

構造物の實驗解法〔十三〕

青 木 楠 男

IV 歪 模 様

概 説 彈性限度内の應力をうけた鋼は、荷重の除去と共に何等發生應力の痕跡を止むることなく原形に復するも、彈性限度以上の應力をうけ、材料に屈伏を生じたる場合には、荷重を取り去ればこゝに永久歪を殘すに至ることは衆知の事柄である。

今この永久歪の發生狀態を検査することが出来るならば、これによつて事前の應力分布の概観を推斷することは困難でない。

一般にこの永久歪の發生は少くとも其初期に於ては極めて局部的で、材料の全面に亘つて一様に生ずるものでない、従つてこれによつて材料に最大影響を與へたる應力の發生狀態を知ることが出来る。

この現象の最も顯著に現はるゝ材料は鐵、殊に低炭素鋼、又は軟鋼であつてこの方面の今日までの研究は殆んどこの材料に限られてをる。而して現今の鐵構造物の大部分が軟鋼である關係上、永久歪の檢出が極めて重要且つ興味ある問題と

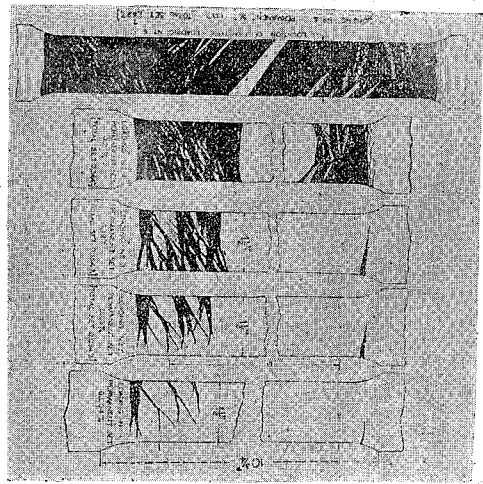
なることが多い。

鉄鋼の歪模様 平軟鋼の抗張試験片の表面を鏡仕上げとして、これを抗張試験機にかけると荷重が降伏點に達して下降を示した瞬間に、試片の表面に伸張の方向とある角度をなして曇つた線條が現はれる、この線條は「歪模様」又は「ルーラー氏線」と稱へられてをるもので、伸張の進行と共に漸次試片全面に擴つてゆく。而してこれ等の歪模様の發生は極めて規則的であり、其這り面の方向は内部主應力の方向と一定の關係にあることが知られる。

今平鋼抗張試験片につき其の歪模様發生の状態を見るに、先づ最初にこれの現はれるのは試片平行部と廣幅の把握部との境目なる曲線部に起る。この部分の纖維應力の他の部分に比して大なることは本稿(十一)光弾性學實驗例の項にて示した如くである。第一線の發生は突如として起り、同時に應力變形圖に於て應力の急激なる降下を示し、屈伏點に達したことを示す。ついで第二第三の線條が現はれ伸長の増加著しきも荷重は更に上昇せず、試片表面の歪模様は益々増加し殆んど全面を蓋ふに至つて荷重は再度の上昇を示すに至る。

第三百三十五圖は荷重の進行に伴ふルーラー氏線發達の狀況を圖示したものであり、第三百三十六圖は其寫眞である。

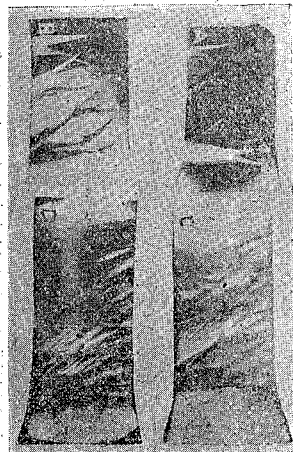
これ等の線條を検するに孰れも試片内に生じたる塑性層即ち這り面と試片の表面との交線を示すものであり、この面を境にして兩側の部分に相對的の移動のあることが認められる、第三百三十七圖は斷面一様なる抗張及抗壓材に生ずる這り面と、其上下の部分の移動狀況を圖示したものである。この這り面は試片中にて最も著しい變形を強いられたる部分であつて大體に於て主剪斷應力面に一致し這り面の試片主軸となす角度は抗張材にて 45° より稍大に抗壓材にて稍小である。實際問題ではこの這り面は複雑なる三元方向の應力分布に對應して起るからして「ルーラー氏線」の發生も極めて込入つた



