

# 基礎構造形式の違いによる上部構造物の地震応答特性について

山田 裕久<sup>1</sup>・直井 彰秀<sup>2</sup>・松田 隆<sup>3</sup>

<sup>1</sup>大阪ガス ガス製造・発電技術部 (〒592-0001 大阪府高石市高砂3-1)

E-mail:hir-yamada@osakagas.co.jp

<sup>2</sup>大阪ガス ガス製造・発電技術部 (〒592-0001 大阪府高石市高砂3-1)

E-mail:naoi@osakagas.co.jp

<sup>3</sup>大林組 技術研究所 (〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)

E-mail:matsuda.takasi@obayashi.co.jp

軟弱地盤上の工場施設を対象とした構造物基礎に、地盤改良の上、直接基礎を採用した。これまで、地震時の安定性を含めて杭基礎を適用することの多かった構造物に対して、地盤改良によって長期安定性の面の確認ができたことから、経済的に有利な直接基礎の適用が可能になったものである。地震応答特性の面からは、ロッキングが卓越する構造物に対して、杭の鉛直抵抗が有効に作用することから制振効果が期待できる。これに対して直接基礎は、上部構造物の反力が地盤剛性を上昇させるとともに、基礎の有効入力低減も期待できる。

本研究は、直接基礎の有効性を数値解析的検討によって示すものである。具体的には、地震応答解析によって、地盤改良直接基礎と同様の設計条件で成立する杭基礎の応答を比較することによって、それぞれの特徴をまとめるものである。解析の結果、検討対象の地盤特性と入力波の振動数特性にもよるが、地盤改良の方が上部構造物の加速度応答で24%、変位応答で43%杭基礎の応答に対して低減され、その結果、構造物の断面力も低下した。ただし、ロッキングに伴う上下動は3.3倍でており、重心の高い構造物への適用に関しては配慮が必要である。

**Key Words :** Seismic design, soil improvement, pile foundation, dynamic analysis,

## 1. はじめに

比較的軟弱な地盤に建設される工場施設には、直接基礎に対する地盤の支持力が得られないため、杭基礎が多く用いられている。これに対して、地盤改良によって、地盤の支持力を上昇させることで対処できれば、経済的に有利な設計になる。

杭基礎は、周辺地盤の長期的な変状に対しても安定した設計が可能であり、地震時の並進・回転振動を抑制するのに有効である事は言うまでもない。一方、直接基礎は上部構造物の重量が地盤に伝達されるため、その拘束圧による支持地盤の剛性上昇と有効入力動低減が期待できることが有利になる。ただし、一般的に工学的基盤まで改良することは経済的に不利となり、中間的な支持層に留め置くことが現実的である。そのため地盤改良によって長期的な安定性を確保することが前提であるが、この条件が満たされた場合、直接基礎の方が上部構造物

の耐震性能として杭基礎に対して上回る性能を発揮できる可能性がある。

本報告は、このような直接基礎の有効性を数値解析的検討によって示すものである。具体的には、地震応答解析によって、地盤改良直接基礎と同様の設計条件で成立する杭基礎の応答を比較することによって、それぞれの特徴をまとめるものである。今回の検討は、レベル1相当地震における構造物の機能保障を確認することが主目的であった。そのため、地盤及び構造物は強非線形には入らないことが前提条件下の検討になる。

## 2. 検討対象構造物と地盤条件

検討対象構造物は、厚さ0.7m (幅18.75m×奥行き20.5m)のスラブ上に総重量4860tonの上部構造物が搭載される構造である (図-1参照)。この構造物は水タンクで

あり、貯槽部と基礎部とで構成される。上部構造物の重心位置はスラブ上から9.45m上である。未改良部の地盤構成は、表-1に示すように15m厚の埋土層の下に堆積層があるが、ここではGL-86mのVs=420m/secの層を工学的基盤面とした。地盤改良は、上部15mにある液状化の可能性のある埋土層を対象に、N値が15になるようSCP工法を行っている。実構造物では、構造物の近傍は敷地条件の制約でグラベルドレーンによる液状化対策を行っているが、ここでは、一般性を持たせるために、この部分もSPC工法を適用したものと仮定した。改良範囲は、構造物端部より20m区間とした。

