

重量コンクリートの考え方

太田 達

§ 1. 序

原子炉の周辺や、アイソトープ照射室その他原子力関係の実験室などに、放射線障害から生体を防護する遮蔽材として、密度の高いコンクリートが使用され、当社の施工例も東海村の原子力研究所第1号炉や、都のアイソトープ研修所照射室、また民間の原子力施設などで実績をあげつつある。ここに放射線と建設技術の両方の面から、高密度コンクリートについて若干の考察をしてみる、

§ 2. 遮蔽体の設計にあたって

2. 1 放射線遮蔽の基礎事項:

生体保護の対象となる放射線の本質については専門書にゆずるが、普通に考えられるガンマ線と中性子線について略説してみると、ガンマ線は放射性物質から放射される電磁波で、大きなエネルギーをもち、透過力が非常に強い。中性子線は核分裂の際生ずる粒子線で、エネルギーによって速いものと遅いものに分けられる。

ガンマ線は、遮蔽体内でその構成物質と相互作用をおこし、

- 1) コンプトン効果
- 2) 光電効果
- 3) 対生成

の過程を経て、そのエネルギーを吸収される。これらの過程はいずれもその原子の重量に重要な関係があり、これを総合して遮蔽厚に対する係数として考えると、その線吸収係数は物質によって「ほぼその比重に比例する」

大きさをもち、密度が高いほど遮蔽効果がある、と考えられている。

一方、中性子にあっては粒子線であるから、遮蔽は中性子と遮蔽体の構成原子との衝突という形で理解され、そのエネルギーによって分けて考えると、

- 1) 速い中性子の非弾性散乱による減速。
- 2) 遅い中性子の弾性散乱による減速となる。

1)の減速に際しては過剰エネルギーが散乱ガンマ線として放射され、2)の減速では等質量の水素原子に衝突したときに効果が最大となる。次に減速された中性子の吸収については、

- a) 捕獲ガンマ線の有無とそのエネルギー
- b) 遅い中性子の捕獲

が考えられ、その線吸収係数に相当するものとして、吸収確率を断面積として理解し、各種の物質について、各種のエネルギーの中性子に対するスペクトルが調べられている。

2. 2 許容線量

前節で省略したアルファ線などを除き、中性子やガンマ線のような放射線は、光の場合のように完全に遮断し切ることにはできない。また生体はその照射をうけて障害をこうむる実態も、時間の要素が非常に大きく、場合によっては世代にわたって考えなければならないので、線源と放射線の物理的な解明だけでは、この位の放射線をこの位の間受けても大丈夫だろうという確信をもてない。

そこで遮断し切れない放射線に許される最大限の限度をもうけておく必要がある、その放射線の量を照射される時間について照射線量率として考え、それに、放射線によって生体に与える影響がちがうので、X線を基準に係数を考え合わせ、これをいわゆる放射線の強さと考え

て、生涯にわたって人体に障害がなく、遺伝の悪影響も残さないと考えられる、ごく控え目な値を許容線量として定めることにした。これが国際勧告値と認められるもので、ラジウムの経験から割り出して、従業員に対しては毎週0.3レム(週48時間労働として毎時6.25ミリレム)、取扱者以外の一般人に対してその1/10を最大許容線量としている。

その他のこまかい規定もあるが、これで物理量の放射線と生物学的な許容限界の関係が明示されることになったのである。

2. 3 遮蔽体の設計条件:

以上によって遮蔽体の設計にかかる段階となるが、これまでに与えられる条件は、

(1) 線源の種類

原子炉炉心であるか、付属部であるか、またはラジオアイソトープであるか、などから、どんな放射線がどんなエネルギーで出るかきまってくる。

$$E \text{ [MeV]}$$

(2) 線源の位置

線源と遮蔽体との位置の関係

$$A \text{ [cm]}$$

(3) 線源の形状

点、線、面状の線源の幾何学的形状。

(4) 線源の強さ

これは線源となる放射性物質の量ではかる。

$$C \text{ (c) (キュリー)}$$

(5) 厚さ x [cm] の遮蔽体をおいたときの、線源の反対側での許容線量

$$I_x \text{ (r/h) (毎時レム)}$$

として与えられる。このうちAの距離についてはxとの関連などで、設計者自身も条件設定に関与しなければならない。

ここでまず遮蔽体の線源側の面での線量率 (I_0) を計算によって求める。点状線源から出るガンマ線については、

$$I_0 = 0.52 \times 10^4 \times \frac{CE}{A^2} \dots \dots \dots (2.1)$$

の式で与えられる。

2. 4 遮蔽体の設計計算の基本式:

