

土木工學に於けるX線の應用 (4)

島田八郎

V 章 應 用 編 (其の1)

序説 既に第 IV 章までの記述により X 線の發生特性並びに寫真作用の傾向の全般に涉り基本的事項を一通り説明した、以下述べんとする應用に關する方面は主として第 V 章までの諸性質を適宜利用すればよい。然れども其の應用上の理論技術と雖も一個の獨立せる分科をなすもので目的及び結果の精度如何によりては頗る高遠な理論と深き實驗上の技術を要す其の全貌を遺憾無く記述する事は筆者の到底及ぶ所でない。然れども現今發達途上にある斯かる方面の科學が如何に多大の利用價值を有し利用者に其の人を得ば土木工事の如きも建設分科に於ける應用も豫想外に大なるか其の一端を述べ得ば望外の幸である。先づ透過試驗に關する方面より記述せん。

鐵鋼製品及び構造物の X 線による透過試驗方法並に試驗結果

(1) 節 概説 緒言に X 線應用方式を便宜上 4 種に分類した本章は其の (1) なる透過法を鐵鋼類の内部に存在せる缺陷の判定に應用せる場合 X 線は如何に利され又其の缺陷發見率精度は如何なる程度のものであるかを述べる。半散銅類即ち構造用鋼類に關する實驗結果を主として鑄鐵に關する部分は省略す、兩者は全く同じ傾向なれば實用上鋼類の結果より推測するも大なる誤謬はない、一般に透過試験に於て常に少くとも考慮に入れる事は、下記の事柄である。

(1) 供試體原子種別を知り内部に異なる物質を含む場合其の原子の種別を推測しをく事。

(2) 供試體の最大肉厚と含有異種物質 (缺陷等) の大きさにより適當な管球電壓及び X 線投射時間を定める。

(3) 含有異種物質の存在推測位置と X 線放射方向の關係を定む。

其他放射面積の大きさ管球フィルム距離等の關係あるも後節に詳しく述べる。以下主として白色 X 線による試験を對照とせるものである、透過試験には常に散亂 X 線の影響の防止等考慮すべきもの餘多あるも後節に説明する機會がある通常工學上 X 線が使用せられる場合管球電壓は少くとも 50KV 程度以上であるから 1 章 (3)' (3)" 式により白色 X 線の最短波長 λ_{\min} 、最大エネルギー一點の波長 λ_{\max} は夫々

$$\lambda_{\min} = 0.26\text{\AA}, \quad \lambda_{\max} = 0.48\text{\AA}$$

である。一方茲に取扱ふ鋼製品の如きは大部分鐵原子 (Fe) よりなるものである。従つて K 系列吸收端は第 IV 章 3 節第 5 表より Fe に對し 1.7394 \AA なれば通常特に選擇吸收の影響を考慮に入れる必要はない、又 X 線強度測定用で使用される寫真乾板感光材料 Ag₂Br の吸收端も 0.918 \AA 、0.485 \AA なれば此點より見るも感度に急激な變化を豫想する必要がない。供試體より輻射する散亂影響は別に慮考に入れ透過試験を行ふものである。常識的に吸收率として寫真感度を豫想するも吸收の傾向としては第 IV 章 (11) (14) (15) 式を基準とし X 線が供試體を透過する際の吸收を考察するが

便である、構造用鋼は化学成分として Fe の外

C = 0.15~0.4%; P = 0.2~0.3%; Mn = 0.45~0.60%; S = 0.03~0.05%; Si = 0.2~0.03%;

Cu = 0.3~0.4%

を含む。

鑄鐵は化学成分として Fe の外

C = 3.0~3.6%; P = 0.3~1%; Mn = 0.5~1.2%; S = 0.08~0.1%; 0.5~3.0%

を含むので茲に云ふ透過法では例へば Fe~C が如何なる組織状態に當るや即ち固溶状態なるやセメントライト、黒鉛等なるやの如き金相學的差異を見出す事を目的とせず上記の如き平均組成を有する物質内に含有せる瓦斯泡スラッグ各種の瑕缺陷等の存在の搜索を目的とす、即ち W 章 4 節(14)式より明かなる如く原子量小なる非金属例へば砂礫の含有瓦斯泡、スラッグ、酸化物鱗隙等の部分は X 線の吸収率少い場合が多い、従つて供試體に投射された X 線の中斯かる異物質の存在せる部分を透過するものは吸収される事少く寫眞乾板に強く感ず、即ち W 章 5 節に述べた方法又は肉眼により乾板の黒さ(S)の差異を求め其の結果供試體中の缺陷の量を推定するものである、最も簡單な場合は瓦斯泡のみが一様に分布し所謂空隙率として見掛比重の減少せる場合である、今材料の質量吸収係數 μ が與へられてある時上記空氣泡により見掛比重が ρ' に減少せる場合 ($\rho > \rho'$) 厚み (X) を通過する時 X 線の強度は W 章〔4〕節(11)式により