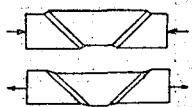
第百三十五圖 ルーダー氏線發達の状況

ものとなるが、これの詳細なる研究が塑性状態に入つた後の内力分布問題の解決に資すること
 だ大である。

張り面歪みの機構 試片の表面に現はれる歪模様は鋼材の種類によつて著しく明瞭なものと然ら
 ざることがある。顕微鏡検査の結果によると前種のものとは比較的、細粒組織を有する鐵で歪模
 様の線條が明かであると同時に材料の降伏點も確然と認めることが出来るが、後種のものとは比較



第百三十六圖 抗張試験片に於けるルーダー氏線



第百三十七圖 抗張及抗
 張材に於ける上面の發生

的、粗粒組織を有し、降伏點に於ける荷重の降下があまり明かでない。又金屬單結晶についての試験によりてはこれが極めて延性に富み且、低荷重にて降伏するに對し、炭素含有量 0.05% 程度の極細粒組織の軟鋼が前者に比して極めて明確なる高降伏點を示す等の點より、鋼材に於ける歪模様發生の特性は鐵の結晶組織に著しい關係のあることが知られる。

抑も軟鋼の組織を考ふるに、其燒鈍されたる状態に於ては大體波來土 (Pearlite) と地鐵 (Ferrite) との二組織より成つてをり、この兩組織中歪模様に大なる影響をもつものは地鐵であつて、波來土の多少は降伏點の顯著なるや否やにはさほど關係なきものと考へられる。

而して多少なりとも波來土を含む鋼の地鐵は炭素を飽和の状態に含んでをると考へられ、少くも 200°C の如き低温に於ては炭素が過飽和の状態にありと考へて差し支へない。

この過飽和炭素は凝結に際して地鐵の結晶粒から析出されて結晶粒間に境界セメント (Boundary Cementite) を形成し、尙未析出の炭素は結晶粒の周圍に過飽和の状態にて殘留し、境界セメントと共に地鐵を包み、こゝに極めて脆い伸の少い炭化鐵よりなる蜂巢狀の組織の中に延性の大なる地鐵の充填されたる複合組織を形成することとなる。

斯くの如き複合組織を有する鋼へ張力或は壓力が加つた時にどうなるか。先づ最初にこの外力に對抗するものは脆い伸の少い炭化鐵の蜂巢狀組織であつて内部の地鐵はこれに與らない。作しこの蜂巢狀組織は厚さも薄く其伸びも地鐵に比して遙かに小さいから、外力がある價に達すれば最大効果を有する應力面に於て蜂巢狀組織の切斷が起る。切斷が起ればこの面に於ける應力は地鐵によつて支へられねばならぬから地鐵は蜂巢狀組織の切斷と同時に急激に外力をうけ、延性の大なる地鐵は急に伸びる。

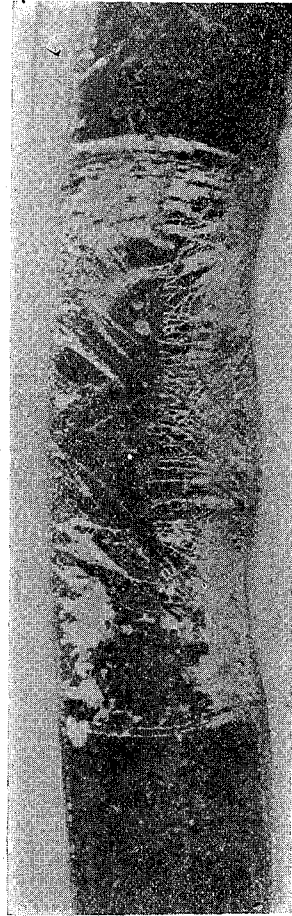
この最初の炭化鐵蜂巢狀組織の破壊が軟鋼に於ける降伏點を示すものであつて、蜂巢狀組織の切斷と同時に急激に地鐵の伸びが起り、其伸びの速さが外力を加へる速さより大であれば應力歪曲線に於て降伏點後に應力の下降が現はれることとなる。

この蜂狀組織の切斷面に沿つた地鐵は他の部分の地鐵と異つて著しい伸びをうけるほかに、この衝擊的な伸びの發生の結果内部組織に變化を來たし、且つこの面が外力の方向に傾いてをる場合には面に沿つてのじりを起し、試片の表面には外觀上の異常が現はれる。これが所謂「歪模樣」又は「ルーダー氏線」である。

