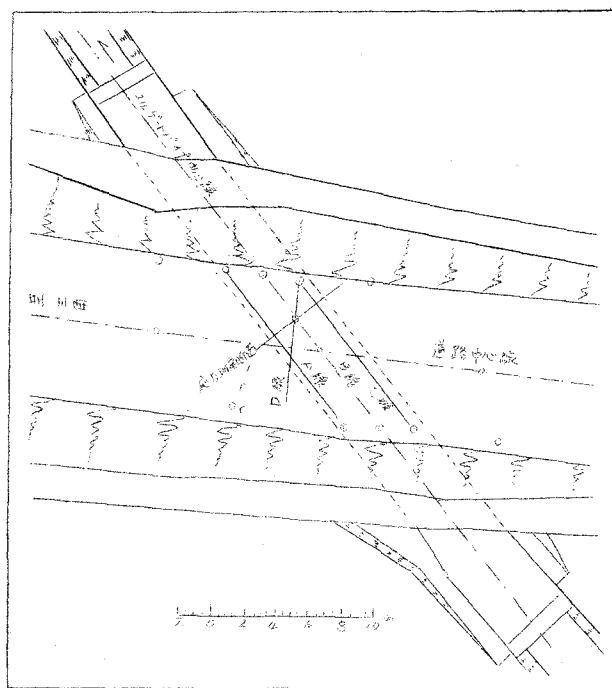


図-1 現場平面図

Ⅱ、応力測定について

A、応力測定の方法

パイプの応力測定点は図-1の平面図に示す断面に34点を選んだ。その測点名を図-2に示す。1~12と1'~12'とは同一のホルゲートの山に、21~25と21'~25'はその隣りの山に選び、新興S11ゲージをSP-3接着剤により貼布した。測定器は完工後の静荷重 (自動車) 試験では新興通信P歪測定器 (10点切替) と共和無線SM歪測定器 (24点切替) を用い、自動車およびブルドーザーの動荷重試験では共和無線DM歪測定器と同電磁オツシログラフを用い

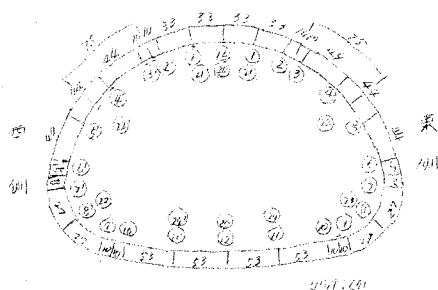


図-2 応力測定点

た。

応力測定は、(1)パイプの支柱撤去の直前・直後における応力変化、(2)自動車処女荷重による応力の発生状態と残留応力、(3)自動車の繰返し载荷による応力状態の変化、(4)動荷重応力の測定の4種に大別して行われた。

B、測定結果とその検討

支柱撤去時の測定歪の(時間的)変化を表-1に示す。荷重状態Aの欄はパイプ両側の端部より支柱6本(両端より10.8m内方)が残置の場合の測定断面の歪状態を、Bの欄は同じく4本残置の場合の歪を、Cの欄は完全に支柱を撤去した場合の歪の分布状態を示す。その歪測定時間中の暗渠内部の気温変化は、10.5°C~11.5°Cであつて、この温度変化のための歪の零点移動は $\Delta \epsilon A-B$ 、 $\Delta \epsilon B-C$ の欄に僅かに見られるようであるが、この量がすべて零点移動量であるとは思われない。何となれば、摘要欄に記したように、測点1、10、11、12では発生歪の大きさに比べて $\Delta \epsilon$ の量が大きいので、支柱撤去後これらの点の応力は他の点の応力に比べて時間と共に徐々に進行しているように見うけられ、その他の点でもいくらか歪が進行していると思われるからである。

表-1の結果を図示して図-3が得られる。この図から知られることは、支柱撤去による

表-1 支柱撤去時のパイプの歪測定値

(単位10⁻⁶)