$$J = J_0 e^{-\frac{\mu}{\rho} \rho' x} \dots\dots\dots (16)$$

となる。

吸収度は空際により著しく減少する事が分る、(16)式は瓦斯炬の個々の大きさ微小にて理論上度外視せるものに就き考察せる場合で吸収に関する傾向を知る事を得。

X線寫眞の乾板の黒さは缺陷の大きさの判定等に重要な關係を有するもので肉眼による黒さ判定能力により、實際上の缺陷の可測最小厚みが定るものである。通常 K. A. Stierzel, Glockner 等の研究の結果全體地の黒さの標準とし $S = 0.7$ ……となる様 X線の量を投射してゐる、黒さ $S = 0.7$ に於ては肉眼で黒さ差異 0.01 が判別し得。靈光の下で判別する場合 0.7 より少し感光小なる黒さ $S = 0.5$ を與ふ方其の判別能力を益すものである。通常 $S = 0.7$ 又は 0.5……を與へる様 X線撮影操作を試みてゐる、本章は下記の諸項に就き述べん。

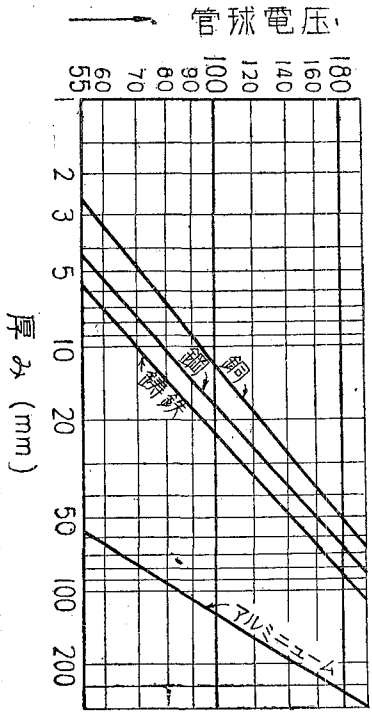
- (1) 試験體厚さ、管球電壓投射時間並に管球試験體距離に関する事柄
 - (2) 可測し得る最小缺陷の厚みと試験體總厚み並びに缺陷部分の形状位置との關係
 - (3) 射出面の大きさと寫眞感度並びに可測し得る缺陷の大きさとの關係
 - (4) ドイツに於ける電弧銲接部の X線透過による試験方法の解説
 - (5) X線透過法による電弧銲接部試験の現状並に二三の結果に就て
 - (6) 特殊な形状 (X線の透過度より見て) を有する鋼製品、例へばワイヤロープ、チェソンの X線透過による試験方法
- 〔2〕節 鋼材と X線透過度との關係 第 IV 章(4)節第 7 表の材料の X線質量吸收率 $\frac{\mu}{\rho}$ と X線波長の關係表より鐵鋼の場合の吸收率も其の大略の値は明かなれども特に鋼材に關しては K. A. Stierzel の詳細な研究がある。今比較の爲め同氏により行れたアルミニウム、銅の吸收率實驗結果をも舉ぐ構造鋼程度のものに對する、此等吸收率は (17) 式

の如き関係にある。

$$\left. \begin{aligned} \mu_{Fe} &= 4.1\lambda + 680\lambda^{2.78} \\ \mu_{Al} &= 1.4\lambda + 37.2\lambda^{2.94} \\ \mu_{Cu} &= 4.8\lambda + 1030\lambda^{2.79} \end{aligned} \right\} \text{波長範囲 } 0 < \lambda < 0.3\text{\AA} \dots\dots\dots(17)$$

