

ずい道用鋼製アーチ支保工の研究

(第1報 荷重試験の報告)

土木建築課 森 宜 制

数年来落盤事故は相変わらず減っていない。この対策としては構造上幾多の欠陥のある木材支保工の代りに、鋼製アーチ支保工を使用し、さらにこれをコンクリート覆工の中へ埋込むことが最も勝れた方法である。当所において鋼製支保工の研究を行なっているが、まずその第1段階としてV形鋼を用いた実物大のアーチの荷重試験を、ついで約 $\frac{1}{4}$ の縮尺を持つI形、レール、V形等の模型材の荷重試験を行なった。以下にその大要を報告す

る。

1. アーチ支保工の実物大荷重試験

1.1 試験材の種類および断面の諸値

使用した材料は24kg/m および 20 kg/m のV形鋼、37kg/m の古レールで、合計8個の試験をした。表-1にその区分を示す。

図-1にV形鋼の形状を示し、表-2にその寸法および

表-1

試験番号	試験材の種類	接手の種類	荷重の型
No. 1	24kg/m V形鋼	Uボルト型, 可縮	対称, 5点荷重
2	24kg/m V形鋼	Uボルト型, 可縮	非対称, 3点 active, 2点 passive, 無変位
3	20kg/m V形鋼	Uボルト型, 可縮	非対称, 3点 active, 2点 passive, 無変位
4	24kg/m V形鋼	Uボルト型, 溶接	対称, 3点 active, 2点 passive, 無変位
5	37kg/m 古レール	添接板式	対称, 3点 active, 2点 passive, 無変位
6	24kg/m V形鋼	Uボルト型, 可縮	非対称, 3点荷重
7	24kg/m V形鋼	Uボルト型, 可縮	対称, 5点荷重
8	24kg/m V形鋼	Uボルト型, 溶接	対称, 3点 active, 2点 passive, 変位

び断面の諸値を示す。

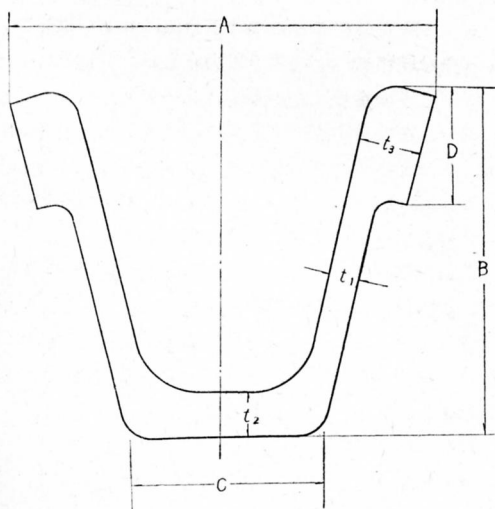


図-1 V形鋼断面

表-2 断面の寸法および諸値

種類	単位重量 kg/m	寸法 mm						
		A	B	C	D	t ₁	t ₂	t ₃
VB-24型	24.2	123	99	56	34	9	13	18
VB-20型	20.0	117	97	58	30	7	12	15

種類	断面積 cm ²	慣性モーメント cm ⁴		断面係数 cm ³		回転半径 cm	
		I _x	I _y	W _x	W _y	i _x	i _y
VB-24	30.3	326	426	65.2	69.3	3.3	3.8
VB-20	25.5	274	331	52.9	56.6	3.3	3.6

1.2 アーチの形状および寸法

アーチは図-2に示すような形状で、スパン≒5m、ライズ≒3.2mである。

V形鋼の場合は3部材より形成され、冠材は半径≒2.2m、長≒3m、両側材はそれぞれ長さ≒4mで、一端から約0.6mの直線部分と残りの半径≒2.8mの

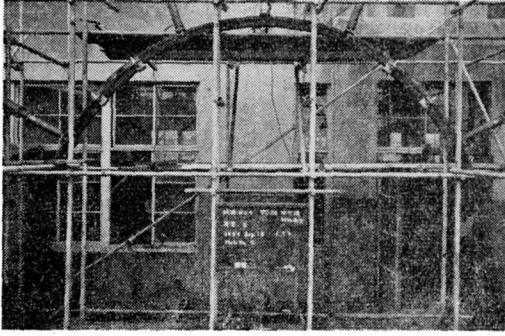


図-2 試験状況

曲線部からなり、冠材と側材を約0.5m重ね合せて、Uボルトで締め付けている。したがって、周長≒9mである。

古レールの場合は2部材からなり、クラウンの位置に添接板を当ててボルト締めして、アーチの形状、大きさはV形鋼の場合と同じである。

V形鋼の場合は、荷重がある限度に達すると、重ね合せ接手に滑動が生じ、アーチが縮小する(図-3参照)。これを降縮と称し、降縮の可能なことを可縮性を有するという。なお、降縮しない状態でV形鋼を試験するとき