最初の「ルーダー氏線」の發生後この部分の地鐵はある程度まで伸び、其歪と内應力とが釣り合ふに及んで應力は再び増大し、最初に蜂巢狀組織の破壊を見たる値に至れば再び同組織の他の部分に切斷が起り、應力は降り、新たな「ルーダー氏線」が現はれる。この現象が何回か繰り返され試片全面に多數の歪模樣が現はれ、外力が全く地鐵によつて支へらるゝに至るまで、應力歪曲線に於ては伸びの増加を示すのみで荷重の増大を見せない、こゝが所謂降伏點強度である。

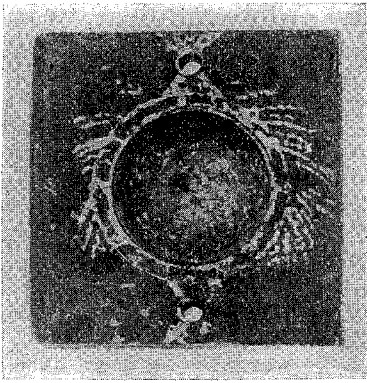
この状態を過ぎて試片は全く地鐵としての性質を示すに至り、伸びと應力が相伴つて増大し、遂に切斷に至る。而してこの間降伏組織は地鐵の剪斷にり等に抵抗を與へ試片の特性は純鐵の場合とは一致しない。

以上は歪模樣的現出と鋼の降伏點との關係を説明したもので、こゝに歪模樣現出の機構を要約すれば先づ軟鋼内部組織の炭化鐵蜂巢狀組織の破壊が起り、これが急激なる破壊は其部分の地鐵に衝擊的な伸びを生ぜしめ、こゝに塑性變形を起したこり面が形成せられ、この面の試片表面との交線に現はれるものが「ルーダー氏線」である。この意味から蜂巢狀組織の充分でない粗粒構造の鋼材に於ては「ルーダー氏線」の現出が明瞭でないことが認められる。



第百三十六圖 工指彎曲試験に於ける黒皮剝落の状況

歪線線輪出法 極めて清らかに仕上げられた鋼材の表面に現はれる歪模様はこれを肉眼で認め得ることは既説の如くであるが、同様の模様を黒皮を有する材片又は表面へ「セメント」又は胡粉を塗つた



第百三十九圖 銀頭周囲の黒皮剝離

材片が歪をうけた場合、これ等被膜上に認め得ることが屢々ある。第百三十八圖は工桁の彎曲試験に當つての黒皮剝落の状況、第百三十九圖は銀頭の圍に生じた鋼板黒皮の裂疵を示す。併しこれ等の歪模様を乾板上に印し、更にこれが發生の状況を詳かにせんがためには、腐蝕檢出法、光學的裝置による「シュリーレン」法、金相顯微鏡による檢査、或は X-Ray による第法等が利用されてをる。

腐蝕檢出法 この方法は 1921 年に Adolf Fry 氏によつて發表されたもので一般に「フライ氏法」と呼ばれてをる。

〔Kraftwinklungsfiguren in Finsseisen dargestellte durch ein neues Ätzverf-

ahren, Krumpfsche Monatshefte, Band. 2, S. 117, 1921)

この方法は鹽化第二銅と鹽酸とよりなる腐蝕液によるものであつて、歪をうけた鋼材をこの溶液内に浸すとき材料は溶出し一定の電圧を示す。而して歪をうけたる部分と受けざる部分とにて其發生電壓に大なる差が生ずる。この理由は兩部分の有する遊離エネルギーの差に起因するものであつて、電壓の高き歪をうけたる部分より、他の部分に向て液絡によつて局部電流が流れる。この際の電流は主として輸率の高い水素イオンによるものであつて、其結果として電壓の高い歪をうけた部分では鹽素オシンの活量が増して酸化が著しく進捗するが、低電壓の歪をうけざる部分では水素オシンの蓄積を見、酸化は進捗せず奮態を保持する状態となる。こゝに於て兩者間の腐蝕程度に顯著なる差を示すに至り歪模様を明瞭に識別しうるに至る。

この検出法を用ふるに當り最も重要な點は鋼材の選擇で、これによつて歪模様の現出に著しい差のあることは既述の如くである。竹中二郎氏の實驗によれば炭素含有量 0.1~0.4%の鋼材中

C.	Si.	mn.	P.	S.
0.19	5.18	0.51	0.016	0.012

のものが最良の成績を示したと報告されてゐる。

同氏は材料を先づ 700°C にて 30 分間焼鈍して製作に當つての加工歪を除き、然る後に試験材を製作し、降伏點以上に外力を加へ、再び 200°C 附近にて焼鈍し、後歪検出用の所要斷面を機械又は鑢仕上げにて作成し表面を砂紙にて仕上げたる上に於て腐蝕を行つてをる。