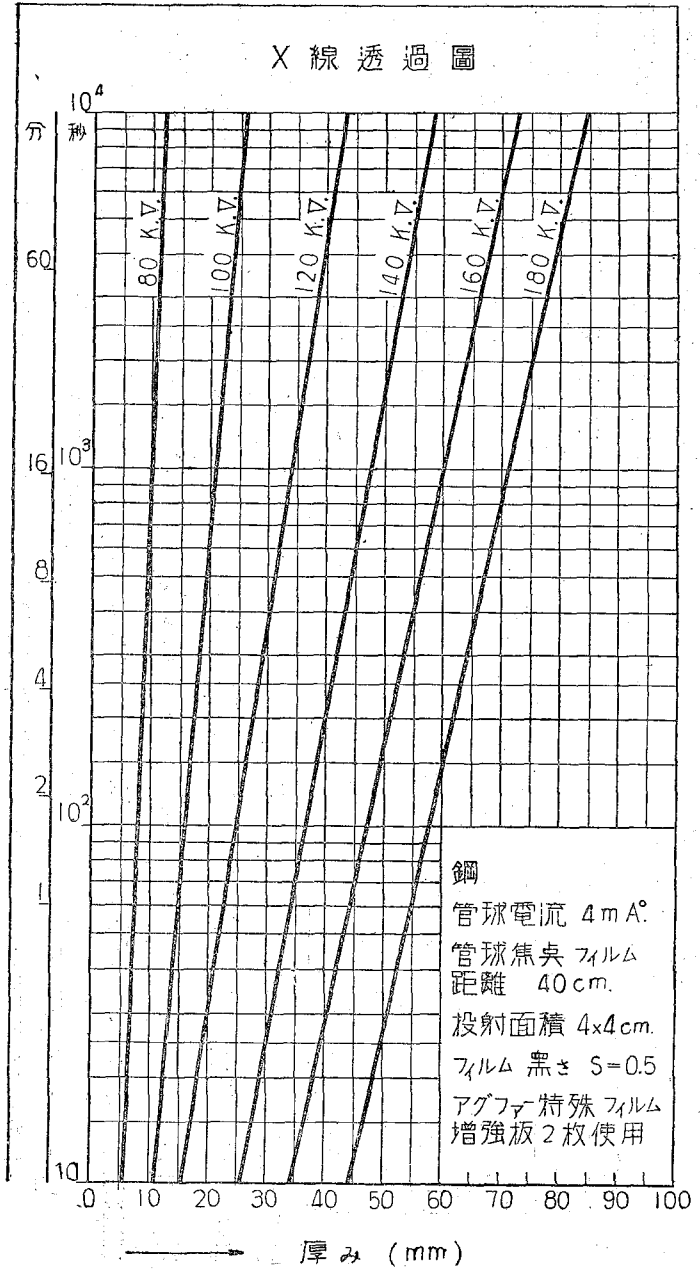
但し μ_{Fe} , μ_{Al} , μ_{Cu} は鐵、アルミニウム、銅の單位厚みに對する吸收率、 λ ; X線波長 (\AA) を示す。X線は供試體の或る厚さを通過する際に(17)式にて與へらるゝ吸收を受け寫眞の感度も減少する。然るに供試體の厚み大く且つ、投射面積大なれば一次投射 X線の外に各部より放射する二次線即ち散亂線の影響を蒙る事が多く時には散亂線による感光度が一次投射光によるものより著しく大となる事もあり得、従つて X線による透過試験では常に投射面積が問題となる。

第 V 章(5)節より明らかなる如く常に寫眞乾板の黒さ $S=1$ 程度以下では黒さは投射時間 (t) と管球電流 (i) の相乗積に正比例する。即ち $S = K(it)$ である、一方管球電壓 (V) の影響は、放射線波長 (λ) に對し I 章第 3 圖の如き関係にある、従つて (17) 式等による管球電壓を増加する事は吸收係數 (μ) を著しく減少する事となる。且つ後節述べるも管球及び供試體



第 33 圖

X線透過圖

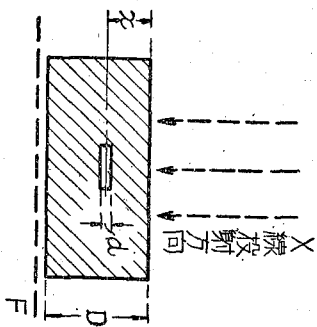


第 34 圖

距離 (a) の X 線強度の關係は略ぼ 2 乗の逆數に比例するものである。理論的には管球電流は無限時間通過し得るも實用上 30 分以上は困難な事が多い、従つて或る厚みのもの透過に際しては實用上電壓の底部に制限がある。且つ可及的管球電壓を下げ許されたる範圍内で長時間撮影する事がコントラスト上よいものを得。勿論使用フィルム増強板等の種類により可成り異なるも、管球供試體距離 40cm, 二枚の挿入式増強板使用に於て黒さ $S=0.7$ を標準とし、クーリヂ管使用に際しての適當なる電壓と供試體厚みの關係は第 33 圖に示す如きものである。大體本圖は射射時間 30 分位を標準としてゐる。

