

材料

UDC 620.172.058:677.721  
669.45

## 鋼索の引張試験に用いられる合金の物理的性質

正員 久保慶三郎\*  
准員 中田重夫\*\*PHYSICAL PROPERTIES OF ALLOYS USED IN THE TENSION  
TEST OF WIRE-ROPES.

(Trans. of JSCE April 1953)

Keizaburō Kubo C.E. Member, Shigeo Nakata C.E. Assoc. Member

**Synopsis** In the tension test of wire-rope, wire-ropes can not be usually inserted between grips, but fusible alloy is used to cover each wire of the wire-rope, so that the rope may break at its middle portion. Such fusible alloys as Pb-Sb-alloys, Wodd's alloy and Pb-Sb-Zn-alloy are usually used.

The most important properties of the alloys are: (1) low melting point (2) high bond strength between the wire-rope and alloy and (3) small amount of creep. When creep is not small, there occurs plastic deformation of anchor portion of suspension bridges in which wire-ropes are connected with anchor bolts by fusible alloy.

Therefore, the writers analyse experimentally the physical properties, i.e. melting point, bond strength and creep of Pb-Sb-alloy and Pb-Sn-alloy.

Bond strength is measured by steel bar (diameter=15.9 mm) instead of wire-ropes. Relation between bond strength and mixing ratio of Pb to Sb or Pb to Sn, relation between bond strength and embedded length, and relation between bond strength and surface conditions of steel bar are tested.

As for amount of creep of alloys used in this experiment, creep test is not done, so it is obliged to estimate only by stress-strain curve obtained in compression, but this estimation is considered to be correct according to the analysis by one of the writers in near future, creep test will be performed by the writers and the above estimation will be checked.

**要旨** 本研究の目的とするところは、ワイヤーロープの引張試験において握持部分に用いられる合金の物理的性質を明らかにし、握持部分の設計に役立たせたいところにある。

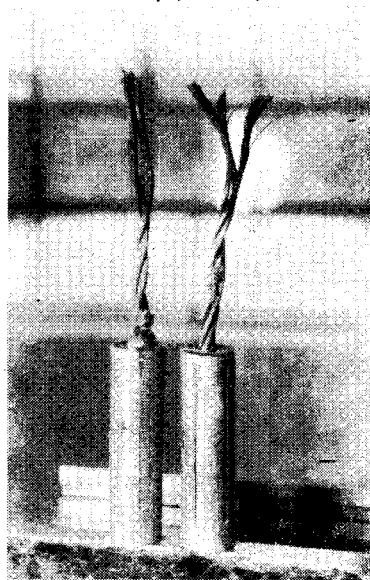
著者は Pb-Sn 合金、Pb-Sb 合金について実験し、混合割合と附着強度、埋込長と附着強度、混合割合とクリープ等について研究した。また表面状態と附着強度、表面処理方法等についても明らかにした。

## 1. まえがき

先日土木工専用ワイヤーロープの引張試験を当研究室で行った。その時は Pb-Sb 合金が間に合わなくてハンダを鑄込んで試験機の握持部に適合せしめたのであるが(写真-1 参照)、ワイヤーロープの附着部に用いる合金をさらに研究する必要を認めたので本研究を始めた。ここに第1報とでも申すべき報告を発表し諸賢の御批制、御教示を仰ぎたいと思う次第である。

ワイヤーロープの引張試験の際、端部に合金を鑄込んで試験機に握持せしめる理由は、直接ロープをグリップの中にさし込むと、外側の素線のうちグリップの歯が咬込んだ部分は早く切断され、次第に抵抗すべき素線の本数が減少し、かくして得られた破断強度は真の破断強度を与えないからである。

写真-1 引張試験を行つたワイヤーロープ



\* 東京大学助教授、生産技術研究所

\*\* 大学院特別研究生、同

現在碇着部に用いられている合金としては、Pb-Sb 合金、Pb-Sb-Zn 合金、Wodd の合金等があり、その成分及び融点は表-1 に示すごとくである。この合金に要求されるべき性質は、

