

【資料 例 3-3】 取水塔の照査例

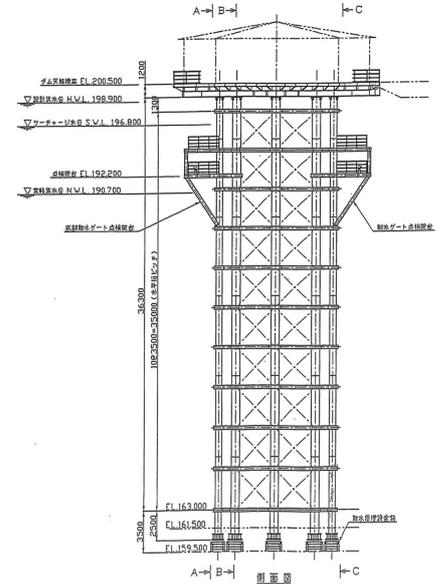
1. 取水塔概要

照査対象は、貯水池内にダム本体とは離れて設置された独立型の鋼製取水塔である。その諸元を表一例 3.3.1に、構造を図一例 3.3.1に示す。

表-例 3.3.1 取水塔諸元

取水塔高さ	41.00m
常時満水位 ^{注)}	31.20m
平面形状	正六角形（1辺 4.50m）
スクリーン設置方式	全面スクリーン （取水塔周りに設置）

注) 取水塔基礎標高からの高さ



図一例 3.3.1 取水塔構造
（側面図）

2. 照査に用いる地震動

本取水塔の設置基礎はダム本体基礎地盤とほぼ同等の岩盤であることから、ダム地点におけるレベル2地震動としてダム本体の照査に用いた地震動と同じ地震動を取水塔照査用の入力地震動（取水塔基礎地盤において考慮するレベル2地震動）とした。

その加速度時刻歴波形および加速度応答スペクトルをそれぞれ図一例 3.3.2および図一例 3.3.3に示す。

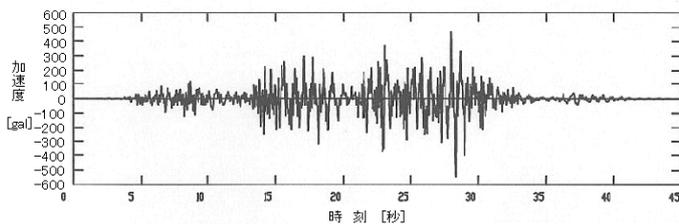


図-例 3.3.2 入力地震動の加速度時刻歴波形

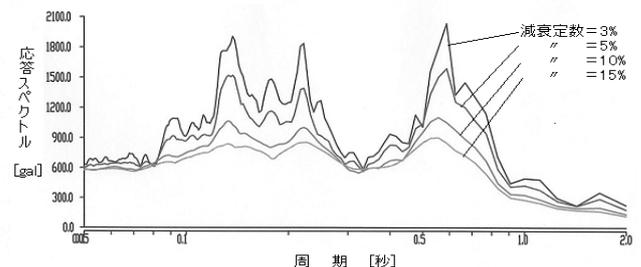


図-例 3.3.3 入力地震動の加速度応答スペクトル

3. 地震応答解析による照査

3.1 解析モデルおよび解析条件

取水塔を構成する各部材（支柱、水平桁、斜材および塔上架台）を対象に、図一例 3.3.4に示すような3次元有限要素モデル（骨組みモデル）を作成した。支柱・水平桁は剛結合、斜材はピン結合とした。取水塔下端はコンクリート基礎に対し剛結合とし、基礎地盤はモデル化していない。取水ゲート、操作室建屋、開閉装置、スクリーン、管理橋等はモデル化せず、その重量を集中荷重または等分布荷重等として考慮した。水位は常時満水位とし、貯水の影響は取水塔内部の水重による慣性力および各部材に作用する動水圧を考慮した。解析に用いた材料物性値を表一例 3.3.2に示す。

以上の条件のもとで、支柱下端から 2. で設定した入力地震動を図一例 3.3.4に示す X 方向^{注1)}に入力した^{注2)}。

注1) 塔上架台の形状を考慮し、構造上最も水平方向地震動の影響が大きいと考えられる方向

注2) 本事例では、解析用プログラムとして汎用有限要素解析コード“ASIST”を用いた。

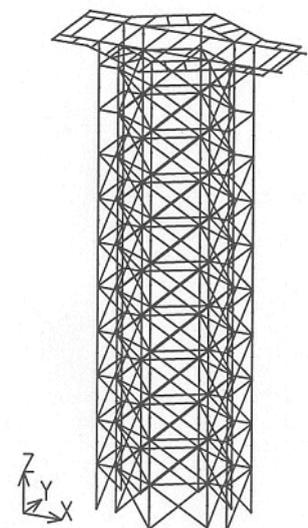


図-例 3.3.4 解析モデル

表-例 3.3.2 取水塔構成部材（鋼材）物性値

部位	材質	単位体積重量 [kN/m ³] ^{注1)}	弾性係数 [N/mm ²]	ポアソン比	降伏応力度 ^{注2)} [N/mm ²]
塔体	SUS304	77.0	1.93×10^5	0.3	205
塔上架台	SM400	77.0	2.06×10^5	0.3	235

