

鋼製高架水槽の耐震補強設計

藤田亮一¹・林 雄一²・森 敦¹・磯山龍二¹

¹正会員 日本技術開発(株) 環境防災事業部 地震防災部 (〒164-8601 東京都中野区本町 5-33-11)

²正会員 日本技術開発(株) 東京支社 構造・橋梁部 (〒164-8601 東京都中野区本町 5-33-11)

水道施設構造物においては、1995 年の阪神大震災を受け水道施設耐震工法指針の改訂がなされ、その中に規定されるレベル 2 地震動に対する耐震診断を実施する必要性が高まった。本論文の対象構造物は、その形状が特殊であること、及び構造物と内容水の連成振動が全体応答に影響すること、を考慮すると大規模地震時に複雑な動的挙動をすることが想定された。そのため、耐震診断及び補強設計にあたっては 3 次元 FEM モデルに基づく動的解析を適用した。本論文は、耐震診断及び補強設計を行うにあたり、入力地震動の規模との対応から、全体構造としての限界状態を満足するように、部位・部材ごとで使用・終局等の限界状態と照査基準を合理的に設定する設計の考え方とその実施結果について述べたものである。

Key Words : Elevated steel water tank, Limit state, Dynamic analysis, Retrofit

1. 序論

1995 年の阪神・淡路大震災以降、水道施設耐震工法指針¹⁾(以下「日水協指針」)を含めた構造物に対する耐震基準類が改訂されて、想定する地震動レベルがこれまでの震度法に比べ大幅に増大した。本論文では、鋼製高架水槽を対象とした地震動レベル 2 に対する耐震診断および耐震補強検討を実施した結果について報告する。

対象構造物は、日水協指針による分類では重要度ランク A に該当する重要度の高い鋼製高架水槽であ

る(図-1)。照査に際しては、本構造物の重要性に加え、構造形状が立体的であることから地震時の挙動が複雑であること、さらに柔らかい鋼製シェル水槽とその内部の水との連成挙動が構造全体挙動に影響を及ぼすことが想定されたことから、一般的な静的解析では適切な耐震性評価が極めて困難と判断されたため、動的解析による方法を選択することとした。しかしながら、日水協指針には動的解析の具体的な条件設定方法や結果の照査方法は特に規定されていない。また、指針改訂後間も無いことから同指針を実際の構造物の耐震性照査に適用した例はなく、解析や照査の方法を適切に設定する必要があった。

そこで本論文では、対象構造物に求められる耐震性能とそれを実現するために必要な構成部材個々の限界状態を定義し、それに対応する合理的な照査方法と照査基準を設定して耐震診断および耐震補強検討を実施した。以下、その結果について報告する。

2. 耐震診断方針

レベル 2 に対する照査は動的解析により得られた断面力および応力度を用いて実施するため、それに必要な照査方針を設定した。日水協指針の規定では、重要度ランク A の構造物は地震動レベル 2 に対して部分

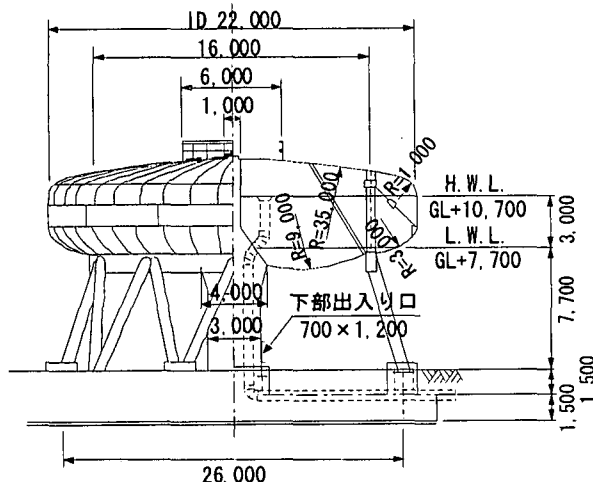


図-1 検討対象とする鋼製高架水槽

表-1 各部位の限界状態とその設定理由

対象部位	限界状態	設定の理由
水槽外殻	使用限界	当該部材の損傷が全体構造の不安定をまねく、あるいは地震後の機能保持に支障をきたす可能性がある。
内部円筒		
中央柱		
外柱		
下リング梁	終局限界	当該部材の損傷が全体構造の安定性に関係なく、また地震後の機能保持にも支障をきたさない。
上リング梁		
槽内支柱		
吊り材		
屋根サポート		
地中梁		
杭基礎		

