

ている。③ 例示設計編は、マニュアル本編に即して、代表的な構造物についての安全性照査の例を示している。マニュアルは、1章 総則（適用の範囲、用語の定義等）、2章 安全性照査の基本的な考え方（限界状態および部分安全係数）、3章 材料、4章 荷重、5章 地震荷重の算定・構造解析、6章 S_2 地震時に対する照査、7章 S_1 地震時に対する照査、8章 常時に対する照査、9章 構造細目 から構成されている。

4. マニュアルの特徴

以下に、本マニュアルの特徴を列挙する。

① 限界状態の設定

原子力構造物における特殊な荷重条件での、構造物に要求される機能を整理し、各荷重条件毎に限界状態および照査項目を設定した。

② 動的解析法を基本

地震荷重算定（耐震計算法）は、原則的に動的解析法によることを明示した。

③ 構造物の非線形性の考慮

動的解析法による地震荷重の算定において、積極的に構造物の非線形性を考慮することを推奨し、その具体的な方法について提案しており、構造物を実現象に近くモデル化することが可能になった。

④ 部分安全係数の設定

原子力構造物、特に設計に用いる地震動の特殊性を勘案して、部分安全係数を設定した。

⑤ 部材耐力等の合理的算定法

地中構造物の荷重形態や構造条件等を考慮して、合理的なせん断耐力算定法を提示した。

⑥ 試設計および検証実験による検証

提案している安全性照査方法に則り多くの試設計を行い、マニュアルの考え方が実務設計上適切であることを確認した。また、地震時の地中構造物を模擬した地盤・構造物連成実験を行い、マニュアルの妥当性を検証した。

⑦ 限界状態設計法の実務設計への適用性

以上の検討の結果、限界状態設計法に則った実務的な安全性照査が可能になった。

5. 安全性照査の基本的な考え方（1章、2章）

（1）適用範囲

対象とするのは原子力発電所・屋外重要土木構造物である。ここで屋外重要土木構造物とは、耐震 A_S クラスの機器（その破損により冷却材喪失を引き起こすものなど）もしくは A クラスの機器（原子炉事故の際に放射線障害から公衆を守るのに必要なもの等）を間接的に支持するかあるいはそれらの機器と同等の機能を期待される土木構造物のことである。大別すると、① 非常用原

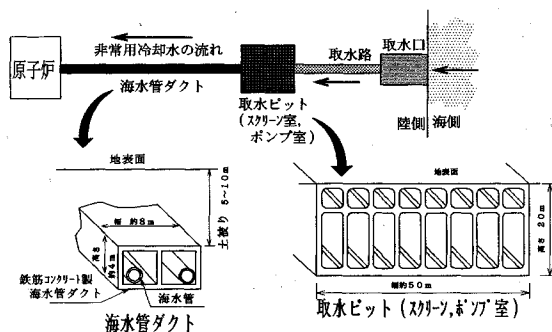


図-2 屋外重要土木構造物の概念図（非常用海水管ダクトと取水ピット）

子炉補機冷却用海水系設備、② 非常用電源設備、③ 非常用ガス処理系設備等がある。本マニュアルでは、図-2に示している海水管ダクト、取水路、取水ピット等で代表される原子炉の非常用取水設備に関連する地中に埋設される鉄筋コンクリート構造物を対象とした。

また、図に示すような構造物の横方向の断面に対する照査方法に限定しており、構造物の長手方向についてはジョイント等の設置によって対処することとし、本マニュアルでは、照査の具体的な方法は示していない。

（2）限界状態の設定

a) 限界状態の種類

屋外重要土木構造物の限界状態は、考慮する荷重に基づき以下の3種類を設定することとした。

① 設計用限界地震（ S_2 地震）時

S_1 地震を上回るもので、活動度の低い活断層までも考慮する基準地震動 S_2 を用いて照査する荷重状態である。この地震中および地震の後に非常用通水機能を確保することを要求される機能とした。

② 設計用最強地震（ S_1 地震）時

過去の地震または活動度の高い活断層を考慮した基準地震動 S_1 を用いて照査する限界状態である。この地震中に、ダクト内配管・機器に発生する応力が弾性範囲を超えることがなく、地震後でも地震前の状態と変わらず使用可能であることを要求される機能とした。

③ 常時

上記地震を考慮しない荷重状態であり、常時存在する荷重（供用時荷重）のみを考慮する状態である。非常時でない場合でも、健全性が損なわれないことを要求している。

b) 照査用限界状態の選定

限界状態を設定するには、上記のそれぞれの限界状態における構造物に要求される機能をFTA (Fault Tree Analysis) 手法等を用いて整理し、いくつかのレベルに分類した。例えば、 S_2 地震時の取水路について

表—2 各荷重ごとの要求機能および安全性照査用限界状態

	屋外重要土木構造物に対する要求機能	屋外重要土木構造物の安全性照査用限界状態	照査項目
S_2 地震時	非常時に構造物に必要とされる機能が維持・確保出来る	部材断面の耐力確保	せん断耐力 曲げ耐力
S_1 地震時	配管・機器に発生する応力が弾性範囲を超えない	諸材料の応力度制限, 急激な部材変形の回避	鉄筋応力 せん断耐力
常時	供用時荷重に対して構造物の健全性を確保出来る	部材耐力裕度の確保, 耐久性の確保	耐力 ひびわれ幅

マニュアルにおいては、構造条件および断面諸元等が既に設定されている構造物に対して安全性照査を行うことを原則としており、断面諸元などを設定する方法は特に言及していない。

6. 設計用地震荷重の算定 (5章)

(1) 算定の基本

マニュアルで対象としているのは、地中に埋設された鉄筋コンクリート構造物であるため、最も影響の大きい荷重は地震時土圧である。この地震時土圧の評価法としては、以下の3つに大別できる。