注1) モデル化しない部材があることにより合計重量が実際より小さくなるため、合計重量が実際の値に等しくなるよう調整した。

注2) 鋼材の降伏応力度は、『ダム・堰施設技術基準(案)』に記載されている設計基本強度（安全率を考慮して設計に用いる許容応力度を定める際に基準とされた強度）と同じ値とし、ステンレス鋼についても同様とした。

3.2 固有値解析

本取水塔の周波数応答特性を確認するため、図-例 3.3.4 に示した解析モデルを用いて固有値解析を行った。構造上、最も影響が大きいと考えられる同図の X 方向の変形に着目した場合に主要な振動モードは、2 次モードおよび 4 次モードであり、固有周期はそれぞれに対して 0.76sec および 0.23sec であった。

3.3 線形動的解析

部材の応力-ひずみ関係を線形とした線形動的解析（減衰定数=3%^{注)}の結果、各部材の応答変位および発生応力の時刻歴を求めた結果、取水塔全体の安定上最も重要な部材と考えられる支柱の全てで降伏点応力を超える応力が発生する可能性があることがわかった。なお、特に支柱の発生応力は基部（下端部材）および頂部（上端部材）において大きくなることから、部材の塑性化は主にこれらの部位で生じると考えられる。また、水平材、斜材、塔上架台の部材塔の一部でも降伏点応力を超える応力が発生する可能性があるとの結果となった。（図-例 3.3.5 の太線部）なお、最大応答変位は、図-例 3.3.5 に示した A 点において、X 方向に約 210mm であった。

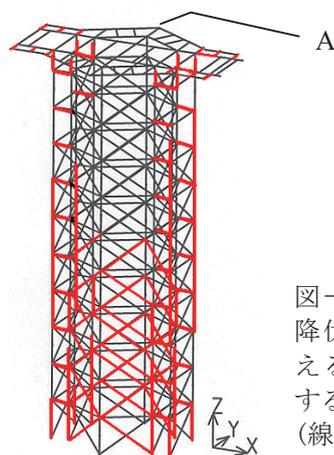


図-例 3.3.5
降伏点応力を超える応力が発生する部材
(線形動的解析)

これらの結果より、引き続き、主要な部材の塑性化を考慮した非線形動的解析による照査を行う必要があると判断した。

注) 構造的に類似すると考えられる道路橋（鋼橋下部構造）の設計基準（『道路橋示方書・同解説』V耐震設計編において示されている解析用の参考値（3~5%））等を参考に設定した。

3.4 非線形動的解析

線形動的解析の結果を踏まえ、取水塔の構造安定上、最も重要な部材である支柱について、その降伏（塑性化）の影響を考慮した照査を行うため、支柱部材の応力-ひずみ関係として、降伏後は剛性が初期剛性（表-例 3.3.2 に示した弾性係数）の 1/100 に低下するものとしたモデル（図-例 3.3.6）を用い、非線形動的解析を実施した。なお、ここでの非線形動的解析の結果は、図-例 3.3.6 の応力-ひずみ関係を用い、平面保持の仮定が成立するとし、軸力の影響を考慮して設定した各部材の曲げモーメント M と曲率 ϕ の関係によって評価することとした。支柱部材で主に塑性化が生じると考えられる基部および頂部の部材についての評価例を図-例 3.3.7 に示す。

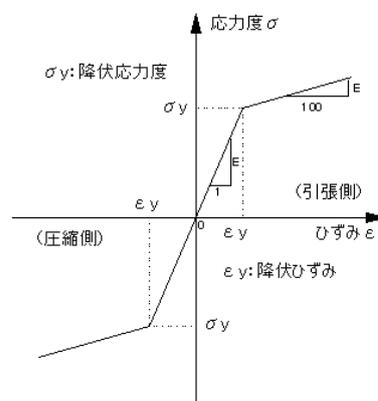
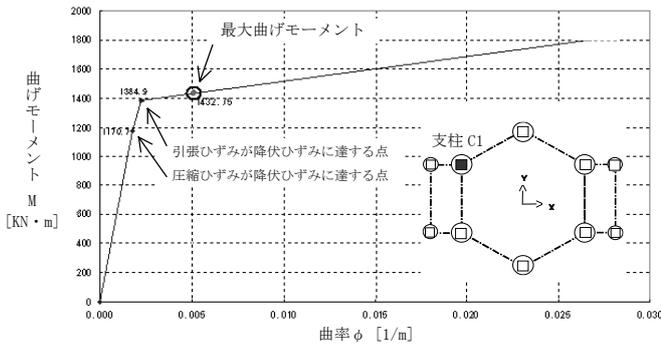
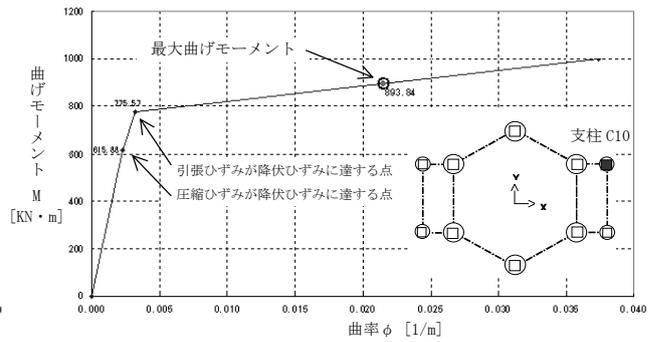


