

杭式栈橋の保有水平耐力

東亜建設工業（株）土木本部設計部 白水 勝之
 東京ガス（株） 生産部 正会員 小松原 徹
 東亜建設工業（株）土木本部設計部 正会員 浅沼 丈夫

1. はじめに

近年、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ており、様々な分野の構造物について巨大地震に対する耐震設計および耐震性評価が数多くなされてきている。

耐震性評価の手法として、建築基準および道路橋示方書では地震時保有水平耐力法および動的解析による地震時の変形性能まで考慮した耐震評価が頻繁になされているが、港湾構造物の耐震性評価は従来から行われている許容応力度に基づく震度法により評価されるのが一般的である。この評価方法では塑性変形を全く許容しておらず、構造物に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求められる。このような耐震性能を求めることも必要であるが、コストや巨大地震の頻度を考えた場合、合理的な耐震評価とは言えず、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、港湾構造物のなかでも鋼管杭式横栈橋（斜杭構造）を対象とし、変形性能を含めた耐震性評価を試みた。評価方法は、一般的に斜杭構造の栈橋は固有振動周期が比較的短い（1.5秒以下）ことから、動的解析は行わず、比較的簡便な耐震評価が可能である静的解析による地震時保有水平耐力法を採用した。この斜杭構造の横栈橋は水平力を斜杭の軸力によって抵抗する構造となっており、変形性能は特に斜杭の長柱座屈による影響が考えられる。そのため変形性能の算出は弾塑性座屈を考慮した有限要素法による解析方法を用いた。