時刻 測点	11.40 ~ 12.40 A	11.40 ~ 13.20 B	11.40 ~ 14.20 C	12.40 ~ 13.20 $\Delta \epsilon A-B$	13.20 ~ 14.20 $\Delta \epsilon B-C$	摘 要
1'	+ 140	+ 170	+ 190	+ 30	+ 20	除々に応力進行
2'	- 12	+ 6	+ 15	+ 18	+ 9	
3'	- 41	+ 32	- 38	+ 9	- 6	
4'	- 42	- 34	- 31	+ 8	+ 3	
5'	- 24	- 16	- 4	+ 8	+ 12	
6'	- 35	- 21	- 11	+ 14	+ 10	
7'	- 46	- 21	- 20	+ 25	+ 1	
8'	- 116	- 120	- 128	- 4	- 8	
9'	- 34	- 33	+ 33	+ 1	0	
10'	+ 19	+ 45	+ 70	+ 26	+ 25	除々に応力進行
11'	+ 25	+ 40	+ 54	+ 15	+ 14	除々に応力進行
12'	+ 376	+ 418	+ 452	+ 42	+ 34	除々に応力進行
1	+ 87	+ 113	+ 136	+ 26	+ 23	除々に応力進行
2	- 17	- 3	+ 6	+ 14	+ 9	応力変化なし
3	- 36	- 26	- 20	+ 10	+ 6	
4	- 27	- 14	- 10	+ 13	+ 4	
5	- 9	+ 6	+ 15	+ 7	+ 9	
6	- 18	- 1	+ 10	+ 17	+ 11	
7	- 94	- 90	- 88	+ 4	+ 2	
8	- 90	- 94	- 103	- 4	- 9	
9	- 18	- 15	- 19	+ 3	- 4	
10	- 16	- 2	+ 2	+ 14	+ 4	
11	- 50	+ 67	+ 81	+ 17	+ 14	除々に応力進行
12	+ 175	+ 223	+ 261	+ 48	+ 38	除々に応力進行

(註) Aはパイプ端部の支柱6本残 Bはパイプ端部の支柱4本残 Cは支柱の撤去完了
- 4 - 3 -

応力分布状態は、A、B、Cの三つの状態とも定性的には変化がないということであつて、その応力状態はあたかもパイプの鉛直直径方向に外部からパイプ軸に沿つて線荷重を加えた場合のそれに似ている。しかもクラウンの応力の約2倍の応力がインパートに生じ、7~8~9、7'~8'~9'の曲率半径の小さい部分においてもかなり大きい応力が観取される2~3~4~5~6、2'~

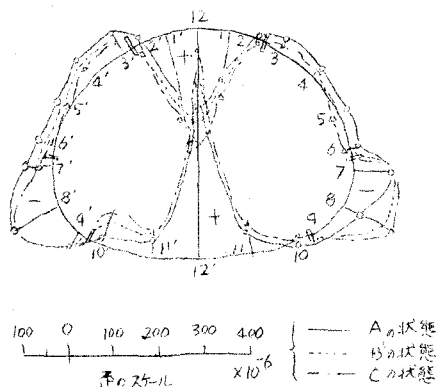


図-3 支柱撤去による歪

3'~4'~5'~6'の部分は締固めた側方土砂の抵抗が有効に働いていることが知られる。クラウンおよびインパートにおける最大応力はそれぞれ約500, 900 kg/cm²であつた。その隣りのコルゲートの山の測点21~25、21'~25'の測定値においても上記と同様の結果が得られた。

表-2 自動車静荷重による歪

(単位 10⁻⁶)

時刻 荷重 測点	14.30	14.43	14.53		15.27
	a	b	b	bの平均	c
1'	+ 23	+ 24	+ 24	+ 24	+ 18
2'	+ 13	+ 17	+ 12	+ 15	+ 12
3'	+ 10	+ 1	+ 4	+ 3	0
4'	- 28	- 36	- 24	- 30	- 37
5'	- 9	- 21	- 19	- 20	- 24
6'	- 10	- 24	- 18	- 21	- 23
7'	- 15	- 27	- 24	- 25	- 25
8'	- 5	- 19	- 19	- 19	- 19
9'	+ 28	+ 23	+ 14	+ 18	+ 14
10'	+ 28	+ 26	+ 18	+ 22	+ 20
11'	+ 15	+ 18	+ 17	+ 18	+ 17
12'	+ 15	+ 17	+ 18	+ 18	+ 15
1	+ 13	+ 25	+ 15	+ 20	+ 22
2	+ 19	+ 19	+ 13	+ 21	+ 19
3	+ 5	+ 2	+ 3	+ 3	+ 5
4	- 18	- 24	- 19	- 22	- 22
5	- 3	- 11	- 14	- 23	- 15
6	- 4	- 15	- 15	- 15	- 18
7	- 11	- 34	- 36	- 35	- 34
8	+ 2	- 5	- 10	- 7	- 4
9	+ 28	+ 32	+ 23	+ 28	+ 30
10	+ 32	+ 37	+ 21	+ 29	+ 26
11	+ 20	+ 23	+ 20	+ 22	+ 22
12	+ 19	+ 25	+ 18	+ 22	+ 18