図-例 3.3.6
非線形部材の応力-ひずみモデル



(a) 支柱 C1 基部(下端部材)



(b) 支柱 C10 頂部(上端部材)

図一例 3.3.7 支柱部材のM-φ関係と最大応答(非線形動的解析)

図一例 3.3.7 より、主要支柱 A の基部では引張側降伏ひずみ(曲率)の約 2.3 倍、張り出し部支柱 B の頂部では同約 6.6 倍の最大ひずみが生じる可能性があることがわかる。

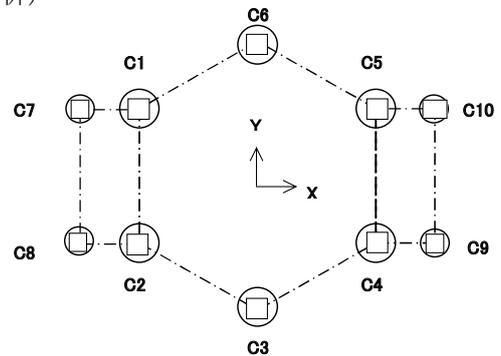
同様に、各支柱の基部および頭部の最大ひずみ(曲率)の引張側降伏ひずみ(曲率)に対する比を整理した結果および各支柱の位置図を表一例 3.3.3 および図一例 3.3.8 に示す。張り出し部の支柱の一部(管理橋側に位置する C9, C10)では、その頂部において降伏ひずみ(曲率)の 6 倍を超える最大ひずみ(曲率)が生じる可能性があるが、構造上最も重要な支柱(C1~C6)では、頂部、基部とも最大ひずみ(曲率)は降伏ひずみ(曲率)の 2~3 倍程度以内となっている。

なお、取水塔全体での残留変位は約 0.08mm となった。

表一例 3.3.3 各支柱頂部および基部の最大応答(非線形動的解析)

		最大応答曲率 $\phi_{max}(1/m)$	降伏曲率(引張側) $\phi_t(1/m)$	ϕ_{max}/ϕ_t
頂部 (上端)	C1	3.600E-03	2.129E-03	1.69
	C2	2.112E-03	2.120E-03	1.00
	C3	1.888E-03	2.172E-03	0.87
	C4	4.696E-03	2.160E-03	2.17
	C5	6.037E-03	2.166E-03	2.79
	C6	1.909E-03	2.175E-03	0.88
張出し部	C7	2.523E-03	2.975E-03	0.85
	C8	2.412E-03	2.964E-03	0.81
	C9	2.076E-02	3.234E-03	6.42
	C10	2.152E-02	3.247E-03	6.63
基部 (下端)	C1	5.074E-03	2.242E-03	2.26
	C2	5.487E-03	2.239E-03	2.45
	C3	2.164E-03	2.240E-03	0.97
	C4	5.523E-03	2.325E-03	2.38
	C5	5.326E-03	2.328E-03	2.29
	C6	2.206E-03	2.245E-03	0.98
張出し部	C7	2.375E-03	2.966E-03	0.80
	C8	2.446E-03	2.963E-03	0.83
	C9	2.515E-03	3.139E-03	0.80
	C10	2.493E-03	3.143E-03	0.79

注) 太字は1.0を超えた箇所



図一例 3.3.8 支柱番号(平面図)

3.5 地震応答解析による照査結果のまとめ

支柱の基部や頂部、また水平桁、斜材および塔上架台の一部において、部材が降伏して塑性化が生じるおそれがある。しかしながら、支柱については、張出し部の一部支柱を除き、最大ひずみが降伏ひずみの 2~3 倍程度にとどまり、塑性化は弾性範囲をやや超える限定的なものにとどまると考えられること、また、取水塔全体での残留変位が十分小さいことから、取水塔全体として大変形あるいは倒壊に到るおそれはないと判断される。