

杭式橋台の耐震性評価

The design method of abutments supported by batter piles against an earthquake

小松原 徹*・浅沼 丈夫**・白水 勝之***

Toru Komatsubara, Takeo Asanuma, Katsuyuki Shirouzu

This report presents the design method of ultimate horizontal strength of abutments supported by the batter piles to protect against damage by an earthquake. Given its plastic deformation ability, this design method is judged more reasonable than the seismic coefficient method for a huge earthquake. The plastic deformation ability is analyzed by static nonlinear FEM with elastic and plastic buckling, because the ultimate horizontal strength of abutments supported by batter piles is generally governed by the buckling of the batter piles.

keyword: ultimate horizontal, FEM, buckling, abutments

1. はじめに

阪神大震災では港湾構造物も大きな被害を受け、巨大地震に対する構造物の耐震性の確保がますます重要になってきた。

港湾構造物の耐震性評価は従来から許容応力度に基づく震度法によるのが一般的であり杭式基礎を有する栈橋やドルフィンおよび橋台も例外ではない。この評価方法では塑性変形を考慮していないことから、想定した地震が起こっても全く被害を受けない耐震性能が構造物に求められる。巨大地震を考えた場合、これはコスト上合理的な耐震性評価とは言えず、むしろ機能を維持しうる変形および被害までを許容した上で耐震性能を確保することが望まれる。

本研究では、構造が比較的単純な鋼管杭式橋台（斜杭構造）を対象とし、変形性能を含めた耐震評価を試みた。評価方法は、建築基準や道路橋示方書などで採用されている静的解析による地震時保有水平耐力法を採用した。この斜杭構造の橋台は地震力に対し斜杭の軸力によって抵抗する構造となっており、保有耐力および変形性能は斜杭の長柱座屈に支配される。本検討では杭の座屈後の挙動は細長比や杭の拘束性などにより変化すると考えられるが、杭の降伏後の塑性エネルギーを考慮した耐震性評価を目的とした。変形性能の評価は、弾塑性座屈を考慮したFEMによる非線形解析により行った。

2. 検討事例

今回の試設計の対象とした構造物はRCの上部工を有する斜杭式構造の橋台で図-1に示す。

載荷方向は、橋軸方向と橋軸直角方向の2方向とし、橋軸直角方向については構造が左右非対称であるため左右両方向からの地震力について検討を行っている。

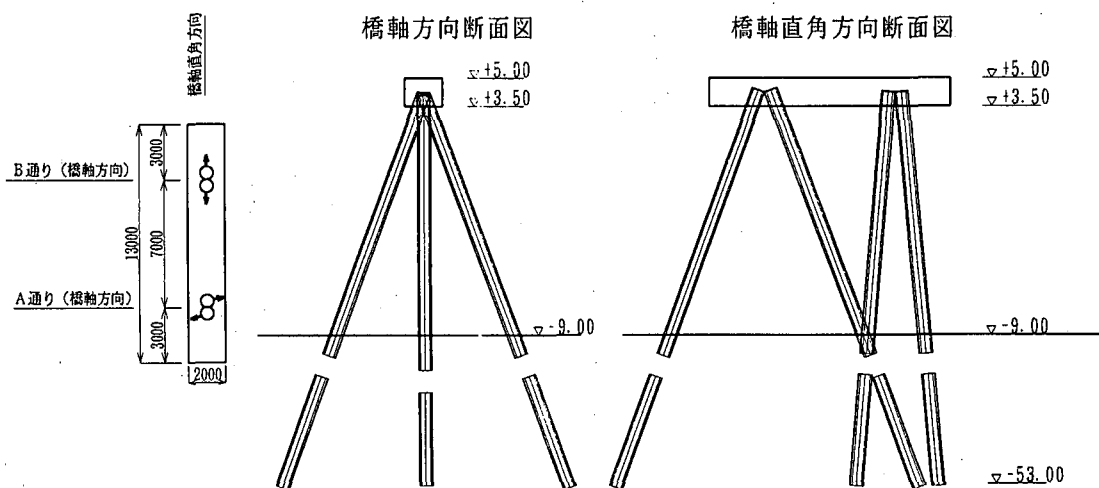


図-1 橋台構造図

* 正会員 東京ガス(株)生産部 (105 東京都港区海岸1-5-20)