- ① 動的解析法
- ② 準動的解析法 (応答変位法等)
- ③ 簡便な地震荷重算定法 (物部・岡部式等)

実測および数値解析の結果、③の従来広く用いられてきた物部・岡部式を用いた簡便な地震荷重算定法が実態とは相違する場合があることが明らかにされた。

また、マニュアルは、構造の基本形式を定めた後の安全性照査に利用されることを主たる目的としていることから、この段階では手間をいとわず、できる限り近似の少ない高度の手法を適用すべきである。

したがって、マニュアルでは地震荷重を動的解析法を用いて算定することを基本としている。ここでいう動的解析法では、地盤と構造物を連成系として扱う。

(2) 動的解析の基本方針

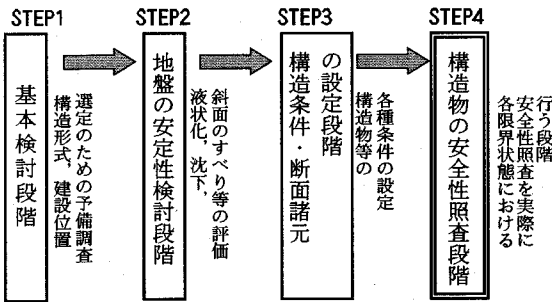
a) 動的解析の手順

動的解析は、解放基盤表面で定義される基準地震動(S_1 または S_2)によって構造物に加わる地震動の作用を求めるために行う。図—4には動的解析法を用いた標準的な設計断面力の算定手順を示している。

構造物がフレームにモデル化できるような比較的単純な場合は、動的解析の結果として部材の断面力が得られるので、これを地震荷重と考えて、他の荷重による断面力と直接重ね合わせられる(図—4の方法②)。この場合には、動土圧や慣性力といった荷重表現を経由することは不要になる。特別な場合として、断面の厚い構造物では、フレームにモデル化することが幾何学的に適切でないことがある。また、構造物の3次元的な剛性を含めて、構造物全体を等価な平面要素でモデル化する必要が生ずることも考えられる。そのようなケースでは、部材の断面力が得にくいので、動土圧と慣性力を算定する手順を採った方が適切である(図—4の方法①)。どちらの方法でも安全性の照査結果は同等と考えられるので、構造形式などを考慮して実務的に容易な手順を選択するのが良い。

b) 留意事項

実際に動的解析法を実施する際には、いくつかの事項に留意しなければならない。マニュアルでは、以下の事



図—3 安全性照査の流れの概要

照査用限界状態としては、最上位のレベルは「通水空間を確保する」であり、以下「地盤・構造物系の健全性確保」、「部材の回転能の確保」、「部材断面の耐力の確保」となる。上位の要求機能を確保することは、それより下位のレベルの限界状態を照査することによって満足されることになる。

理想的には、より高いレベルで照査することが望ましいのであるが、現状での技術レベル、汎用性および従来設計方法との継続性などから考えて、マニュアルでは実務に対処し得る限界状態を設定した。将来的には、研究の進展および解析手法の高精度化を勘案して、より高いレベルの限界状態に移行していくことが望ましい。

表—2に、マニュアルに採用された各限界状態(S_2 地震時、 S_1 地震時および常時)における要求機能と限界状態および照査項目を示した。

(3) 安全性照査手順

全体の安全性照査の流れは図—3に示すように、4段階に分かれている。マニュアルにおける安全性照査は上記4段階の中の『構造物の安全性照査段階』に限定している。これは、基本検討段階での構造形式、建設位置の選定、断面諸元および地盤の安定性の検討は既に実施されていることを前提としているためである。従って、マ

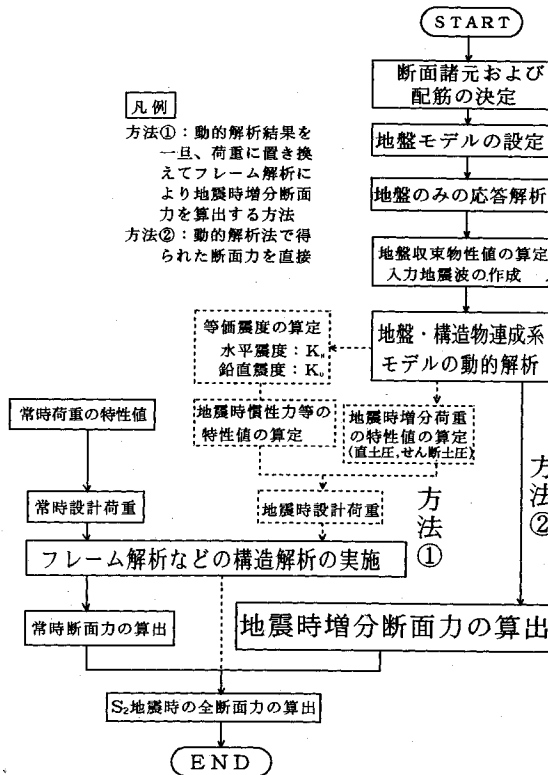


図-4 動的解析を用いた場合の S_2 地震時設計断面力の算定手順の例

項について、標準的な対処方法を提示している。

- 要素の選択 (平面要素, フレーム, 集中質量系等)
- 構造物のモデル化 (特に, 非線形性の考慮方法: この点については, 次の 6.3 で詳説する。)
- 地盤を構成する土質材料の非線形性の考慮方法
- 地盤の解析領域, 要素の大きさ
- 運動方程式の解法の選択 (直接積分による時間領域の解法, フーリエ変換を利用した周波数領域の解法)