使用腐蝕溶液は次の5種で、第2種のは所謂「フライ氏の腐蝕液」である。

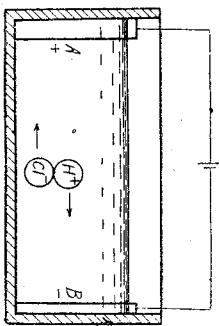
歪検出用腐蝕溶液

配合種類	1	2	3	4	5
濃鹽酸(38%)	cc	60	40	60	40
蒸溜水	cc	50	30	50	30
エチルアルコール	cc	—	25	50	25
鹽化第二銅($CuCl_2$)gr	20	5	20	10	20

これ等數種の溶液は歪の種類又は程度によつて適不適があり、其都度最適のものが選ばれるべきである。腐蝕の時間は試片の種類により、數分乃至數十時間を要するも一般に數分間にて薄く歪模様を見分けらるゝに至る。

腐蝕完了後の試片は水及アルコールにて充分洗滌し酸を完全に除去すべきことは金屬顯微鏡用試片の場合と同様である。

以上「フライ氏檢出法」が歪をうけたる部分と然らざる部分との電解電壓の相違に起因する腐蝕度の速速を應用したものである點から、この電解作用を一層顯著ならしむる目的で兒玉元一氏によつて考案された腐蝕液へ電流を通ずる方法がある。第四百十圖は其機構を示すもので、Cなる不導體容器に盛つた腐蝕液内に A なる歪出試片を浸し、B に適當なる導體を入れ、兩者



第四百十圖 電流を通して腐蝕を促進せしむる歪檢出法

間に電源を入れ、Aを陽極、Bを陰極につなぐ。然るとき液中にては圖に示すが如きイオンの移動を生じ、陽極に於ける鹽素イオンの活量を増し、歪部の腐蝕は促進されるに至る。児玉氏によれば、この方法は電流電圧の調節、電極の選擇及取扱、腐蝕液の選擇、酸化劑の利用等により可成自由な條件にて腐蝕の目的を達しうるが故に歪検出法としては極めてすぐれたる新法であると云はれてゐる。

腐蝕検出法による實驗例は後に歪模様の實例の項に於て多數説明する機会があるからこゝには掲げない。

銅面の歪模様の検査 「フライ氏法」が腐蝕によつて軟鋼の歪模様の検出せんとするものなるに對し、加藤留五郎博士及連水永夫氏にて考察された酸化銅皮膜法は銅の歪模様の検出せんとするもので、一種の腐蝕法と考へられるのでこゝに其概略を記述したい。

本法の骨子とするところは歪をうけた銅試片を適當の濃度にして充分空氣に曝露し酸素が自由に溶解離散せる苛性曹達溶液中に浸すことにある。同液中に投ぜられた銅面には銅の組織が全く均齊なるとき黑色の酸化銅皮膜が一樣に形成せらるゝも、歪をうけてゐる場合には皮膜は歪の多少によつて薄厚を生ずる。即ち歪の大なる部分には殆んど皮膜を生ぜず歪の少き部分には厚き膜を生じ、外觀上試片表面に黒褐色の濃淡を生ずる。