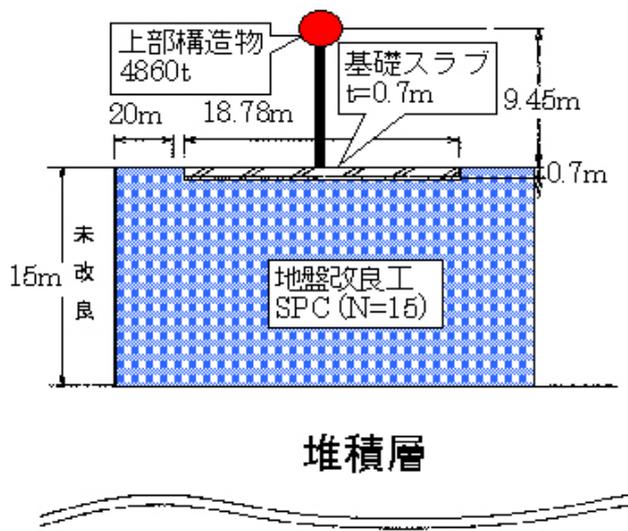


図-1 検討対象構造物と地盤改良範囲

表-1 地盤構成

深度 (GL-)	地層区分	せん断剛性
0~15	埋土	200Mpa
15~21	洪積粘性土	480Mpa
21~35	洪積砂質土	660Mpa
35~84	洪積粘性土	800Mpa

杭基礎は、SKK400、φ600mm、t=12mmの鋼管杭を仮定した。杭配置は、加振方向2.6mピッチ、加振直角方向2.2mピッチとした。深さ方向に関しては、杭を洪積砂質土に根入れさせ、基礎とは剛結を仮定した。後述するように、レベル1相当地震においては、当該地盤は液状化しない。そのため、杭直下の地盤の地盤改良は行わないものとした。

### 3. 解析検討手法とモデル化

地震応答解析は等価線形化手法による2次元複素応答

法を用いている。解析ケースは、以下の2ケースである。

CaseI：地盤改良物性一様

CaseP：杭基礎

地盤改良部の物性は複合地盤としてN値=15を元に道路橋示方書の評価式( $V_s=80N^{1/3}$ )より算定した。その結果、地盤改良後のS波速度検層からの平均的なVsとして200m/secを基に算定した。

未改良部の液状化の影響は、一次元の応答解析結果を用いた液状化判定を行い建築基礎構造設計指針に従い、初期剛性を減じている。その結果、FL=0.96となる層があるが、剛性の低減が必要ない状態と判断できるため、初期剛性の低減は行わなかった。

地盤改良直接基礎は下部地盤と連続しているが、杭基礎の場合、基礎スラブは下部地盤と非連続とした。側方は無限境界を、下方は粘性境界を配置して入射波を入力した。

図-2に解析モデルを示す。上部構造物及び杭のモデル化は、梁要素を用い、剛性等の物性値は単位奥行きあたりの値に変換した。上部構造物の重量は一質点系に集約した。上部構造物の剛性は、別途に計算した固有周期0.229秒より、梁の弾性理論を用いて等価剛性を決定した。その結果、単位奥行きあたりの剛性は、 $EI=5.12 \times 10^4 \text{ MN}\cdot\text{m}$ とした。

解析に用いた入力地震動は、想定東海東南海地震で、工学的基盤面での2Eでの最大振幅は157Galである。ただし、本モデルの解析における工学的基盤面の実振幅は、110Galである(図-3)。海溝型遠方地震であることから、長周期成分が卓越した地震動になっている。