2. 検討フロー

本検討は、建築基準の地震時保有水平耐力に基づく耐震評価に準じて進めた。検討のフローを、図-1に示す。

始めに、座屈を考慮にいれた静的弾塑性解析を行い、構造物の保有水平耐力の算定を行った。次に、必要保有水平耐力を求めるため設計水平震度を次式により求めた。

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

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

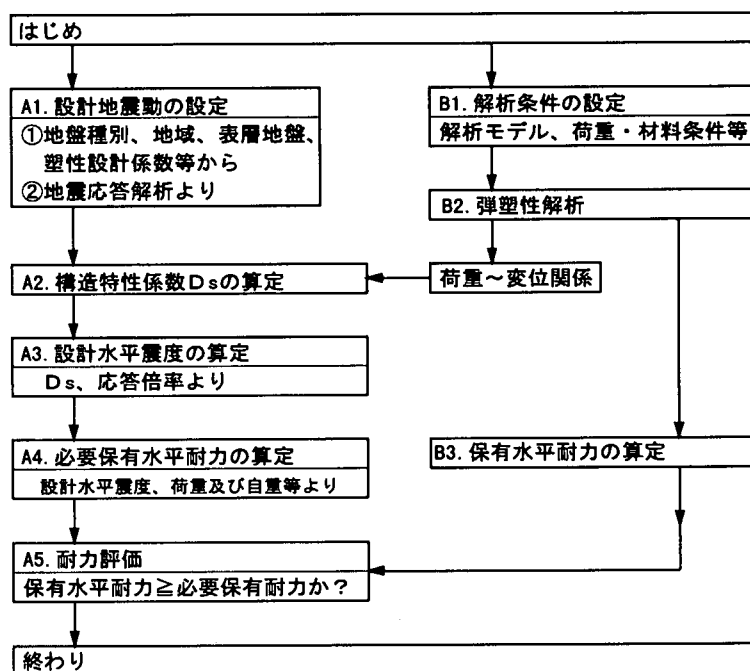


図-1 検討フロー

キーワード：杭式栈橋、保有水平耐力、FEM、座屈

連絡先：東亜建設工業(株)土木本部設計部 東京都千代田区四番町5 TEL 03-3262-5105 FAX 03-3239-2793

なお、本検討では、試みとして海底面震度0.4および0.7の2ケースについて耐震性の評価を行った。

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、次式で定義され、

$$D_s = \frac{\text{復元力特性が非線形の場合の降伏せん断力}}{\text{復元力特性が線形の場合の最大応答せん断力}}$$

図-2のような変形特性がわかれば、下式により D_s 値が算出できる。

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

ここで、 W_p 、 W_e は、図-2を参考にして次のように表される。

$$W_p = 2 Q_y \delta_0$$

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

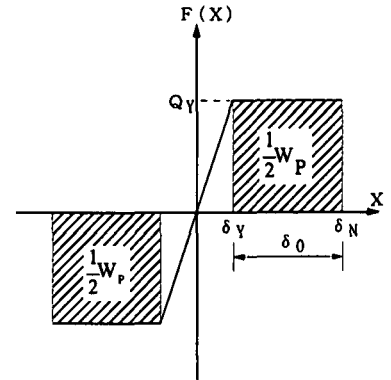


図-2 D_s 値算定図

必要保有水平耐力は、自重および上載荷重に設計水平震度 K_h を乗じて求め、それと解析により求められる保有水平耐力との比較により耐力評価を行った。

3. 検討事例

今回の試設計の対象とした構造物は、図-3に示すような斜杭構造のプラットフォームである。

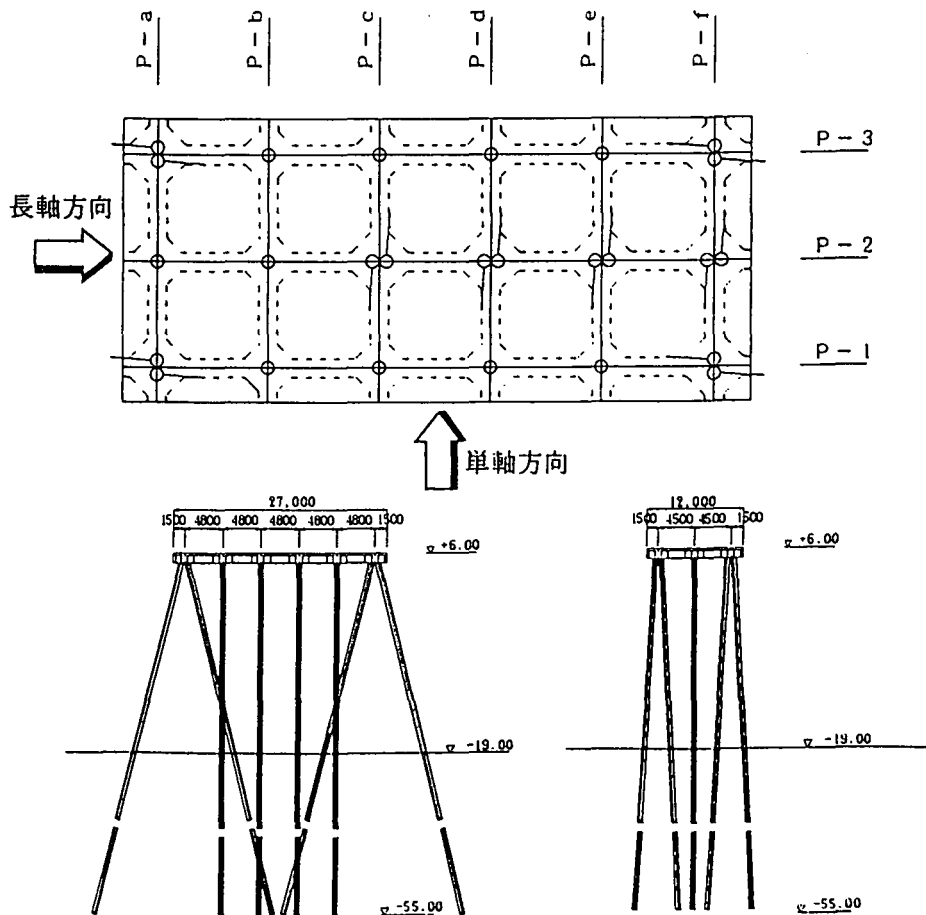


図-3 プラットフォーム配置・構造図

4. 静的弾塑性解析

(1) 解析方法

解析は、座屈を考慮に入れた弧長増分法を用いた静的非線形弾塑性解析で行った。

(2) モデル化

解析モデルは比較的簡単な2次元モデルで行った。

3次元から2次元へのモデル化は、図-4に示すように各方向ごとに通りに分け、例えばY1通りであればY1通り上の杭および上部工をZY平面上に投影することにより行った。そして、図-5に示すように杭・上部工を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。

全体系の耐力は、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ることにより求めた。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。