- (1) 融点が低いこと
- (2) 鋼との附着がよいこと
- (3) クリーブ量の少ないこと
- (4) 安価であること
- (5) はなはだしくは硬くないこと

等である。以上の性質を少しく説明すると、あまり融点の高

い合金では溶解に時間的、経済的損失がともなうし、溶解操作が大規模なものになるから、(4) と矛盾しない程度で、なるべく融点の低いものがよい。ガスで溶解する場合を考えれば、実用上 500°C 以下の融点を有する合金ならば溶解に大した困難もない。碇着の機構は未だ不明であるが、結局鋼との附着力が大きければ大きいほど、埋込む長さが短くなり、合金の量も少なくてすむ結果になる。クリーブ量が小さいことは、ワイヤーロープの引張試験には大して問題にならないことであるが、吊橋の碇着部にこの合金を用いる時は、クリーブ量が大きいと、碇着がゆるみ、橋全体が撓んでくる。これを防ぐためには、結局クリーブ量の小さい合金が必要である。合金がはなはだしく硬い場合は、試験機械のグリップをいためるおそれもあるから、クリーブ量が少なくかつやわらかい合金、換言すれば、ヤング率が低く、弾性を失わない材料であることが望ましい。

本実験においては Pb-Sb 合金について、Pb, Sb の混合割合と附着強度及び応力-ひずみ曲線との関係を調べた。前に行つたワイヤーロープの引張試験に用いた合金が Pb-Sn 合金であつたので、Pb-Sn 合金についても同様の実験を行つた。Pb-Sb-Zn 合金、Wodd の合金については、変えるべき変数があまりに多くて未だ手をつけていない。以上のほか表面状態と附着強度との関係、埋込長と附着強度、握持部合金の直径と附着強度との関係を調べた。

## 2. 実験方法及び結果

ワイヤーロープをそのままにして合金を鑄込んだ場合には引張試験中にロープ中の麻芯がしぼられるため断面が縮少し、碇着力がいちじるしく低下する。これを防ぐためと、合金との接触する面積を増加し、従つて碇着力を大きくさせるために端部を素線としてその部分に合金を鑄込んで試験機に握持せしめる。しかし附着強度その他をしらべるためには、ロープが曲つていること、合金の中で不均一に分布していること等の条件によつて、附着強度の実験そのものが困難になるため、及びロープの素線1本の強度は 100 kg 程度で、附着強度を十分調べることができないので、丸鋼(直径 15.9 mm)を使用することにした。丸鋼とロープでは多少性質が違つてくるかも知れないが、これについては後から検討することにする。

実験は丸鋼を型枠中で鑄込んだ後、引抜試験を行い附着力を調べたのであるが、実験の際、最も問題になる要素は、大体つぎのごときものである。

- (1) 試験片の表面の粗度、(2) 型枠の種類大きさ及び温度、(3) 試験片の偏心、(4) 荷重速度等

試験片の表面の状態は附着力に影響するところ大であるので、常に一定の条件で行わねばならぬ。そこで試験ごとに紙ヤスリで表面を磨き、後稀い酸で洗つて毎回一樣になるようにした。型枠は直径 35 mm、長さ 95 mm の鋼鉄製のものを用い、温度を一定になるよう毎回冷却した。また偏心を避けるため、型枠の底の中央に試験片と同大の孔を明け、これに試験片を挿入し、荷重速度は大體 100 kg を 10 sec の割合にした。

つぎに実験を行つた事項としては、

(A) Pb-Sb, Pb-Sn 合金を使用、それぞれその重量比を変化せしめて、その附着強度を測定し、さらにそれぞれの場合について圧縮試験を行つて、その塑性量を調べた。

(B) つぎに型枠の大きさを変化せしめて、一定の合金で附着強度を測定、型枠の大きさと附着強度との関係を、また型枠の大きさ、及び合金を一定にして附着長と附着強度との関係を調べた。