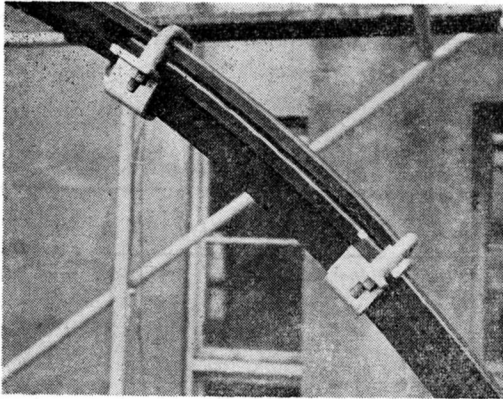


図-3 可溶接手

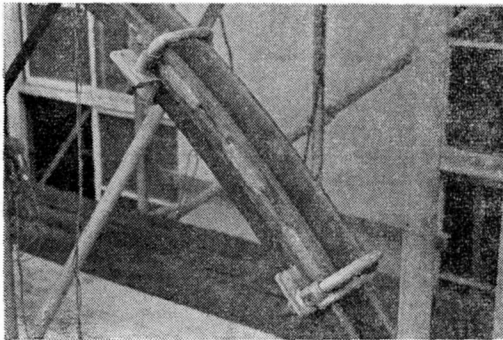


図-4 溶接接手

は、重ね合せの部分を溶接した(図-4参照)、古レールの接手は降縮しない。

1.3 試験方法

負荷は5個のオイルジャッキにより行った。ジャッキは板桁構造のボックスラーメン(これを外枠と称す)にとりつけられ、外枠はジャッキおよびアーチの支点の反力を受けるようになっている(図-5参照)。

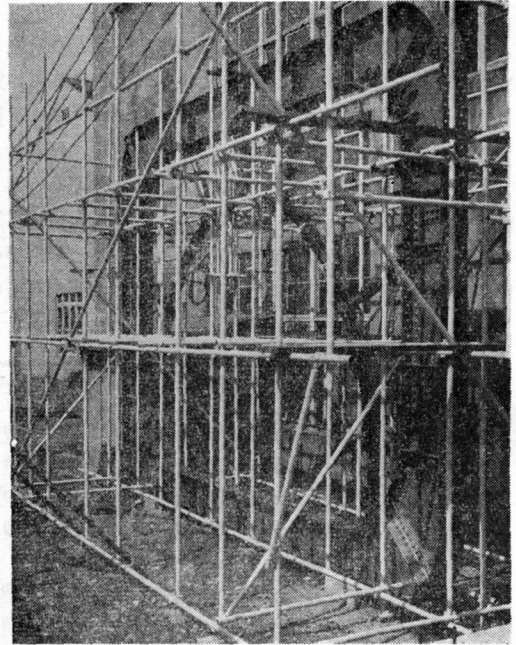


図-5 試験装置

ジャッキは能力20ton、荷重の調節はバルブによって個別的にコントロールできる。

ジャッキを外枠にとりつける台座はヒンジ構造で、ジャッキを試験材へ接続する着座もヒンジ構造である。

ジャッキの番号は左から1, 2……5で、1および5のジャッキの着点点はアーチの両支点からそれぞれ1.9m, 2および4の着点点はクラウンから左右へそれぞれ0.9m, 3はクラウンの位置にあり、ジャッキの方向はいずれもアーチの曲線にはほぼ直角である。

荷重の値は各ジャッキにとりつけた油圧計より読んだ。試験材には0.5mの間隔で標点を附し、試験材に正対させたカメラにより、各荷重ごとに撮影し、写真から標点の移動を測定した。また重ね合せ接手の滑動量(以後降縮量と称する)は直接測った。

1.4 荷重の型

各試験材ごとの荷重の型は簡単に表-1に示してあるが、これを詳しく説明する。

a. 対称5点荷重というのは、5個のジャッキに同時

等しい油圧を送る場合の荷重である。

- b. 対称3点 active 2点 passive というのは、No. 2, 3, 4のジャッキのみに等しい油圧を送り、No. 1および5のジャッキは油を送らずにその反力を受けるようにした場合で、無変位とは反力を受けるジャッキが全然後退しない場合で、変位とは多少後退を許す場合である。
- c. 非対称3点 active 2点 passive は、No. 3, 4, 5のジャッキのみに油を送って、他のジャッキはその反力を受けるようにしたもので、bの場合と同じく変位、無変位の別がある。
- d. 非対称3点荷重とは、No. 3, 4, 5のジャッキのみ働かせて、他のジャッキは取外した場合である。

これらのうち対称5点荷重は、アーチの変形の増大とともに非対称荷重に移行し、またその他の荷重の場合でも変形とともに荷重の方向は変わった。

1.5 可縮性支保工の最大耐力

可縮性接手をを用いた No. 2, No. 3 および No. 7 の試験における最大荷重時の状況をそれぞれ図-6, 図-7 および図-8 に示す。

図中の番号は荷重番号を示し、例えば2-19とはNo. 2の試験の19番目の荷重を示す。

()内はアーチの降縮変形による各標点の水平、垂直移動量を cm で示したもので、左向きおよび下向を正としている。

□内は降縮量を示している。

Nは接手における軸方向圧縮力で、Mは最大および最小の曲げモーメントの位置および大きさを示す。

24kg/m のV形鋼の降伏モーメントは単純梁として行った実験の結果では4.0~4.2t-mであるから、2-19および7-16では降伏に至っていないが、20kg/mのV形鋼では3.3~3.5t-mであるから3-11ではすでに降伏が生じていることがわかる。