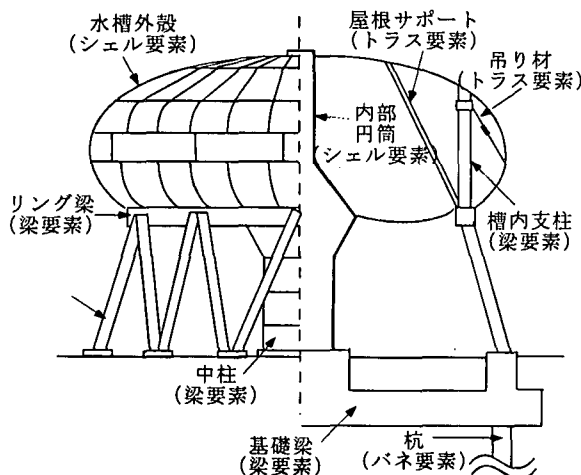


図-2 各部位の名称とモデル化に用いた要素

的に軽微な被害が生じてその機能保持が可能であることが求められている。ここでは、対象構造物を構成する各部材を、全体系の構造安定性および地震後の機能維持の観点から分類し、そのおのおのに対して限界状態と照査基準を設定して、それに基づく照査を行う方針^{2,3}をとった。各部材に対して設定した限界状態を表-1に示す(各部位の名称については図-2参照)。

当該構造物においては鋼製脚および下リング梁は構造安定上重要であることから、安定性に問題がでる損傷を許容できないため使用限界状態とした。水槽外殻(天井部を除く)についても、施設の機能保持に直接関わる重要な部分であることから使用限界状態とした。これら鋼部材の使用限界状態は、発生応力度が降伏応力レベルに達した状態と設定した。これは、鋼構造の降伏後の挙動を解析的に表現することが実務的には困難であり、また結果の評価指標が必ずしも明確にはなっていないことから、主要な鋼部材については弾性域にとどめる必要があると判断したためである。その他の部位については、損傷を生じて構造全体系が不安定になることはなく、機能保持も可能であり、必要に応じて取替え等の復旧も比較的容易に行えることから終局限界状態とした。このため天井部・吊り材等の鋼製部材については降伏およびそれ以上の破断をも許容するものとした。基礎については、阪神・淡路大震災の被災事例に関する研究報告⁴からもわかるように、耐震安全性に対するリダンダンシーは一般に高いもの

と判断できる。また、現実的には基礎の補強は施工上の制約と経済性との関連が十分議論しきれていない状態にある。したがって、本検討で設定した基礎の限界状態は、基本的に終局限界レベルを想定している。

3. 解析方法および条件設定

既往の研究事例⁵を参考にして、ここでの解析方法は複雑な構造形状を比較的忠実にモデル化することができる有限要素法とし、高架水槽の形状を勘案して立体モデルを用いることとした。解析の条件を表-2にまとめる。この時、流体の運動は線形速度ポテンシャル理論に従うものと仮定した。対象構造物を図-3に示すようにモデル化し、各要素は弾性として取り扱うこととした。これは、鋼材の非線形特性のモデル化がまだ一般的にコンセンサスを得られていないことと、限界状態の設定で主要部位を使用限界にとどめているため非線形領域までは追う必要がないことから判断した結果である。

各部材の減衰定数は道示V耐震設計編⁶を参考に設定した。水の減衰定数については一般に0.001~0.005程度が多く用いられているようであるが⁷、これらの研究の多くが阪神・淡路大震災以前に行われたものであり、考慮する入力地震動のレベルが本解析に比べてかなり小さいものであった。今回の解析ではレベル2相当の入力地震動を用いる上、水槽の形状から水の非線形性が発現しやすいことが予測されるため、既往の研究で採用されてきた減衰定数をそのまま採用することは不合理である。その一方で水の幾何学的非線形特

