

設計震度の設定に関する一つの問題

前運輸省港湾技術研究所 青木 義典

○運輸省港湾技術研究所 関 博

1. まえがき

従来の構造物の耐震設計は、地域により設計震度を定め、地盤条件、構造物の重要度などにより修正した震度から部材の諸要素を決定している。一方、構造物の経済効果を導入した手法も検討されているようである。^{1),2)}など 岡本、田村、栗林³⁾は、構造物の終極限界（損傷状態と破壊状態の境界）を目標とする設計震度に関して、地震の再現期間、建設されたことによる構造物の利益率、建設工費、構造物の更新期間を包含した確率論的な設計震度の決定について研究を進めている。岡本などの研究によると、建設工費と地震の再現期間（設計震度の関数）が個々の構造物に関し求められるとすると、利益率が最大となる再現期間の設計震度を用いることが最大の経済効果を期待できるとしている。本文では、岡本などの提案を沈埋トンネルに適用して、地震の再現期間と建設工費との関係を計算した。沈埋トンネルは、岡本などの類別化に基くと経済効果が個別の場合に属するが、この種特殊構造物の設計震度の設定方法に関して考察を試みた。

2. 鉄筋量と断面の抵抗曲げモーメント

本文では某港で建設の計画されている沈埋トンネルを取り上げた。その構造物断面は図-1に示したように、高8.542^m×幅31.0^mの箱型である。なお、図-1ではすでに設計々算されている配筋方法も併せ図示している。

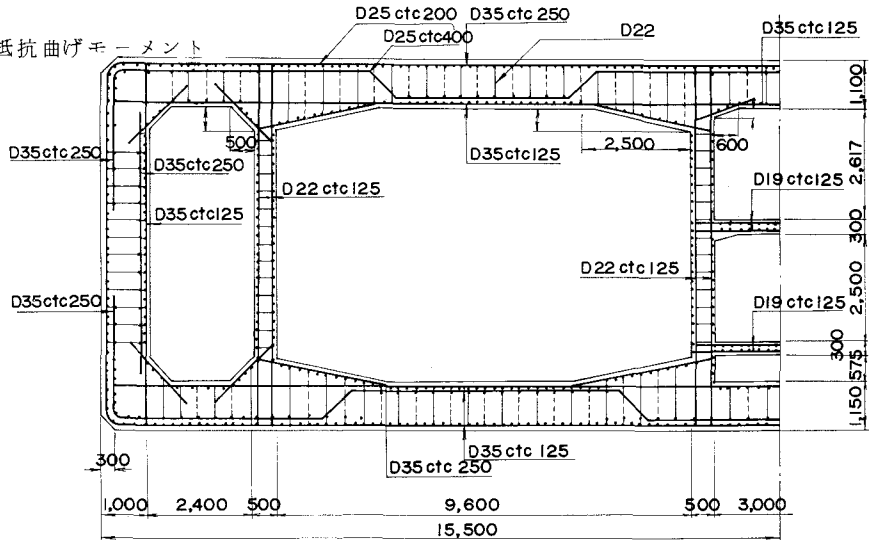


図-1 沈埋トンネル断面図

構造物水平方向に作用する地震による外力は、一つの計算法によると、 $M=7.66 \times 10^{-4} \text{ t}\cdot\text{m}/100\text{gal}$ 、 $S=2.36 \times 10^3 \text{ t}/100\text{gal}$ 、 $T=1.28 \times 10^4 \text{ t}/100\text{gal}$ である。

沈埋トンネルの断面形状は外力、使用目的などから規制され任意に決定される自由度は少ない。すなわち、内部形状は沈埋トンネルを利用する自動車の交通量、排気ダクトなどにより一義的に規定され、一方、沈埋トンネルの壁厚は普通のコンクリート材料の使用を前提とすると、水中重量など浮力のバランス、断面方向の応力計算によつて支配される。しかも壁厚などを変えても交通量などに関連した経済効果は不変である。従つて、内部形状が定められると構造物のあげる純利益は建設地点との

