



## 可燃物質貯蔵タンク群の耐震設計に対する目標公準 について

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2013-11-08 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 宮脇, 幸治郎 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="https://doi.org/10.24729/00008098">https://doi.org/10.24729/00008098</a>

# 可燃物質貯蔵タンク群の耐震設計に対する目標公準について

## Study on Object Postulates Against the Aseismic Design of Combustible Liquid Storage Tanks

宮 脇 幸 治 郎\*

Kojiro MIYAWAKI\*\*

(昭和53年9月1日 受理)

### Synopsis

This paper dealt with methods of evaluation in order to set up object postulate on the aseismic design against large groups of combustible liquid storage tanks. As the factors of a design object are derived from 1) mortal risk, 2) fortune risk, 3) environment risk, and 4) social life risk, the quantities of object postulate are obtained from valuation of the acceptable level of risk. That is, when the level of aseismic risk of object factor is expressed by the fundamental format of quantity of aseismic risk and variation, the acceptable failure probability with respect to the aseismic can estimate by a linear proportional format.

### 1. 緒 言

構造物の設計を行う際には、設計基準等の名称で呼ばれる一定の設計体系に従って行われる。N. C. Lind<sup>1)</sup>はこれらの設計基準等を、部分安全係数形式の公準として荷重公準、強度公準、設計公準、一様信頼性の原則、情報充足の公準の5項目と特別な公準としてISO形式、Cornellの形式、線形化係数形式の3項目とを基準公準に還元して示した。さらに中野<sup>2)</sup>は、Lindの提案のほかに地震荷重の公準、費用最適化の公準、Starrの公準、中野の公準を付加して提案した。また中野等<sup>3)</sup>は構造設計の公準を、1)荷重・強度の公準群、2)設計公準群および、3)目標公準群の3つの類似した群に分けて示した。このような構造設計の規準体系を基本原理から演繹的に組み立てて考えることは、規準体系相互の比較となり、最適規準体系を探すことが可能となろう。

ところで、目標公準の設定には、その公準を構築している諸因子が定量化できるものでなければならないし、定量化できる諸因子についてはどの程度の確らしさで定量化できるかが重要となってくる。対象物として可燃性物質貯蔵タンク構造物群をとり、地震時における目標公準について本研究は考えてみた。目標公準を設定するということは、構造物の破壊確率などを設定することになるが、この設定値は、構造物以外の現状危険度を参考にして定める方法と構造物の危険度を参考にして定める方法とが考えられるがここでは前者の考え方に従って許容人命危険度、許容財産損失危険度、許容環境破壊危険度および許容社会生活崩壊危険度によって目標公準設定を提案した。

---

\*土木工学科    \*\*Department of Civil Engineering

その基本的な考え方は、1) 対象とした要因の構造物の寿命中における危険度と変動の割合というものを大領域（たとえば国） $\widetilde{D}$ 内で経年変化を考慮して求め、2) さらに地震災害あるいは火災害に関連した量を推定し、3) 各災害に対する危険度と対象とした要因の変動量とによって許容危険度というものを評価し、4) 許容危険度を用いて災害の及ぶ領域 $D^*$ あるいは対象構造物設置領域 $D_0$ において構造物の地震時の許容破壊確率というものを評価することによった。

## 2. 目標公準と設計公準との関係

いま強度の期待値 $R^*$ と荷重の期待値 $S^*$ とすると、中央安全率 $n$ は、

$$n = \frac{R^*}{S^*} \quad (1)$$

あるいは、破壊確率 $P_f$ は、

$$P_f = P(R^* \leq S^*) \quad (2)$$

となる。このとき、設計公準は、

$$n \geq n_{cr}, \quad n_{cr} \geq 1 \quad (3)$$

あるいは、

$$P_f \leq (P_f)_{cr} \quad (4)$$

という形式で表現できる。そして $n_{cr}$ あるいは $(P_f)_{cr}$ が目標公準の設定値となる。

上述の目標公準は、構造設計の目的達成の影響因子の抽出を行い、技術的算定可能な目的関数を設定し、設計目的とする各事項の達成目標値を目的関数の形式で設定する。

ところで可燃性物質貯蔵タンク構造物の地震による破壊は、タンク本体の破壊という一次災害のほかに貯蔵物質の流出および火災などによる周辺地域に及ぼす二次災害の影響も大きい。すなわち、周辺住民の福祉的な面（生命、財産、生活）および環境汚染に対する危険性が生じる。そこで本報告は、設計目的の設定を現時点において許容される人命損失、財産損失、社会生活崩壊、環境破壊などに対する危険度に置き、設計公準を破壊確率の形で議論してみた。