表-2 動的解析条件

解析法	直接積分法、線形時刻歴応答解析	
数値積分法	Newmark- β 法($\beta=0.25$ 、積分間隔0.01秒)	
減衰	要素剛性比例型	
材料減衰定数	水槽外殻・内部円筒・吊り材・ラフター・屋根サポート・上下リング梁・槽内支柱	0.03
	中央柱・外柱	0.05
	地盤バネ	0.30
	地中梁	0.10
	流体	0.01
入力地震動	地盤の応答解析により基礎位置で得られた加速度を最大500galに振幅調整したもの	

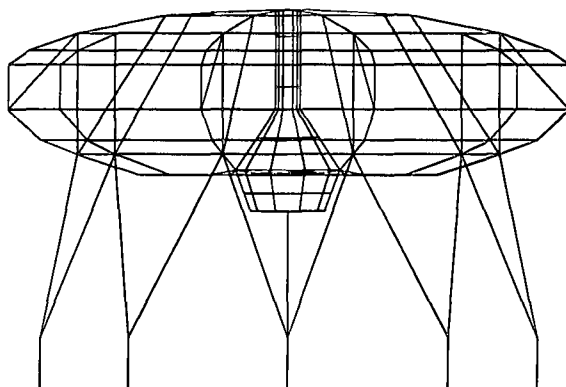


図-3 解析モデル

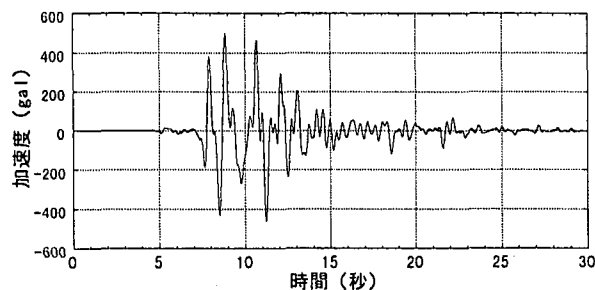


図-4 入力地震動

性による減衰効果はかなり大きくなるという研究結果も報告されているが、不明確な部分もある。そこで本解析では、若干の水の非線形効果と内部円筒等による減衰効果を考慮して、水の減衰定数を0.01とした。

入力地震動加速度は、地盤の応答解析により作成した。この際、基盤への入力波には1995年兵庫県南部地震の際に神戸海洋気象台において観測されたNS成分波を用い、基礎の杭頭部位置での応答加速度波を最大500galに振幅調整して入力地震動とした(図-4)。

4. 耐震診断結果

前述の条件のもと動的解析を実施した⁹⁾。ここでは、水槽天端の時刻歴応答変位(図-5)と柱上下端の最大断面力(表-3)を示す。水槽天端の最大応答変位は6cm程度であり、全体としては曲げ振動変形の生じにくい比較的剛性の高い構造物であるといえる。したがって、水槽本体の地震時変形による管の変形や破断のおそれはないものと考えられる。

柱部に発生する断面力に着目してみると、外柱には軸力以外の断面力がほとんど発生しておらず、トラス構造としての挙動を示している。一方、中柱は曲げ部材として挙動していることがわかる。

動的解析の結果を踏まえ、主要構造部材である中柱および外柱について応力度照査を行った。照査結果を表-4に示す。同表から明らかなように、本高架水槽はほとんど全ての照査箇所・照査項目で照査基準が

表-3 中柱および外柱の最大応答断面力

	中柱上端	中柱下端	外柱上端	外柱下端
軸力(tf)	265.4	269.0	310.0	310.4
せん断力(tf)	411.6	411.2	0.1	0.7
曲げモーメント(tf・m)	705.2	2640.0	3.2	0.0

