コバールの酸化被膜に関する研究*

池 田 豊** 鮫 島 幸 治**

On the Oxide Films of Kovar

by

Yutaka IKEDA and Yukiharu SAMESHIMA

(New Nippon Electric Co., Ltd.)

The present study was carried out to search for the optimum condition of preliminary treatment of Kovar (Fernico) in order to make good glass-to-metal seals. Especially, the effects of the hydrogen annealing on the characters of the oxide films were studied. The results obtained were as follows:

(1) The adherence between Kovar and its oxide films was affected by the conditions of the hydrogen annealing given before the oxidation. That is, the oxide films formed on too coarse structure alloy (due to high temperature hydrogen annealing) and on too fine structure alloy (due to lack of hydrogen annealing) showed weak adherence to base metals.

(2) The rate of the oxidation was affected by the grain size of Kovar. The larger the grain of Kovar was, the slower the rate of the oxidation became.

(3) The gain of weight (mg/cm^2) by the oxidation and the conditions of the hydrogen annealing had an influence on the thermal shock resistivity of the seals.

(4) The oxidizing temperature affected the orientation of the Spinel type oxide to be formed on Kovar. But the hydrogen annealing temperature showed no clear effects on the crystal structure of the oxide.

(5) In giving explanation on the above phenomena, some problems on the sealability were discussed.

(Received Apr. 28, 1961)

1. 緒 言

ガラス-金属封止用の金属材料として白金、デュメット、タングステン、モリブデン、銅、コバール等が古くから用いられているが、特にコバールはその熱膨張係数がホウケイ酸ガラスのそれとときわめてよく近似しており、かつガラスとのなじみもよいので、最も広く用いられている材料である。この合金の封止法に関しては既に文献に記述されており、特にガラスと融着させる際に合金の表面に生成された酸化被膜の性質が決定的な役割を果すことが指摘されている。この点に関しては、主として酸化¹⁾の程度(酸化増量 mg/cm^2)および酸化物の結晶構造の点から検討が加えられている。われわれは寸法がきわめて小さく、気密を保持する封止部分の長さが約1mmというような小形の気密端子の量産に携わり、その製造条件を検討した結果、コバール自身の結晶粒度が酸化被膜の生成状態や封止体の気密性に影響を及ぼすことを見出し、この点について検討を行なった。

2. 試 料

われわれが実験に使用した材料は Table 1 に示すとおりである。ガラスは100メッシュ以下に粉砕後、Fig. 1 に適合する形状にプレス成形して用いた。コバールは線引きまたはプレス加工により Fig. 1 のような形状に成形した試料を気密試験に使用し、他の試験には0.5mmの厚さの冷間圧延板を25.4mm角に切

Table 1 The properties of materials

	Kovar	Boro-silicate glass
Thermal expansion	$(47.8 \pm 1.5) \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ (30~450 $^{\circ}\text{C}$)	$(58.0 \pm 1.5) \times 10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ (30~380 $^{\circ}\text{C}$)
Inflexion point ($^{\circ}\text{C}$)	435 $\pm$ 10	520 $\pm$ 5
Yielding point ($^{\circ}\text{C}$)	—	575 $\pm$ 10
Density (g/cm^3)	—	2.30 $\pm$ 0.01
Composition	Co: 17.2 $\pm$ 0.8 Ni: 29.0 $\pm$ 0.5 Mn: <0.5 Si: <0.2 C: <0.06 Fe: bal.	SiO ₂ : 67.0 $\pm$ 1 Al ₂ O ₃ : 6.5 $\pm$ 1 Na ₂ O: +K ₂ O: 7.0 $\pm$ 1 B ₂ O ₃ : 18.5 $\pm$ 1

* 原稿受付 昭和36年4月28日, 日本化学会第12年会講演会にて講演(昭34.4)