(3) 構造物の非線形性の考慮

a) 非線形性考慮の必要性

従来, 地中構造物を対象として動的解析を行う際には, 地盤の非線形性は等価線形として考慮していた。しかし, ひびわれなどに起因する鉄筋コンクリート構造物の非線形性は無視されていた。地盤と構造物の連成作用について検討した結果, 地盤と構造物の剛性の比率が構造物に作用する動土圧に大きな影響を与えることが明らかとなった。図-5 には, 地盤と構造物の剛性の比率が異なる 2 種類の海水管ダクトに加わる直方向動土圧の比較 (動的解析法結果) を示した。このように, 地盤と構造物の剛性比により, 動土圧の大きさ, 分布形状とも変化し, 地盤および構造物の両者の剛性を適正に評価する必要性が示された。

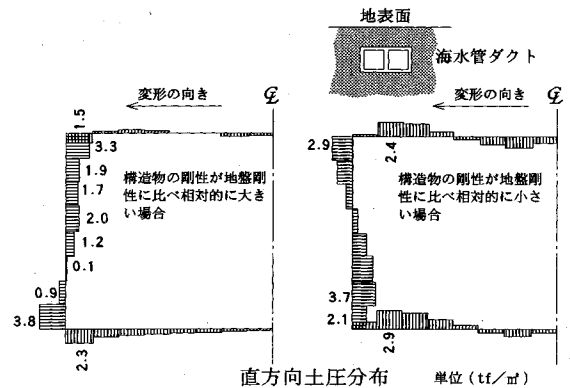


図-5 地盤と構造物の剛性比が土圧分布に与える影響

b) 非線形性考慮の合理性

従来の許容応力度設計法では, 照査の対象となっていたのに対し, マニュアルでは, S_2 地震時では部材断面の耐力で, また, S_1 地震では鉄筋降伏の有無を照査項目としている。照査において設定している構造物の挙動に近い状態を仮定することで, 実際の挙動を正確に再現でき, 合理的な設計が可能になるのは明白である。

理想的には, 各限界状態の照査項目 (S_2 地震時: 耐力 S_1 地震: 鉄筋降伏) に対応させて, 鉄筋コンクリートのひびわれおよび鉄筋降伏などの非線形性を厳密に考慮して, 構造物をモデル化するのが理想的である。

c) 実務的な考慮方法の提示

実際には, 地盤と構造物の連成非線形挙動を完全に追跡することは困難であり, 現状では実務設計においては不可能といってよい。そのため, このような効果をどこまで, どのように考慮するかが問題となってくる。マニュアルでは, 解析手法の精度および信頼性, 地盤の非線形性の考慮方法とのバランス, 既往の設計法との継続性等を勘案して, 以下のような簡便な構造物の非線形性の考慮方法を提案した。

① 一部材 (床版, 側壁) は一様に一定の比率で低下させた剛性を用いる。

実務設計に用いることを念頭におき, 動的解析法での簡便さを考慮して, 最も単純な非線形性の考慮方法とした。地盤の非線形性も等価線形でひずみ依存性を考慮しているため, それとの整合性も考慮した。

② S_2 地震時 (耐力照査) では, 鉄筋降伏時の剛性を用いる。 S_1 地震 (鉄筋降伏照査) では, 鉄筋応力が [鉄筋降伏応力 / 1.3] になったときの剛性を用いる。

S_2 地震時では, 部材の耐力を照査項目としているので, その前の段階であり, かつ, 鉄筋コンクリートの非線形性が顕著になる「鉄筋降伏」段階での構造物の非線形性までを考慮してよいことにする。それに対して, S_1

地震時は鉄筋応力が鉄筋降伏強度以下であることを照査項目としているため、鉄筋応力が鉄筋降伏強度以下の値である時の断面の非線形性を考慮することとする。

ある断面の鉄筋降伏時の剛性を厳密に算定する場合、断面諸元（鉄筋比）および断面力性状（曲げモーメントと軸力の比）によってその値は変動する。そこで、これらの影響を考慮できる剛性の算定法を採用している。

③ 実務検討において詳細な計算を行わない場合は、一般に S_2 地震時の検討においては、構造物の剛性残存率（全断面有効剛性に対する比率）を50%としてよい。 S_1 地震時の剛性残存率は60としてよい。

海水管ダクトおよび取水ピットを対象とした試設計ならびに試算により、標準的な設置条件においては、上記の剛性残存率は十分に安全側の値であることが確認されている。また、LNG タンクの設計指針ならびに格納容器等の温度応力に対する設計とも整合がとれている。

④ 剛性低下を考慮する部材・領域は、断面力の大きさ、荷重の繰返し効果および地盤との接触の有無等を考慮して定めることとする。

剛性低下はその部分に発生する断面力の大きさに密接に関連しているため、原則的には構造部材の断面力の大きな部分を剛性低下領域とする。地震荷重を受けるということで繰返し作用を考慮して剛性低下領域を設定する。また、剛性低下は地盤と構造物の連成作用と密接に関連しているため、地盤と構造物が接している部分を原則として剛性低下領域とする。

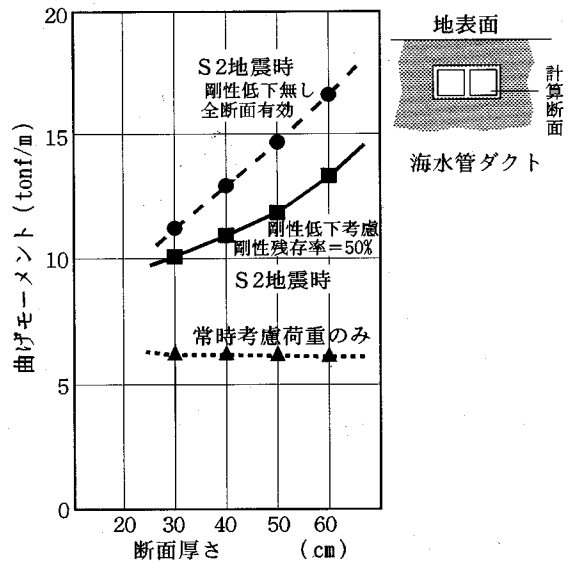
具体的な構造物にこれらの原則を適用してみると、図一2に示した海水管ダクトのように単純なボックスラーメン形状では、剛性低下を構造物全体で仮定することが可能である。また、取水ピットは、最外部の側壁のみを剛性低下させることを推奨している。

d) 試設計結果の例示

動的解析法において、上記の構造物の非線形性を考慮し、構造物の剛性を小さく仮定すると、地震荷重、特に地震時土圧を実際に即して算定することができ、従来に比べ地震荷重や発生断面力が低減されることが明らかとなった。