1.6 可縮接手の滑动抵抗力

No. 2, 3 および 7 の試験において、最初に接手で滑动を始めたとき、Uボルトをさらに締め直して最大荷重に達したときの、接手における軸方向圧縮力、曲げモーメントおよび降縮量を表-3および表-4に示す。

この表から明かなように滑动開始のときのNは約10tであり、締め直して最大荷重に達したときのNが15~19tである。これは直線材を用いた接手の単独の滑动試験の結果とはほぼ一致している。これは曲げモーメントの比較的低い位置に接手があったためであろうと思はる。したがって、可縮支保工においては可縮性接手は曲げモーメントが小さい位置に置くことが、可縮性を保持する

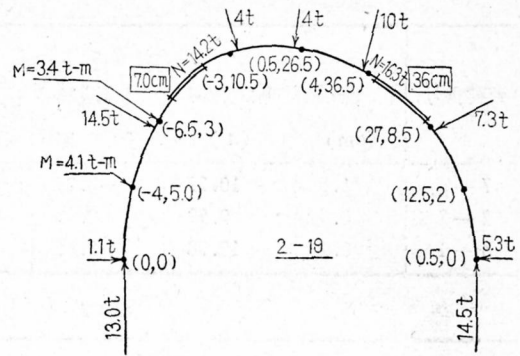


図-6

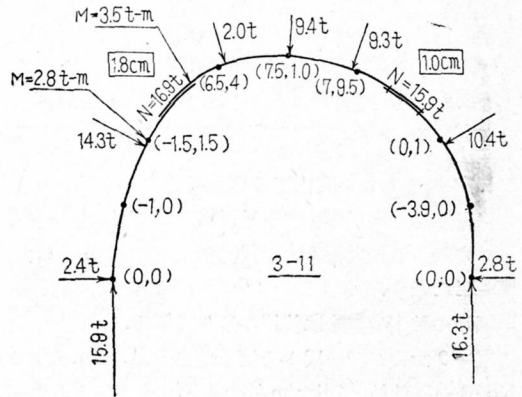


図-7

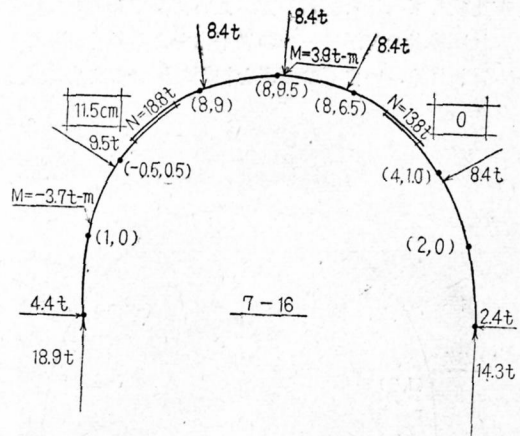


図-8

ためには必要である。

No. 3の試験では、僅かしか降縮せずに部材が降伏しているが、この接手の締付力が20kg/m材にとってはやや大き過ぎることを意味しているようである。

表-3 滑動開始のとき

負荷番号	左				右			
	降縮量 (cm)	軸力 (t)	Uボルト部の曲げモーメント (t-m)		降縮量 (cm)	軸力 (t)	Uボルト部の曲げモーメント (t-m)	
			上部	下部			上部	下部
7-4	1.5	10.39	-0.75	-1.15	0	8.99	-1.35	-1.26
2-2	0.3	9.59	0.93	1.72	0.3	9.16	0.69	-0.01
3-4	0.6	10.38	-2.86	0.35	0.6	10.52	0.03	-3.37

表-4 最大荷重のとき

負荷番号	左				右			
	降縮量 (cm)	軸力 (t)	Uボルト部の曲げモーメント (t-m)		降縮量 (cm)	軸力 (t)	Uボルト部の曲げモーメント (t-m)	
			上部	下部			上部	下部
7-16	11.5	18.82	-1.49	-2.48	0	13.77	1.83	2.35
2-19	7.0	14.22	-2.71	0.70	36	16.34	-0.20	0.87
3-11	1.8	16.92	-3.51	-1.70	1.0	15.92	0.03	-0.42

1.7 降縮しない支保工の最大耐力

降縮しない接手を有するV形鋼および古レール製のアーチ支保工の最大荷重時の状況を図-9、図-10および図-11に示す。

図中の数字の意味は前節の通りである。

図-9および図-10から明らかのように、No. 4およびNo. 8の試験材は24kg/m材の降伏モーメント4.0~4.2 t-mに等しい最大および最小曲げモーメントが生じてアーチが降伏していることが分る。また4-5と8-16を比較してみると後者の方が低い荷重で降伏している。これは後者の方がアーチの扁平化をより多く許したためと思われる。いまこの両者を初期の形状のまま降伏する