** 正員 新日本電気株式会社

断したものを用いた。なお、コパールは加工後トリクレンで蒸気洗浄して脱脂した。

3. 実験結果

(I) 水素処理温度とコパールの結晶粒度

コパールは適度に酸化させた状態でガラスと融着させなければならないがこの操作に先だって、あらかじめ水素気流中で加熱して表面を清浄にしなければならない。これは封止部分に気泡が発生するのを防止し、また酸化被膜が地金からはく落するのを防止するために行なうものであるが、われわれの経験によれば、こ

Fig. 1 Dimensions of seals which were used for the tests of vacuum tightness

Fig. 2 Effect of hydrogen annealing temperature on grain size of Kovar

の水素処理条件も適切でなければ良い結果は得られない。言うまでもなく水素処理条件と最も密接な関係を持っているのはコパールの結晶粒度である。そこでまず、水素処理温度とコパールの結晶粒度の関係について調べた。Fig. 2 にこの結果を示す。試料は所定温度の水素炉中に 15 分間保持した。この図から明らかにコパールの結晶粒は 1000°C 付近から急速に大きくなっている。結晶粒の大きさは保持時間によっても異なるが、温度によるほど大きな影響は見られず、15 分程度でその温度についてほぼ安定した大きさになるように見受けられたので、保持時間は 15 分間とし加熱温度を変化させた。結晶粒の平均直径は試料の顕微鏡組織写真から求めた。

(II) 水素処理温度と酸化速度

水素処理温度はコパールの結晶粒度に大きな影響を与えることがわかったが、これは次の酸化の工程でコパールの酸化速度に影響を与えるのではないかということ予想させる。そこで水素処理温度を変えて、結晶粒度の異なった試料を造り、これを開放型空気ふんい気の電気炉中で酸化させて、その酸化速度を測定した。酸化温度は 750°C に固定したが、この理由は酸化温度が低すぎると酸化が進行しがたく、また高すぎると酸化が急速すぎるため、酸化の程度の制御が困難になり、したがって実際に量産を行なう上において不都合なためである。Fig. 3 にこの結果を示す。この図から明らかに水素処理温度が高いほど、すなわちコパールの結晶粒が大きいほど、酸化速度は遅いことがわかる。この傾向は酸化被膜が厚くなりすぎてはく落したり、地金から浮いたりしない範囲、すなわち封止にはこの範囲しか利用できないのであるが、この範囲ではきわめて明りょうに再現される。また酸化温度を変えてみても、上記の範囲ではこの傾向は変わらないようであった。

Fig. 3 Effect of hydrogen annealing temperature on rate of oxidation

(a)

Annealed in H_2 at $1200^\circ C$ for 15 min, then oxidized instantly at $750^\circ C$ in air ($\times 100$)

(d)

Re-oxidized specimen of Photo. 1 (a) at $750^\circ C$ for 2 min in air ($\times 100$)

(b)

Annealed in H_2 at $1200^\circ C$ for 15 min, then oxidized instantly at $750^\circ C$ in air ($\times 100$)

(e)

Re-oxidized specimen of Photo. 1 (b) at $750^\circ C$ for 2 min in air ($\times 100$)

(c)

Annealed in H_2 at $1200^\circ C$ for 15 min, then oxidized instantly at $750^\circ C$ in air ($\times 100$)

(f)

Re-oxidized specimen of Photo. 1 (c) at $750^\circ C$ for 2 min in air ($\times 100$)