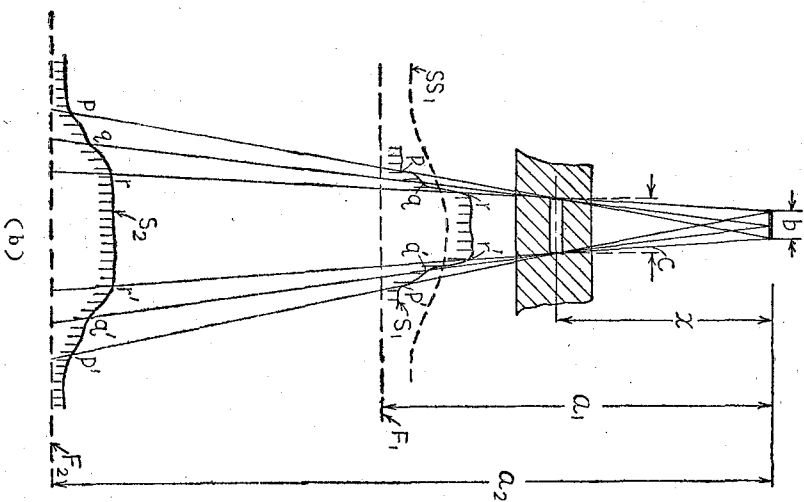
同圖より明かなる如く、銅は X 線透過度銅より悪くアルミニウムは著しく大である。第 34 圖は詳細な構造銅の X 線透過試験成績を示すものである。試験條件は總て同圖中に記入してをいた。同圖により供試體の厚み等により定むべき管球電壓等を選定する事が出来る今與へられた、條件が下記の如き場合——供試體厚み 3cm, 管球供試體距離 50cm, 管球電流 (i) 2mA, 管球電壓並びに射射時間が如何に定むべきや、今投射面積の影響を度外視すれば $\frac{4}{40^2} : \frac{2}{50^2} \div 1.55$ の割合に X 線射射エネルギーを増大すればよい事が分る。第 34 圖を参照し直ちに適當な電壓と射射時間が定まる。斯かる推論は全く輻射 X 線が並行であり且つ、供試體内の缺陷の位置並びに其の可測最小差異等重要なる事項を度外視せる場合の推論である、今簡單に之等諸性質の相互關係を一應考察しをく。第 35 圖 (a) (b) X 線の射射方向と内部缺陷の位置並に X 線寫真乾板上の X 線分布強度との關係を示すものである。

第 35 圖 (a) の如き並行線の場合は缺陷は其の厚み “a” に相當するだけ X 線吸収少なければ乾板上其の値に相當する黒さが明瞭に現れる、然るに實際は同圖 (b) の如く對陰極は “b” の幅を有するもので對陰極供試體缺陷、フィルム (F) の距離を夫々 x, a_1 とすれば F_1 上の X 線強度の分布は $P_1 r_1^2 q_1^2 \sim S_1$ 曲線で示す如くなり、境界は $P_1 r_1^2 (q_1^2)$ の如く



(a)

第 35 圖 X線投射方向と供試體缺陷、位置並びに写真乾板上の分布との關係説明圖



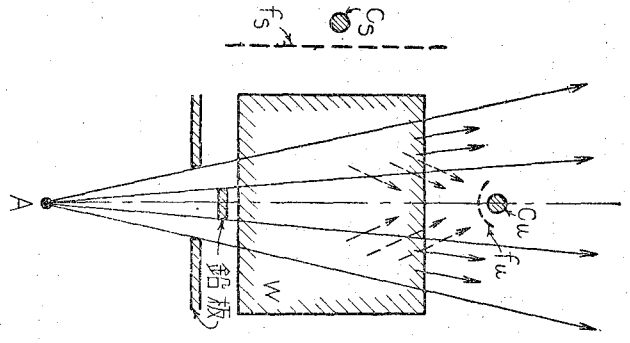
(b)

連続的になる、若し缺陷フイルムの距離が相對的に x, a_2 となればフイルム上の X 線強度分布は $S_2 \sim$ 曲線の様になり F_1 の場合に比較して更に境界が不明瞭となる、更に照射面積々大にして各部より輻射する散亂線も其の影響を及ぼす場合は散亂線による強度分布 SS_1 との總和として實際上の感度が定る、従つて缺陷部の境界は $S_1, S_2 \sim$ 曲線の場合より更に不明瞭となり、缺陷の判別は益々困難となる。