自動車静荷重による応力測定は、図-1の測定断面の中心杭を中心として、(a)。支柱撤去後の処女荷重として自動車1台を西向きに載荷し、その後輪をD-線上に置いた場合、(b)。中心杭を中心として自動車2台を西向きに載荷しその後輪をD-線上に並べた場合、(c)。荷重 (p) の状態で5往復転圧した場合の応力状態の変化、(d)。中心杭を中心として自動車を2台載荷し、その後輪をB-線上に並べた場合の数種について行つた。自動車は車輪間隔 186 cm、軸間距離 430 cm、前輪重量 4.1 t、後輪重量 11.0 t、総重量 15.1 t、であつた。

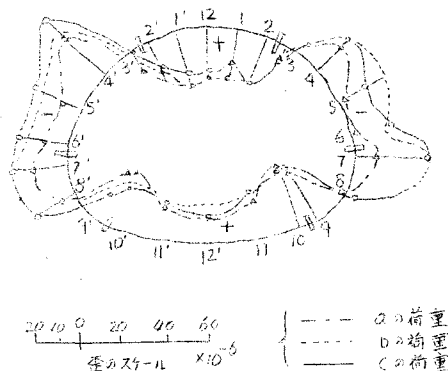


図-4 自動車荷重による歪

自動車静荷重により発生した歪を表-2に示した。表-2を図示して図-4を得た。3種の荷重による応力分布は、いづれも定性的には同じであつて、支柱撤去による応力状態とは全く相異していることは注目すべきである。この場合、側方土圧の効果が極めて大きく働いて、3~12~3'、8~12'~8'、3'~5'~8'、3~5~8の4群の等分布状態の応力が生じていることは興味あることであり、なおセグメントの接手の存在 (接手附近は接手がピン結合状態として働き、応力が零に近いと予想されるがそのこと) が認められず、パイプは連続閉合断面のパイプとして1体となつて働いていることも注目すべきことと思われる。

自動車静荷重試験で得られた応力は最大 50~60 kg/cm²であつた。また、支柱撤去直後の処女荷重 (自動車1台) による応力は図-4に見るように、その後の2台の場合に比して小さく、パイプは支柱撤去後も安定な状態にあることが判明した。

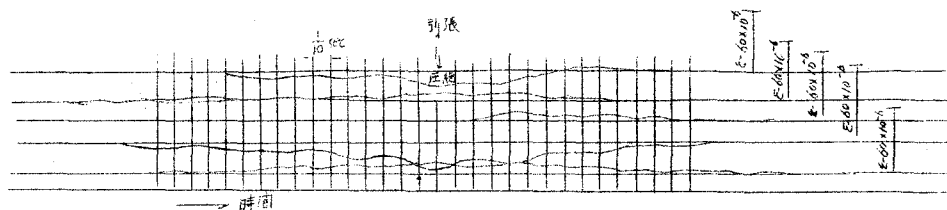


図-5 自動車による動的歪記録

自動車荷重によつて生じた残留応力に関する資料を表-3に示す。載荷の回数と共に残留歪は小さくなり遂に第3欄以降ではそれが測定誤差程度となり、パイプは弾性的に働いていることが知られた。また、後の動荷重試験からも同様の結果が得られた。