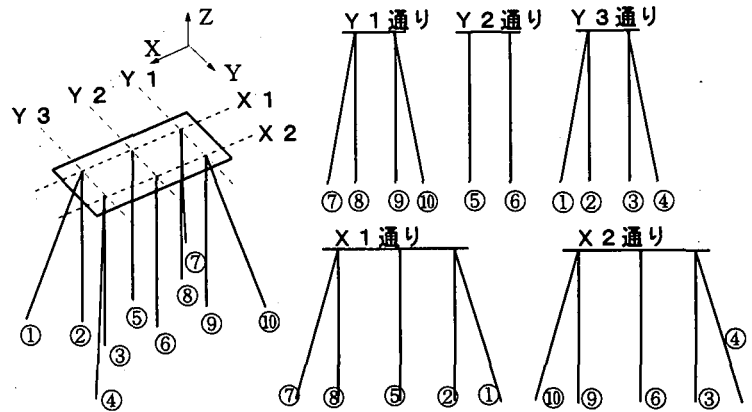


図-4 2次元化

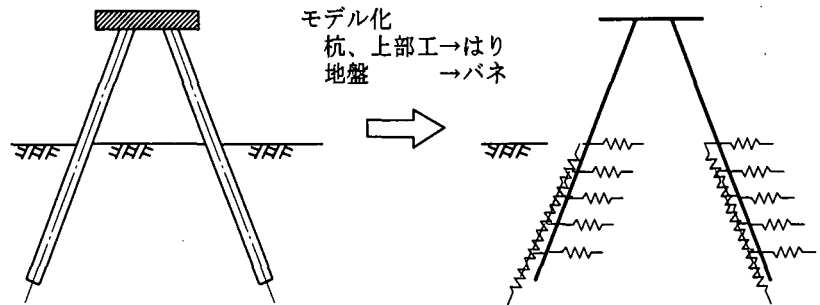


図-5 杭と地盤のモデル化

(3) 材料モデル

- ・ **地盤** : 今回の調査対象構造物の大部分が斜杭構造であり、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。

(4) 荷重条件

荷重は、下記の3種を作用させた。

- ① 上部工自重
- ② 上部架構荷重+上載荷重
- ③ 水平力(漸次増加荷重)

なお、地震力による上部架構からの反力は、上部架構降伏までは水平震度に比例し増加させ、降伏後は一定値(=降伏時反力)としている。

(5) 部材の降伏・破壊モードと解析上の取扱い

解析フローを図-6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。

表-1に部材の主要な降伏・破壊モードを示す。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実際の引抜き破壊力の算定も困難であることや、被災例もあまりみられないことから無視した。

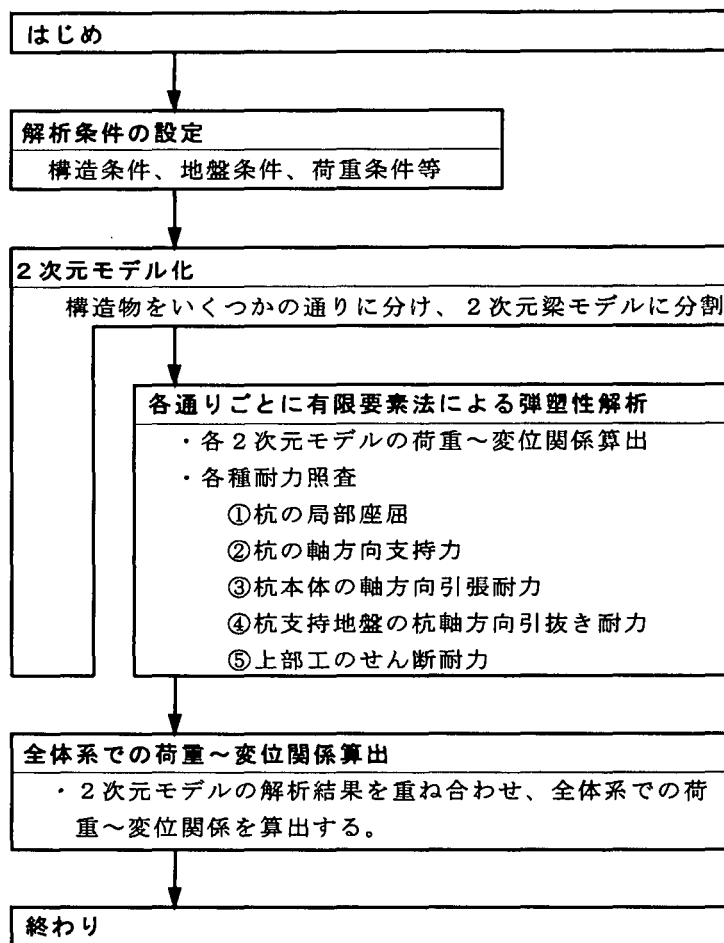


図-6 解析フロー図

表-1に、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まとめて示す。

表-1 部材の降伏・破壊モードと解析上の取扱い

部材	降伏・破壊モード	解析上の取扱い	
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 引抜を受ける場合	上部工との埋込み部引抜破壊	×
		杭体引張破壊	△
		杭引き抜け	△
		曲げ降伏	○
	せん断変形	○	