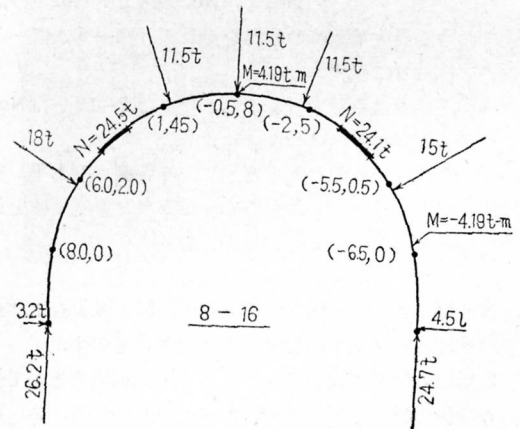


図-10

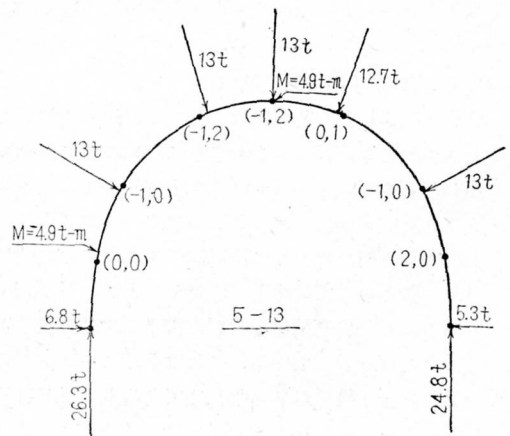


図-11

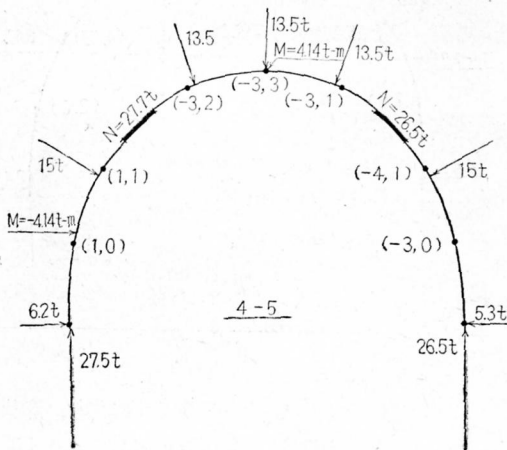


図-9

として、その計算値とこれらの実測値を比較してみると4-5は92%、8-16は84%となり、扁平化を許す度合の差によってこれだけの開きがある。したがって、アーチは変形を許す度合を小さくすればするほど強くなると思われる。

図-11は37kg/mの古レール材であるが、これは接手で振れて面外座屈を生じた。その値は図-9の4-5と比較すると約95%である。

1.8 実物大試験の結果の考察

可縮性支保工についてはおおむね、以上の試験のデータがそのまま設計に使えるように思われる。ただ20kg/m材に対しては、接手の締付力がもう2割ぐらい低い方が可縮性が保持できるように思われる。また24kg/m材の場合でも大きな曲げモーメントが生ずるような荷重状態のときは降縮し難くなるから注意を要する。

降縮しない支保工の場合は、荷重の型が曲げモーメントを大きくし、変形を比較的大きくするようなものであったため、降伏による崩壊という現象が生じたが、実際のずい道支保工では、地山によって支保工の変形が拘束され、軸方向圧縮力が大きくなって降伏より先に面外座屈をすることも起り得るので、一概にはこのデータがそのまま使えるとはいえない。特にV形断面のように振りの中心と曲げの中心(図心)が一致していない場合は軸方向力のみによっても、振りが生ずるので横座屈を生じ易い。面外座屈については未だ研究の余地がある。

2. 模型アーチ支保工の荷重試験

2.1 試験材の断面および試験材諸元

試験材の断面積は24kg/m形鋼の約 $\frac{1}{16}$ で、その形状は、No.1~4がボカール(抗枠用I形鋼)、No.5~9がレール、No.10~12がV形鋼、No.21~24が背高のV形鋼である。