遮蔽体が放射線遮蔽にはたす機能は外ならぬ $I_0 \rightarrow I_x$ の減衰であるが、この関係については、ガンマ線の平行線束に対し

$$I_x = I_0 e^{-\mu x} \quad (2.2.1)$$

の式が成り立ち、線吸収係数 μ と厚さの関数として表わされる。これを变形すると、

$$x = \frac{1}{0.434 \cdot \mu} \log_{10} \frac{I_0}{I_x} \quad (2.2.2)$$

を得るので、前記の条件の外にあらたに μ を選定することによって、そのような μ を有する材料での遮蔽体の厚さを決定することができる。

§ 3. コンクリート遮蔽体の設計

3. 1 遮蔽材料としてのコンクリート:

鉄、鉛などの重金属とともに、コンクリートは重要な遮蔽材としてあげられ、その長所は早くから着目されていた。自由な形状での一体性は非常に楽な設計ができ、材料に天然産のものをそのまま選べる手取早さは、その経済性と相まって、むしろ重金属に優るものとして賞用されてきた。

このコンクリートの遮蔽特性のうち、中性子線に対しては結晶水として含有する水が有効にはたらし、必要に応じて硼素を含むコレマナイト、ボロカルサイトなどを添加剤として混入できる利点をもっている。しかし一般にコンクリート遮蔽体の厚さを決定するのは、むしろガンマ線に対する遮蔽能力である。

普通コンクリートの線吸収係数 μ はコバルトの放射性同位元素 ^{60}Co からのガンマ線 (2.5MeV) に対しては0.13、運転中の原子炉炉心から出るガンマ線 (7MeV) に対しては0.06位にとるようになっている。

また重金属に比べて遮蔽体の厚さが非常に厚くなるので、(2.2.1)式には係数補正を要し、この再生数Bの計算は非常に複雑なので、通常は近似的に25%増の値をとる。

以上によって、コンクリートを遮蔽体に選定するときの計算ができるようになる。

3. 2 高密度コンクリート:

前述のようにガンマ線の減衰は遮蔽体の密度に比例すると考えてよい。すなわち、同じコンクリートでも設計如何によって密度が変化すると線吸収係数 μ が変化し、計算値の x に反比例してくる。

遮蔽体は空間的にも機能的にも種々な制限をうけるが、その厚さについてもできればあまり大きくないにこしたことはない。そこで密度の高いコンクリートがとりあげられてきたのである。建築の軽量化の最大のキーポイントとして軽量コンクリートが発達してきている一方に、新しい要求によって重量コンクリートが脚光をあびて、建設技術者の課題となってきたわけである。

コンクリートの構成材料のうち、セメントと水についてはまず密度は変わらないものとし、骨材の選択によってコンクリートの大部を占める部分に改善が試みられてきたのも、当然のことであろう。

a) 重 骨 材

通常の川砂利、川砂などは比重2.6前後を示すが、これに代るものとして同じく天然産の骨材を求めると、

(1) 各種の鉄鉱石

褐鉄鉱、赤鉄鉱、磁鉄鉱、磷酸鉄鉱、砂鉄 など

(2) その他の鉱石

重晶石

などがあり、いずれも比重3.5を超え、4.0の前後のものえられる。このほか金属片など人工のものとして、

(3) 鋼片

丸鋼短片、鋼板片、パンチング片、スチール・ショット

などもあまり不規則な形状にならない範囲で用され、比重の点では7.0を超えるので非常に有利である。また特殊なものとして「銅からみ」をあげることもできる。

b) 調 合

組成の点で考えると、調合設計も重要な要素であり、もっとも軽い成分の水の量を減少させて、それだけコンクリートの密度をあげうることは明白である。水セメント比や、ワーカビリティなどの水量の加減には制約が多いが、それらの許す範囲で水量を減らし、スランプについていえば5cmあるいはそれ以下が目標とされ、水セメント比も強度の目的以外にかなり低くするのが普通である。