## 3. 許容人命危険度

人命の安全は、構造物構築上最も重要な要因の1つとなる。この分野の研究提案は、たとえばつぎのようなものがある。

David E. Allen は人命の安全性に関して社会的な許容値があるべきであるという考えで、公共安全の規準（Criterion of Public Safety）というものを想定した。C. Starr<sup>5)</sup>は社会活動を自発的行動と非自発的行動とに大別して1時間あたりの死亡率で人命危険度を評価した。中野は人命の社会的許容値として背景危険度（Background Risk）というものを探り、これらを構造物の安全度決定の条件とした。その他種々の研究・提案がなされているが、現在のところまだ実用的な段階に到っていない。

ここでは、地震時における許容人命危険度を中野等<sup>5)</sup>の考え方を参考にして以下のように求めた。いまある年における人命の危険感の基礎となっている危険度は、ある年までの $n$ 年間の平均死亡率 $\bar{d}$ と仮定する。すなわち、

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum d_i \quad (5)$$

また、ある年における死亡率の変動係数はある年までの  $n$  年間の変動係数とする。すなわち、

$$\Delta_a = \frac{1}{\bar{d}} \sqrt{\sum \frac{1}{n} (d_i - \bar{d})^2} \quad (6)$$

つぎに、将来における平均死亡率および死亡変動係数は現在時点における過去の比較的長期間における経年変化により推定できると考えられる。そこで、現在時点を  $t = 0$  としたときの将来推定式は、それぞれ次式のように仮定できる。

$$\left. \begin{aligned} \bar{d}_t &= A_1 \cdot 10^{-B_1 t} + C_1 \\ \Delta_a &= A_2 \cdot 10^{-B_2 t} + C_2 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

ところで、構造物の設計寿命が  $T$  年であるとしたとき、平均死亡率および死亡率の変動係数の平均値は、

$$\left. \begin{aligned} d^* &= \frac{1}{T} \left( C_1 T + A_1 \frac{1 - 10^{-B_1 T}}{B_1 \ln 10} \right) \\ \Delta_a^* &= \frac{1}{T} \left( C_2 T + A_2 \frac{1 - 10^{-B_2 T}}{B_2 \ln 10} \right) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

によって求められ、さらに期間  $T$  年中においては平均的な死亡率の変動幅は、

$$\begin{aligned} \sigma_a^* &= \Delta_a^* d^* \\ &= \alpha_a \left( 1 + \frac{\beta_a}{T} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

ここに、 $\alpha_a = C_1 C_2$

$$\beta_a = \left( \frac{A_1}{B_1 C_1} + \frac{A_2}{B_2 C_2} \right) / \ln 10 \cong 0.434 \left( \frac{A_1}{B_1 C_1} + \frac{A_2}{B_2 C_2} \right)$$

と求められる。式(9)より設計寿命  $T$  が相当長ければ、 $\sigma_a^* = \alpha_a$  一定と評価できる。

なお、平均死亡率  $d^*$  には、あらかじめ地震による死亡率も含んでいる。しかし、死傷者の発生するほどの地震の再現期間はかなり長くなるので、以上の議論に用いた平均的な死亡率を出すための期間により長い期間に対する平均を用いなければならない。したがって現在時点の地震による平均死亡率  $\bar{d}_s$  から将来の平均死亡率は推定できないが、現在時点での  $\bar{d}_s / \bar{d} = \mu_s$  が将来も一定であると仮定する。そうすると、