(C) さらに試験片の表面の状態を種々変化せしめて附着強度を調べた。

(D) 最後に実際のワイヤーロープに関して、上で得た値が適用され得るか否かを調べた。

以下各場合についての結果を報告する。

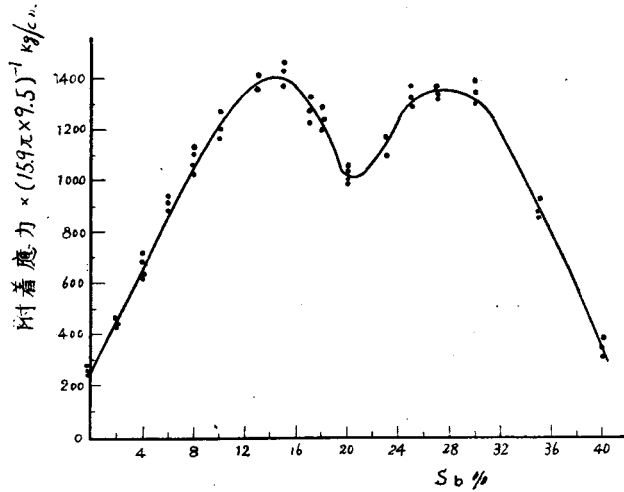
(A) (1) Pb-Sb 合金について: Sb の重量比を 0 から 40% まで変化せしめて、重量比と附着力の関係を図示すると 図-1 のごとくなる。これをみると Sb の量が増すと、附着力は大体直線的に増加し 15% 附近で極大値に達する。さらに増加すると、逆に減少し 20% 附近で極小になる。なお Sb を増加すると再び附着力は増加

表-1

合金 (%) は	融点
Pb(68) Sb(12) Zn(20)	280°C
Pb(83) Sb(17)	220°C
* Bi(50) Pb(25) Zn(12.5) Cd(12.5)	60°C

\* はウッドの合金と称す

図-1 Pb-Sb 合金  
(Sb の重量比と附着力の関係)



し、25~30% 附近で極大となつて、また減少し始める。

Pb-Sn 合金について：前と同様 Sn の重量比と附着力の関係は図-2 に示すものである。この場合も Sn の増加とともに附着力は増加し、9% で極大となる。そして 16% で極小、30% で極大となる。

これらの現象は、それぞれの合金について、その重量比の相違により、顕微鏡組織が異なり、このことが附着に対する性質を異にするのだと考えられる。2つの合金を比較してみると、附着力の最大値は、前者が1400 kg、後者が1120 kg で、Pb-Sb 合金の方がやや大である。融点をしらべるために、それぞれの状態図を示すと、図-3、4 のごとくである。これよりみると、Pb-Sn の

図-2 Pb-Sn 合金  
(Sn の重量比と附着力の関係)

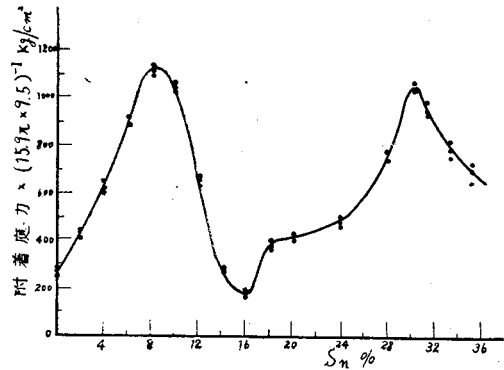


図-3 Pb-Sb 合金の状態図

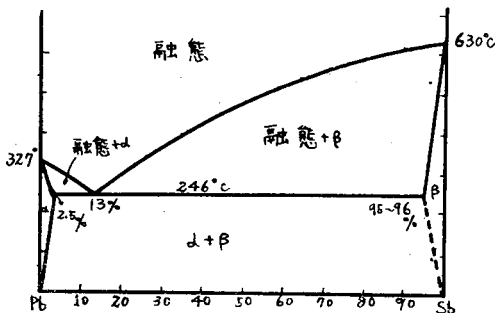
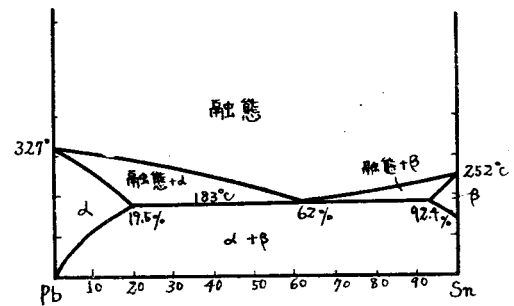