図一6には、海水管ダクトのある断面の曲げモーメントと断面厚の関係、剛性残存率100%と50%の場合について示した。断面厚と曲げモーメントの関係をみれば判るように、構造物の剛性が低いほど、発生する曲げモーメントは小さくなる。いずれの断面厚でも、剛性低下を仮定することにより、20%~30%設計断面力が低減することが明らかとなった。断面厚が厚い場合ほど、剛性低下の影響が大きく、断面厚が小さく全断面有効剛性が小さい場合には剛性低下の影響は小さくなる。

これらの結果から判るように、剛性残存率で簡便に構造物の非線形性を考慮することによって、地震時の断面



図一6 断面厚さと発生曲げモーメントの関係（動的解析によるパラメータスタディ）

力を合理的に評価することが可能になる。

7. 鉄筋コンクリート構造物の照査方法

(1) 安全係数 (2章)

安全係数についての基本的な考え方は示方書に準拠するが、マニュアルでは、各限界状態の特質に鑑みて、表一3に示す標準値を設定している。部分安全係数は、 S_2 地震時、 S_1 地震時および常時に分けて設定している。常時については、破壊に対する検討である耐力裕度を照査用限界状態とした場合と、耐久性の確保を限界状態とした場合に分けてそれぞれに標準値を示した。

以下に主な安全係数の設定根拠について説明する。荷重係数については、【7.2 荷重】で言及する。

a) 構造物係数 γ_1 について

① 地震時の構造物係数

原子力発電所の屋外重要土木構造物の重要度は最大級である。しかし、地震時の安全性照査において、この重要度は基準地震動の設定ならびに限界状態の設定をはじめとした耐震安全性照査の手法の中で十分考慮できているものとし、構造物係数では重要度を考慮しないこととする。すなわち、地震時の構造物係数は1.0とする。

② 常時の構造物係数

静的な荷重が主要なものとなる常時の安全性照査については、一般構造物と同様の扱いをしているため、安全性照査の中でその重要度を十分に考慮しているとはいえない。そのため、常時においては構造物係数でその重要度を直接的に考慮する必要がある。そのため、常時の耐力裕度の照査については、構造物係数 $\gamma_1=1.15$ とする。

表—3 安全係数の標準値

安全係数		限界状態	S ₂ 地震時	S ₁ 地震時	常 時	
			部材耐力	材料応力度	耐力裕度	耐久 性
材料係数 γ_m	曲げ軸力	コンクリート γ_c	1.3	1.0	1.3	1.0
		鉄 筋 γ_s	1.0	1.0	1.0	1.0
	せん断	コンクリート γ_c	1.3	1.3	1.3	1.0
		鉄 筋 γ_s	1.0	1.0	1.0	1.0
部材係数 γ_b	曲げ軸力	軸 力 卓 越	1.3	鉄筋降伏応力 度の 照 査 1.0	1.3	曲げひびわれ の 照 査 1.0
		曲 げ 卓 越	1.15		1.15	
	せん断	コンクリート	1.56	1.3	1.3	1.0
		せん断補強筋	1.38	1.15	1.15	1.0
構造解析係数 γ_a			1.0	1.0	1.0	1.0
構造物係数 γ_i			1.0	1.0	1.15	1.0

また、常時の耐久性の照査については補修等により対応が十分に可能であることを考え、通常の構造物と同様、 $\gamma_i=1.0$ とする。

b) 部材係数 γ_b について

① 曲げに対する検討

S₂地震時の曲げに対する照査は示方書と同等であるので、示方書で推奨している部材係数の値を用いることを原則とする。それに対して、S₁地震時の照査の限界状態は、地震後の健全性の確保であり、曲げに対しては、鉄筋降伏応力の照査であるため、耐力を限界状態とするより構造物全体への影響度が小さいと考え、1.0とした。

② せん断に対する検討

S₂地震時のせん断の照査については、示方書で推奨している部材係数の値を用いることを原則とする。主鉄筋降伏後の繰返し荷重下で、脆性的な破壊を防止するため、地震時の部材係数を1.2倍することとした ($\gamma_b=1.3 \times 1.2=1.56$)。S₁地震時のせん断に対する照査においても、S₂地震と同様にせん断耐力についての照査を行うこととしている。しかし、S₁地震時の曲げの照査が鉄筋降伏応力度の照査であり、鉄筋降伏以上の応力度とならないことが保証されているので、S₂地震時で考慮した主筋降伏後の脆性的な破壊に対する割増し1.2倍は考慮しないこととする。即ち、S₁地震時のせん断に対する部材係数は $\gamma_b=1.3$ とする。

(2) 荷重 (4章)

a) 考慮する荷重

考慮する荷重は、永久荷重として、躯体自重、配管荷重、土被り荷重、上載荷重、静止土圧、水圧があり、変動荷重として、変動上載荷重、雪荷重、温度荷重がある。これらに加え、偶発荷重として地震時増分荷重(動土圧、慣性力、動水圧等)を考慮することになる。このうち、変動荷重の影響は非常に小さく、永久荷重と地震荷重が