$$d_s^* = \mu_s d^* \quad (10)$$

と推定される。

また、平均死亡率  $d^*$  には、火災による死亡率も含んでいる。火災による死亡率は、平均死亡率  $d^*$  の算定法と同様の手法を用いることができるが、ここでは地震による死亡率の推定法と同じ方法により求める。すなわち現在時点での  $\bar{d}_f / \bar{d} = \mu_f$  が将来も一定であるとして、

$$d_f^* = \mu_f d^* \quad (11)$$

と推定する。

以上の  $d_s^*$ 、 $d_f^*$ 、 $\sigma_a^*$  の諸量を用いて、許容人命危険度として許容地震死亡率  $d_{sa}$  と許容火災死亡率  $d_{fa}$  が次式であると仮定する。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} d_{sa} &= d_s^* + \sigma_a^* \\ d_{ra} &= d_r^* + \sigma_a^* \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

つぎに、地震時における可燃物質貯蔵タンクの許容破壊確率 $P_{ra}^t$ と一般建築物の許容破壊確率 $P_{ra}^b$ とが、 $d_{sa}$ および $d_{ra}$ を用いてどのように評価すればよいか考えてみる。タンク破壊によって引き起こされる災害の及ぶ地域 $D^*$ の人口を $P$ とすれば、 $d_{sa} \cdot P$ は $D^*$ 内でのタンク数を $N_t$ 、一般建築物数を $N_b$ とし、それぞれの破壊危険確率を $P_r^t$ 、 $P_r^b$ とし、1構造物の倒壊による死亡危険率を $\gamma_t$ 、 $\gamma_b$ とすると、地震1回あたりの地震死者数は、 $(P_r^t N_t \gamma_t + P_r^b N_b \gamma_b)$ となる。したがって $D^*$ 地域の地震頻度を $m$ とすれば、

$$d_{sa} P = m (P_r^t N_t \gamma_t + P_r^b N_b \gamma_b) \quad (13)$$

とおける。またタンクおよび一般建築物からの出火率をそれぞれ $a_1$ 、 $b_1$ とし、独立出火の延焼発生率をそれぞれ $a_2$ 、 $b_2$ とし、飛火出火延焼率を $a_3$ 、 $b_3$ とし、建築物1件あたりの火災による死亡率を $\epsilon_t$ 、 $\epsilon_b$ とすれば、 $D^*$ 地域内の地震によって発生した火災による死者数に対して、

$$d_{ra} P = m \{ P_r^t N_t \epsilon_t a_1 a_2 (1 + a_3) + P_r^b N_b \epsilon_b b_1 b_2 (1 + b_3) \} \quad (14)$$

となる。式(13)および(14)より、許容破壊確率はそれぞれ、

$$\left. \begin{aligned} P_{ra}^t &= \frac{P}{m N_t} \frac{\{ d_{sa} \epsilon_b b_1 b_2 (1 + b_3) - d_{ra} \gamma_b \}}{\{ \gamma_t \epsilon_b b_1 b_2 (1 + b_3) - \gamma_b \epsilon_t a_1 a_2 (1 + a_3) \}} \\ P_{ra}^b &= \frac{P}{m N_b} \frac{\{ d_{ra} \gamma_t - d_{sa} \epsilon_t a_1 a_2 (1 + a_3) \}}{\{ \gamma_t \epsilon_b b_1 b_2 (1 + b_3) - \gamma_b \epsilon_t a_1 a_2 (1 + a_3) \}} \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

と求められる。

#### 4. 許容財産損失危険度

財産の保全は、構造計画上重要な要因の1つである。この分野における研究提案は、ほとんどみられないが、前節での議論がそのまま適用できる。

まず、ここにおいては一般住民の財産の代表として住宅が適当であると考えられる。そうすると、住宅は、火災、風水災、震災および除却等によって年々滅失しており、一方年々新築住宅が着工されている。

ある年における住宅の滅失の危険性はある年までの $n$ 年間の平均滅失率 $\bar{e}$ と滅失率の変動係数 $\Delta_e$ とで表わせる。

つぎに、将来における平均住宅滅失率および住宅滅失変動係数は、現在時点における過去の経年変化によって推定できるものとし、将来推定式は次式のようなになる。

$$\left. \begin{aligned} \bar{e} &= A_3 \cdot 10^{-B_3 t} + C_3 \\ \Delta_e &= A_4 \cdot 10^{-B_4 t} + C_4 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