関連で推定され、壁厚とは無関係となる。すなわち、沈埋トンネルの建設工費と設計震度との関係はコンクリート厚とは関係を有さず、コンクリート強度、鉄筋の配筋量、鉄筋強度によつて定まると考えてよい。

沈埋トンネルの断面の抵抗モーメント計算には、内部側壁の厚さが少なく十分なモーメント効果を有さぬため内部側壁を無視した形状として計算を進めた。取り上げた材料強度は、コンクリートは $\sigma_c = 180, 240, 300$ ㎏/㎠。鉄筋は SD30 ($\sigma_{sa} = 1800$ ㎏/㎠, $\sigma_y = 3000$ ㎏/㎠), SD35 ($\sigma_{sa} = 2000$ ㎏/㎠, $\sigma_y = 3500$ ㎏/㎠), SD40 ($\sigma_{sa} = 2100$ ㎏/㎠, $\sigma_y = 4000$ ㎏/㎠) である。また、側壁、上下版の単位長さ当りの鉄筋断面積比 (r) を $0.5 \sim 3.0$ と変えて計算を行なつた。沈埋トンネルは、断面、軸方向いづれにも主鉄筋が必要で配筋は極めて煩雑な作業となり、また、鉄筋比を過度に増加すると配筋困難となる。太径鉄筋としてこの弊害を除去することも可能であるが、ひびわれ幅増加の逆効果が生ずる恐れがあり、わが国でもまだ使用実績が少ない。従つて、本文の計算では鉄筋の最大径 D35 を限度として、側壁の鉄筋比の限界を 3% 程度と考えた。

図-2 は断面の鉄筋量と抵抗曲げモーメントの関係を図示したものである。計算結果によると、本文で取り上げ断面の沈埋トンネルでは再現期間 100 年以下においてコンクリートはいずれも許容応力度以下にあつて、抵抗曲げモーメントは鉄筋許容応力度、配筋量によつて定まる。従つて、同一鉄筋量では高張力鉄筋を使用するほど抵抗モーメントは増加する。また、同一鉄筋断面積、同一鉄筋許容応力度では、側壁の鉄筋比を高めるほど抵抗モーメントは大きくなるが、上述した鉄筋比の限界値

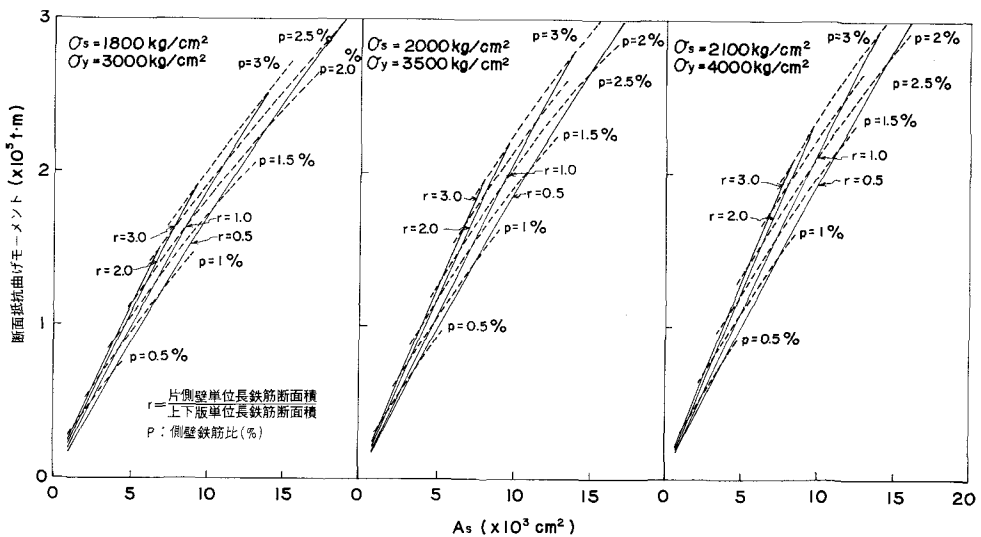


図-2 鉄筋量と抵抗曲げモーメント

からある程度以上の抵抗曲げモーメントを得るためには、上下版の鉄筋量を増さねばならない。さらに、大きな抵抗曲げモーメントが必要なときにはコンクリート応力度が許容応力度を超過する可能性があり、この場合には断面を変更することになる。