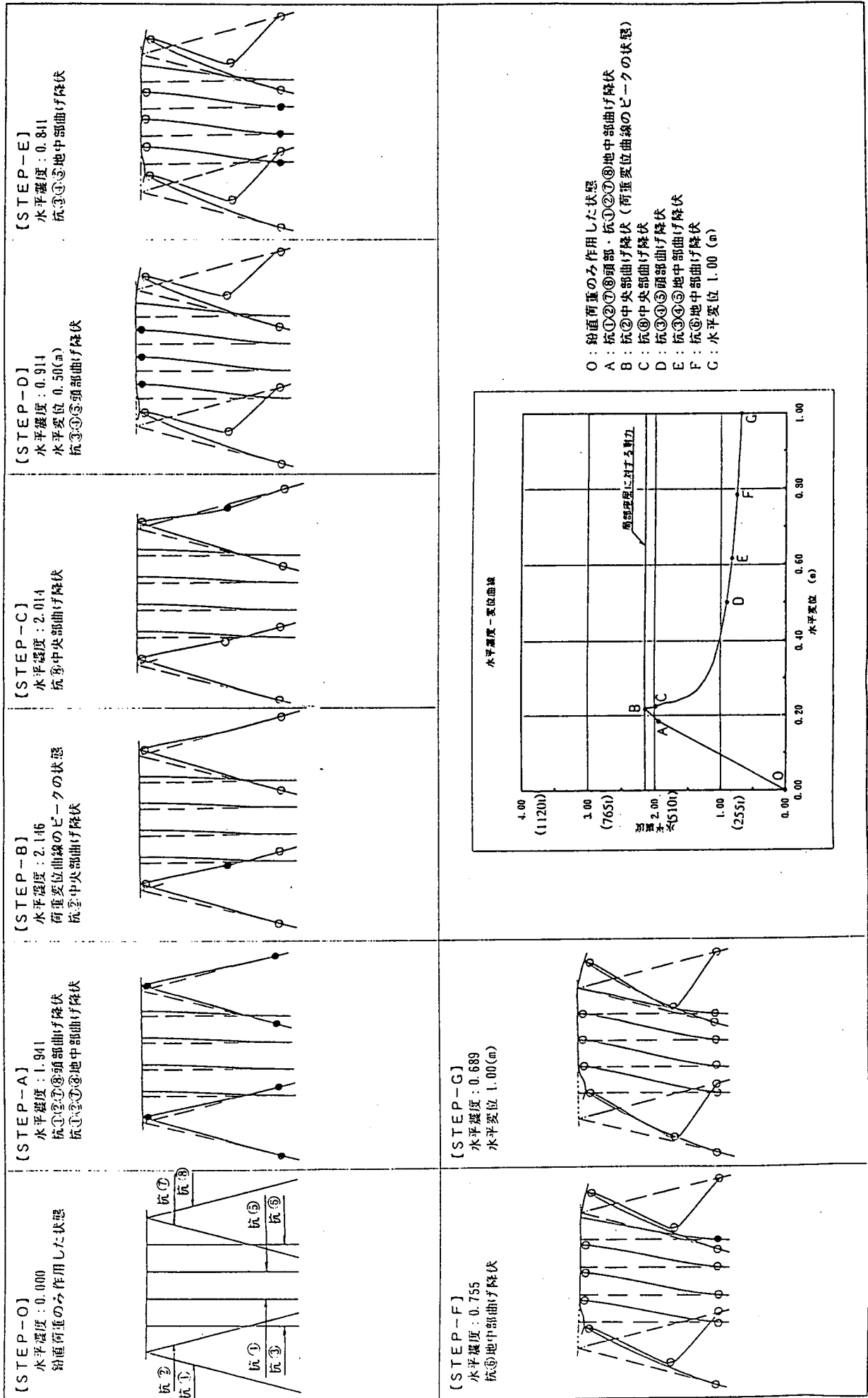
ここで、解析上の取り扱いでの記号は次のような意味を表す。

- ：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。

(6) 解析結果

解析は各通りに関して行ったが、ここでは一例として、図-7にP-3通りの荷重～変位履歴図を示す。(ここでの変位は、上部工中心の水平方向の変位を示す。)