表—4 各荷重状態での荷重組合せと荷重係数

限界状態	荷重ケース	永久荷重			地震荷重				変動荷重				
		常時考慮荷重*1)	静止土圧最大*2)	静止土圧最小*3)	外水圧	内水圧	水平向		鉛直上	鉛直下	変動上載荷重	雪荷重	温度荷重
							右	左					
S ₂ 地震時	1	1.0	1.0		1.0	1.0	1.0		1.0		-	-	-
	2	1.0	1.0		1.0	1.0		1.0	1.0		-	-	-
	3	1.0	1.0		1.0	1.0	1.0			1.0	-	-	-
	4	1.0	1.0		1.0	1.0		1.0		1.0	-	-	-
	5	1.0		1.0	1.0	1.0	1.0		1.0		-	-	-
6~ 以下省略													
常時・耐力裕度	1	1.1	1.1		1.1	1.1	-	-	-	-			-
	2	1.1		0.9	1.1	1.1	-	-	-	-			-
	3	1.1	1.1		1.1		-	-	-	-			-
	4	1.1		0.9	1.1		-	-	-	-			-
	5	1.1	1.1		1.1	1.1	-	-	-	-	1.2		-
	6	1.1	1.1		1.1	1.1	-	-	-	-		1.2	-
7~ 以下省略													
常時・耐力性	1	1.0	1.0		1.0	1.0	-	-	-	-			
	2	1.0		1.0	1.0	1.0	-	-	-	-			
	3	1.0	1.0		1.0		-	-	-	-			
	4	1.0		1.0	1.0		-	-	-	-			
	5	1.0	1.0		1.0	1.0	-	-	-	-	1.0		
	6	1.0	1.0		1.0	1.0	-	-	-	-		1.0	
	7	1.0	1.0		1.0	1.0	-	-	-	-			1.0
	8	1.0	1.0		1.0	1.0	-	-	-	-	1.0		1.0
9~ 以下省略													

*1) 躯体自重については、いずれのケースも1.0

*2) 静止土圧の上限値を用いる場合(不利に働く場合)

*3) 静止土圧の下限値を用いる場合(有利に働く場合)

大きな比重を占めている。

b) 荷重の組合せと特性値について

荷重の組合せは、各荷重状態毎 (S_2 および S_1 地震時、常時・耐力裕度、常時・耐久性) に設定している。表—4 に各荷重状態における荷重の組合せと荷重係数の標準値の一覧を示している。

地震時には、変動荷重は組合せないのを基本とする。これは、 S_2 , S_1 という特殊な地震動を用いて地震荷重を算定しており、これと生起確率の小さな変動荷重が同時に生ずる可能性はごく小さいと判断したことによる。

常時の耐力裕度の照査では、変動荷重のうち温度荷重については、部材の剛性が低下して、温度変化による拘束応力が逸散すると考え、無視することとした。また、変動上載荷重と雪荷重が同時に作用する確率はきわめて低いと判断し、これらが同時に作用するケースは考慮しない。

常時の耐久性の照査では、変動荷重は3種類考慮するが、同時に作用するのは変動上載荷重と温度荷重の組合せに限定した。この場合の変動上載荷重と温度荷重の特性値は、同時に作用する確率が低いことを考慮して、単独で永久荷重と組み合わせる場合の特性値を0.7倍したものを特性値とする。また、ひびわれ幅の照査における変動荷重の特性値は、慣用的に用いられる特性値に低減係数(0.5)を乗じたものとする。

荷重の特性値に関して特徴的であるのは、表にも示しているように静止土圧を2種類考慮していることである。この2種類とは、全体の断面力に対して有利(全体断面力を減じる方向、下限値)に働く場合と、不利(全体断面力を増加させる方向、上限値)に働く場合を想定しているものである。静止土圧の上限値とは、静止土圧係数を0.5として算定したもので、従来から用いられている慣用的な値である。下限値は、静止土圧係数0.3として算定してよいとしている。

c) 荷重係数 γ_f について

① 地震時の荷重係数

基準地震動 S_2 , S_1 を用いて算出される、いわゆる設計用地震荷重については、その設定された経緯から考えて、現状ではその変動性、不確実性等の確率論的議論は行うことができないと考えるべきである。したがって、基準地震動 S_2 , S_1 を用いた設計用地震荷重の荷重係数は1.0以外の値を設定することは意味を持たない。この設計用地震荷重と組み合わせられる他の荷重については、本来個々に有している変動性、不確実性が、基準地震動を用いていることで薄められると考え、荷重係数による割増は考慮せず、すべて1.0とする。

② 静止土圧

静止土圧に関しては、特性値に上下限値が存在することならびに全体断面力を減少させる方向に働き、かつ、

その影響が大きいことを勘案し、特性値の算定において、上下限値の存在の影響を考慮することとした。特性値に最小値と最大値があるため、それぞれの荷重係数を0.9および1.1とした。

③ 他の荷重

そのほかの荷重については、示方書に定められた原則に従って、表で示すように設定した。特に、地震時については、前述したように基準地震動の特殊性を勘案して、すべての荷重係数を1.0とする。

(3) せん断耐力算定法の検討

a) せん断に対する設計法の問題点

示方書におけるはりのせん断耐力算定式は、基本的には2点載荷の単純はりの実験結果に基づいて導かれたものである。このような単純な載荷形態あるいは単純な断面力分布である場合は、精度良くせん断耐力を評価することが可能である。

しかし、試設計や実験の結果によれば、分布荷重が卓越する場合、支点付近に大きな荷重が加わる場合および支点反力が大きい場合において、そのせん断耐力を過小評価してしまうことが明らかとなった。地中に埋設されたボックスラーメン構造物である海水管ダクトならびに取水ピットではこれらが複合して作用することになるため、示方書算定式の不合理性は顕著になる。

