

# L N G 貯槽の基礎部鋼管杭打設時の振動 — 水平成層地盤での実測例 —

関口 雄介<sup>1</sup>・若松 洋介<sup>2</sup>・都築 顕司<sup>3</sup>・佐藤 充史<sup>4</sup>・宮瀬 文裕<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 北海道電力（株） 石狩湾新港火力発電所建設所（〒061-3242 北海道石狩市新港中央4-3740-2）  
E-mail: [h2001049@epmail.hepco.co.jp](mailto:h2001049@epmail.hepco.co.jp)

<sup>2</sup>正会員 北海道電力（株） 石狩湾新港火力発電所建設所（〒061-3242 北海道石狩市新港中央4-3740-2）  
E-mail: [y-waka@epmail.hepco.co.jp](mailto:y-waka@epmail.hepco.co.jp)

<sup>3</sup>フェロー会員 清水建設（株） 北海道支店土木部（〒061-3242 北海道石狩市新港中央4-3743-3）  
E-mail: [tsuzuki@shimz.co.jp](mailto:tsuzuki@shimz.co.jp)

<sup>4</sup>正会員 清水建設（株） 土木東京支店土木第二部（〒061-3242 北海道石狩市新港中央4-3743-3）  
E-mail: [m-sato@shimz.co.jp](mailto:m-sato@shimz.co.jp)

<sup>5</sup>正会員 清水建設（株） 土木技術本部基盤技術部（〒104-8370 東京都中央区京橋2-16-1）  
E-mail: [f.miyase@shimz.co.jp](mailto:f.miyase@shimz.co.jp)

L N G 貯槽の基礎部鋼管杭は、油圧ハンマを使用して鋼管杭を打設することが多いが、大きな振動が発生し、近隣の別作業に対して作業精度や仕上がり等への影響が懸念される。油圧ハンマ使用時の振動のデータは、バックホウ等の汎用機材に比べて事例が少なく、様々な条件（施工条件・地盤条件等）によるバラツキも大きい。そのため、事前に精度よく振動値を予測することが困難である。そこで、使用機材や杭径等の施工条件、地層分布やN値等の地盤条件が明確な現場で精緻な実測を行った。その結果、当該現場、機材における信頼性の高い振動の予測式等が得られた。さらに、今回得られた予測式とバックホウ等の建設機材の振動予測等で多用される予測式との比較を、日々の施工管理データをもとに行った。本論文では、これらの概要を説明する。

**Key Words :** *hydraulic pressure hammer, vibration, prediction formula, distance attenuation*

## 1. はじめに

北海道電力（株）は、平成26年4月より石狩湾新港において、容量23万klのPCLNG貯槽（No.3貯槽、以下、LNG貯槽）を杭基礎構造で建設中である（図-1）。LNG貯槽の基礎部鋼管杭は、油圧ハンマを使用して鋼管杭を打設することが多い。鋼管杭打設時には、大きな振動が発生するため、周辺環境（周辺住民の生活環境、生態系への影響等）への影響および近接の別作業への影響（溶接作業の効率、精度の確保等）が懸念される。一方、油圧ハンマによる鋼管杭打設時の振動のデータは、バックホウ等の工事現場で多数が使用されている機材に比べて事例が少ない。また、使用機材の能力、杭径、杭長等の施工条件、地層分布や杭先端のN値等の地盤条件によるバラツキが大きい。そのため、施工前に任意の位置での振動値を、精度よく予測することが困難である。

現在建設中のLNG貯槽では、LNG貯槽施工箇所を含め、基地用地内全体の広大な範囲で地層が水平成層を呈しており、一様な地盤条件となっている。そのため、鋼管杭打設時の振動データが、地層厚さの変化、N値の



図-1 PCLNG貯槽（No3貯槽）の完成CG図

変化等がない理想的な条件で計測可能であった。そこで、使用機材、杭径、杭長等の施工条件、地層分布、杭先端のN値等の地盤条件を明確に把握した状況で、鋼管杭打設地点から5か所の距離で振動の実測を精緻に行った。

その結果、当該現場、当該機材における信頼性の高い振動予測式が得られた。また、得られた振動予測式と環境アセスメント等で多用される予測式を日々の施工管理データをもとに比較し、精度よく適用可能な距離は、前者が200m、後者が100m程度等の留意点も得られた。