動荷重試験では、ブルドーザー (D-80) を東から西に約 7 km/h の速度で通過せしめた時と、自動車1台を約 2 km/h 速度で走行せしめたときの応力を6点、電磁オシログラフで記録した。自動車走行の場合の歪の記録の一例を図-5に示す。またこれらの記録から各測点の最大歪を求めて表-4を得た。自動車およびブルドーザー (T2) の場

表-3 自動車静荷重による残留歪 (単位 10^{-6})

時刻 測点	14.30 ~	14.43 ~	14.53 ~	15.04 ~	15.17 ~	15.27 ~
	a の前後	b の前後	b の前後	b の荷重 5回往復	左に同じ	c の前後
1	26	23	14	8	5	14
2	12	10	4	2	5	5
3	11	- 2	- 1	2	3	4
4	- 14	- 16	- 5	- 4	2	13
5	3	- 4	- 2	- 4	3	- 6
6	3	- 1	3	- 2	- 1	1
7	4	5	2	- 1	- 5	- 2
8	8	1	- 1	- 2	- 4	- 1
9	23	16	4	3	7	3
10	27	18	10	9	7	12
11	9	6	2	5	2	3
12	10	3	6	6	9	1
1	10	19	10	5	6	10
2	14	8	4	3	3	4
3	3	- 2	0	3	1	- 1
4	- 9	- 8	- 3	0	0	- 5
5	6	3	1	- 2	- 1	1
6	5	1	4	- 7	- 1	1
7	- 1	2	2	- 5	0	3
8	6	6	1	9	- 1	6
9	16	13	2	8	4	7
10	24	24	10	4	5	12
11	14	10	6	7	2	6
12	20	24	13	10	9	- 12

表-4 動的歪の最大値 (単位 10^{-6})

測点	ブルドーザー		自動車
	T ₁	T ₂	
4	- 23.8	- 3.6	- 15.0
10	+ 10.1	+ 5.2	+ 7.0
25	+ 13.0	+ 8.8	+ 9.3
7	- 35.1	- 20.2	- 23.2
12	- 6.1	+ 6.2	+ 5.0

(註) ブルドーザーの場合は T₁ の時刻の応力とそれより約5秒おくれた T₂ の時刻の応力とは表のごとき差が見られる。

合の応力状態は静荷重試験のときのそれと同様で、応力値も表-2の荷重bの場合の約50%の値を示す。しかしながらブルドーザー(T₁)(T₂よりも約5秒前の荷重状態)では、これらと応力分布状態が相異し、応力値も最大70kg/cm²に達し、またクラウンでは僅かながら圧縮応力を生じた(自動車走向の場合は図-5に示すようにこれに対応する応力状態が得られなかった)。従つて、コルゲートパイプはブルドーザーの如き荷重では相当大きな土攪りを有する場合でも、その荷重位置によつて応力状態が極度に相異することがあることが知られた。載荷試験中の写真数葉を写真3、4、5に示す。

Ⅲ、パイプの変形測定について

パイプの絶対変形を盛土期間の長期にわたり(あるいは短期間においても)この現場で測定することは非常に困難を伴うものであるから、応力測定断面における数方向のパイプ内径の変化の測定とパイプ底面のキャンバーの変化の測定を、盛土工事期間中に数回および支柱撤去前後と自動車静荷重試験の場合において行つた。

A、内径の測定

内径の測点は応力測定断面と同一断面に図-6の如く選んだ。パイプ組立後から盛土期間中は図-6に示す測点間1~7、2~8、3~9、4~10、5~11、6~12等の内径の変化を測定し、さらに支柱撤去前後における内径の変化測定には1~7、2~8、4~10、6~12の測点を用いた。内径測定には写真-6の如く充分乾燥した45×45mmの「かや」の先端に1/20mmよみの「のぎす」を取付け、他端にはビスをつけたものを使用した。

盛土期間中の各内径の変化を表-5に示す。盛土の増加に伴う内径の変化を図示して図-7

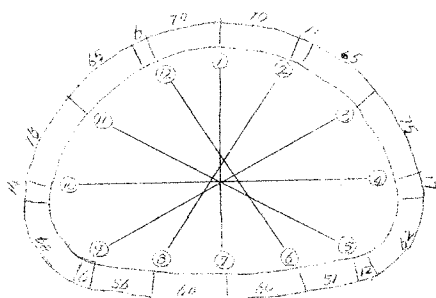


図-6 内径測定点(盛土中)