** 正会員 東亜建設工業(株)土木本部設計部 (102 東京都千代田区四番町5)

*** 東亜建設工業(株)土木本部設計部 (102 東京都千代田区四番町5)

3. 地震時保有水平耐力法の考え方

本検討では、図－2に示すようなフローに従い耐震評価を行った。

まず、座屈を考慮したFEMによる静的弾塑性解析を行い、構造物の保有水平耐力を算定をした。次に、必要保有水平耐力を次式により求め、それと保有水平耐力との比較により耐震性評価を行った。

$$Q_u = K_h \cdot W$$

Q_u ：必要保有水平耐力
 K_h ：設計水平震度
 W ：有効重量

ここで、設計水平震度は次式により与えた。

$$K_h = K_0 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot D_s \quad (1)$$

K_h ：設計水平震度
 K_0 ：海底面震度
 α_1 ：重要度に基づく係数
 α_2 ：地域に基づく係数
 α_3 ：構造物の水平方向応答倍率
 D_s ：構造特性係数

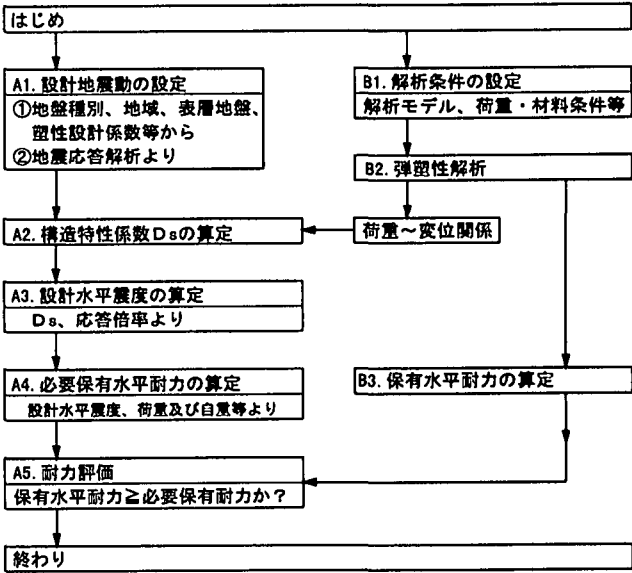
ここで、 D_s 値は静的弾塑性解析によって得られる荷重－変形特性より求められ、構造物の塑性変形によるエネルギー吸収効果を表し、図－3を参考に次式で定義される。

$$D_s = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{W_p}{W_e}}}$$

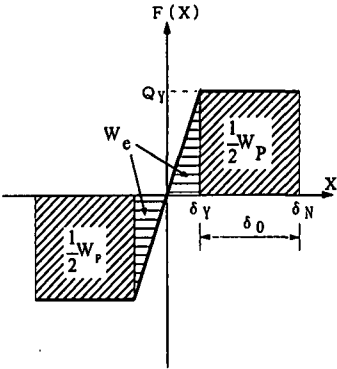
ただし、

$$W_p = 2 Q_y \delta_0$$

$$W_e = \frac{Q_y \delta_y}{2}$$



図－2 検討フロー



図－3 Ds値算定図

4. FEMによる弾塑性解析

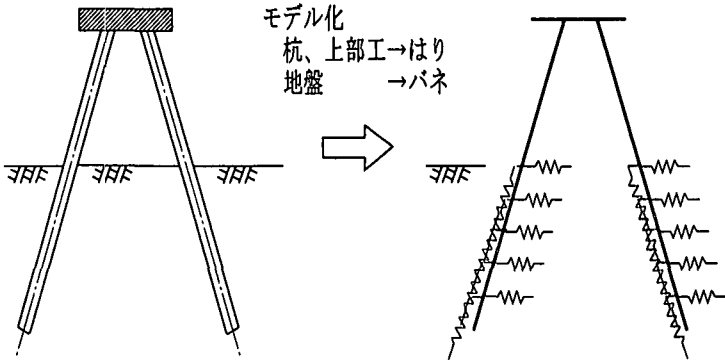
(1)解析方法

解析は、座屈を考慮に入れた有限要素法による静的非線形弾塑性解析で行った。

(2)解析モデル

解析は構造物を各通りに分割し、それから各通りごとに2次元モデルを作成した。全体の荷重－変位曲線は各通りにおける2次元の荷重－変位曲線の解析結果を加え合わせて求めた。その際、1方向のみの変形を考え、各通りごとの同一変位量に対して荷重を加え合わせた。