Photo. 1 Photomicrograph of oxidized surface of Kovar

(III) 酸化被膜の生成状態

水素処理温度を変化させることによってコパールの結晶粒度, および酸化速度は大きな影響を受けることが明らかになった。そこで酸化被膜の生成状態を光学顕微鏡および電子顕微鏡で観察してみた。Photo. 1 (a)~(c) はペパ研磨で鏡面仕上げした試料をそれぞれ 800, 1000 および 1200°C でそれぞれ 15 分間水素処理した後, 空气中 750°C で瞬間的に酸化させたものである。空气中 750°C で瞬間的に酸化させる方法としては, 試料を 750°C の水素炉中から瞬間的に空气中に取り出すことによって行なった。Photo. 1 (d)~(f) は Photo. 1 (a)~(c) の試料を 750°C の空気ふんい気電気炉に入れて, 更に 2 分間再加熱して酸化を進行させたものである。Photo. 2 は Photo. 1 (b) の試料の一部を電子顕微鏡で観察したもので, コパールの結晶粒界が酸化されて盛り上がっている状態を示している。以上の結果から次のことがわかる。すなわち, コパールは結晶粒界のほうが結晶粒内より酸化されやすく, 酸化の初期にほとんど結晶粒界だけ酸化される時期があるため, コパールの組織が明りょうに現われる。この粒界に生成された酸化物は漸次盛り上がると同時に横方向にも広がって幅を増し, 粒内も一様に酸化された状態になってもその跡を残している。

(IV) コパールとその酸化被膜の密着性

封止物の気密性を完全にするためには, コパールとその酸化被膜の密着性がよくなければならない。われわれはコパールの結晶粒度とこの密着性の関係を定量的に測定しようとしたが, 結局定量的とは言えないが, 試料表面にセロテープを密着させた後直ちにこれを引きはがし, 地金からはぎ取られた酸化被膜の有無を調べるのが最も簡単であり, しかも確実であるという結論に達した。Fig. 4 はこの方法で調べた結果を示す。図の縦軸は試料の水素処理温度を示し, 横軸は空气中 750°C で加熱時間を変えて酸化させた酸化の程度を酸

化増量 (mg/cm^2) で示したものである。すなわち, 縦軸で示される温度で 15 分間水素処理を施した試料を空气中 750°C で酸化させた場合, どの程度の酸化増量まで密着性が良好であるかということを示すもので, 曲線の左側の斜線の範囲が密着性の良好な範囲を示し, これ以上の酸化増量では密着性がきわめて悪くなることを示す。図に示されている 3 本の曲線はそれぞれ次に示すような 3 種類の表面処理を施した試料に関するものである。

- a : 処理なし(圧延のままの表面状態)
- b : エメリー紙(00番)で研磨した後, アルコールで洗浄したもの
- c : 空气中で酸化(750°C 5分)させた後, 濃塩酸でスケールを除去して表面をあらくしたもの

この結果から水素処理温度はコパールとその酸化被膜の密着性にも影響し, それぞれの表面状態について適当な水素処理温度の範囲が存在しているようである。この範囲は材料のロットによってある程度変化するが, 傾向としては Fig. 4 と同様で, 水素処理温度が高すぎてコパールの結晶粒が極度に大きくなっても, また水素処理温度が低すぎても, コパールとその酸化被膜の密着性という点では好ましくない。

(V) 酸化被膜の結晶構造

水素処理温度, コパールの結晶粒度, 酸化速度およびコパールとその酸化被膜の密着性の間の関係がある程度明らかになったので, これらと酸化被膜の結晶構造の間に関係があるのではないかと考えて, 酸化被膜の結晶構造を電子線回折およびX線回折によって解析した。電子線回折は日立製作所製 HS-6 型電子顕微鏡 (50 kV) を使用し, X線回折は理学電機株式会社製自動記録式X線回折装置を使用した。Photo. 3 は水素処理温度を 600°C から 1200°C の範囲で変化させ, 酸化

Photo. 2 Electronmicrograph of specimen of Photo. 1 (b) ($\times 10,000 \times 7/9$)

Fig. 4 Effect of hydrogen (bubbled through 20°C H₂O) annealing on adherence of oxide films (oxidized at 750°C)