本報告では、1) 振動の実測結果の特徴と実測から得られた振動予測式、2) 得られた予測式と多用される予測式の比較および留意点について概要を述べる。

## 2. LNG貯槽の概要・施工条件・地盤条件および計測方法

### (1) LNG貯槽の概要

振動計測を実施したLNG貯槽は、北海道石狩市新港中央において、平成26年4月から平成30年10月の工期で建設中の石狩LNG基地No.3貯槽である。LNG貯槽の施工場所および基地用地（拡張）を図-2に、基地用地（拡張）および施工状況を写真-1に示す。このLNG貯槽は、北海道電力（株）初のLNG火力発電所である石狩湾新港発電所向けの燃料を貯蔵する。その形式は、北海道電力（株）初となる地上式PCLNG貯槽である。

LNG貯槽は基礎版の直径92.5m、防液堤の内径88.2m、外層の高さ59.7m、容量23万klで、杭基礎構造である。杭基礎は鋼管杭で、杭径 $\phi$ 800mm、杭長50～51m（17m/本の杭を3本溶接接合で施工）で、杭中心点を約3m間隔で合計588本を施工している。LNG貯槽の概要を図-3に、主要諸元を表-1に示す。



図-2 LNG貯槽の施工場所および基地用地



写真-1 LNG貯槽の基地用地（拡張）および施工状況

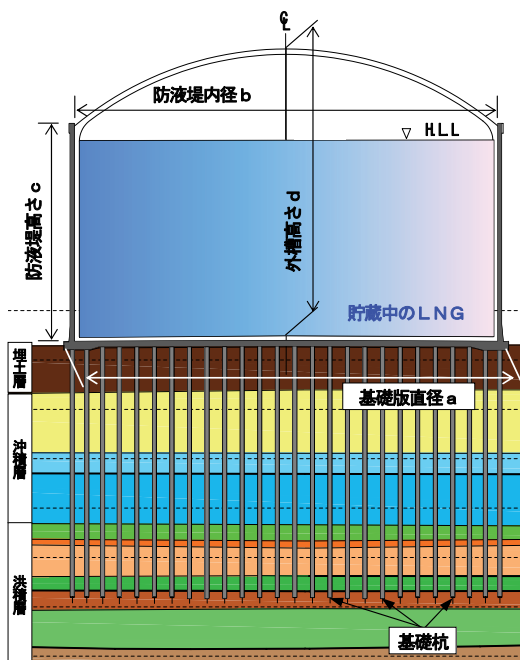


図-3 LNG貯槽の概要

表-1 LNG貯槽の主要諸元

形式	地上式PCLNG貯槽
容量	23万kl
基礎杭	仕様 : 鋼管杭 $\phi$ 800mm
	長さ : 50.0～51.0m
	本数 : 588本
基礎版	直径 a : 92.5m
	厚さ : 1.3～1.7m
防液堤	内径 b : 88.2m
	高さ c : 44.05m
	厚さ : 0.7～1.05m
外槽	高さ d : 59.728m

## (2) 施工条件

施工機材には、打撃エネルギー150KN級の油圧ハンマを使用した。鋼管杭の打設は、2～3秒間隔で鋼管杭頂部を油圧ハンマで打撃した。今回の施工では、油圧ハンマ3台を同時に稼働して施工している。なお、振動の計測時には、1台のみが稼働した状態とし、データの精度を確保した。油圧ハンマ3台が稼働して基礎杭を打設している状況を写真-2に示す。

## (3) 地盤条件

地盤条件の概要を図-4に示す。LNG貯槽の施工箇所を含め、図-2に示す基地用地全体の地盤は、ほぼ水平成層を呈し、砂質土層と粘性土層の互層となっており、大部分は砂とシルトの中間土に近い性状を有している。地表から深さ約10mまでは埋立地盤で、原地盤はN値10であったが、鋼管杭打設前のサンドコンパクションにより、鋼管杭打設箇所およびその周辺までの地盤を目標N値17以上とした地盤改良を実施している。

## (4) 計測方法

杭打設地点（振動源）から任意の距離の振動値を推測するためには、振動の距離減衰状況を精緻に把握する必要がある。今回、鋼管杭が打設されていない範囲において、鋼管杭打設地点からの水平距離が7m、15m、30m、50m、70mの5点で計測を実施した（図-5）。振動の計測対象は、データの精度を確保するため、隣接する3本の鋼管杭a、b、cとした。データの整理の際には、計測点と同一直線状にない鋼管杭b、cは、水平距離を補正して整理した。

振動の計測には、リオン社製の振動計VM-53Aを使用し、5つの計測点全てに配置して一斉に計測した（写真-3）。計測は、1分間隔での鉛直方向の振動の最大値とし、参考に時間率振動レベル（ $L_{10}$ ）も計測した。