従つて實際上の X 線透過法に於ては常に此點を明かにして置く必要がある、次節に散亂による影響を主眼として一般の傾向を述べる。

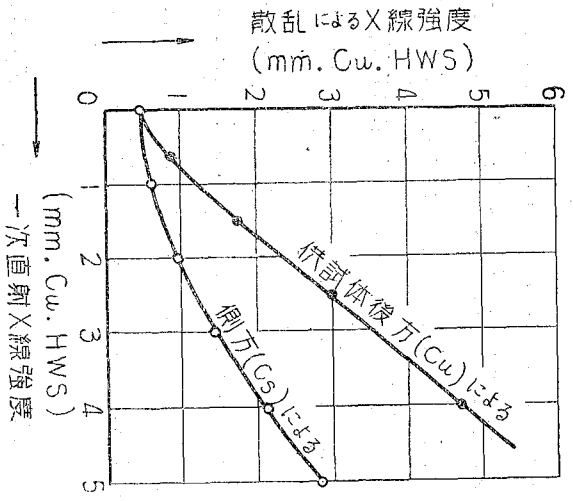
〔3〕節 供試體による散亂 X 線の透過 X 線強度分布に及ぼす影響並に透過試験に於ける照射面積の廣狹の寫真感度に及ぼす影響 第Ⅱ章 4節に X 線を試験體に投射する場合通常の光線の場合と異り所謂散亂作用により一次照射線方向以外にも新に X 線の分布する事を述べた。第36圖 (a) (b) は鋼材に對する散亂影響を實驗せる L. Graf, R. Jaeger の研究結果の一つである。W は供試體で A なる對陰極より X 線が投射され三枚の鉛板により其の大部は遮斷され圖上矢記號にて示せる部分の X 線のみが W を透過する事となる。 O_1, O_2 は背後及び側面に置れた X 線強度測定器である、 f_u, f_s は O_1, O_2 の周圍に置れた銅薄片よりなるフイルター (吸収片) にて厚み 0.2mm のものを多數組合せ重ねて使用する。X 線強度及び其の硬さを示す方式とし O_1, O_2 の感度を半減するに必要な f_u, f_s の厚み即ち半減層の厚み (H. W. S) を採用した。H. W. S の厚み大なるものほど X 線の硬さの大なる事を示すものである。第36圖 (b) の曲線は O_1, O_2 による實測値を示すもので背後及び側面の散亂 X 線の硬さが一次直射 X 線硬度と如何なる関係にあるか、分る。

斯の如く吸収試験に於ては供試體による散亂 X 線の影響が可成り著しく、従つて後に説明するも照射面積の大なる場



(a)

供試體 (W) と一次直射 X 線
並に測定器位置の關係を示す



(b)

測定器位置と X 線の銅板
による半減層厚みの關係

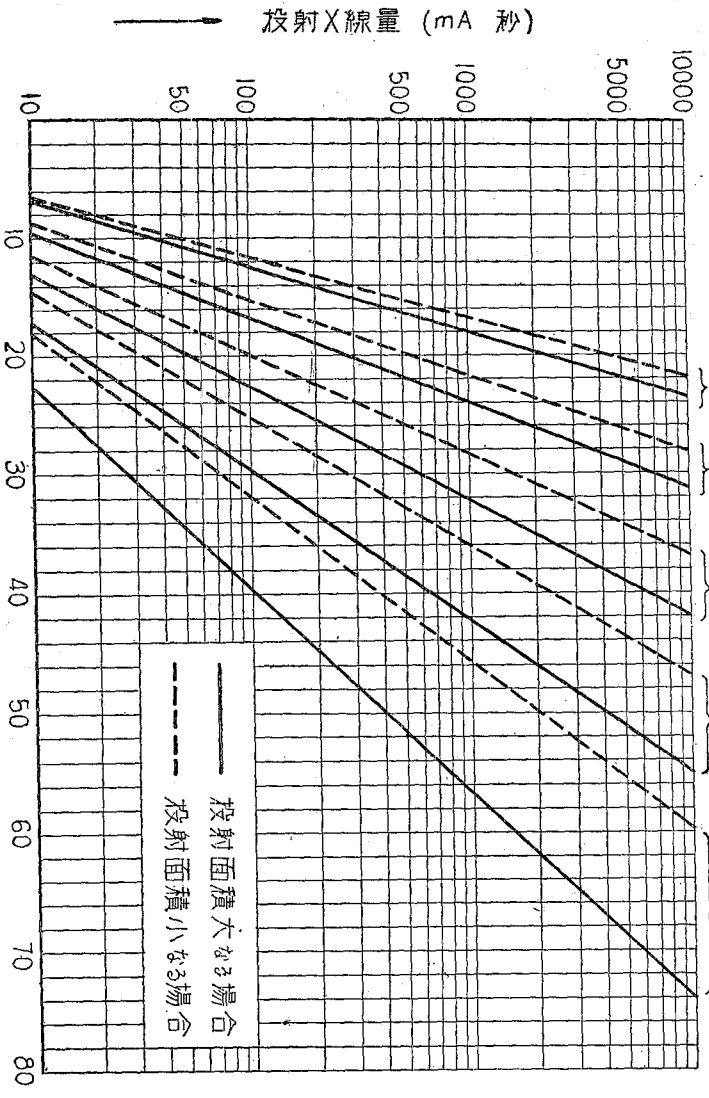
第 36 圖 供試體散亂 X 線による背後側面の X 線分布の一例

合散亂 X 線による影響は場合によつては一次直射 X 線以上に増大する事がある。以下鋼材の實際上の透過試験に於ける投射面積の大小の影響を量的に考察す、最も極端な場合としては面積極度に小にて零に近き場合と無限に大なる場合とに分類されるが、實際には斯かる極端な場合を取扱ふ必要がない。例へば投射面積 3cm^2 、 50cm^2 の場合に就て考察すれば鋼の場合は充分である。