条件を空气中 750°C 5 分間に固定して処理した試料の X 線回折の結果を示す。Photo. 4 は水素処理条件を 1000°C 15 分間に固定し、酸化温度を 600°C から 1000°C の範囲で変化させて処理した試料の X 線回折の結果を示す。Photo. 3 の場合、すなわち水素処理温度を変えた場合には、生成酸化物はほとんどスピネル

型の酸化物で、これに若干のヘマタイト型酸化物を混入している。Photo. 4 の場合、すなわち酸化温度を変えた場合も同様であるが、酸化物結晶の方向性と酸化温度の間に明りょうな関係が見られる。すなわちピークの位置は変わらないが、回折強度順位が低温側で酸化させた場合と、高温側で酸化させた場合とで明らか

Photo. 3 Automatically recorded X-ray diffraction patterns of the oxide films of Kovar which were annealed at various temperature for 15 min in H₂, then oxidized at 750°C for 15 min in air.

a : annealed at 600°C c : annealed at 1000°C
 b : " " 800°C d : " " 1200°C
 S(hkl) : Spinel type oxide H(hkl) : Hematite type oxide
 K(hkl) : Kovar

に異なっている。強度順位から考えると、この場合には酸化温度が高いほど酸化物結晶に方向性がないこと

を意味している。これらの試料は更に電子線回折によって調べたが、加速電圧が比較的 low (50 kV) しかも

Photo. 4 Automatically recorded X-ray diffraction patterns on the oxide films of Kovar which were annealed at 1000°C for 15 min in H_2 , then oxidized at various temperature for 5 min in air atmosphere

a : oxidized at 600°C

b : " " 700°C

c : " " 800°C

S(hkl) : Spinel type oxide

K(hkl) : Kovar

d : oxidized at 900°C

e : " " 1000°C

H(hkl) : Hematite type oxide

酸化被膜が比較的厚かったために、X線回折で得られた程度の分解能は得られなかった。Table 2はX線回折および電子線回折によって得られたスピネル型酸化物の解析結果を示す。

(VI) 封止体の気密性

以上の実験で確認した現象と実際に封止した場合の封止体の気密性との関連性を明らかにするために、トランジスター用システムを種々の条件で封止してその気密性を調べた。形状寸法は Fig. 1 に示したとおりである。ところで実際に封止作業を行なう場合には普通次の二とおりの方法が用いられる。すなわち、

(a) コパールとガラスを適当な治具を使用して組み合わせ、コパールが適度に酸化された頃ガラスが軟化流動して融着するようにふんい気および加熱速度を調整して、酸化と融着を一段の操作で終了する。

(b) 適当な条件でコパールをあらかじめ加熱化させ、次に適当な治具を使用してガラスと組み合わせ、この酸化の状態が変化しないような中性ふんい気でガラスと融着させる。つまり酸化と融着を二段の操作で行なう。

本実験では作業の安定性の点から後者の方法を選んだ。封止にはコンペヤ型ふんい気電気炉を使用し、炉内ふんい気は窒素中に若干の水素を混合したガスを流して調整した。具体的には酸化させたコパールと全く酸化していないコパールを通して前者は還元されず、かつ後者は酸化されなくなるように水素の混合量を調節してふんい気を中性に調整した。最高温度部分は1000°Cでこの部分の通過所要時間は5分である。各ロットの試料は混合して同時に封止した。封止後はんだ仕上げを行ない金属製の容器をかぶせ、内部に浸透液(日本レッドチェック株式会社製, 商品名: レッドチ

ェック)を入れてはんだで封じた後、真空デンケーター中に試料を1時間放置して、内部から漏出した浸透液を顕微鏡で観察し気密性を調べた。熱衝撃試験は試料を室温から350°Cの溶融はんだまたは300°Cの溶融塩(東洋金属化学株式会社製金属熱処理剤, 商品名: マルテンパーソルト TS-14)中に投入し30秒間保持し