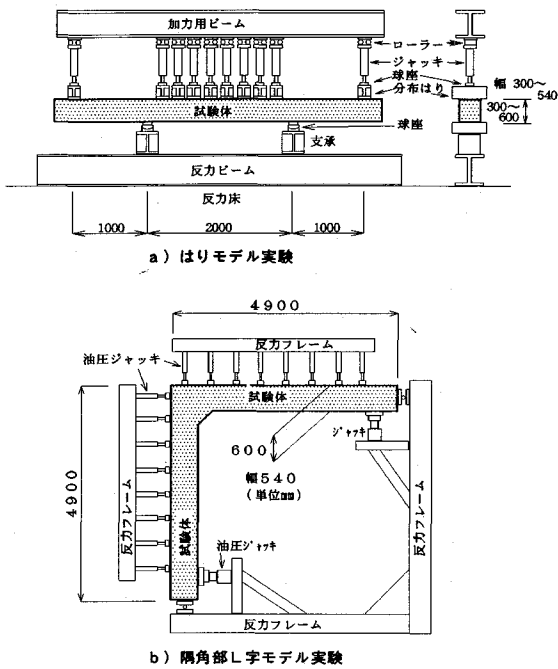
また、従来のせん断設計法(昭和55年制定示方書等)と新示方書(昭和61年および平成3年制定)と比べた場合、新示方書の方が厳しくなることが試設計の結果明らかになった。例えば、土被り約3mの外形約8×4m、断面厚60cmの2連ボックス形状の海水管ダクトでは、55年示方書ではせん断補強筋を必要としなかったのに対して、新示方書では0.2~0.4%のせん断補強筋が必要となった。このような、予備検討を踏まえ、実験ならびに解析的な検討を行い、この種の構造物のせん断耐力算定法について検討した。

b) 実験的検討

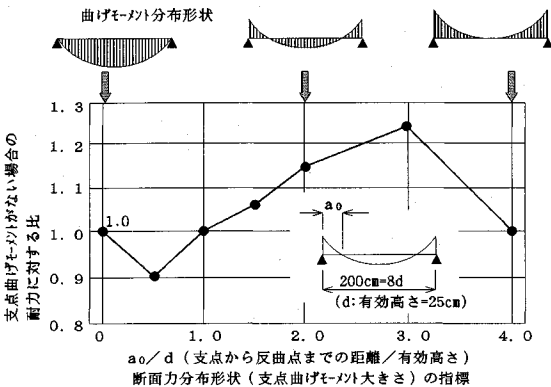
海水管ダクトのような地中に埋設されるラーメン構造の隅角部を模擬して、連続はりに置換したはりモデル実験と隅角部L字型モデル実験の2種類を実施した。図—7には、これらの実験方法を示した。

実験においては、土圧を模擬した多数のジャッキの荷重比率ならびに位置を変化させ、実際の断面力分布を再現した。試験体は、せん断破壊が曲げ破壊より先行するように、引張鉄筋比を大きくし、試験区間にはせん断補強筋を配置していない。

実験結果の一例を図—8に示した。これは、はりモデル実験において、発生するせん断力分布を同一にして、曲げモーメント分布のみを変化させた結果である。この結果から、せん断耐力が曲げモーメント分布性状に影響を受けることが明らかとなった。



図一七 せん断破壊実験状況図



図一八 断面力分布の違いがせん断力に与える影響

c) せん断耐力算定法の提案

① 基本的考え方

実験などの結果から、地中に埋設されたラーメン構造物のせん断耐力は、構造物の設置条件、部材の形状と照査部位、荷重の種類、発生している断面力の分布等を考慮して適切に算定しなければならないことが明らかとなった。

マニュアルでは、地中に埋設されたボックス構造を想定し、作用している曲げモーメントおよびせん断力分布および部材の形状を考慮した棒部材の設計せん断耐力の算定方法を提案した。

厳密には、個々の荷重（分布荷重）ならびに構造形状

を考慮したせん断耐力算定法を用いるのが望ましい。しかし、今回対象としている地震時の荷重作用は、常時荷重および地震時荷重増分の多数の荷重の複合作用であり、それらを個々に分解して影響を評価するのは実務的には困難である。

そこで、せん断耐力の算定法では、個々の荷重作用を区別せず最終的な設計用断面力分布のみを基に耐力を算定する方式を採用することとした。示方書で示してある方法は、一つの断面での照査であり、それに対して本方法は、ある意味では部材の照査といえることができる。この点が、最も大きな相違点である。

② 照査区間

図一10には、せん断耐力算定法（簡便法）の概念の説明を示している。最終的に算出された設計用断面力分布を用いて、いくつかの区間に部材を分割し、それぞれの区間について計算される設計せん断耐力と設計せん断力を用いて照査を行うこととした。

照査対象となる部材の区間は、支承前面あるいは柱・はり前面から反曲点（最大曲げモーメント点あるいはせん断力が零となる点）までとする（図中の区間①と②）。一般的には、柱あるいははり部材は1つあるいは2つの区間に分割することとなる。

③ 等価せん断スパンの設定

上記の区間内をさらに分割し、以下の方法で等価せん断スパンを設定する。区間内に曲げモーメントの反曲点が存在する場合は、以下の2種類の等価せん断スパンを設定する。

第1等価せん断スパン (a_1)：支承前面あるいは柱・はり前面から反曲点までの距離

第2等価せん断スパン (a_2)：反曲点から最大曲げモーメント点までの距離

このようなせん断スパンを設定したのは、反曲点を境界にした2つのせん断スパンで独立したせん断ひびわれが進行し破壊に至るといった実験結果に基づいている。

④ 耐力の算定

それぞれの区間内のせん断スパンにおいて、設計せん断耐力 V_{ud} は以下の2つの式 ($V_{ud,s}$ と $V_{ud,d}$) のいずれか大きい方により求めてよいものとする。