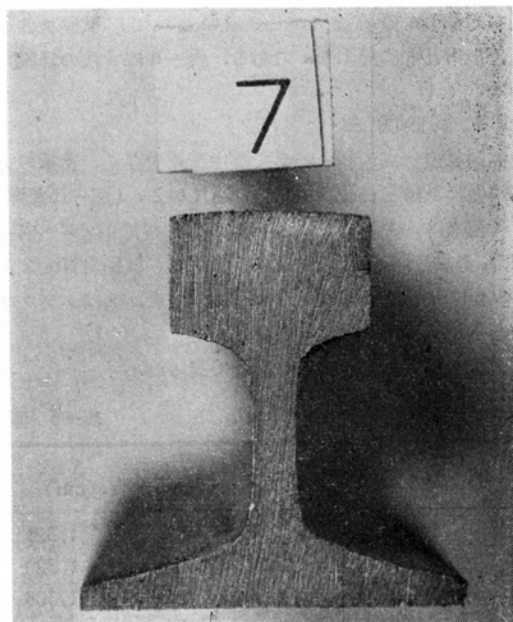


図-13 レール断面

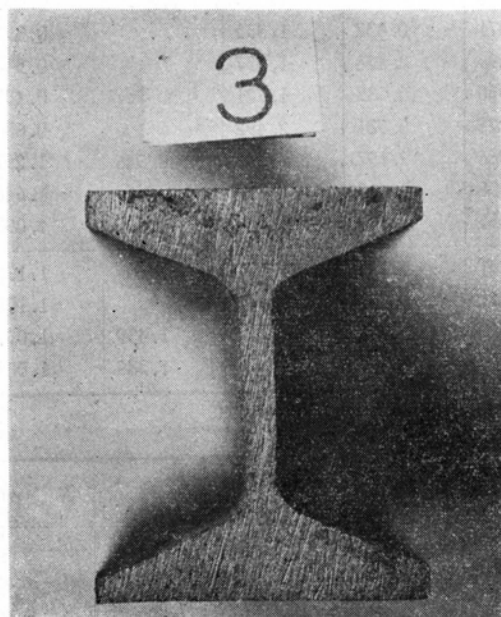


図-12 ボカール断面

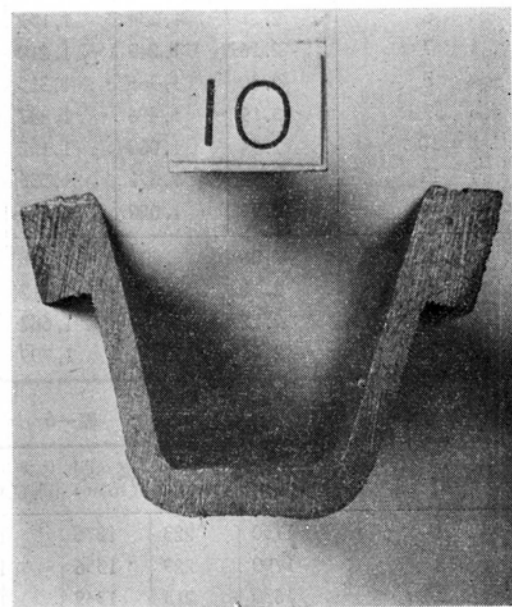


図-14 V形断面

図-12にポカール、図-13にレール、図-14にV形鋼
図-15に背高V形鋼を示す。

表-5は模型アーチの左支点附近の断面を拡大し、数値計算により求めた断面の諸係数であるが、模型断面の加工がプレーナ切削によるためそれほど高い精度を示していない。他の位置では約±5%程度の差があるようである。

試験材の曲線部分は半径約0.7mの半円で、側壁部は長さ約0.7mの直線である。したがって、試験材の全高、全巾ともに約1.4mである。表-6は寸法の詳細である。

2.2 試験方法

試験材の一点にヒッバラで集中荷重を与え、荷重の方向は常に試験材底辺の中心点へ向っている。(図-16参照)

荷重点は、クラウン、クラウンからスプリングへ向って $\frac{1}{3}$ の点、同じく $\frac{2}{3}$ の点の3種類で、試験材No. 2とNo. 6は $\frac{1}{3}$ 点、No. 3とNo. 7は $\frac{2}{3}$ 点、他はクラウンである。(表-6参照)

荷重は抵抗線歪計式の荷重計で測った。

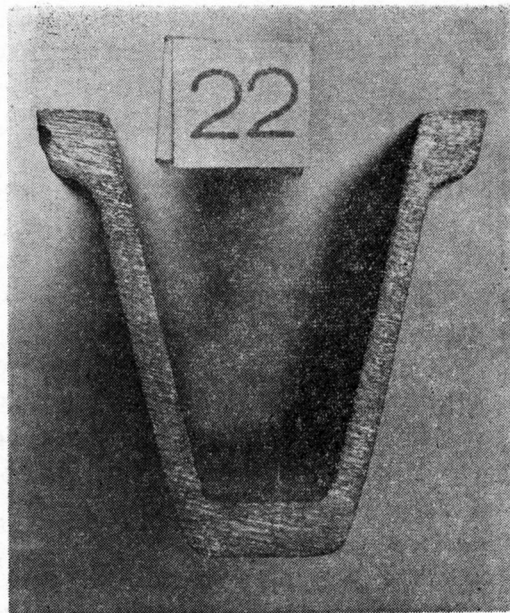


図-15 背高V形断面

表-5 断面の諸値

試験材	A (cm ²)	Yu (cm)	Ye (cm)	Ix (cm ⁴)	Iy (cm ⁴)	Zxu (cm ³)	Zxe (cm ³)	Zy (cm ³)
1	2.30	1,321	1,321	2,352	0.562	1,781		0.521
2	2.28	1,320	1,320	2,345	0.555	1,778		0.511
3	2.10	1,308	1,308	2,195	0.520	1,679		0.481
4	2.17	1,420	1,420	2,652	0.533	1,867		0.471
5	2.19	1,266	1,204	1,738	0.438	1,373		0.358
6	2.21	1,234	1,199	1,671	0.437	1,355		0.355
7	2.16	1,249	1,210	1,695	0.428	1,357		0.348
8	2.40	1,365	1,313	2,350	0.585	1,721		0.433
9	3.19	1,496	1,487	3,728	0.981	2,492		0.654
10	1.94	1,088	1,127	1,066	2.197		0.946	1.257
11	2.54	1,621	1,536	2,958	3.613	1,825		1.648
12	1.95	1,020	1,484	1,231	1.689		0.829	1,093
21	2.06	1,603	1,548	2,251	2.193	1,404		1.196
22	2.11	1,661	1,612	2,571	1.837	1,547		1.108
23	2.22	1,539	1,687	2,427	1.761		1.439	1.037
24	2.16	1,474	1,799	2,499	1.475		1.389	1.009