この歪模様の形成の機構は加藤、連水兩氏の說に従へば次の如くである。

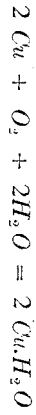
先づ銅は溶液中の酸素と化合し酸化第一銅となつて苛性曹達液内に溶解する。



この酸化第一銅は更に酸素を採り酸化第二銅となる。



然るにこの酸化第二銅の苛性普達液への溶解度低きため液より分離し、次の反應により水酸化銅として再び銅面に附着する。

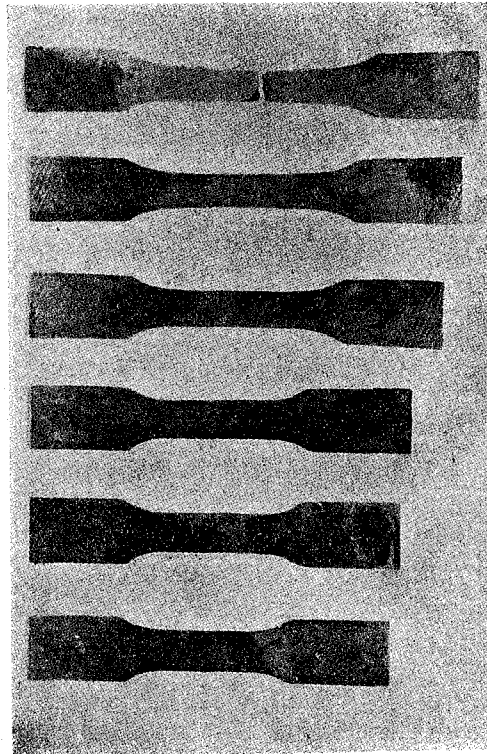


而してこの第一の銅の溶解は電解電壓の高い歪を多く受けたる部分に於て盛んであり、第二の附着は低電位の歪をうけざる部分ほど著しいことになる。この結果試片上には歪の大小に應じて黒色皮膜の歪模様が現はるゝこととなる。

兩氏の實驗にては約 0.4% の苛性普達溶液が用ひられた。溶液は充分空気に曝露し、

酸素を自由に溶解瀰散せしめたる後銅の試料を約 2.5 時間浸潤し、適當に歪模様の現

はれたる後取出し充分水洗の上乾燥せしめてをる。この浸潤の際皮膜を形成せしめんとする表面を溶液中にて同一水平面に置くことが肝要である。これ溶解せる Cu_2O が下降して低部に皮膜を形成し易きによる。



伸長率(%) 63 50 30 10 5 0
 荷重(kg) 910 885 884 625 438 —
 第四十一圖 銅板抗張試験材の歪模様 (逆水氏による)

第四百一十一圖は銅板抗張試験材について上記の方法にて検出した歪模様である。伸長の異なるものほど黒色皮膚の附着の少いことが明瞭にわかるが、鋼に於ける歪模様の如く顯著でない。これは元來銅に生ずる歪み模様其物の明瞭でないことに因るので、この點は銅の組織が軟鋼に於ける蜂巢状炭化鐵と地鐵とによる複合組織とは全く異り、單一組織にして、其應力歪曲線を見るも明かなる降伏點の如きを認め難き點より推斷することが出来る。(未完)

路面電車が迅速輕走のペースに驅逐せられて早晚都市から其の姿を消すであらうと云ふ論者もあるが我邦に於て代表都市と見らるゝ東京市外五大市の路面電車事業の成績を擧げて大勢觀照の資料に供する。

市名年度	種類	運轉料數	乗客人員		總收入	總支出	利益金	收入對支出
			人	圓				
東京	大正十一年	108,718,131	4,347,301,114	31,215,101	1,272,129,231	1,027,027,000	24,192	
	昭和六年	227,828,007	5,377,828,221	31,215,101	1,272,129,231	1,027,027,000	24,192	
京都	大正十年	31,752,608	747,027,111	4,762,110	1,027,027,000	2,277,828,007	4,762,110	
	昭和五年	31,752,608	1,017,027,111	4,762,110	1,027,027,000	2,277,828,007	4,762,110	
大阪	大正十一年	42,218,208	1,277,828,221	1,277,828,221	1,277,828,221	1,277,828,221	1,277,828,221	
	昭和六年	42,218,208	1,277,828,221	1,277,828,221	1,277,828,221	1,277,828,221	1,277,828,221	
神戸	大正十年	7,752,608	1,017,027,111	3,762,110	1,027,027,000	2,277,828,007	3,762,110	
	昭和五年	7,752,608	1,017,027,111	3,762,110	1,027,027,000	2,277,828,007	3,762,110	
名古屋	大正十一年	7,027,111	1,277,828,221	1,277,828,221	1,277,828,221	1,277,828,221	1,277,828,221	
	昭和六年	7,027,111	1,277,828,221	1,277,828,221	1,277,828,221	1,277,828,221	1,277,828,221	
横濱	大正十一年	8,027,111	1,277,828,221	1,277,828,221	1,277,828,221	1,277,828,221	1,277,828,221	
	昭和六年	8,027,111	1,277,828,221	1,277,828,221	1,277,828,221	1,277,828,221	1,277,828,221	

十年間を隔てゝの成績を比較すると前表の通で運轉料數延長するも乗客數の減するものがあつて神戸市を除くの外は五大市とも收支の對比は支出は其率を増加するを見るのである。乍去路面電車が全く行き詰つて自動車が都市交通機關として絶大な効力を現はし近き將來に於て路面電車を驅逐し得るものとは思はれない。