また、構造モデルとしては図－4に示すように杭・上部工は、はり要素としてモデル化し、地盤は弾性バネとして評価した。地盤・杭・上部工についての具体的なモデル化について以下に示す。



図－4 杭と地盤のモデル化

地盤：今回の橋台は斜杭構造であり、構造物に作用する水平力は主に斜杭の軸力として伝達される。従って、杭の水平方向変位は小であると考え、水平方向地盤バネは完全弾性バネとした。また、杭軸方向の地盤

バネも、地盤と杭との杭軸方向相対変位量は小であると考え、水平方向地盤バネと同様に、完全弾性バネとした。なお、杭軸方向バネは、地盤～杭の相対変位量に杭周面に作用する周面摩擦力が比例すると仮定し、「道路橋示方書・同解説 IV下部構造編」に示されている杭全体での軸方向バネ値から換算した。

杭：杭は、部材端に曲げによる塑性ヒンジが発生する完全弾塑性部材として取り扱った。

上部工：杭同様、部材端に曲げによる塑性ヒンジが発生する完全弾塑性部材として取り扱った。

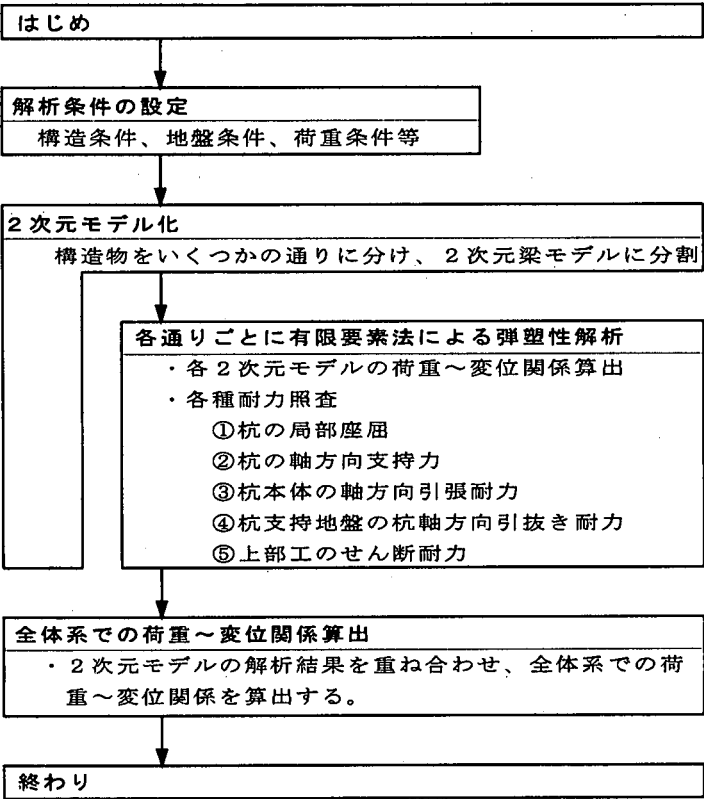
(3) 荷重条件

荷重は、鉛直方向に自重＋上載荷重を作用させた上で、水平方向に荷重を漸次増加させていった。

(4) 部材の降伏・破壊モードと解析上の取り扱い

解析フローを図－5に示す。この図に示されているように、今回行った手法では杭の支持力等のような各種耐力は、有限要素法による弾塑性解析のモデルには組込んでいないため、別途検討を行っている。

部材の主要な降伏・破壊モードとそれぞれの降伏・破壊状態に至った時の弾塑性解析上の取り扱いを表－1に示す。これらのモードの内、上部工への杭埋込み部の破壊・降伏は、支圧破壊であれば急激な耐力の低下に至らないと考えられることや、過去の被災例からみて発生する可能性は低いと考え、本解析では無視した。また、上部工との杭埋込み部の引抜き破壊も、杭頭プレートや鉄筋などにより結合されており発生する可能性は極めて低いと考え、無視した。



図－5 解析フロー図

表－1 部材の降伏・破壊モードと解析上の取り扱い

部 材		降 伏 ・ 破 壊 モード	解析上の取り扱い
上部工		せん断破壊	△
		曲げ降伏	○
上部工への杭埋込み部		パンチングシャー破壊	×
		杭頭杭軸方向支圧破壊	×
		杭埋込み部杭軸直角方向支圧破壊	×
杭	軸方向に 圧縮を受ける場合	局部座屈	△
		基礎地盤破壊（圧縮力＞支持力）	△
	軸方向に 引拔を受ける場合	上部工との埋込み部引抜き破壊	×
		杭体引張破壊	△
		杭引き抜け	△
		曲げ降伏	○
		せん断変形	○