Berthold の鋼の厚みと X 線透過度の研究によれば投射面積の大小の寫真黒さに對する傾向を明かに知り得。第37圖は投射面積廣狭2種の場合とし 3cm^2 、 50cm^2 とせし時の X 線透過度と併試體厚みとの關係を示せるものである。同圖によるに厚みの増加、(即ち電壓の増加) に伴ひ投射面積の大なる場合は散亂線により寫真乾板黒さ (S) は著しく増大す、第37圖は黒さ $S = 0.7$ に對する X 線放射エネルギーを示すから投射面大なる場合は (mA×sec) のエネルギーは少い。同じ厚みに對する廣狭投射面積の場合の (mA×sec) 値の差より散亂 X 線による影響を明かに知り得、實際上の吸収率が第IV章〔4〕節の(11)式 $J = J_0 e^{-\mu x}$ の項のみの表示法に嚴密に従ふのは波長の一定なる示性 X 線の場合のみで白色 X 線の場合は各波長に對する上式の組合せである。實用上 X 線は可なり薄き部分を通過するも波長の異なるものゝ吸収著しく結局或る範圍内の波長のものみに近く従つて吸収も(11)式の如き項1個によると推測するも大なる誤がない。第37圖は勿論〔2〕節の第34圖も斯かる特性を裏書す。實用上の X 線放射時間は〔2〕節にも述べた如く最大10分~30分である、第38圖は Villard 接續法にて管球電流 5mA の 50cm^2 投射面積に於ける X 線透過度と厚みとの關係を示すもので寫真乾板黒さ $S = 0.7$ の場合である、同圖によるに管球電壓 $250\text{KV} \sim 300\text{KV}$ に達すれば併試體の有効厚みの増加は略々停止する。

120 KV, 140 KV, 160 KV, 180 KV, 200 KV

四〇



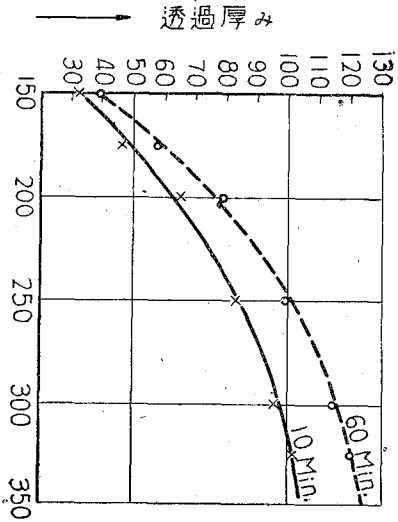
→ 照射X線量 (mA 秒)

鉄 (厚み) mm
鋼材のX線透過度と照射面積との關係
第 37 圖

更に透過法に於て主要なる事は X 線寫真による可測最小厚み差の問題である、Neoff の實驗的研究によるに肉眼にて可測し得る黒さの最小差異は地の黒さによるものである、今夫々の値を $\frac{\Delta S}{S}$, S, とすれば $S \div 0.3$ に對し $\frac{\Delta S}{S} 100 = 5\%$ 以上に於て黒さ S の増大と共に $\frac{\Delta S}{S} 100$ は著しく減少し $S \div 0.7 \sim 0.9$ に至れば $\frac{\Delta S}{S} 100$ は 1% 前後となる、然る後 S の増加に伴ひ略 S 直線的に増加するもので $S = 2$ に至れば $\frac{\Delta S}{S} 100$ は 2% となる。Neoff の結果によれば X 線寫真による可測最小厚みと投射面積の關係は直ちに求め得。

今具體的に一例を述べんに、X 線寫真乾板上の相接せる部分の黒さを 0.7、0.724 とすれば $\Delta S = 0.024$ にて兩者の差異は明瞭に判別し得、然るに投射面積大なる場合に於て散亂による影響が黒さとし 1.3 の値を示すとすれば兩者の黒さは夫々 2、2.024 となり、結局兩者の差 $\Delta S = 0.024$ となり Neoff のコントラス T の研究によるも黒さ判別は可なり困難な事となる。

斯かる理論的考察により第 37 圖より散亂 X 線の影響を考慮に入れ、大小投射面積の場合に於ける可測最小厚み差を供試體の夫々の厚みに對して求め得、第 39 圖は斯くして得たる關係である。第 36 圖 (b) の L. Graf, R. Jaeger の散亂 X 線の硬さ試驗の結果をみるも、管球電壓の増加に伴ひ可なり散亂 X 線硬度の大なる事が分るが、第 39 圖に於ても投射面