断面の終局モーメントは鉄筋が降伏点に達する時点を基準とした。このときコンクリートはいずれ

も圧縮強度以下であつた。コンクリートの応力～ひずみの曲線は、梅村の提案した ϵ 関数法⁴⁾を用いて計算を実施した。計算結果によると終局モーメントと抵抗曲げモーメントの比率は1.7～2.2内外である。なお鉄筋のひずみを0.02としコンクリートの終局ひずみが0.003を上廻らぬ条件の基に断面の終局モーメントを計算している。後者の終局モーメントは許容応力度法による断面の抵抗曲げモーメントの2.1～3.0倍程度である。このときの回転角は許容応力度法による回転角に比較し相当に大きく、非常にじん性が大きな構造物となり耐震設計上重要な事柄である。

3. 設計震度と建設工費

地震の再現期間と設計震度の関係を後藤、龜田の論文⁵⁾から類推した。すなわち図-3に示すように、地震震度が正規分布することから、それぞれの再来年数に対する震度(gal)を求めた。

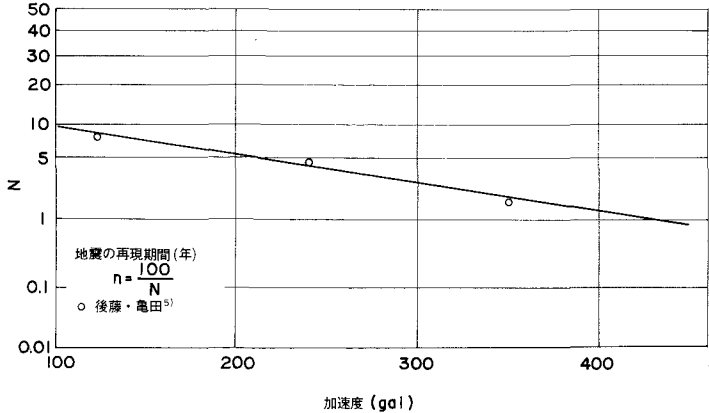


図-3 地震の再現期間と加速度

建設工用材料の積算価格

は以下の通りである。異形鉄筋の使用を前提とすると、D32程度の鉄筋で38円～40円/kgであり降伏点の大きい鉄筋など価格は高くなるがその差はわずかであり、SD30, SD35, SD40それぞれ/円/kg程度の価格差にすぎない。降伏点の増加による鉄筋断面減少、配筋の容易さの観点からは、ひびわれ幅を無視すると有利な結果となる。また、鉄筋の加工、組み立てに要する費用はほぼ64円/kgであるから鉄筋に要する全費用は約100円/kgということになる。

コンクリート工に必要な工費

は、本沈埋トンネルにおいては断面形状の変更を考慮しないこと、コンクリートの応力度が許容応力度以下であることから、ほぼ一定で変化しないと考えることができる。既往の施工例から、沈埋トンネルの総工費を800万円/㎡とすると、断面の抵抗モーメントと工費に影響を与える項目は鉄筋経費であると言えるようである。