図-4 Pb-Sn 合金の状態図



方が融点が低く溶かしやすいけれども、経済的な点より、実際に使用される Sb, Sn の重量比の小部分ではあまり相違はない。つぎに図-5,6 に各合金の硬度曲線と比重曲線をそれぞれ示す。硬度は Pb-Sb の方が Pb-Sn より大であるが、比重においてはやや少である。また価格(昭.27.7.現在)を比較すると、その比は大体、Pb:Sb:Sn=5:12:30、程度で Sn は Sb に比し、相当高価であるので、上述の諸点よりみて、また後述の塑性量の比較とあいまつて、ワイヤーロープの握持部に使用される合金の条件は、Pb-Sb の方が Pb-Sn より勝つている。

図-5 Pb-Sb, Pb-Sn 合金の硬度曲線

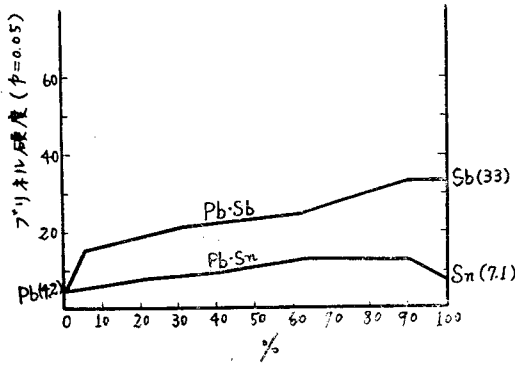
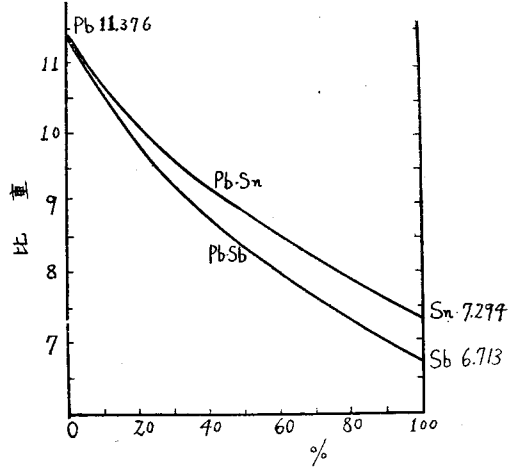


図-6 Pb-Sb, Pb-Sn 合金の比重曲線



(2) 各合金のそれぞれの場合に、直径 35 mm、長さ 70 mm の圧縮試験片を作り、荷重速度を一定(10 sec 間に 100 kg の割合)にして、圧縮試験を行い応力-ひずみ曲線を図示すると、それぞれ 図-7, 8 のごとくである。これよりみると、各合金とも重量比が増すに従つて変形量が小となり、同じ割合のものでは Pb-Sb の方が Pb-Sn より変形小である。