また、構造物の設計寿命が $T$ 年であるとしたときの平均住宅滅失率 $e^*$ および住宅滅失変動係数 $\Delta_e^*$ および変動幅 $\sigma_e^*$ は、次式のように与えられる。

$$\left. \begin{aligned} e^* &= \frac{1}{T} \left( C_3 T + A_3 \frac{1 - 10^{-B_3 T}}{B_3 \ln 10} \right) \\ \Delta_e^* &= \frac{1}{T} \left( C_4 T + A_4 \frac{1 - 10^{-B_4 T}}{B_4 \ln 10} \right) \\ \sigma_e^* &= \Delta_e^* e^* \simeq a_e \left( 1 + \frac{\beta_e}{T} \right) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

ここに、 $a_e = C_3 C_4$

$$\beta_e = \left( \frac{A_3}{B_3 C_3} + \frac{A_4}{B_4 C_4} \right) / \ln 10$$

人命の危険度の場合と同様住宅の滅失危険度は地震災害による部分も含んでおり、人命の場合と同様の理由により現在時点における地震による滅失危険度 $\bar{e}_s$ と全滅失危険度 $\bar{e}$ との比 $\mu_e$ が将来においても一定であると仮定すると、

$$e_s^* = \mu_e e^* \quad (18)$$

となる。また、火災による滅失危険度についても同様の考え方に従って、つぎのようにおく。

$$e_f^* = \mu_f e^* \quad (19)$$

以上の $e_s^*$ 、 $e_f^*$ 、 $\sigma_e^*$ の諸量を用いて、許容財産損失危険度として許容地震建築物滅失危険率 $e_{sa}$ と許容火災建築物滅失危険度 $e_{fa}$ が次式であると仮定する。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} e_{sa} &= e_s^* + \sigma_e^* \\ e_{fa} &= e_f^* + \sigma_e^* \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

つぎに、地震時における可燃物質貯蔵タンクの許容破壊率 $P_{fa}^t$ と一般建築物の許容破壊確率 $P_{fa}^b$ とが、 $e_{sa}$ と $e_{fa}$ とを用いてどのように算定されるか考えてみる。地域 $D^*$ 内での一般建築物の許容地震滅失数は $e_{sa} N_b$ であり、これは許容破壊確率を用いれば、 $m P_{fa}^b N_b$ である。したがって、

$$P_{fa}^b = \frac{e_{sa}}{m} \quad (21)$$

一方、地震時の火災による一般建築物の許容火災滅失数は $e_{fa} N_b$ であり、これはタンクおよび一般建築物の許容破壊率を用いれば、 $m \{P_{fa}^t N_t a_1 a_2 (1 + a_3) + P_{fa}^b N_b b_1 b_2 (1 + b_3)\}$ である。したがって、式(21)を用いれば、

$$P_{fa}^t = \frac{N_b}{m N_t} \frac{\{e_{fa} - e_{sa} b_1 b_2 (1 + b_3)\}}{a_1 a_2 (1 + a_3)} \quad (22)$$

となる。

## 5. 許容環境破壊危険度

自然環境の保全は、構造物機能に関連して重要な要因となりうると考えられる。たとえばタンクなどが破壊すれば、貯蔵物質がかなり広範囲に流出し、河川あるいは海洋の汚染を誘因する。このような環境破壊は、その地域住民に及ぼす公害として扱えられる。具体的な例として、昭和49年の水島石油コンビナート内におけるタンク破損事故に伴う海洋への重油流出は、水質汚濁等による突発的漁業被害として、その年の全被害額 285 億円のうち約75%の 214 億円がこの事故によるもので

あった。

ところで大気汚染、水質汚濁、土壌汚染、騒音・振動、地盤沈下、悪臭などの公害に対する公的な情報収集は、昭和44年12月から始められた。また経済的な立場から災害を分析し、被害金額などで見積高には、非常に難しく多くの不確かさを含んだ情報量と成らざるを得ない。したがって過去の情報量の不足と不確かさおよび現在時点の現象の定常性にも問題が含まれた状態で議論を行うことにする。