Table 3 Effect of hydrogen annealing and gain of weight on vacuum tightness

Condition of hydrogen annealing***	Gain of weight (oxidized at 750°C in air (mg/cm²))	Leakage after the repeating of thermal shock*		
		Initial leakage	after 5 times	after 10 times
800°C 15 min	0.145	0/20**	3/20	4/18
	0.170	1/21	1/21	1/21
	0.235	0/20	1/19	1/19
1 000°C 15 min	0.135	0/18	0/18	1/18
	0.215	0/19	0/19	0/19
	0.265	0/19	0/19	0/19
1 200°C 15 min	0.130	0/19	10/19	16/19
	0.165	1/20	1/20	2/20
	0.210	0/19	0/19	0/19

* Room temp.→350°C (fused solder) for 30 sec →air cool
** Denominator: number of specimens
Numerator: number of leaked specimens
*** Hydrogen was moistened by bubbling through H₂O (20°C)

Table 4 Effect of hydrogen annealing and gain of weight on vacuum tightness

Condition of hydrogen annealing***	Gain of weight (oxidized at 750°C in air (mg/cm²))	Leakage after the repeating of thermal shock*			
		Initial leakage	after 5 times	after 10 times	after 15 times
800°C 15 min	0.135	0/18	1/18	3/18	6/18
	0.160	0/18	0/18	0/18	0/18
	0.267	0/19	0/19	0/19	0/19
1 000°C 15 min	0.360	0/19	0/19	0/18	0/18
	0.115	0/19	0/19	0/19	0/19
	0.163	0/18	0/18	0/18	0/18
1 200°C 15 min	0.265	0/19	0/19	0/19	0/19
	0.330	0/20	0/20	0/20	0/20
1 200°C 15 min	0.130	0/18	5/18	13/18	16/18
	0.210	0/20	0/20	1/20	1/20
	0.255	0/18	0/18	0/18	0/18

* Room temp.→300°C (fused salt) for 30 sec →air cool
** Denominator: number of specimens
Numerator: number of leaked specimens
*** Hydrogen was moistened by bubbling through H₂O (20°C)

Table 2 Analytical data of Spinel type oxide

(hkl)	Electron diffraction* 50 kV		X-ray diffraction** Cu-Kα	
	d (Å)	Intensity	d (Å)	Intensity
111	—	—	—	Reffer to Photo. 3 and 4
220	2.95	w	2.921	
311	2.52	v.s	2.495	
222	—	—	—	
400	2.18	s	2.053	
422	1.74	m	—	
333	1.68	m	—	
400	1.48	s	1.469	
620	1.31	w	—	
533	1.27	w	—	
444	1.20	w	—	

* Hitachi, Ltd. Model HS-6
** Rigaku-Denki Co., Ltd. "Geigerflex"

た後空冷する操作を繰り返してから、さきに説明した気密試験を行なった。Table 3 に溶融はんだで急熱した場合、Table 4 に溶融塩で急熱した場合の気密もれの発生状況を示す。まず酸化増量の点に関しては、酸化増量が少なければ初期の気密性は保持できるが、熱衝撃に対して明らかに弱い傾向が見られる。水素処理温度の点に関しては、高すぎる場合も低すぎる場合も特に酸化増量が少ない場合に好ましくない結果を生じている。なお、以上のような方法で行なう気密もれの検知感度はわれわれの経験によれば 10^{-8} cc/sec 程度のものである。

4. 考 察

コパールとホウケイ酸ガラスはコパールの酸化被膜を介して融着させなければ気密は保持できない。したがって、酸化被膜の生成条件はきわめて重要な問題である。われわれは酸化の条件が同じであるにもかかわらず、しばしば酸化被膜と地金の密着性にばらつきを生じ、密着性の悪いものは封止後の気密性も悪いことを経験し、更にこの密着性の良否を支配する一因が水素処理にあることを知った。水素処理はコパールの表面付近の炭素を除去して表面を清浄にし、封止部に気泡が発生するのを防止するために行なうものである。Kohl はこの水素処理条件について 1100°C の湿潤水素中で 15 分ないし 30 分という条件を提唱しているが、われわれはこの問題を上記の理由からもっと定量的に検討しようと考え、主として水素処理条件がその後の封止にどのような影響を与えるかという点を調べた。