図-7 Pb-Sb 合金の応力-ひずみ曲線

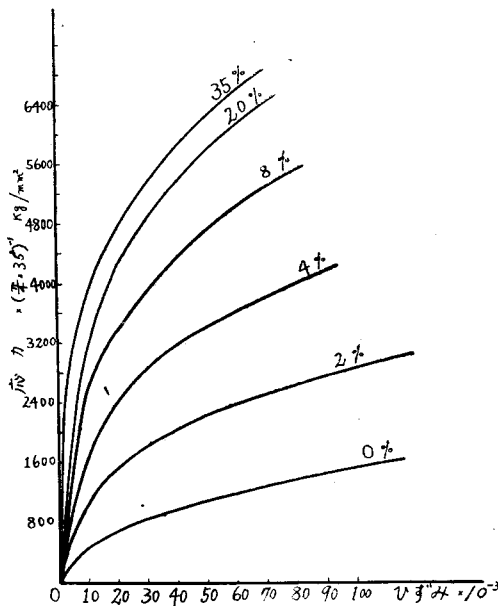
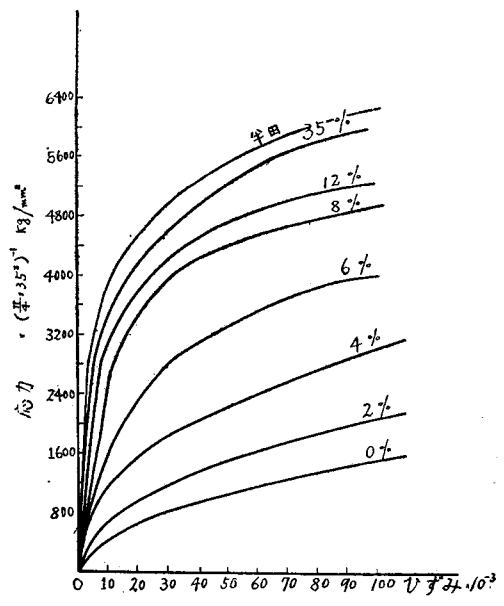


図-8 Pb-Sn 合金の応力-ひずみ曲線



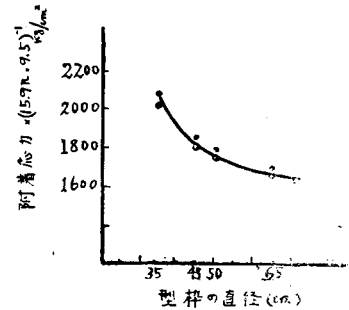
応力-ひずみ曲線とクリープとの関係については、著者の1人がセメントモルタルについて研究した\*。この性質はセメントモルタルのみでなく、応力-ひずみ曲線が抛物線的に伸びてゆく材料についても適用できると考えている。もちろんこの拡張については実験的証明はないが、理論的に類推しても差支えないと思う。またクリープは短期のクリープであつて、定量的に短期のクリープから長期間のクリープを求めることは困難であるが、定性的にはある程度の類推は得られると思われる。すなわち短期間のクリープが大なるものは長期間のクリープもまた大である。以上の仮定から考えると、ワイヤーロープの礎着部のクリープを小さくするためには、応力-ひずみ曲線がなるべく直線に近い性質をもっている合金をえらんだらよいことになる。この仮定は実験的に検討したいと思つている。Pb-Sb を用いるときは、従来 Pb : Sb = 83 : 17 であるが、吊橋の礎着部分に用いるのは、Pb : Sb = 74 :