まず国内総資本形成量が自然災害の大きさに影響すると考え、環境災害率は国内総資本形成額に対する自然災害額の比で算定することにする。また、全被害額と地震による被害額との比 $\eta_s^*$ が常に一定であると仮定し、タンク構造物のような構造物機能が被害の規模に関係する場合民間企業公害防止設備投資比率 $\eta_c^*$ による量が環境破壊危険度を評価すると考える。

ある年の災害の危険感 $C$ は、ある年までの平均災害率 $C$ で、その災害率の変動係数を $\Delta_c$ とする。なお、現在のところ将来における災害および変動係数は、現在時点と変わらないとして、

$$C^* = \bar{C}, \quad \Delta_c^* = \Delta_c, \quad \sigma_c^* = \Delta_c^* C^* \quad (23)$$

とおく。さらに地震による災害分は、

$$\left. \begin{aligned} C_s^* &= \eta_s^* C^* \\ \Delta_{sc}^* &= \eta_s^* \Delta_c^* \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

であり、災害率の変動幅は、

$$\sigma_{sc}^* = \Delta_{sc}^* C_s^* \quad (25)$$

と推定する。 $C_s^*$ 、 $\sigma_{sc}^*$ および $\eta_c^*$ を用いて許容地震環境破壊危険度が次式のようにおくことを提案する。

$$C_{sa} = C_s^* + (1 - \eta_c^*) \sigma_{sc}^* \quad (26)$$

つぎに地震時における可燃物質貯蔵タンクの許容破壊確率 $P_{fa}^*$ が $C_{sa}$ を用いてどのように評価することができるか考えてみる。いま対象とする地域 $D_0$ 内で民間企業投資を $I$ 、貯蔵タンク1基あたりの貯蔵容量を $V_0$ 、タンク破壊にともなって流出した貯蔵物質が海洋等へ流出割合を $\xi_1$ 、貯蔵物資単位量あたりの廃棄物処理経費を $\xi_2$ とすると、 $IC_{sa}$ が $D_0$ 地域内での地震による災害額に相当し、 $\xi_1 \xi_2 P_{fa}^* V_0 N_t$ がタンク破壊に伴う貯蔵物質流出の処理に要した経費に相当することになる。したがって、

$$IC_{sa} = \xi_1 \xi_2 P_{fa}^* V_0 N_t$$

より、

$$P_{fa}^* = C_{sa} \frac{I}{\xi_1 \xi_2 V_0 N_t} \quad (27)$$

となる。

## 6. 許容社会生活崩壊危険度

日常生活の安定も構造物機能に関連して重要な要素となりうると考えられる。すなわち、地震災害は日常生活の衣食住に対して障害をもたらすため、住居としての建築物機能が保たれるよう要請

されることになる。

そこで日常生活の危険感として何を指標にすべきかが問題とたが、ここでは現在社会において常に存在している被保護者率をもって危険感の指標にすることにする。

まず、ある年の一般市民の生活の崩壊の危険感、その年までの平均住宅扶助率 $\bar{g}$ で表わし、またそのときの変動状態も住宅扶助率の変動係数 $\Delta_g$ で求める。つぎに、将来における平均住宅扶助率および住宅扶助変動係数は死亡率などの場合と同様に、

$$\left. \begin{aligned} \bar{g}_c &= A_5 \cdot 10^{-B_5 t} + C_5 \\ \Delta_g &= A_6 \cdot 10^{-B_6 t} + C_6 \end{aligned} \right\} \quad (28)$$

なる推定式を用いる。このようにすると構造物の寿命がT年であるときの将来の平均住宅扶助危険率 $g^*$ 、住宅扶助変動係数 $\Delta_g^*$ および変動幅 $\sigma_g^*$ は次式のようにになる。

$$\left. \begin{aligned} g^* &= \frac{1}{T} \left( C_5 T + A_5 \frac{1 - 10^{-B_5 T}}{B_5 \ln 10} \right) \\ \Delta_g^* &= \frac{1}{T} \left( C_6 T + A_6 \frac{1 - 10^{-B_6 T}}{B_6 \ln 10} \right) \\ \sigma_g^* &= \Delta_g^* g^* \approx \alpha_g \left( 1 + \frac{\beta_g}{T} \right) \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