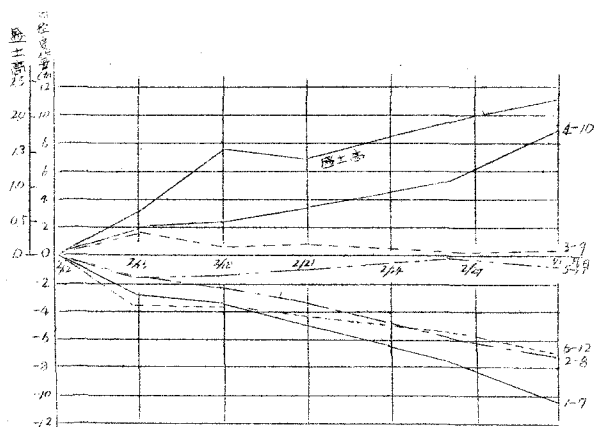


図-7 盛土期間中の内径の変化状況

表-5 盛土期間中におけるコルゲートパイプ内径測定値

内 径 月 日	2 / 1 2	2 / 1 5	2 / 1 8
1 ~ 7	213.640 cm (0)	210.800cm (-2.84)cm	210.250cm(-3.39)cm
2 ~ 8	230.280 (0)	228.830 (-1.45)	228.070 (-2.21)
3 ~ 9	278.575 (0)	280.255 (+1.68)	279.233 (+0.658)
4 ~ 10	301.150 (0)	303.230 (+2.08)	303.585 (+2.435)
5 ~ 11	279.395 (0)	277.855 (-1.54)	278.065 (-1.33)
6 ~ 12	231.405 (0)	227.875 (-3.53)	227.970 (-3.435)
盛 土 高	0 m	0.645 m	1.545 m

内 径 月 日	2 / 2 1	2 / 2 6	3 / 1
1 ~ 7	208.755cm(-4.885)cm	206.250cm(-7.590)cm	203.165cm(-10.475)cm
2 ~ 8	226.970 (-3.31)	224.825 (-5.755)	223.035 (-7.245)
3 ~ 9	279.448 (+0.873)	278.893 (+0.318)	278.950 (+0.575)
4 ~ 10	304.655 (+3.505)	306.475 (+5.235)	308.165 (+7.015)
5 ~ 11	278.547 (-0.848)	279.308 (-0.087)	278.675 (-0.720)
6 ~ 12	227.155 (-4.250)	226.070 (-5.335)	224.570 (-6.865)
盛 土 高	1.407 m	1.934 m	2.242 m

(註) カッコ内は2 / 1 2 よりの変化量を示す。

が得られる。なおパイプの内径の変化量を測定5~6~7~8~9が不動として描けば図-8のようになる。この変形量はパイプのスケールの5倍のスケールで描かれている。これらの図から次のことが知られる。

(1) パイプ設置直後から盛土(パイプ天端よりの高さ)2.24mまでの間に、鉛直内径に-10.48cm、水平内径は+7.02cmの変化を生じた。この変形は支柱を施したまゝにおける変形である。支柱の頂部の変形の状態を写真-7に示す。

(2) 内径の変化は盛土の初期において著しく、また必ずしも左右対称に変形しない。このことは図-7の3~9、5~11の折線に見られる通りで、パイプが僅かに側方に転つたような様相を呈している。

(3) 支柱撤去によるパイプの変形量は表-6に示す通りで、鉛直内径が-1.54cm、

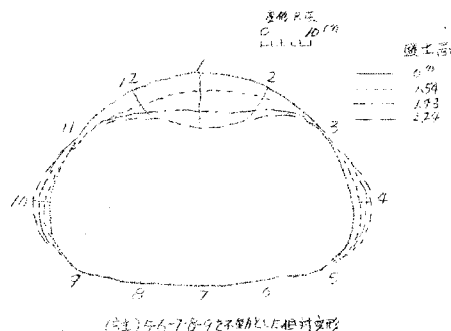


図-8 盛土期間中におけるコルゲートパイプ変形図

水平内径は+ 0.64 cm であつた。

表-6 支柱撤去前後におけるコルゲートパイプ内径測定値

内 径	支 柱 撤 去 前	支 柱 6 本 残	支 柱 撤 去 後
1 ～ 7	198.645 cm (0)	198.040 cm (-0.605) cm	197.105 cm (-1.540) cm
2 ～ 8	224.510 (0)	224.465 (-0.045)	-
4 ～ 10	312.245 (0)	312.405 (+0.160)	312.885 (+0.640)
6 ～ 12	218.710 (0)	218.525 (-0.185)	-