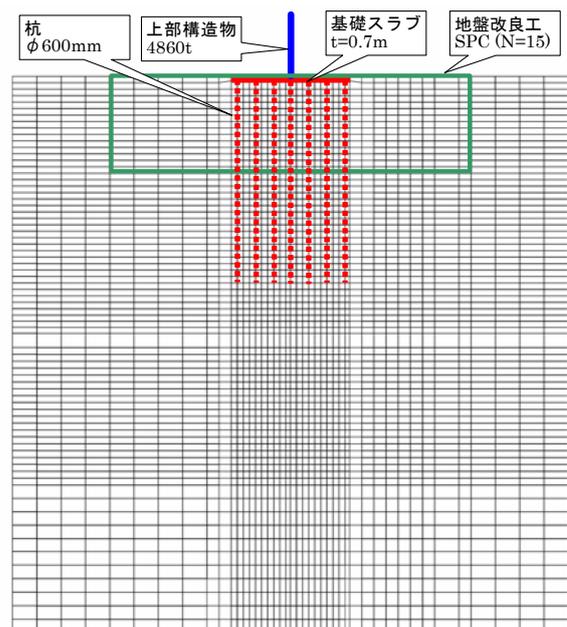


図-2 解析モデル

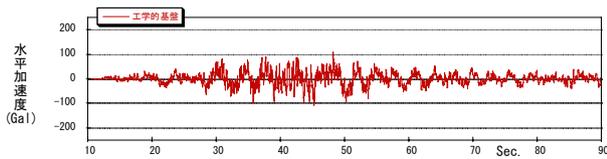


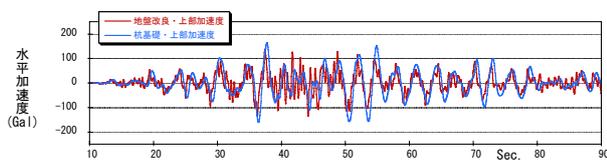
図-3 工学的基盤面入力地震波(2E)

#### 4. 解析結果

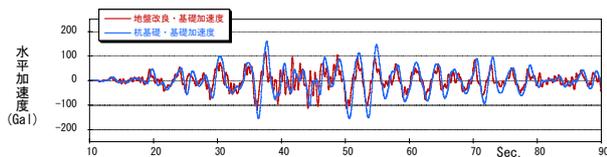
図-4に応答波形を、表-2に最大応答値の一覧を示す。

表-2 最大値の比較

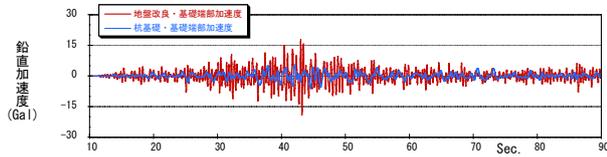
項目	I:地盤改良	P:杭基礎	I/P
上部工加速度	138Gal	176Gal	0.78
基礎加速度	119Gal	159Gal	0.75
上部工変位	16.6cm	29.1cm	0.57
基礎変位	16.1cm	26.1cm	0.62
曲げモーメント	304MN $\cdot$ m	399MN $\cdot$ m	0.76
せん断力	32.8MN	42.2MN	0.78



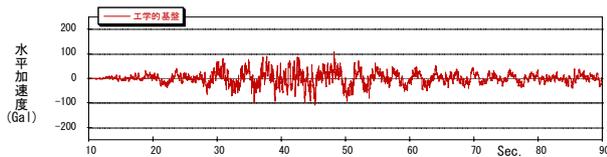
1) 上部構造物頂部



2) 上部構造物基礎部

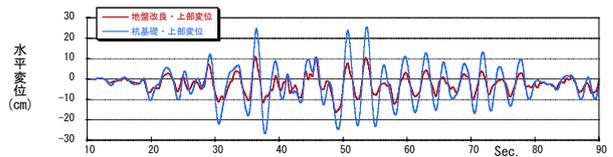


3) 基礎端部 上下加速度

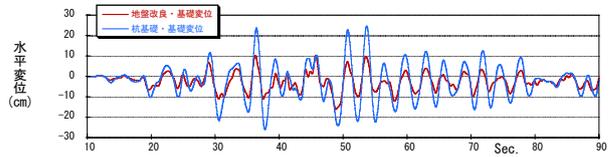


4) 工学的基盤入社波

図-4 応答加速度波形



1) 上部構造物頂部



2) 上部構造物基礎部

図-5 応答変位波形

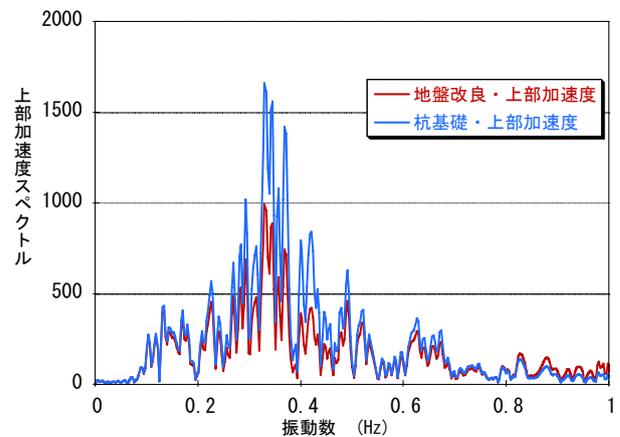


図-6 加速度フーリエスペクトル

基礎及び上部構造物及び基礎の加速度応答に関しては、地盤改良は杭基礎に比べ短周期成分が大きくなっていることがわかる。これは、杭基礎は直下地盤の軟化による長周期化の影響と考えられる。最大応答加速度に関しては、基礎位置及び上部構造物で杭基礎が大きくなっている。このことから、地盤改良（直接基礎）の場合、基礎への入力低減される一方、周辺地盤の軟化を許す杭基礎の場合、共振振動数と基礎への入力の関係から、上部構造物の増幅が更に励起されたと考えられる。