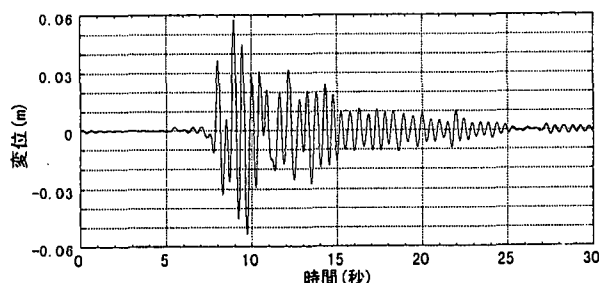


図-5 水槽天端水平方向変位

表-4 中柱および外柱の照査結果

照査項目	照査部位			
	中柱上端	中柱下端	外柱上端	外柱下端
曲げ圧縮応力度	1.03	3.19	1.75	1.80
せん断応力度	2.07	2.07	0.04	0.04
合成応力度	12.67	12.61	1.95	1.99
座屈安定性	0.76	2.21	1.99	2.04

※白抜き文字は照査基準を満たさないもの
(1.0未満:OK、1.0以上:OUT)

満足されておらず、耐震安全性に問題があると判断された。これらの照査結果は、動的解析において中柱に大きなせん断力と曲げモーメントが発生していたこと、外柱において軸圧縮力が卓越していたことに起因していると考えられた。安定の照査についてもほとんどの照査箇所において座屈が発生するような結果となっており、部材の耐力が不足していることがみてとれる。

本構造物における柱部は全体安定上極めて重要な部材であり、柱部の損傷はそのまま全体系の崩壊につながる可能性を含んでいる。照査の結果、主要部材である柱部の耐震性に問題のあることが判明したため、当該構造物は要求される耐震性能を満足していないこととなり、何らかの耐震補強対策が必要であると判断された。

5. 補強対策検討結果

現況の耐震診断の結果、中柱および外柱の耐力が不足していることが明らかになった。そこで、景観およびこれまでの補強実績を考慮した上で耐震補強対策として鋼板巻き立てを想定し、要求される耐震性能をみたく補強諸元の導出を試みた。ただし、補強する鋼板の板厚をいらずに増すことは費用対効果の面で必ずしも利点がないことと、想定地震動が大規模なことを考慮し、補強のレベルとしてはある程度の損傷の可能性はあるものの構造全体の不安定を招かない最低限のものを目指した。

補強諸元の決定には、耐震診断と同様に動的解析を基本とした手法をとった。中柱と外柱に巻き立てる鋼板の厚さをパラメータとして動的解析および照査を行い、最終的に適切と考えられる補強諸元を導出した。その結果、中柱および外柱にそれぞれ9mm程度の鋼板を巻き立てることで必要な耐震性能が得られることが明らかになった。

補強後の構造物に対する動的解析の結果を表-5および図-6に示す。中柱では曲げモーメントが、外柱では軸力が卓越しており、構造物全体としての振動特性は現況とあまり変わらないといえる。しかしながら、中柱と外柱に発生する断面力が変化しており、現況に比べて中柱に発生する曲げモーメント・せん断力

表-5 中柱および外柱の最大応答断面力(補強後)

	中柱上端	中柱下端	外柱上端	外柱下端
軸力(tf)	262.8 (265.4)	266.6 (269)	350.6 (310.0)	351.6 (310.4)
せん断力(tf)	249.0 (411.6)	247.8 (411.2)	2.0 (0.1)	2.8 (0.7)
曲げモーメント(tf・m)	581.6 (705.2)	1749.4 (2640.0)	10.6 (3.2)	5.8 (0.0)

注) () は現況の値(表-3参照)

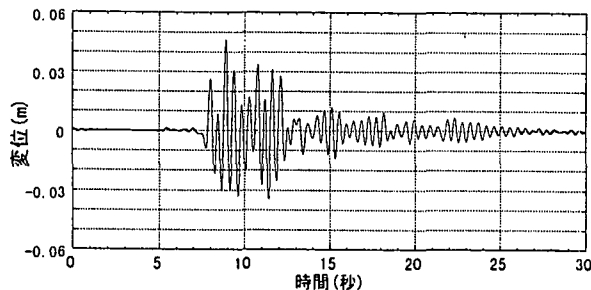


図-6 水槽天端水平方向変位(補強後)

がおおよそ 40%低減されている。これは、外柱の耐力が向上することによって、外柱と上部リング梁から形成されるトラス構造の剛性が高くなり、水槽本体の動きが拘束されるためであると考えられる。