ここに、

$$\alpha_g = C_5 C_6$$

$$\beta_g = \left( \frac{A_5}{B_5 C_5} + \frac{A_6}{B_6 C_6} \right) / \ln 10$$

ところで住宅扶助を受けるようになる原因は種々であるが、ここでは風水害、地震、火災などの災害がその原因であるとし、全災害戸数に対する各災害の戸数の比に比例すると仮定する。そこで各災害に対する比率は過去の情報から推定して定め、全災害による滅失戸数に対する地震災害による滅失戸数の比を $\lambda_s$ とし、火災に対する比を $\lambda_f$ とする。地震および火災による住宅扶助危険率は、

$$\left. \begin{aligned} g_s^* &= \lambda_s g^* \\ g_f^* &= \lambda_f g^* \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

となる。

つぎに地震に対する許容生活崩壊危険度および火災に対するそれを $g_{sa}$ および $g_{fa}$ とすると、それぞれ次式のようにおける。

$$\left. \begin{aligned} g_{sa} &= g_s^* + \sigma_g^* \\ g_{fa} &= g_f^* + \sigma_g^* \end{aligned} \right\} \quad (31)$$

つぎに  $g_{sa}$ 、許容人命危険度によるタンクおよび一般建築物の許容破壊確率  $P_{fa}^1$ 、 $P_{fa}^0$  の算定方法と同様にして、許容社会生活崩壊危険度による  $P_{fa}^1$ 、 $P_{fa}^0$  を次式のように求められる。



$$\left. \begin{aligned} P_{fa}^i &= \frac{P}{mN_i} \frac{\{g_{sa}\epsilon_b b_1 b_2 (1+b_3) - g_{ra}\gamma_b\}}{\{\gamma_i \epsilon_b b_1 b_2 (1+b_3) - \gamma_b \epsilon_i a_1 a_2 (1+a_3)\}} \\ P_{fa}^b &= \frac{P}{mN_b} \frac{\{g_{ra}\gamma_i - g_{sa}\epsilon_i a_1 a_2 (1+a_3)\}}{\{\gamma_i \epsilon_b b_1 b_2 (1+b_3) - \gamma_b \epsilon_i a_1 a_2 (1+a_3)\}} \end{aligned} \right\} \quad (32)$$

## 7. 結 言

本研究は、大規模な可燃物質貯蔵タンク群に対する耐震規定における目標公準設定のための評価の仕方について提案を行った。目標公準の設定値を構造物の破壊確率を採用し、設計目的の要因として人命への危険度、財産破損への危険度、環境破壊への危険度、社会生活崩壊への危険度などの社会福祉的なものを考え、それぞれの容認される危険度を評価することによって目標公準設定値が誘導された。すなわち、各要因の許容地震危険度は、その要因の地震危険度量に経年変化量を加えた量という基本的形式で表わしたとき、許容地震破壊確率は、許容地震危険度に比例した形式で評価できることが判明した。なお具体的な数値による結果は示されていないが、別の機会に発表するつもりである。

## 参 考 文 献

- 1) Lind, Niels C.: Consistent Partial Safety Factors, Proc. of ASCE, Vol. 97 No. ST6, June, 1971, pp. 1651-1669.
- 2) 中野清司：建築構造の安全性に関する研究の現状，建築研究報告，No. 73, March, 1976.
- 3) Nakano, K., Y. Aoki and K. Watanabe: A Proposal for A Rational Aseismic Structural Design Process, BRI Research Paper No. 68 Sept. 1976.
- 4) Allen, David E.: Discussion; Choice of Failure Probabilities, Proc. of ASCE, Vol. 94, No. ST 9, Sept., 1968, pp. 2169-2173.
- 5) Starr, C.: Social Benefit Versus Technological Risk, Science, Vol. 165, Sept., 1969, pp. 1232-1238.
- 6) 中野清司，石山祐二，青木義次：耐震規準における目標公準について，天然資源の開発利用に関する日米会議，耐震耐風構造専門部会第9回合同部会会議録，1977，東京，pp. 383-395.