表-6 試験材諸元

試験材	単重 (kg/mm)	断面積 (mm ²)	支間 (mm)	スプリング間隔 (mm)	高さ (mm)	左スプリング高さ (mm)	右スプリング高さ (mm)	荷重点	名称
1	1750	223	1376	1351	1353	678	677	クラウン	ポカール
2	1790	229	1356	1352	1352	677	676	$\frac{1}{3}$ 点	ポカール
3	1630	213	1349	1352	1355	676	677	$\frac{2}{3}$ 点	ポカール
4	1720	220	1353	1351	1350	677	676	クラウン	ポカール

5	1740	221	1410	1405	1374	674	675	クラウン	レール
6	1680	214	1421	1412	1368	677	675	1/3点	レール
7	1680	215	1437	1417	1336	675	676	1/3点	レール
8	1930	246	1395	1402	1379	675	674	クラウン	レール
9	2510	320	1411	1412	1378	673	677	クラウン	レール
10	1520	193	1390	1373	1386	676	673	クラウン	V形鋼
11	1960	250	1414	1417	1377	674	675	クラウン	V形鋼
12	1560	199	1404	1405	1369	687	687	クラウン	V形鋼
21	1540	189	1421	1416	1384	675	675	クラウン	背高V形
22	1740	221	1431	1423	1378	675	675	クラウン	背高V形
23	1700	210	1404	1405	1389	675	675	クラウン	背高V形
24	1690	215	1405	1413	1387	675	675	クラウン	背高V形

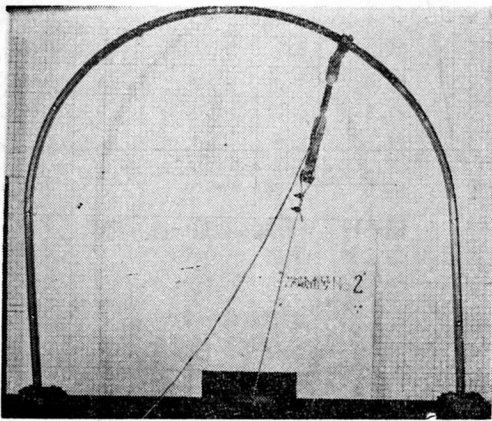


図-16 試験状況

撓みは試験材後面に方眼紙をはり、前面に正対せるカメラで各荷重ごとに形状を撮影し、写真より測った。

2.3 アーチの荷重と変形の測定値

模型アーチに対する荷重と荷重方向の撓みとの関係を図-17~20に示す。(次頁参照)

アーチの変形の状況は荷重点、部材断面の形状によって異なる。ポカールおよびレール断面のときは、荷重点がクラウンもしくは1/3点であれば、面外におじぎをしている(上から眺めるU字型に面外変形している)が、2/3点のときは荷重点が変曲点となるS字型の面外変形をしている。V形断面のときは面内に扁平化する変形のみであるが、背高V形断面のときは荷重点が変曲点となるS字型の面外変形を生ずる。

2.4 模型材の引張および圧縮強度

引張試験に用いた材料はアーチ試験の残材で、永久変形を受けていない右側壁の長さ約0.4mの部分で、おのおのの形状のまま試験した。表-7はその試験結果である。

表-7 引張強度

試験No.	材種類	断面積 mm ²	荷重 t		降伏点 kg/mm ²	引張強度 kg/mm ²	伸び %
			降伏	最大			
2-R	ポカール	229	5.0	9.51	21.8	41.5	14.6
6-R	レール	205	5.0	8.85	24.4	43.2	11.2
12-R	V形鋼	202	5.8	8.82	28.7	43.7	22.0
23-R	背高V形鋼	212	6.75	10.45	31.8	49.3	18.3