自動車静荷重による上記断面の鉛直内径の変化を、写真-4の如く三脚スタンド上の1/10 mm 読みダイヤルゲージによつて測定し、同断面のパイプ底面の上下動をカセットメーター(写真-5)で測定した。これらの資料を表-7に掲げる。

表-7 自動車荷重によるコルゲートパイプの変形測定(応力測定断面)

荷 重	カ セ ト メ タ ー※	各荷重段階に おける変化	最 初 からの 変 化	備 考
o	909.3 mm		0 mm	⊖はレベルの減少を示す
a	908.5	- 1.0	- 1.0	
o	909.0		- 0.5	
b	908.6	- 0.4	- 0.7	
o	909.2		- 0.1	
b	908.8	- 0.4	- 0.5	
o	909.4		+ 0.1	
o	908.7	- 0.7	- 0.6	5回転圧後
o	907.4	- 1.5	- 1.9	5回転圧後
c	907.0	- 0.4	- 2.3	
o	907.5		- 2.0	

荷 重	ダ イ ア ル ゲ ー ジ ※※	各荷重段階に おける変化	最 初 からの 変 化	備 考
o	0.09 mm		0 mm	⊖はレベルの減少を示す
a	1.20	1.11	1.11	
o	0.93		0.84	
b	2.50	1.57	2.41	
o	1.80		1.71	
b	3.10	1.30	3.01	
o	2.50		2.41	
a	2.88	0.38	2.79	5回転圧後
o	3.21	0.33	3.12	5回転圧後
c	4.73	1.52	4.64	
o	4.00		3.91	

(註) ※ パイプ底面レベルの変化測定

※※ 鉛直方向内径の変化測定

B、パイプの沈下測定

盛土期間中および支柱撤去によるパイプ底面の沈下を測定するため、図-9に示す如き1、2、3……8、(9)のパイプ底面の測点のレベルを測定した。測点8～9の間は盛土の途中パイプが継ぎ足された部分であつて、この部分のレベル変化は図示しなかつた。支柱

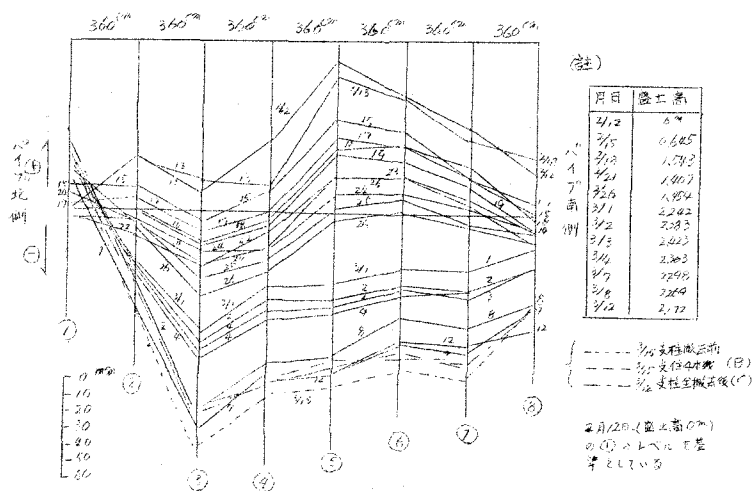


図-9 コルゲートパイプ沈下状況

は図の測点およびその中間に 1.8 m 間隔に設けてある。

図-9 は、盛土高がパイプ天端より 0 m のとき (2 月 12 日) の測点 1 のレベルを零として、これに対する相対的の変化を示している。2 / 12 の太線が示すように、このとき測点 5 のキャンバーは + 8.9 cm (設計では 25 cm)、測点 3 は既に沈下している。盛土の増加と共に 2 / 12 の折線に相似のキャンバーを保ちつつ 2 / 26 頃まで沈下して逆キャンバーがついた形となるが、その後盛土が 2.0 m を越した場合には中央部の沈下が増大し、パイプ端部は浮上った傾向を示している。3 月 15 日支柱撤去前における端部の浮上りは 3.0 cm、中央の沈下は 19.5 cm であり、支柱撤去後は端部浮上りは 3.4 cm、中央部の沈下は 18.5 cm に変化した。これらを図-9 に併記した。