図-5に示す応答変位に関しては、明らかに地盤改良の方が小さくなっている。低減率は約60%であり、これは、地盤改良によって地盤の変位振幅が抑制されるものと考えられる。これに対して、杭基礎の水平変位に対する抑制効果は小さいと考えられ、軟弱地盤での増幅が杭基礎に直接入力されるものと考えられる。

図-6に示す応答加速度の振動数成分を示すが、主要成分である0.5Hz以下で地盤改良効果が明瞭に現れている。このことから、直接基礎の入力低減は、比較的高い振動数領域のみならず低振動数領域でも現れている。

図-7に上部構造物の基礎に対する応答倍率（伝達関数）を示す。構造物全体の応答特性は、杭基礎の場合、長周期化し、更に応答倍率も大きくなっていることが明瞭に現れている。また、地盤改良においては、3Hz以降で杭基礎より小さな伝達特性を示すことから、比較的高い振動数を有する地震動に対しても、応答の低減が期待できることが示されている。

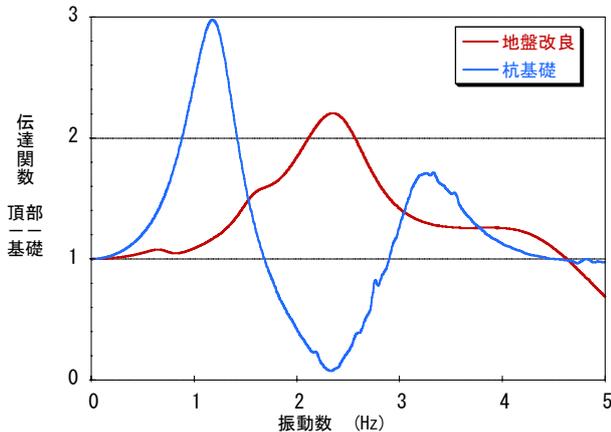


図-7 上部構造物頂部の基礎に対する伝達関数

図-8に示す構造物に生じる断面力の応答は、頂部の応答加速度と類似しており、この種の構造物にとって応答加速度を低減させることが最も重要であり、地盤改良直接基礎が有効であることがわかる。最大値に関して、地盤改良の場合、杭基礎の75%程度になることがわかる。

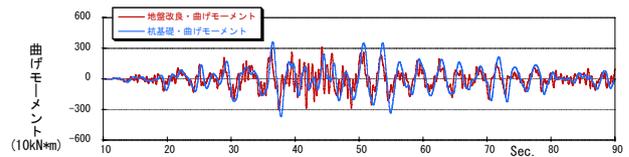


図-8 上部構造物の断面力の時刻歴

## 5. まとめ

地震応答解析によって、従来多く用いられていた、軟弱地盤上の杭基礎が、地盤改良+直接基礎で耐震性能が向上、すなわち、応答の低減ができる可能性が示された。特に、変位応答は大きく低減されることから、周辺設備との関係も良くなるものと考えられる。また、この種の構造物に発生する断面力は上部構造物の応答加速度に大きな相関をもち、応答加速度を低減できる基礎形式が有効であることが示された。

ただし、構造物の伝達関数に示したように、基礎への入力に、地盤改良の共振振動数が合致した場合、上部構造物の振動励起は避けられず、杭基礎のほうが小さな応答となることは避けられない。この点、今回のモデルでは、地盤改良の最大応答倍率が小さいことから、ここで採用した広範囲の地盤改良が有効であることも示された。

(2007.06.29 受付)

## EARTHQUAKE RESPONSE CHARACTERISTIC OF ABOVE STRUCTURE DUE TO THE DIFFERENCE OF FOUNDATION TYPE

Hirohisa YAMADA, Akihide NAOI and Takashi MATSUDA

This paper describes effectiveness of spread foundation using 2-dimensional dynamic analysis. The response of pile foundation and spread foundation with soil improvement were compared. However, it depended on the ground characteristics and frequency characteristics of the input motion; spread foundation with soil improvement was reduced for displacement amplitude to 43% of pile foundation as well as acceleration of 24% reduction. On the other hand, the vertical vibration component caused by rocking motion was over 3.3 times of spread foundation, and consideration is necessary about the application to an expensive structure of the center of gravity.