ここで、解析上の取り扱いでの記号は次のような意味を表す。

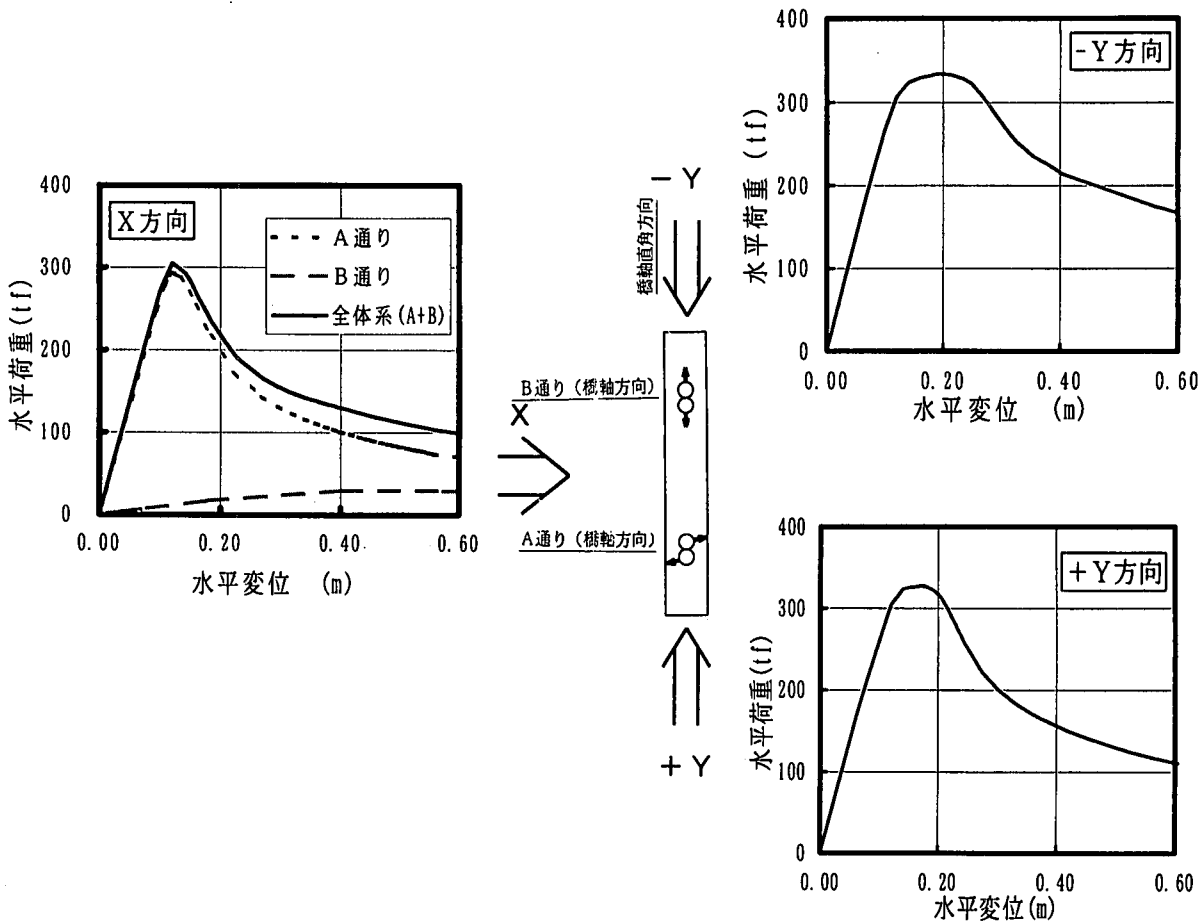
- ：有限要素法による弾塑性解析で考慮される。
- △： " " " " 終了後照査する。
- ×：本解析では、無視する。

(5) 解析結果

各通りごとの荷重～変位履歴図の結果と橋軸および橋軸直角方向の全体系の荷重～変位履歴図を、図－6に示す。なお、橋軸方向に関しては2つの通りを合成し全体系の荷重～変位履歴図としている。