次に骨材は一般に鉱石からえた碎石として使用されるので、実績率を考慮して、できるだけ粒度配分の適正化をはかる。人工の鋼材片によるときは、粒大が非常に段階的になるからとくに注意を要する。

c) 施工上の問題点

原子力関係施設の遮蔽体には、かなり多くの開口部や埋設物などがあることを考えなければならない。このため打設するコンクリートには、できるだけワーカビリティの良好なものを使って、均一密実なコンクリートをうることを目標とする。とくに骨材の分離に留意し、碎石を最小限の水量で混練するのと、しかも各材料の比重の差が大きいため、打設に際しても、パイプレーターの適用についても、分離をおこさないようにしなければならない。

このほか、コンクリート自体の体積変化、熱特性などにも考慮を払う必要があり、亀裂を生じて致命的な欠陥とならぬことも大切である。また亀裂でなくても各種の貫通スリーブなども多いから、その周囲のコンクリートの密着性や、不慮の間隙の迂余曲折の配慮も必要で、総じて常に放射線の存在とその方向を念頭におかねばならない。

これら施工上の諸問題には、プレキャスト工法が甚だ有利な解答を与えることが多いが、建設技術固有の問題として、コンクリート工学の全般の問題として取扱かわねばならぬ事項も多い。

d) その他の考慮

遮蔽体の重量は一般に非常に大きくて、炉心部の大きさ、形状などにより、基礎の設計に影響することが多い。また基礎の耐力のほかに、機器の精度や関連から、不同沈下の対策も十分にとられていなければならない。耐震設計の基本的な考え方にも、建設技術の役割は大きい。

§ 4. 高密度コンクリートの 経 済 面

4. 1 普通コンクリートとの比較:

重骨材に対する費用は、採取、輸送、破碎までも含めると、遮蔽厚の減少という目的と、その他の二義的な利点にくらべると、非常に不釣合に増大する。近在から容易に入手できる骨材も、輸入とまではいかななくても、国

内の特定な産地から引くとすると、重量以外に目に見えぬ費用がかかり、堅硬な鉱石を破碎して篩い分けまですると、目減りも無視できなくなり、密度との関係ではほとんどその4乗に比例するとさえいわれる。

コンクリート混練に当っても、ミクサー容量の割引きや、労務費の増大などが顕著となり、仮枠の補強などを含めると、この面でも密度の2乗以上に比例することになる。

このために、遮蔽体用の重コンクリートの設計施工に関しては、綿密な計画と管理が必要で、一貫した建設技術の裏付けがなければならない。

4. 2 建設費に占める遮蔽体の位置：

原子炉施設建設のある研究所の例では、総工費の37%が原子炉の建設費、その中47%が遮蔽体の工費となり、これは全施設に対して15%ほどを占めることになる、と報ぜられている。なおこの遮蔽体の工費の内訳では、

工事の設計、管理費 25%

原材料費 15%

工事費 60%

の比率が出されており、これはまた

労務費 65%

材料費 35%

に大別されて、いずれにしても、材料費の占める割合はかなり高く、重量コンクリートの経済性は全計画に大きな意義を有している。

§ 5. む す び

原子力施設における重コンクリートの機能について考えてみると、放射線源や放射源遮蔽の物理などから、遮蔽計算や高密度コンクリートの調合設計などをあげてくると、建設技術者に与えられるこれらの要求事項は、いづれも遮蔽体設計や施工仕様として集約されて「条件」となってくるものであり、この意味では、元来一般の建築物と差のあるものではない。ただ、原子力施設ではその条件の生ずる要素に目新しい事項が多く、一般建築物の時のように、技術の蓄積として体得されているというわけにいかない点がちがっている。

したがって施工にあたる技術者は、仕様の背景にある要求事項を一応理解しておいてから与えられた条件に取り組み、施工の技術をおり込んで、重コンクリートの機能を万全に発揮できるようにしなければならないと思う。

一方、重コンクリートの経済性について考えると、施設の建設費に占めるかなり大きな部分に影響し、材料の面でも、労務費の面でも、普通コンクリートに比べてコスト高になっているので、この部分における建設技術者の役割は非常に大きく、その総合技術による工費の低減には重大な責任をもっている。

この意味では、重コンクリートについてまず第一に考えなければならないことは、如何にして僅かな条件の差で影響の大きいコストの変動を小さく納めるか、ということになり、やがては原子力施設の工費の低減から、平和利用の発展にさえ結びつくことになるのである。