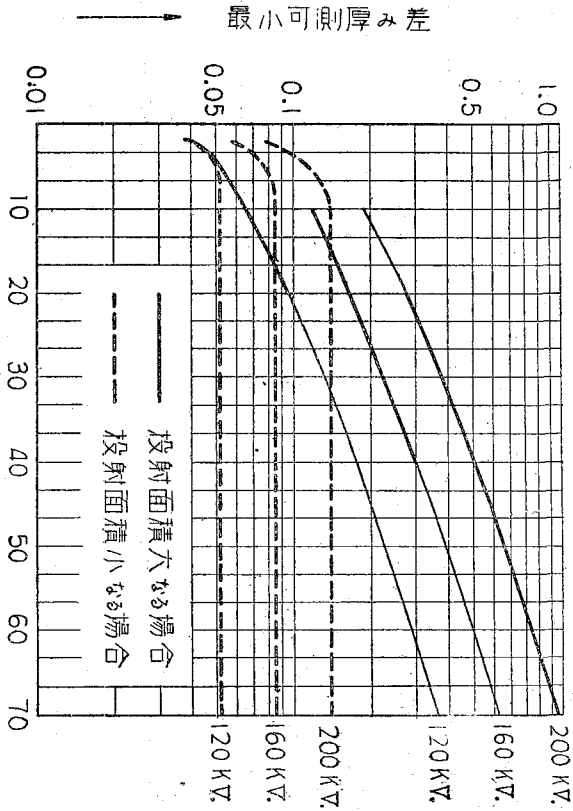


第 38 圖 廣投射面積に於ける X 線透過率と供試體厚み並びに投射時間との關係 (S=0.7)

積の大小に拘らず管球電圧の増加に伴ひ、可測最小厚み差が増大してゐる、一方投射面積の大小の影響も可なり顯著なものである。要約すれば

- (i) 廣投射面積の場合可測最小厚みは供試體の厚みの増加に伴ひ略々直線的に増大す。
- (ii) 狹投射面積の場合は可測最小厚みは供試體が或る厚みに至れば増大するも略々一定値になる。

第39圖より明かであるが0.1mm以下の厚み差の判別は可成り困難である實驗の結果も略々同じ傾向を示す、上述せし實驗は唯厚み差異のみを考慮に入れ其の形状等の影響を全く度外視した。〔2〕節に述べし如く投射X線は並行線に非らず且つ散亂の影響等もある事なれば當然形状の影響が可成り著い筈である。次節に其の主要なる形状の影響を述べる。



第 39 圖 可測最小厚み差と供試體厚みとの關係 (投射面積の影響を示す)

鉄 (厚み) mm

—— 可測面積大なる場合
 - - - 可測面積小なる場合

〔4〕節 缺陷部の形状の寫真感度判別度に及ぶ影響 (1)節より (3)節の記述せし事により鐵鋼類の X 線透過試験の概要を明かにし寫真上に於ける缺陷判別の基準となるべき厚み差及び投射面積の關係等を特に詳細に述べた。更に主要なる因子は缺陷部又は厚みの異なる部分の形状である、X 線の透過試験を行ふに常に形状を定めねば全く無意義である、現今之方面の研究に二種の形式が採用されてゐる。其の1はドイツに多く行はれ電弧銲接部 X 線透過試験 DIN 案 2, E, 1914 にも規定されてゐる様な各種直径の異なる圓棒を使用し、X 線寫真と其の直径との關係を求め透過感度並に判別差異を研究す。其の2は深さの異なる溝を穿てる鋼板を使用し、全く同様な試験を行ふ。後者は主に米國に行はれてゐる、兩者を比較し其の差異を明かにしをく必要がある、其の外厚み差の形状とし貫通穴によるものがある、A. W. Miller, W. E. Schmidt は、上記の三種の形状相互の關係を種々研究し明かにした。

Miller, Schmidt の實驗條件：——

投射面積 $10 \times 10 \text{cm}^2$; 標準寫真黒さ $S = 0.5$; 對陰極—フィイルム距離 50~56cm ; 投射時間 1分~20分、二板の増強板使用。

供試験は下記の3種とす；——

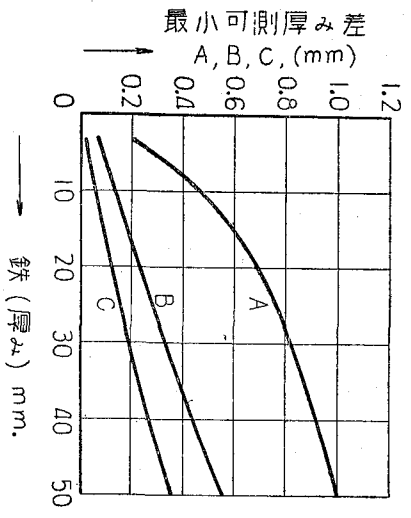
貫通穴供試體.....A.	} の記號にて示す。
圓棒 " ".....B.	
重ね板 " ".....C.	