橋軸方向のA通りは、水平変位11.7cmにおいて押込み側の斜杭が座屈し、水平耐力は急激に低下する。一方、B通り直杭部分は耐力のピークは見られず、漸増傾向にある。

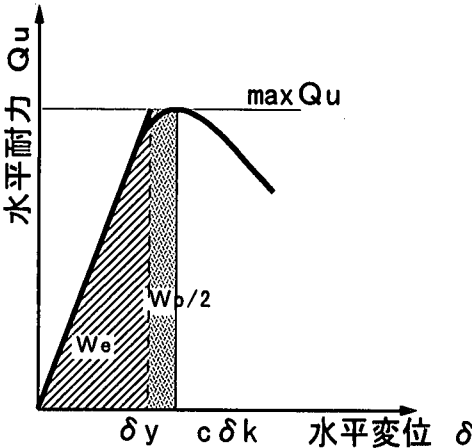
橋軸直角方向については、橋軸方向の斜杭断面同様、耐力のピークがみられるが直杭が構造的な破壊を防ぎ急激な低下はみられない。また、水平力の方向の違いによって座屈後の挙動に違いが生じている。なお、すべてのケースについて先に述べた上部工せん断破壊・杭局部座屈・基礎地盤破壊・杭体引張破壊・杭引抜けに対する照査を行ったが、どの降伏・破壊モードにも至っていない。



図－6 荷重～変位履歴図

5. 必要保有水平耐力の算定

全体系の結果に関しては3ケースとも、水平力のほとんどを1組の斜杭で受け持つ構造となっているため最大耐力は同程度(305～334t)となった。しかしながら、座屈後の変形に違いが生じ、橋軸方向は斜杭座屈後は構造的に不安定になり急激な耐力低下が生じるのに対し、橋軸直角方向は斜杭座屈後もラーメンとしての構造を維持しているため急激な耐力低下は生じず、じん性が高いことがわかる。また水平力の作用方向の違いによってもじん性に違いが生じる。これらは弾性設計では把握できなかったことで、本解析によりじん性、すなわちDs値を定量的に把握でき、じん性を考慮した必要保水平耐力を求めることがで



図－7 Ds値算定図

きる。本構造物は水平耐力が低下しはじめる δu の変位が生じた時、たちまち不安定になることを考え、許容変位量を δu とし、図-7に示すように荷重-変位履歴より弾性エネルギーと塑性エネルギーをもとめ、Ds値の算定を行った。図-6より、この方法でDs値を求め、試みに海底面震度0.24および0.5についてそれぞれ橋台の自重および応答倍率を考え合わせると、必要保有水平耐力は表-2のようになる。

表-2 必要保有水平耐力

海底面 震度		地震力 の方向	重 量 [tonf]	応答 倍率	弾性応答時 必要水平耐力 [tonf]	Ds値	必要保有 水平耐力 [tonf]
0.24	橋軸方向	X	500	1.81	217	1.00	217
	橋軸直角方向	-Y	424	1.96	199	0.68	135
		+Y		1.96	199	0.77	153
0.50	橋軸方向	X	500	1.81	452	1.00	452
	橋軸直角方向	-Y	424	1.96	416	0.68	283
		+Y		1.96	416	0.77	320

6. 保有水平耐力の算定と耐震性評価

(1) 許容座屈応力の補正

杭等の鋼材では、部材の不完全性として、初期曲がり、荷重の偏心、残留応力及び部材断面内における降伏点のバラツキ等が存在する。今回の弾塑性解析では、これら部材の不完全性は考慮していないので、これら不完全性を考慮するため弾塑性解析から得られた耐力を補正する必要がある。

本検討では、既往の耐荷力曲線（建築学会 鋼構造設計規準）に基づいて定められた許容軸方向圧縮応力度と、弾塑性解析から得られた最大軸方向圧縮応力から補正係数を求め、その補正係数を弾塑性解析から得られた全体系の耐力に適用し、耐力の補正を行った。すなわち、今回の検討では一般に、斜杭の座屈により耐力が決まることから、杭の許容軸圧縮応力度が全体系の水平耐力に比例すると仮定した。

なお、許容軸圧縮応力度を算定するには、有効座屈長を決定する必要があるが、杭天端から海底面を座屈計算で考慮する杭長とし、座屈係数0.65として算出した。この座屈係数は、「建築学会 鋼構造設計規準」で、両端拘束における推奨値を用いた。以上の座屈に基づく補正係数と、補正後の保有水平耐力を表-4に示す。