\* 久保慶三郎：“セメントモルタルの塑性とクリープ” 土木学会論文集，第13号

26 の合金の方が、クリープ量も少なく、附着強度は大差ない点を考えて、推薦される合金ではないかと思う。

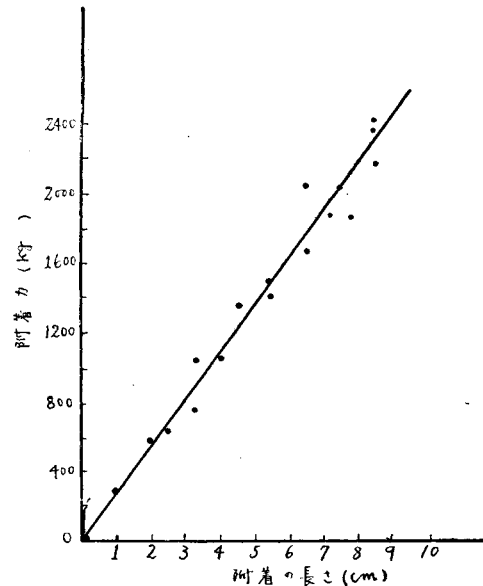
(B) (1) 一定の合金としてハンダを使用、型枠の直径を現在の 35 mm より漸次 45, 50, 65 mm と変化せしめてその附着強度を測定した。その結果は 図-9 に示す。これによると、型枠の直径の増加に従つて附着強度は小となつていく。この理由を考えると Sb も Sn もともに Pb に比し、 図-6 のごとく比重は小である。故に一例を Pb-Sn 合金にとつた場合、 図-4 より共晶点の 62% 以下では、凝固の際初晶として出る Pb が比重大のため融体の下部に沈む。従つて凝固後この合金の組織は、上層と下層でいちじるしい相違があり、冷却速度が遅い場合にこの現象がいちじるしくなる。型枠の大なるほど、冷却速度遅く、附着力も弱くなることが考えられる。この他に各合金に対するアムスラーのグリップの影響、型枠の大小による応力分布の変化等も考えられる。型枠が小になると附着強度にもかなり変化を及ぼすことが考えられるが、実際に鑄込みが困難である。大体試験片の 2.5 倍程度の直径の型枠が適当だと考えられ、この程度ならば鑄込みも容易であり、合金の凝固も速かて上下層の組織変化もみられない。

図-9 型枠の直径と附着応力の関係



(2) つぎに合金及び型枠の直径を一定にして、附着部分の長さを変化せしめ、長さ と 附着強度 と の 関係 を 図示すれば、 図-10 のごとくになる。これはコンクリートと鉄筋との附着と異なり、実験の範囲内では、附着面積に比例して附着強度が変化することがわかつた。

図-10 附着力と附着応力との関係



(C) Pb-Sb, Pb-Sn, いづれの合金も附着力のみから比較すればその最大値には、大した差は認められなかつた。そこで試験の表面に特別の操作を施して、その附着力を増加する研究を行うことにし、一定の合金をえらび表面の状態をつぎのごとく変化せしめてその強度を測定した。

(1) 従来は表面を紙ヤスリで磨いた後、稀い酸で洗つていたが、これを油で洗つた場合。

附着力 1310 kg のものが平均 950 kg に低下。

(2) 表面を紙ヤスリで磨かず錆びたまゝの場合。

1310 kg のものが大体 2500 kg に上昇する。

ただしこの場合には、錆び方の度合その他により種々異なつた値を生ずる。

(3) 試験片を稀塩酸で洗つた後、硫酸銅溶液に浸け表面処理をした後、合金を鑄込んで附着力を測定した場合は、溶液の濃度や試験片を溶液に浸けておく時間には無関係で、Pb-Sb 合金 (Pb : Sb = 75 : 25) で 2400 kg の附着強度が得られ、表面処理を行わない場合の 1310 kg に比し、83% 強くなつたことになる。

従来の実験では、附着力は主として丸鋼表面のいくらかの凹凸と、合金の収縮による摩擦力で構成され、合金と鋼とは直接くつつかないらしい。ところが銅と鉛の合金との間は附着がよいので、丸鋼の表面に一度銅を附着せしめてから、鉛の合金を鑄込むと附着力は大きくなるわけである。

(4) (3) で一応好結果を得たのでさらに銅を一様に丸鋼の表面に附着せしめるため、硫酸酸性溶液 (7%) に硫酸銅溶液 (15~24%) を混じ、さらにゼラチンあるいはニカワを入れたものを作る。試験片を塩酸 (20% 常温) 中でよく洗い、上に作つた溶液中に浸けると丸鋼の表面に一様に銅が附着する。かく表面処理をした試験片の附着強度は 3000 kg となり、1310 kg に比し、129% 強くなつたことになる。

(D) ワイヤー ロープについての実験

以上の実験はワイヤー ロープの代用として丸鋼について行つた実験であつた。ワイヤー ロープは前述のごとく、各素線が互いに接近してあること、表面その他の条件が各素線について必ずしも様にはできないこと等の点で丸鋼と異なつた性質をもつている。丸鋼の実験で得られた単位面積当りの附着力がワイヤー ロープに拡張できるかどうかを検討することにする。