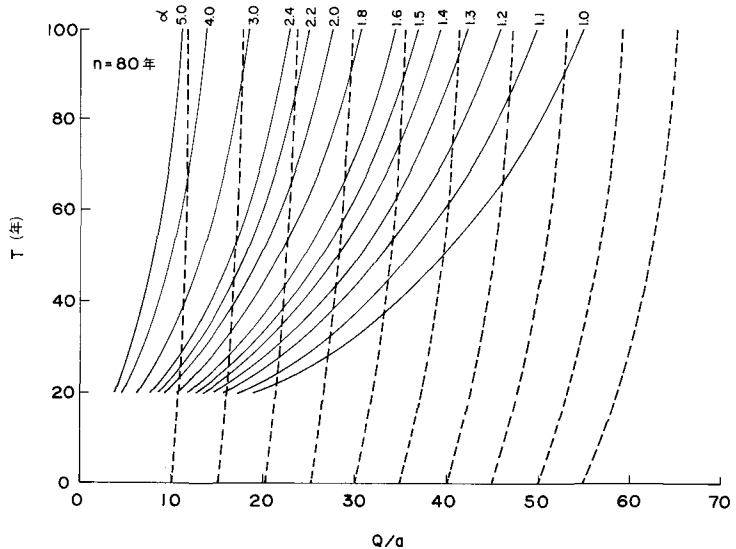


図-4 地震の再現期間と利益率および建設工費

構造物の建設によつて期待される純利益の算定は極めて

困難である。岡本など³⁾は、毎年の純利益(a)が不変であるとして、構造物建設に要する全工費(Q)、構造物があげる利益の期待値、利益率(すなわち、後者と前者の比、 α)、設計震度以上の地震の再現期間(T)、構造物の更新期間(n)の関係式を誘導し、この関係式をもとに設計震度の設定に関する議論を展開している。本沈埋トンネルについても純利益の想定は困難であるから、全工費/純利益(Q/a)を基準として検討を行なうこととする。岡本の求めた設計地震以上の地震の再現期間(T)と全工費/純利益(Q/a)の関係、および、本沈埋トンネルにおけるTおよび Q/a の関係を図示した一例が図-4である。本図から、 Q/a の小さな、すなわち、建設工費に対して純利益の比率の大きな構造物では、若干の工事費の増額(使用鉄筋の増加)によつて利益率の大幅な増加が期待できる。一方、 Q/a の

大きな構造物では、利益率の増加の程度は少なくなり、さらに、純利益の小さな構造物では利益率に達せず経済的に構造物築造の意義がなくなる。また、岡本が述べているように、更新期間が短いほど建設工費に対する純利益の比率の小さな構造物では、建設による経済効果を期待できない。本図によると、沈埋トンネルにおいては建設工費は地震の再現期間の増加に伴つて急激には増加しないようである。建設工費の増加による利益率の変化を作図すると図-5が得られた。これによると、 α は岡本の想定するような極大値を有さず、 Q/a を大きくとるほど、すなわち、地震の再現期間を長く設定するほど利益率は大きくなる。