図-7 P-3 通り荷重変位履歴図



表中 ● は各荷重STEPで曲げ降伏が生じた位置を示し、
 ○ は各荷重STEP以前に曲げ降伏が生じた位置を示す。

この図から、上部架構荷重やプラットフォーム自重等の不均衡により、全ての斜杭が同時に座屈に達するのではないことがわかる。従って、プラットフォーム全体をみると、一部の杭は座屈を始めていても、他の杭の軸力は未だピークに達しておらず、一部の杭の多少の座屈を許容するならば、プラットフォーム全体ではエネルギー吸収は期待できると考えた。

また、全解析を通じ斜杭構造の断面については水平変位 18 cm 付近で斜杭の杭頭部と海底面付近で曲げ降伏が生じ、その後水平変位 20 数センチで押し込み側の斜杭が圧縮破壊し座屈に至る。その時水平耐力は図-8に示すようにピークを迎え、その後低下する。

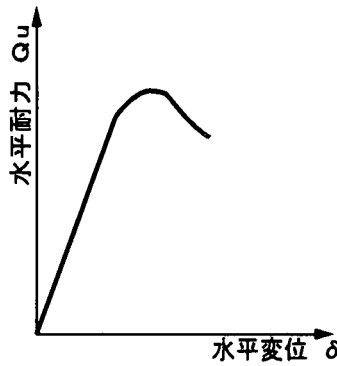


図-8 斜杭構造復元力特性

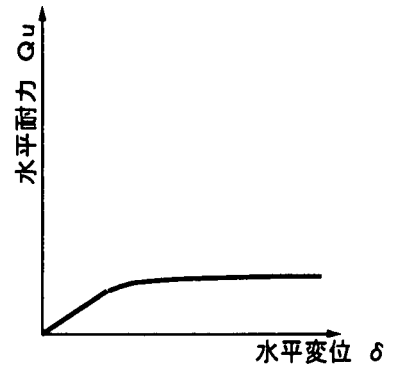


図-9 直杭構造復元力特性

一方、直杭構造の断面については、図-9に示すように杭頭部および海底面付近で曲げ降伏を起こすまでは直線的に耐力は増加し、その後なだらかにではあるが耐力は増加し続ける。斜杭構造のような耐力の急激な低下は見られない。

図-9に示すように杭頭部および海底面付近で曲げ降伏を起こすまでは直線的に耐力は増加し、その後なだらかにではあるが耐力は増加し続ける。斜杭構造のような耐力の急激な低下は見られない。

5. 荷重～変位履歴（全体系）および必要保有水平耐力

前述のように必要保有水平耐力を求めるためにDs値の算定が必要であるが、本構造物は水平耐力が低下しはじめるδuの変位が生じた場合、たちまち不安定になることを考慮し、許容変位量はδuとし、図-10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。ここで、長軸・単軸方向の各通りごとの荷重～変位履歴を重ね合わせて求めた全体系の荷重～変位履歴を図-11に示す。図-11より、前述の方法でDs値を求め、海底面震度0.4および0.7についてそれぞれプラットフォーム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。

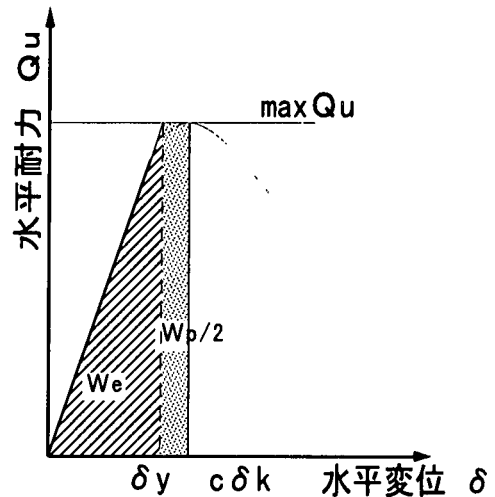


図-10 Ds値算定図

表-2 必要保有水平耐力

海底面震度		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]
0.40	長軸方向	669	2.15	575	0.85	489
	短軸方向		2.18	583	0.82	478
0.70	長軸方向	669	2.15	1007	0.85	856
	短軸方向		2.18	1021	0.82	837