合金はハンダ (Pb:Sn=50:50) を使用し、上述 (C) の (4) で表面処理した場合で実験する。この場合では丸鋼 (直径=15.9 mm, 埋込長=53 mm) で 3140 kg あるので、 $1.19 \text{ kg/mm}^2$  の附着力を有することになる。ワイヤーロープは素線の直径 0.9 mm, 24 本よりである。まづ端部埋込長を残して針金でしばり、埋込長を素線にし、鋼の附着のよいよう紙ヤスリで一本々々丁寧に磨いた後前述の稀塩酸で洗い、硫酸銅溶液に浸し、合金をしばつた針金の部分まで鍍込む。埋込長さと附着強度の関係は表-2のごとくである。埋込長さは素線にした部分の長さである。

表-2 からすると、前述の表面処理をしたワイヤーロープとハンダとの附着強度は大体  $0.55 \text{ kg/mm}^2$  で、丸鋼の  $1.19 \text{ kg/mm}^2$  に比して  $1/2.16$  に相当している。これは針金でしばつた附近においては素線が密集して、各素線と合金との附着が十分でないこと及び素線は丸鋼のように十分表面を磨き、鋼の附着をよくすることができないこと等に原因していると思われる。なお他の合金についても、同様のことが云われ、 $1/2.16$  の係数は大体一定である。この結果からすると、ワイヤーロープの引張試験における素線の埋込長  $L$  は、

$$L > \frac{2.16 P_b}{n\pi D\sigma_r}$$

から求められる。ここに  $\sigma_r$  は丸鋼で得られた附着強度、 $D$  は素線の直径、 $n$  は素線の本数、 $P_b$  はワイヤーロープの破断強度である。

### 3. 結 語

以上の実験からつぎのことが結論されると思う。

(1) Pb-Sb合金は従来 83:17 の混合比をもつたものが用いられてきたが、これは附着力において85:15あるいは75:25等の合金に劣っている。このため必要な附着力を得るためには埋込長を長くしなければならず、結局合金の損失となっている。

(2) Pb-Sb合金とPb-Sn合金(俗に言うハンダ)と比較すると前者が附着力が大きいこと、クリープ量が小さい点及び安価な点で後者より優っている。

(3) 吊橋その他長期間荷重のかかっているワイヤーロープの鍍着には附着力大で、クリープ量小さいPb-Sb合金(75:25)が推薦される。

(4) 表面状態が附着力に重要な関係があることがわかった。できるならば(C)の(4)の方法をとると、素線の埋込長が少なくなり材料費の節約となる。

本実験はこの種の問題の実験的研究の第1報であり、従来用いられたPb-Sb合金と、たまたま本研究室で用いたハンダ(Pb-Sn合金)とについて各種の実験を行つて、その物理的性質とか機械的性質を明らかにしたにとどまつた。まえがきに述べたこの種の合金に要求されるべき諸性質を満足する合金の研究までは行っていないが、できるならばその方に進みたいと思つている。また本研究では2元合金までにとどまつているが、3元、4元合金等についても系統的な研究を行いたいと考えている。クリープについては、附着力が主として収縮による摩擦に原因していると考えて、合金の応力-ひずみ曲線から推定される点を説明したが、これについては非常に重要な問題であるので、附着力のクリープ試験を行つて先述の説明を検討するつもりである。しかしワイヤーロープの表面に銅メッキその他の表面処理をしたものについては附着の機構が明確でないので、これについては、クリープの試験をして、表面処理とクリープ量との関係を明らかにしようと思つている。終りに本研究に絶えず御指導を頂いた本学福田教授に深謝致す次第である。

(昭.27.8.18)

表-2

埋込長 (cm)	附着強度	
	gk	kg/mm <sup>2</sup>
2.5	910	0.54
3.5	1320	0.56
4.7	1760	0.55