いま、地震の再現期間(T)と構造物の

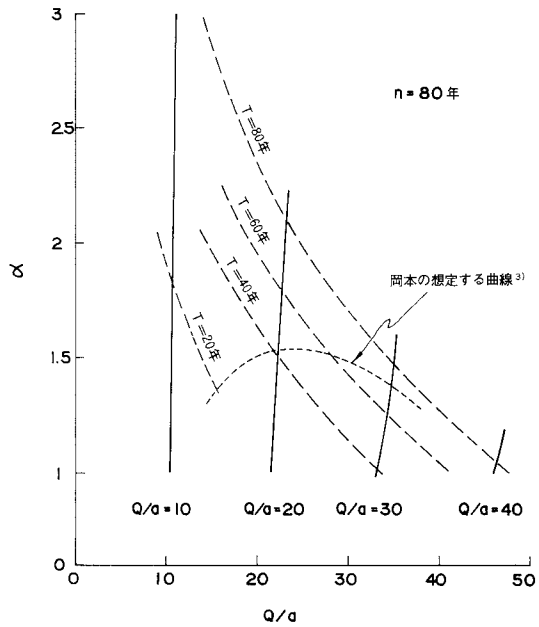


図-5 建設工費の増加による利益率の変化

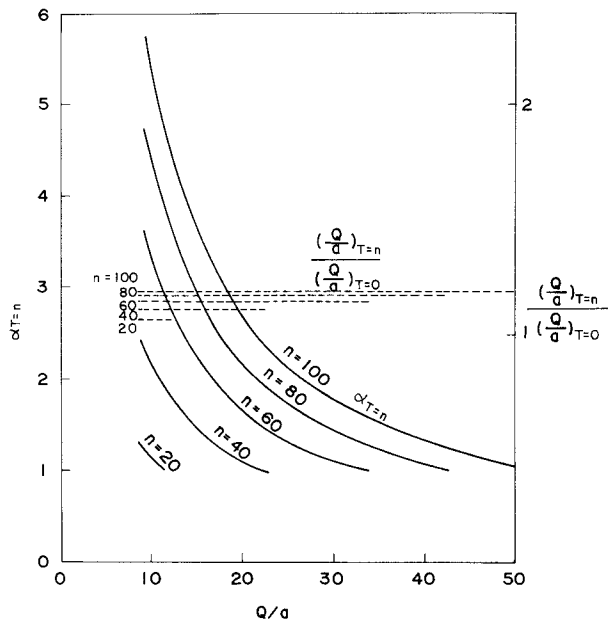


図-6 $T=\alpha$ における利益率と建設工費

更新期間(n)が同一年数であると考えたときの利益率を求めると図-6が得られる。本図からは、耐震設計を実施しなかつた構造物に対する $T=n$ としたときの工費の増加率 $((Q/a)_{T=n} / (Q/a)_{T=0})$ を併せ図示している。工費の増加率は同一更新年数を有する構造物ではほとんど一定であつて Q/a によつて影響されない。ただし、増加の程度は構造物の更新年間の取り方によつて異なり、 $n=20$ 年では1.06程度であるが $n=100$ 年ではほぼ1.18となる。しかし、純利益の小さな場合を除いては、地震の再来年数を大きくとることによつて利益率(a)の大幅な増加を期待することができる。すなわち、若干の建設工費の増加は必要であるが、設計震度を大きく設定した、つまり、鉄筋量を増加させることによつて建設による経済効果の増加を保證することとなる。

4. あとがき

経済効果を考慮した設計震度の設定に関する岡本などの提案³⁾を、沈埋トンネルに適用することを試みた。断面形状が耐震設計以外の条件で規制される本構造物においては、限られた面からであるが構造物の耐震性とそれに伴う建設工費の変化は主として鉄筋量によつて定まると言える。

計算結果によると、設計震度を大きく設定することによる、すなわち、断面の鉄筋量を増加することによる建設工費の増大はわずかである。たとえば再来年数20年に相当する設計震度と再来年数100年に相当する設計震度との建設工費の増大は約10%にすぎない。一方、この程度の建設工費の増加であつても、構造物の利益率は飛躍的に大きくなる。この結果岡本などが想定するような、利益率と再来年数は極大値をもたず、再来年数を高めるほど利益率は大きくなる結果となる。しかも、鉄筋量を増加させれば終局強度に対して回転能が高まり余裕のあるねばり強い設計を行なうこととなる。従つて、設計震度を大きくとり鉄筋量を増した方が経済性および安全性の観点から好ましいといふことが言えるようである。

参考文献

- 1) 岡本舜三, "地震力を考えた構造物の設計法", オーム社, 第5版, 336pp, 昭和41年6月
- 2) 栗林栄一, "公共土木施設の震害と経済上の対策", 第10回地震工学研究発表会講演概要, pp.107~110, 昭和44年7月
- 3) 岡本舜三, 田村重四郎, 栗林栄一, "設計震度における経済的考察", 第12回地震工学研究発表会講演概要, pp.91~94, 昭和47年7月
- 4) 武藤 清, "鉄筋コンクリート構造物の塑性設計", 丸善, 424pp., 昭和39年8月
- 5) 後藤尚男, 龜田弘行, "地震時における最大地動の確率論的研究", 土木学会論文集, 第159号, pp.1~12, 昭和43年12月