両式ともせん断スパンを関数とした耐力式となっている点が最も大きな特徴である。これにより、はじめてせん断耐力に与える断面力分布の違いの効果を考慮することができるわけである。

棒部材式： $V_{ud,s} = V_{cd,s} + V_{sd}$

ディープビーム式： $V_{ud,d} = V_{cd,d}$

ここに、 $V_{cd,s}$ ：斜め引張破壊モードにおけるコンクリートが分担する設計せん断耐力

V_{sd} ：せん断補強鋼材により受け持たれる設計せん断耐力

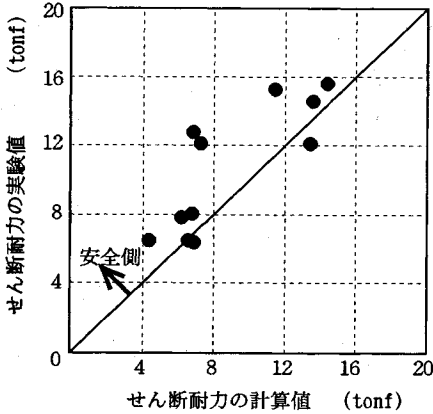
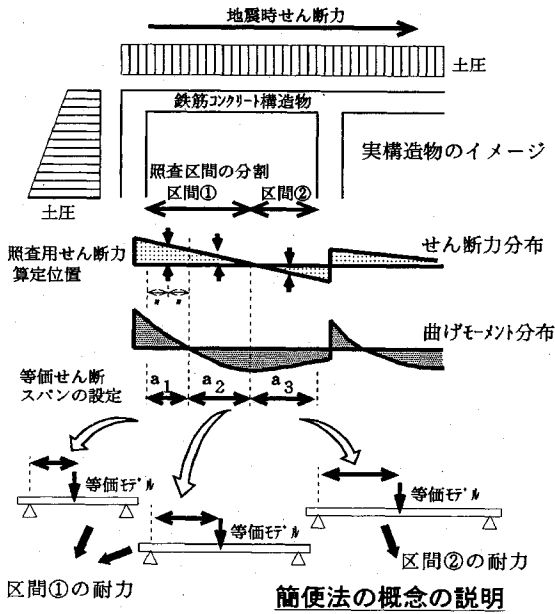


図-9 提案したせん断耐力算定法の妥当性の検証

$V_{c,d}$: ディープビーム的破壊モードにおけるコンクリートが分担する設計せん断耐力

ただし、直接支承がないせん断スパン a_2 では、ディープビーム的な耐荷機構は成立しないので、斜め引張破壊モードのみで耐力の計算を行う。

⑤ 設計せん断力を算定する断面

原則的には、検断断面は等価せん断スパンの中央部とする。ただし、支承前面あるいははり・柱前面から $h/2$ 以上はなすこと、支承前面あるいははり・柱前面から $1.5d$ 以下とすることを制限事項として加えた。

⑥ 実験値と本算定法の比較

図-9には、上記の方法で求めたせん断耐力とはりモデル実験結果の比較を示している。若干安全側の結果とはなっているが、実務的には問題のない精度であると思われる。また、図-10には、実構造物の形状により近

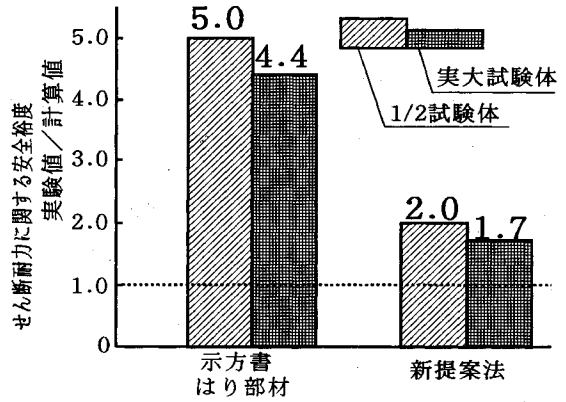


図-10 せん断耐力算定の比較 (隅角部L字実験結果)

い隅角部L字実験結果と従来法(示方書のはり部材)および新提案法との比較結果を示した。従来法では、計算値の5倍程度の安全裕度があるが、新提案法では2倍程度と若干安全側になっているものの、算定精度は十分に改善されていることが判る。

(4) 常時・耐久性の照査(8章)

対象としている構造物は、海岸付近の地中に埋設される構造物である。示方書において、地中に埋設されている構造物の環境条件の設定方法については明示されていない。そこで、本マニュアルでは、地下水位、土中の塩分環境等を考慮した地中構造物の環境条件の設定方法を提示した。

8. 検証実験

(1) 実験の目的

地震時の地中構造物の挙動、特に、地盤と構造物の非線形連成挙動を解明し、マニュアルの最大の特徴である地盤と構造物の非線形性を考慮した地震荷重の算定方法の妥当性の検証を目的として実験を行った。

(2) 実験の概要

a) 実験の特徴

実験は図-11および図-12に示すように、乾燥砂を充填したせん断土槽内に鉄筋コンクリート製の試験体を埋設し、土槽にせん断変形を与えるものである。既往の実験と比較して、本実験の特徴を挙げれば、以下の2点に集約できる。

① スケール: 実物大の1/4縮尺実験

これまでの地盤・構造物連成実験では、鉄筋コンクリート構造物をアクリルなどの弾性材料でモデル化して実験を行ってきたが、この実験では大型の鉄筋コンクリートモデルを用いて実験を行っている。そのため、コンクリートに発生するひびわれなどの現象(非線形性)も考慮した実験が可能である。