Ⅳ、土質試験

土質試験は次の各項について行つたが、紙面の都合やパイプの沈下の理論的研究について稿を改めたいので、こゝでは省略する。

A、基礎地盤の土質調査と土質試験

- (1) 真比重試験、(2) 粒度試験、(3) 間隙比試験、(4) 液性塑性限界試験
- (5) 単純圧縮試験、(6) 圧密試験、

B、盛土の土質試験

- (1) 真比重試験、(2) 粒度試験、(3) 突固め試験、(4) 平板載荷試験

V. 結 論

盛土期間中のパイプの沈下の測定ならびに内径の変化の測定、支柱撤去によるそれらの変化の測定、自動車載荷試験におけるパイプの変形および応力の測定結果から、次のことが言えると思う。

(1) 支柱撤去後のパイプは弾性的に働き、自動車載荷に対しては安全なものと判断されるが、その工法として次の各項が今後この種工事において留意さるべきであろう。

(2) パイプ中央のキャンバーは設計では2.5 cmであるにもかかわらず、測定当初既に中央において8.9 cmとなり、盛土高（パイプ天端より）2.24 mのとき19.3 cmの逆キャンバーを生じた。従つて本工事の如き軟弱地盤では盛土による基礎地盤の最終圧密沈下量の予測や基礎の置換砂の締め固め等に対して充分の考慮が払われるべきである。しからざればキャンバーの不具合の外、パイプの縦方向応力に対して不都合が生ずるおそれがある。

(3) 支柱撤去によりパイプ横断面に発生した応力分布は図-3の通りであるから、パイプ設置時に逆にこの応力に相当するだけ鉛直内径をジャッキ等によつて上げ越し、パイプにプレストレスを与えておけば、支柱撤去時にこのプレストレスが消失され、パイプの応力状態は非常に改良されるわけである。本工事では支柱撤去による応力はクラウン、インバートにおいてそれぞれ約 $500, 900 \text{ kg/cm}^2$ の値を示した。このときの鉛直内径のちぎみは1.54 cm、底面は0.80 cm浮き上つた。なお、これらの変形や応力を減少せしめるためには、パイプの側面の埋戻し土を充分締め固め側方土砂の抵抗を増大することもまた必要と考える。

(4) 支柱は本工事では、写真-7に示すように木材の支圧、曲げ、剪断変形のため盛土期間中において予想以上にパイプの内径の変動を生ぜしめた。頂部の梁2本はその間隔をつめた方が良いのではなからうか。更に附言すれば、本工事における如き極端な支柱の変形を許さないならば、元来木材支保は可縮支保の如き作用をなし盛土期間中に除々にパイプの変形を調整完了して好ましい支保であり、剛性支保は却て避くべきものとする。

(5) 自動車荷重によるパイプの挙動は無接手の閉合断面のパイプの如き応力状態を示し、1.5 t自動車2台載荷の場合の最大応力は約 60 kg/cm^2 、ブルドーザー（D-80）走行の場合最大約 70 kg/cm^2 の応力が記録された。

(6) コルゲートパイプは、その縦方向の剛性が小さく、軽量であるため、軟弱地盤には好ましい工法であるが、上記の如き各項について充分留意さるべきであり、また欲を言

えば、その破壊実験によつてこの種構造物の安全率を究明することはリミットデザインの立場からだけでなく非常に重要なことと考える。

本実験に対して多大の御協力と御厚意を賜つた九州地建熊本工事々務所の関係諸氏、ならびに土質試験を依頼した本学園田頼孝教授に深く謝意を表する。