酸化の条件に関しては、Kohl およびその他の研究者^{2),3)}によって研究されているので、これらの報告も考慮した上で、われわれが最も安定な作業ができると考えている温度に固定した。安定な作業というのは、たとえば非常に高い温度で酸化させれば短時間で所定の酸化増量が得られるが、わずかの加熱時間の誤差が大きな酸化増量の誤差になり、また大量に処理する場合に熱容量の関係で大きな温度こう配ができるため製品が不均一になるというような量産に不都合な点がないという意味である。以上の観点でわれわれが行なった実験結果は次のように解釈することができる。

水素処理温度が高くなるとコパールの結晶粒は大きくなるが、この条件はコパールの酸化速度に大きく影響する。この理由はコパールの結晶粒界と結晶粒内とで酸化の様相が異なっており、Photo. 1, 2 で明らかなように結晶粒界のほうが結晶粒内より酸化されやすいということによると考えられる。すなわち、水素処理温度が高ければコパールの結晶粒は大きくなり、したがって表面に現われている酸化されやすい粒界が少なくなるため酸化速度は遅くなり、水素処理温度が低ければこれと逆で酸化速度は速くなると考えることが

できる。酸化被膜と地金の密着性に関しては、水素処理温度は高すぎても低すぎても好ましくない結果が得られた。小野氏²⁾はコパールの粒界に盛り上がって生成されるスピネル型酸化物はその部分で地金に食い込んだような形で生成されているので、これが密着性に寄与しているのではないかと述べている。このように考えれば、高温の水素処理で結晶粒が、ある程度以上粗大化したコパールの酸化被膜は地金との密着性に寄与する粒界が少ないため、密着性が悪いという考え方ができるように思われる。この解釈では水素処理温度が低すぎる場合にも密着性が悪いという事実は説明できないが、これはコパールの表面層の脱炭が不完全なため、酸化に際してガスが発生して酸化被膜の密着を妨げるためではないかと考えられる。実際、水素処理が不充分であれば、封止部分に気泡が発生しやすいというのは常識であり、この事実は上の考え方をある程度裏づけしているのではないかと思う。酸化被膜と地金の密着性と封着後の気密性は確かに関係があると考えられる。酸化増量もまた気密性と密着性に関係しており、これが少なすぎ、かつ水素処理条件が適当でなければ封止体は熱衝撃にきわめて弱くなる。コパールの酸化被膜は、本実験の範囲ではスピネル型酸化物が主成分で、これに若干のヘマタイト型結晶が混入している。このスピネル型酸化物は、回折線の強度順位から考えて、 600°C 付近で酸化させた場合は方向性を持っているが、酸化温度が高くなるにつれて漸次この方向性は失われ、 900°C ないし 1000°C で全く方向性がなくなっている。この結果は文献²⁾ともよく一致している。酸化条件を固定し、水素処理温度を変えた場合の差は明りょうではない。ガラスと金属の封止性に関しては、金属の表面に生成された酸化物の結晶構造が、 Cu_2O 型やスピネル型のように、chemical valency³⁾の残っているものでなければならぬと言われている。この点に関して、小野氏は封止性にきくのは酸化物の種類よりもむしろ生成状態や膜厚で、スピネル型酸化物が下地に固着するのは単なる chemical valency のみによるものではなく、結晶粒界に沿って下地から発生しているものであるから機械的要素も含んでいるのではないかということ述べている。本実験の結果を総合して考えてみると、スピネル型酸化物が生成されていても、コパールの結晶粒度や酸化被膜の膜厚を変えることによって封止性は大きく左右されており、したがって封止性という問題は金属表面の清浄さ、金属の結晶粒度および酸化被膜の膜厚などが総合されたもので、上記の機械的要素も多分に含んでおり、単に chemical valency のみによって論ぜられるものでないと言える。なお、コパールは他の封止用金属と違って、使用中に変態を起こすことがあり、この変態はコ