圧縮強度試験の材料はアーチ試験の残材で永久変形を受けていない部分を使用し、長さは200mmおよび

80mmの二通りについて試験した。表-8にその結果を示す。

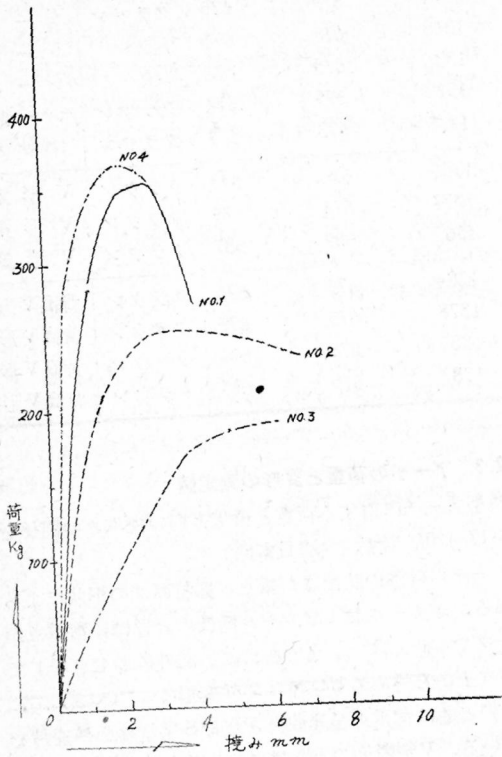


図-17 ポカールの荷重-撓み線図

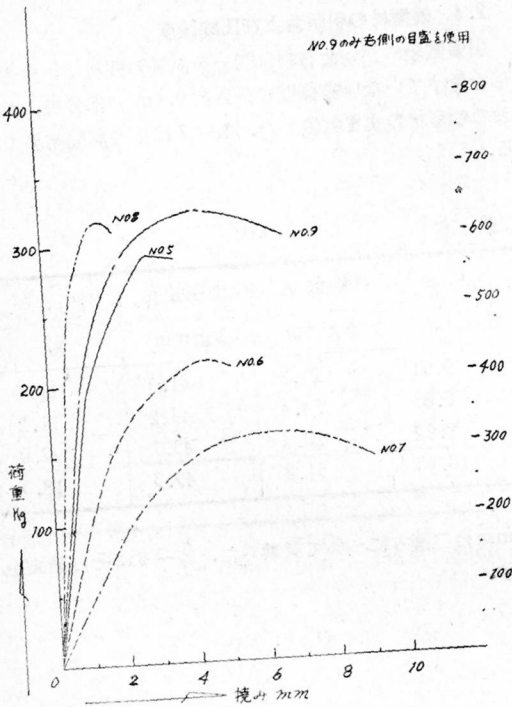


図-18 レール荷重-撓み線図

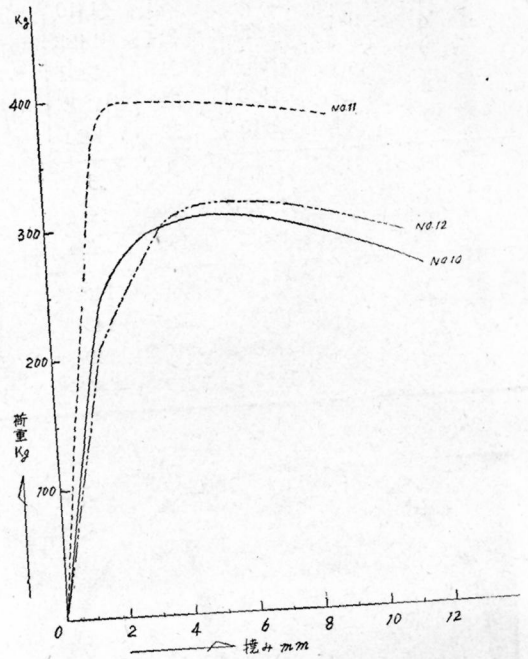


図-19 V形鋼の荷重-撓み線図

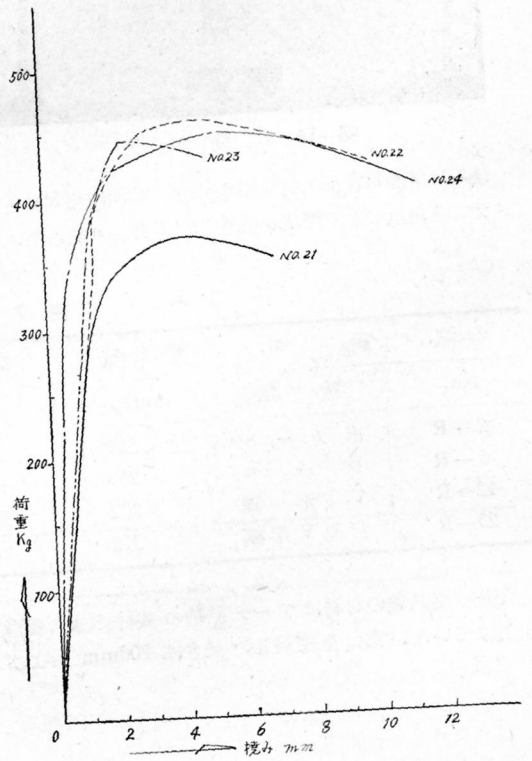


図-20 背高V形鋼の荷重-撓み線図

表-8 圧縮強度

試験材		断面積 mm ²	細長比	座屈荷重 t	座屈応力 kg/mm ²
No.	種類				
1-4	ポカール	230	16.2	11.50	50.0
2-4		228	16.2	11.38	49.91
3-4		210	16.0	9.97	47.48
4-4		217	15.7	10.52	48.48
5-4	レール	219	17.8	9.71	44.34
6-4		221	18.0	9.31	42.13
7-4	I	216	17.9	9.20	42.60
8-4		240	16.3	11.38	47.42
9-4	V形鋼	319	14.5	15.79	49.50
10-4		194	10.8	6.35	32.73
11-4	背高V形鋼	254	7.4	8.30	32.68
12-4		195	10.2	5.45	27.95
21-4	背高V形鋼	206	7.8	6.20	30.10
22-4		211	8.7	6.13	29.05
23-4		222	9.0	7.11	32.03
24-4		216	9.8	6.75	31.25
1-5	ポカール	230	40.5	5.90	25.6
2-5		228	40.5	5.83	25.5
3-5		210	40.2	5.75	27.6
4-5		217	39.7	6.50	30.4
5-5	レール	219	45.0	5.55	25.2
6-5		221	45.2	5.73	26.0
7-5	I	216	45.0	5.45	25.1
8-5		240	40.4	7.23	30.0
9-5	V形鋼	319	36.2	8.77	27.6
10-5		194	27.2	5.96	31.1
11-5	背高V形鋼	254	18.5	6.54	26.1
12-5		195	25.2	4.98	25.8
21-5	背高V形鋼	206	19.4	5.69	27.3
22-5		211	21.6	5.52	26.5
23-5		222	22.6	6.12	27.8
24-5		216	24.2	5.45	25.4