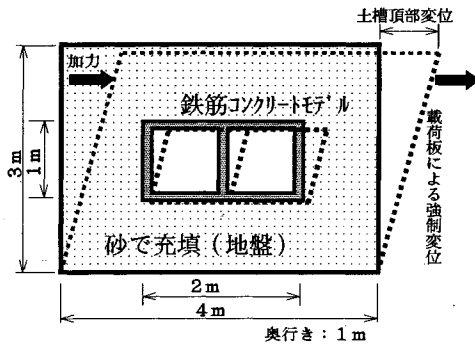
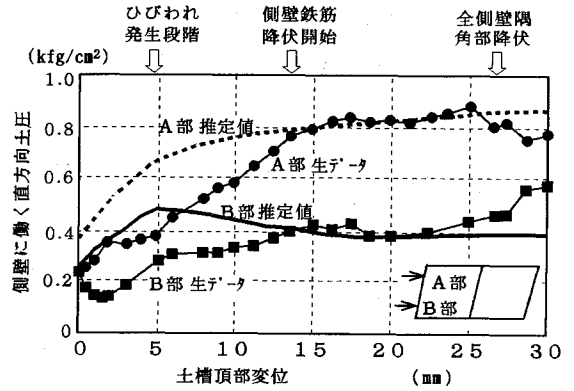


図-11 検証実験の概要



(注) 生データ：土圧計による計測値
推定値：変位計測結果からの逆算値

図-13 検証実験結果の一例・側壁に働く直方向土圧

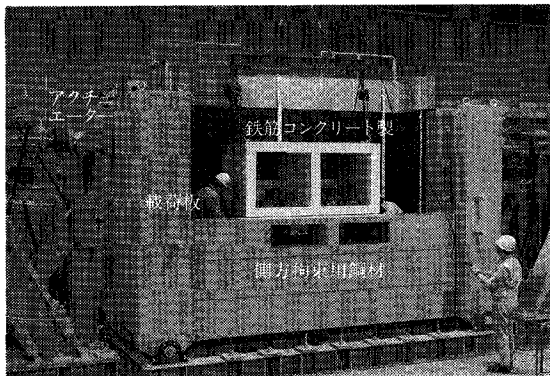


図-12 検証実験準備風景(試験体の土槽への吊り込み)

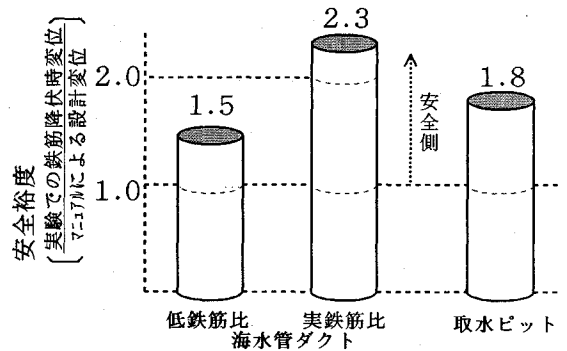


図-14 検証実験結果と試設計結果の比較

② 加力方法：土槽に鉄筋コンクリートモデルを埋設する形式

これまでの鉄筋コンクリートの加力実験では、ジャッキ等で直接モデルに加力する方法が採られてきたため、地盤と構造物の連成効果を再現できない。この実験では、地盤にせん断変形を加えて、構造物に間接的に力を加えるため、より実際の条件に近い実験が可能である。

b) 実験ケース

実験は、1/4 縮尺海水管ダクトモデル 2 体 (外形 2×1×1 m, 断面厚 10 cm, 鉄筋比 2 種類) と 1/7 縮尺取水ピットモデル (2 連 2 層ラーメン, 2×4×1 m, 断面厚 20 cm) の計 3 体である。

(3) 実験およびその数値シミュレーション結果の概要

a) 構造物の非線形性の考慮方法に関する検証

実験結果より、構造物の非線形性の影響は地震荷重の評価に際して無視できないことが明らかとなった。具体的には、実験から以下のことが明らかとなり、解析からも裏付けられた。

- ひびわれ発生、鉄筋降伏による構造物の剛性低下にともなって、作用荷重の増加傾向が鈍化する (図-13 参照)。

- 構造物の非線形化 (ひびわれ等) と地盤の非線形化 (降伏) が同時進行するが、構造系の破壊 (終局) には至らず、構造物の非線形化による荷重低減効果は期待できる。このことから、少なくとも連続体の仮定が可能な範囲では、非線形性の効果を考慮できる。

b) 動的解析法での仮定条件の妥当性の検証

種々の非線形性をパラメータとした実験の数値シミュレーション結果により、動的解析法での種々の仮定 (地盤の非線形性の考慮方法、地盤と構造物の境界面の仮定、隅角部剛結など) は十分に安全側であり、その条件から大きく逸脱する現象がないことが明らかとなった。

c) 総合的な安全裕度

マニュアルの仮定条件に基づいた検証実験モデルの試設計を実施した。図-14 には、試設計結果と実験結果変位に基づいた比較を示している。いずれの実験モデルにおいても、十分な裕度を有していることが確認された。この結果により、設計思想を含めたマニュアルの照査方法の妥当性が確認できた。

9. ま と め

本報告では、4年以上にわたる委員会活動の成果の中の特徴的な事項のみを紹介した。本編である「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震設計に関する安全性照査マニュアル」により、上記の事項を含めて、実務設計者が安全性照査を行うことが可能になっている。近日中に「マニュアル」を刊行し、講習会を開催する予定である。

詳細はこれを参照していただきたい。

今回の研究活動に際しては、地中に埋設された鉄筋コンクリート構造物を対象として、耐震工学とコンクリート工学の専門家が一堂に会し、それぞれの立場で地盤と構造物の相互作用について真摯な議論を行ったこと自体が大きな成果であると考えている。

(1992.1.16 受付)