パールの焼なまし条件によって左右されるが、本実験⁵⁾に使用したロットのコパールは、実験範囲内のすべての処理で変態を起こしていないことを顕微鏡的に確認したものである。

5. 結 言

コパールの水素処理条件を変えて種々の結晶粒度の試料を造り、これが封止性に及ぼす影響を中心として検討を行ない、次の結論を得た。

(1) 水素処理温度を変えることにより、コパールの結晶粒度は特に 1000°C 付近以上で大きな影響を受けることがわかった。

(2) コパール結晶粒度は酸化速度に影響し、結晶粒が大きくなるほど酸化速度は遅くなることがわかった。

(3) コパールとその酸化被膜の密着性は水素処理温度によって大きな影響を受け、これは高すぎても低

すぎても好ましくないことがわかった。

(4) コパールはスピネル型酸化物を生成しやすく、この酸化物は酸化温度によってその方向性に影響を受け、600~800°C では方向性を持っているが、これより高い温度では方向性は失われる。また酸化温度を固定し、コパールの結晶粒度を変えた場合には、酸化物の結晶構造とコパールの結晶粒度の間には明りょうな関係は見出されなかった。

(5) 封止性は酸化被膜の膜厚やコパールの結晶粒度などに大きく支配され、単に酸化物の種類のみからは論じられないことがわかった。

参 考 文 献

- 1) W.H. Kohl, Materials Technology for Electron Tubes., (1951) Reinhold Pub. Corp.
- 2) 小野, 応用物理, 25-12 (1956)
- 3) 岡本, 徳光, 日本物理学会誌, 2-2 (1947), 2-4 (1947)
- 4) H. Scott, U.S. Patent 2,043, 307 (1936)
- 5) 三戸, 日本金属学会誌, 20, 10 (1956)

(785 頁より)

英国におけるプレストレストコンクリートに関する最近の研究 (Recent British Research on Prestressed Concrete) A.R. Collins, Journal of the Prestressed Concrete Institute, Vol. 6, No. 2, pp. 39~58 (June 1961)

英国におけるプレストレストコンクリートに関する研究を概説したものであって、次の問題についての研究結果が示されている。

(a) 曲げとねじりを受けるはりの研究——長方形、I 形および T 形断面 PC はりの曲げモーメントとねじりモーメントの相対的大きさを種々に変化させたときの耐力変化を実験的に研究し、ねじりモーメントの作用による PC はりの曲げ耐力はきわめて大幅に低下することが報告されている。

(b) PC プレキャストはりとは現場打ちコンクリート床版との合成けたに関する研究——主としてプレキャストはりとは合成された床版との間の収縮およびクリップの差の影響についての実験報告がなされている。

(c) PC ストランドの定着長さに関する研究——プレテンション PC 材に用いる各種ストランドのプレストレス導入時の定着長さに関する実験報告が示されている。現在までに得られている結果は下記のとおりである。

3/8 in 7 本よりストランド——7~8 in
 1/2 in 7 本よりストランド——11~14 in
 0.7 in 19 本よりストランド——18~22 in
 0.2 in PC 鋼線——15~27 in

(d) 定着端応力分布に関する研究——正方形断面および I 形断面の定端端コンクリートブロックに局部載荷を行なった場合の割裂応力分布を実測した結果が述べられている。

(e) PC の耐火性に関する研究——コンクリートおよび PC 鋼材の高温度における性質、ポストテンション大形はりの耐火性とはり断面寸法の影響、プレテンション床材の耐火性などに関する広範な研究成果がまとめられている。 (六 車熙)