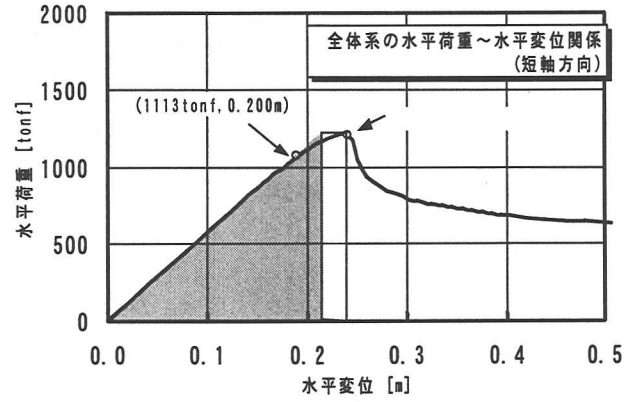
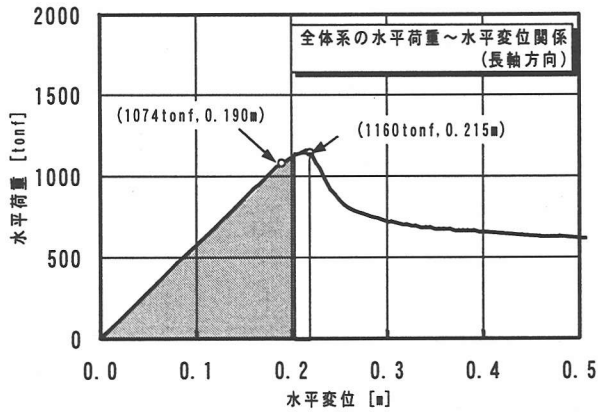


図-11 荷重-変位履歴

6. 保有水平耐力

(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を表-3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

	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
長軸方向	25.3	16.42	1966	2258	0.871
短軸方向				2317	0.849

(2) 保有水平耐力

弾塑性解析から得られた耐力に上述の補正係数を考慮し保有水平耐力を求めると、表-4のようになる。また、表-5には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比較を示した。

表-4 保有水平耐力

海底面 震度		弾塑性解析から 得られた耐力	補正係数	保有水平耐力 [tonf]	必要保有水平耐力 [tonf]
			対座屈		
0.40	長軸方向	1160	0.871	1010	489
	短軸方向	1208	0.849	1026	478
0.70	長軸方向	1160	0.871	1010	856
	短軸方向	1208	0.849	1026	837

表-5 より、本構造物は塑性変形を許容すれば弾性設計に比べ2～3割高い安全率となっている。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。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。

表-5 完全弾性設計と弾塑性設計の比較

海底面 震度		弾性解析から 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
0.40	長軸方向	1074	0.871	575	489	935 (1.63)	1010 (2.07)
	短軸方向	1113	0.849	583	478	945 (1.62)	1026 (2.15)
0.70	長軸方向	1074	0.871	1007	856	935 (0.93)	1010 (1.18)
	短軸方向	1113	0.849	1021	837	945 (0.93)	1026 (1.23)

※ 括弧内は、安全率 (=保有水平耐力/必要保有水平耐力)

5. おわりに

ここで示した保有水平耐力に基づく杭式栈橋の耐震検討方法は、従来から、建築分野、コンクリート分野あるいは道路橋示方書等で用いられてきた手法である。直杭式栈橋に関しては、塑性を考慮した解析の事例があるが本検討対象である斜杭式栈橋は、斜杭の座屈により全体の耐力が決定するため従来からの許容応力度法が一般的で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、今回の検討は試設計に近いものとなっている。しかしながら、本解析により斜杭の座屈は同時には発生せず、多少の塑性エネルギーが期待できることがわかった。また今後栈橋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、本検討によりじん性を高めることで耐震性を増すといった補強案も提案が可能になると考える。

今後の問題点としては、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する必要がある。

前述のように、本検討法を用いることにより、構造物の終局状態（崩壊状態）が明確になる上に、巨大地震等に対しより合理的な、アプローチが可能となる。今後、本検討方法を発展させ、保有水平耐力に基づく耐震性の評価を通じ、既設栈橋の補強方法等の提案・検討を進めていきたいと考える。

【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