動的解析結果に基づき、各主要構造部位について照査を行った結果を表-6 および表-7 に示す。中柱および外柱は照査項目について許容値内におさまっており、補強によって柱部材が十分な耐力を有するようになったことを示している。その他の主要構造部材についても照査基準を満足することが確認された。槽内支柱や吊り材・屋根サポートが損傷を受ける可能性は高いが、全体構造の安定性には影響が無いものと判断した。基礎梁および杭基礎も損傷を受ける可能性は高いが、地盤によって拘束されているため、損傷部位に大きな変形が残るとは考えにくい。したがって、これまでの震害事例が示すように鉛直方向の支持力は保持されることが考えられることから、地震後の施設の供用と

表-6 中柱および外柱の照査結果(補強後)

照査項目	照査部位			
	中柱上端	中柱下端	外柱上端	外柱下端
曲げ圧縮応力度	0.32	0.80	0.85	0.78
せん断応力度	0.31	0.30	0.02	0.03
合成応力度	0.32	0.80	0.95	0.88
座屈安定性	0.30	0.74	0.95	0.88

(1.0未満:OK、1.0以上:OUT)

表-7 主要構造部位の照査結果(補強後)

対象部位	限界状態	照査結果
水槽外殻	使用限界	降伏および座屈を生じない
内部円筒		
中央柱		
外柱		
下リング梁	終局限界	降伏および座屈を生じない 部分的に降伏あるいは座屈する 全体座屈を生じる 全体座屈を生じる 部分的に曲げによる損傷を受ける 杭頭において損傷を受ける可能性あり
上リング梁		
槽内支柱		
吊り材		
屋根サポート		
地中梁		
杭基礎		

高架水槽の機能の保持には影響を及ぼさないものと判断した。

以上、各部材の照査結果を総合判断すると、当該構造物は中柱および外柱に対する巻き立て補強を行うことで、地震動レベル 2 に対しても局部的な損傷が生じるに留まり、全体的な崩壊を起こすことなく、震後の機能確保が可能であると判断された。

6. 結論

本論文では、改訂された日水協指針に示される方針に準拠して実施した鋼製高架水槽に対する耐震診断および補強対策について述べた。耐震診断において考慮する地震荷重がこれまでのレベル 1 に加えてより大きなレベル 2 も対象となり、従来の許容応力度レベルでの耐震性照査では不合理なものとなる。そのため、本論文では構造全体の要求耐震性能を満足するための各構造部材に対する限界状態について提案し、それにもとづき、実用的かつ合理的な照査方法および照査基準を設定した。提案する考え方にもとづいた耐震性照査を実施した結果、検討対象とした鋼製高架水槽においては脚柱に対する適切な補強を施すことで、想定する大地震時においてもその挙動は耐震上問題となることはなく、震後においても高架水槽の機能を十分確保できることが確認された。また、本論文で示した考え方や方法は類似の構造物の耐震診断に適用することが可能と考えられ、今後のこのような問題に対する参考となれば筆者らの喜びとするところである。

参考文献

- 1) (社)日本水道協会:水道施設耐震工法指針・解説、1997.
- 2) (社)土木学会:コンクリート技術シリーズ No. 20, 1997.
- 3) (社)日本建築学会:容器構造設計指針・同解説、1996.
- 4) (社)日本建築学会近畿支部基礎構造部会:兵庫県南部地震による建築基礎の被害調査事例報告, 1996.
- 5) A.DOGANGUN, A.DURMUS, Y.AYVAZ: Earthquake analysis of flexible rectangular tanks by using the Lagrangian fluid finite element, Eur. J. Mech, A/ Solids, pp165-182, 1997
- 6) (社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 1996.
- 7) 嶋田三朗, 山田善一, 家村浩和, 野田茂:円筒タンクの非線形スロッシング解析に基づく長周期応答スペクトルの推定, 土木学会論文集, 第 368 号/I-5, pp383-392, 1986.
- 8) Ryoichi FUJITA, Yuichi HAYASHI, Atsushi MORI, Ryoji ISOYAMA: A Procedure of Aseismic Verification Using a Dynamic Analysis Technique for an Elevated Steel Water Tank, IWSA International Workshop, 1998.