表-3 座屈に基づく補正係数および復元特性に基づく補正係数

	地震力 の方向	杭長 [m]	座屈長 [m]	許容軸圧縮応力度 [kgf/cm ²]	弾塑性解析から得られた 最大軸圧縮応力 [kgf/cm ²]	座屈に基づく 補正係数
橋軸方向	X	14.1	9.17	2213	2364	0.94
橋軸直角方向	-Y				2394	0.92
	+Y				2380	0.93

表-4 保有水平耐力

海底面 震度		地震力 の向き	弾塑性解析から得 られた耐力(tonf)	補 正 係 数	保有水平耐力 [tonf]	必要保有水平耐力 [tonf]
				対 座 屈		
0.24	橋軸方向	X	305	0.94	287	217
	橋軸直角 方向	-Y	334	0.92	307	135
		+Y	328	0.93	305	153
0.50	橋軸方向	X	305	0.94	287	452
	橋軸直角 方向	-Y	334	0.92	307	283
		+Y	328	0.93	305	320

(2) 保有水平耐力

ここで、完全弾性設計を行った場合と構造物の塑性変形を許容した場合の耐力の比較を表-5に示した。表-5より、橋軸直角方向は塑性変形を許容すれば弾性設計に比べ4～6割高い安全率を示すことがわかる。し

かしながら、橋軸方向は弾性解析と同等の耐力となっている。これらより、どのケースでも水平力は同じ1組の斜杭に集中しているにもかかわらず耐力評価がかわることとなり、斜杭の座屈モードを考慮した、より合理的な耐震評価が必要であることがわかる。これは従来の設計手法では明示することができないことであり、本検討手法の有効性が示されている。もちろん、塑性化により残留変形が生じるので、構造物の耐用年数中に作用する可能性のある荷重に対して本検討法を用いることは問題があると考えられる。しかし、本検討方法を用いれば、巨大地震のような発生確率が低い事象に対しては、それが発生した場合でも構造物が崩壊に至らないような対策を検討することができ、かつある程度の残留変形を受け入れることにより対策コストの削減が可能となる。

表－5 完全弾性設計と弾塑性設計の比較

海底面 震度		地震力 の向き	弾解析から 得られた耐力	座屈に基づ く補正係数	必要保有水平耐力 [tonf]		保有水平耐力 [tonf]	
					完全弾性	弾塑性	完全弾性	弾塑性
0.24	橋軸方向	X	305	0.94	217	217	287 (1.32)	287 (1.32)
	橋軸直角 方向	－Y	305	0.92	199	135	281 (1.41)	307 (2.27)
		＋Y	305	0.93	199	153	284 (1.43)	305 (1.99)
0.50	橋軸方向	X	305	0.94	452	452	287 (0.63)	287 (0.63)
	橋軸直角 方向	－Y	305	0.92	416	283	281 (0.68)	307 (1.08)
		＋Y	305	0.93	416	320	284 (0.68)	305 (0.95)

※ 括弧内は、安全率（＝保有水平耐力／必要保有水平耐力）

7. おわりに

直杭構造の栈橋については塑性を考慮した動的解析等の事例があるが、本検討対象である斜杭式橋台は、斜杭の座屈により全体の耐力が決定するため塑性を考慮した解析事例はあまり存在しなかった。そのため、想定する破壊モードや許容座屈応力の取り扱い等実用化するためには更なる検討が必要な事項も多く、今回の検討は試設計に近いものとなっている。

本検討結果より杭配置の違いがその構造物全体の変形性能や塑性エネルギー量に大きく影響を与えることがわかった。また橋台の補強を考える上で、許容応力度法では単に最大耐力を高めることしかできなかったが、本検討方法を用いることで構造物全体のじん性を高める補強の検討も可能になると考えられ、幅広い補強案の提案が可能となる。このように、本検討方法を用いることで、構造物の終局状態（崩壊状態）が明確になる上に、巨大地震に対してより合理的なアプローチが可能となったと考えられる。

今後は、前述のように解析上には表れない座屈耐力の低減や部材の降伏・破壊モードの取り扱いについて、さらに合理的な評価方法を検討し、栈橋などの複雑な構造の耐震検討や合理的な補強方法の検討を進めていきたい。

【参考文献】

- ・神奈川県高圧ガス協会、高圧ガス施設等耐震設計基準、平成2年
- ・日本建築学会、「建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990)」、1993年3月30日
- ・土木学会、「座屈設計ガイドライン」、昭和62年10月30日