A は厚み 0.2mm の板に直径 0.2mm の穴を 10個穿ち更に厚み 0.2mm の板に直径 0.4mm の穴を 9個穿てるものを重ね

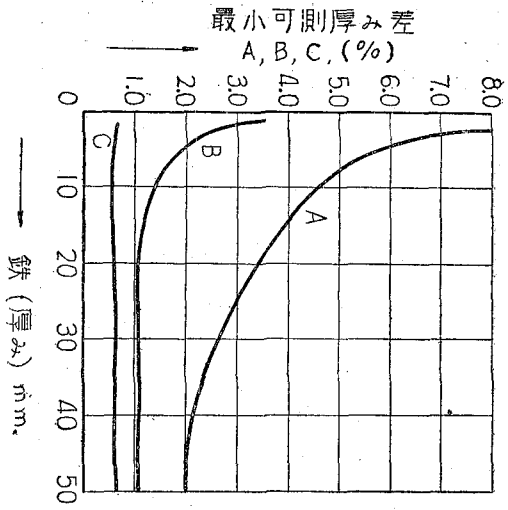
其の上に直径 0.6mm の穴を 8 個穿てる板を重ね、最後に直径 2mm の穴を穿てるものを重ね供試體を作る。B は直径 0.03 ~ 0.0mm の各種の棒状のものを組合せしものである、O は大き 4 × 10mm の厚み 0.01 ~ 0.5mm の薄き板状のものを組合せしものである。寫真乾板黒さの判別は特に作りし観察箱で肉眼で行つた。投射面積 10 × 10cm² ならば〔3〕節 Berthold の實驗の二ツの場合の中間のもので、散亂影響も可成りあり費用上に近いものと解して大なる誤謬がない。詳細なる説明は之を省略するも結果は Berthold の場合の廣投射面積の場合の様に最小可測厚み差は供試體厚みの増加と伴ひ増してゐる、即ち投射面積 10 × 10cm² にては散亂影響の可成り著しい事が分る。第 40 圖 (a) (b) (c) は三種の供試體の X 線寫真法に於ける最小可測厚み差と供試體厚みの關係及び其の割合との關係を示すもので A 型の場合厚み差の判定の最も困難なる事を示す、之に反し O 型の場合は可成り小なる 1% 以下の厚み差も判別し得。實際上電弧銲接部の瓦斯泡等は A 型に近く銲着部の層狀缺陷等は O 型に近いと想像される、斯る實驗結果より透過試驗に於ける精度には厚み差の部分の形状が重要な要素をなす事が分る。

第 40 圖 (c) は供試體 B 型の場合のみの結果を掲げた、最小可測厚み差の總厚みに對する % は同圖内に點線にて示す。

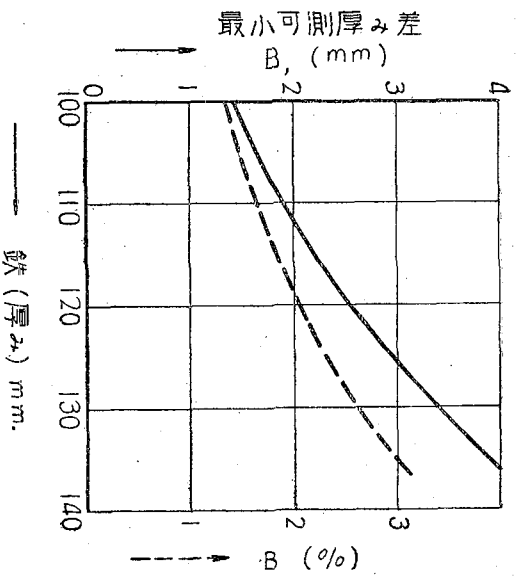
以上〔2〕〔3〕〔4〕節の結果を綜合するに鐵鋼の X 線透過試驗を行ふ際に定むべき管球電壓は如何なる事項により支配されるか且つ其の量的關係をも明かにした、一方明瞭なる X 線透過寫真を得る爲め



第 40 圖 (a)



(b)



(c)

第 40 圖 X線透過試験に於ける厚み差の形状と線厚みとの関係

に考慮すべき散乱線の影響並びに条件善き場合到達し得べき精度を述べた。鐵鋼試験に際して使用すべき X線装置の最高電壓の經濟的の値を決定する技術上資料を得た。散乱 X線の影響比較的大なるコンクリートの如き重金屬フィルムターを使用しコントラストよき結果を得んとする場合は別章に述べる。電弧銲接の銲着部の X線による試験、 D_{IN} の同試験法解説等は〔1〕〔2〕〔3〕節の諸論の應用を示すもので簡単に次節に其の大勢を述べる。