図-21は座屈応力と細長比の関係を図示したものである。

2.5 試験結果の考察

ポカールおよびレールの断面のアーチについては荷重の位置を変えて試験をしたが、その結果を表-9に示す。

この試験は1個の集中荷重による試験なので、アーチのある部分にはかなり大きな曲げモーメントを生じ、全体の強度は部材の曲げ強度に支配されるものと考えられるが、面外への変形拘束が全然ないため、横方向の曲げ強度が低くても、全体の強度が低下するおそれがある。

図-21 座屈応力-細長比曲線図

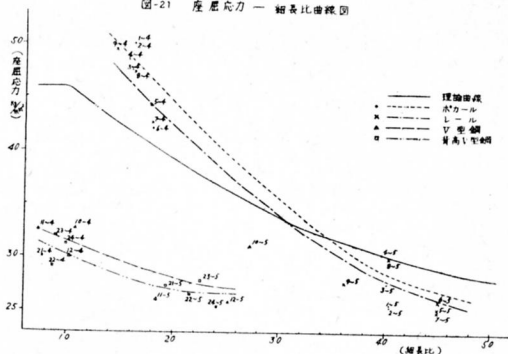


図-21 座屈応力-細長比曲線図

表-9

		荷重点		
		クラウン	1/3 点	2/3 点
ポカール	強度 kg	353	250	192
	比率 %	100	71	54.5
レール	強度 kg	292	215	160
	比率 %	100	73.5	55

そのために、縦横の断面係数比 Z_x/Z_y がどのくらいのとときに最も総合能力が大きいかを示すため、強度と Z_x/Z_y との関係を図-22に示した。

図-22 アーチの耐力と Z_x/Z_y との関係図

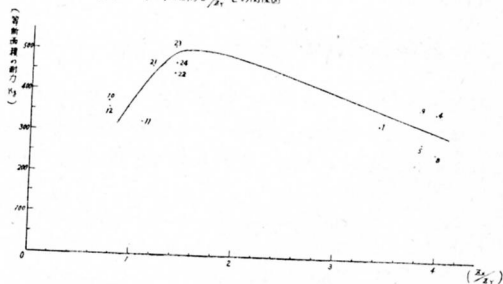


図-22 アーチの耐力と Z_x/Z_y との関係図

この図は荷重点がクラウンの場合のみを対象にして、各強度を等断面 (220mm²) に換算したものである。

この結果によると Z_x/Z_y が 1~1.6 のところに最大強度点があるようである。

しかしながらこのような荷重状態はきわめて特殊な場合であって、実際に問題になると思われる横座屈の場合は違ったものになるであろう。このことは模型材の座屈試験の結果にあらわれている。すなわち図-21をみればV形断面のグループが、ポカールやレールに比べてかなり低いところにある。この理由は前述の1-7で述べたところと同じであるが、詳しくは解析した結果に俟たなければならない。

Report on the Load Tests of Steel Arch-Supports for Tunnelling

By Yoshitada Mori

The use of steel arch-supports in the tunnelling is increasing recently in Japan. This tendency is due to the fact that steel arch-supports are superior to timberings from many view-points, in order to protect a person from the fall of roof of tunnel.

These tests are a part of the writer's investigation, which is still continuing, on how to design and how to erect steel arch-supports.

In this report eight full-sized load tests and sixteen model load tests of steel arch-supports for tunnelling are described.

Each test support for full-sized load test consisted of three members which were jointed with yieldable joints to each other or welded to each other, a span of support being about 5 m, a height of support being about 3.2 m, and a member section of support being V type and 24 kg/m or 20 kg/m in unit weight. The support was loaded at three or five points with oil jacks, the loads being normal to the arch line.

In case of the non-yieldable arch-support with welding joints, the effects of two types of load were compared, in one of them five jacks were all active, while in the other three jacks were active and two jacks were passive. But there was no actual difference between them, for the support began to undergo the failure when plastic-hinge were formed at several points of the support in each case. It was also recognized in the case of non-yieldable support that the more the centrifugal displacements at loading points were allowed, the less the bearing power of the support became.

In the case of yieldable support, it was found that the yieldable joint used in this test was more suitable for a member of 24 kg/m section than for that of 20 kg/m section, so that the support with 24 kg/m members sustained its yieldability unless the deformation of the support was not so much. The axial force on the section near a joint was between 10 ton and 15 ton while the support was yielding.

In model load tests, test supports had members of V section, I section and rail section in a scale of one-fourth respectively, and each support consisted of a half circle of 0.7 m radius and two side legs of 0.7 m in height. The load on a support was a concentrated load at the crown or one of other points of the arch, and directed to the center of the base of support.

As a result obtained, a support with V section, which section-modulus-ratio Z_x/Z_y was smallest, was stronger than the one with any other section. A support with members of larger section-modulus-ratio tended to be laterally deformed.

The findings described so far are considered to be right under the condition of these tests, but it will be necessary to test further supports under other conditions, in particular the investigation of the lateral buckling of arch-support is very important.

研 究 所 報

1960 No. 1

内 容

1. ずい道用鋼製アーチ支保工の研究
(第1報 荷重試験の報告) 1
2. 挟み吊揚具の先端(心金)の摩擦係数に関する実験.....10
3. 交代制の労働負担.....14

労働省産業安全研究所

昭和35年7月