## 3. 振動値の特性および振動予測式の算出

### (1) 振動値の特性

今回の現場では、図-4に示すように、杭の埋込長により杭先端のN値が異なる。そのため、杭の埋込長と杭先端のN値の違いによる振動発生状況の差異を確認するため、表-2に示す5種類の組合せでの振動値に着目し、計測結果を整理した。横軸に鋼管杭打設地点からの水平距

埋立	【土層】 Bf	【層厚】 9.9m	【N値】 10 (改良後 17)	
油層	As1	11.9m	15	【鋼管杭】 杭径φ800mm 埋込長51m
	Ac1	4.1m	7	
	Ac2	10.5m	11	
泥層	Dc1	2.8m	12	
	Dc2	5.2m	40	
	Dc3	2.8m	32	
	Dc3	4.3m	48	
	Dc4	7.0m	33	

図-4 地盤条件の概要

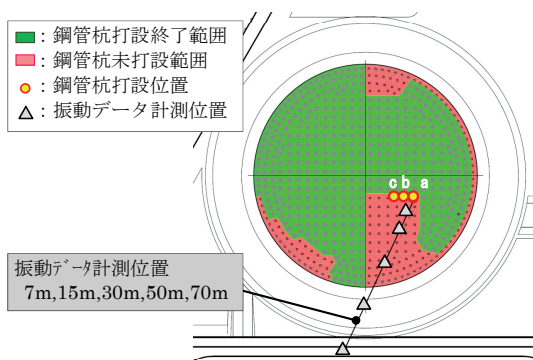


図-5 振動計測方法の概要

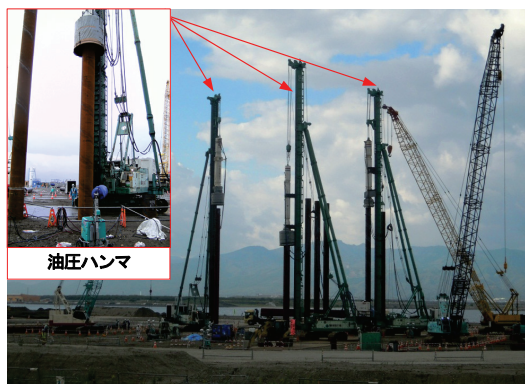


写真-2 基礎杭の打設状況（油圧ハンマ3台稼働）



写真-3 振動計測状況

離 (m) , 縦軸に振動の計測値 (dB) とし、表-2に示す5種類の組合せについて、鋼管杭 a ～ c 別に整理した結果を図-6～8に示す。鋼管杭 a ～ c で、次に示す同様な傾向がみられた。杭の埋込長と杭先端のN値が異なっても、杭打設地点からの水平距離が同じであれば、振動の計測値のバラツキは小さく、また、振動の計測値の距離減衰の傾向（グラフの傾き）はほぼ同一であった。

### (2) 振動予測式の算出

杭の埋込長、杭先端のN値は、各距離での振動値、距離減衰の傾向（グラフの傾き）にほとんど影響しない状況が確認された。そこで、表-2に示した5つの組合せに区分せず、杭打設地点からの水平距離と振動の計測値について、鋼管杭 a ～ c の計測結果をまとめて整理し、回帰線を算出した結果を図-9に示す。この図から、回帰式の寄与率R<sup>2</sup>が0.9205と高いことから、振動源からの水平距離が遠くなると、振動値が低減する「距離減衰の関係」が確認できる。そして、杭打設地点から任意の水平距離における振動値の予測式は以下と考えられる。

【杭打設時の振動値の予測式】

$$L(r) = -9.052 \times \ln(r) + 111.18 \tag{1}$$

ここに、

L(r) :杭打設地点から任意の水平距離での振動レベル (dB)

r :杭打設地点から任意の予測地点までの水平距離 (m)

振動予測式の寄与率が高い要因として、2 (3)に示したように、今回の施工及び計測実施範囲の地盤は、広大な範囲で水平成層を呈し、振動の伝搬が均質の物体内を伝搬する状況、すなわち振動源からの水平距離に依存する理想的な状況であったと考えられる。

## 4. 建設機材の振動予測等で用いられる予測計算方法との比較

### (1) 建設機材の振動予測等で用いられる予測計算方法

バックホウ、ブルドーザー等の建設機材の振動値の予測は、環境アセスメント等で多用される「距離減衰に基づく予測計算方法」<sup>3)</sup>で実施されることが多い。この予測式（式(2)）を以下に示す。

表-2 杭の埋込長と杭先端のN値

杭の埋込長 (m)	5	15	30	45	51.3 <sup>*1</sup>
杭先端の N 値	17	15	10	40	45以上

\*1:打ち止め

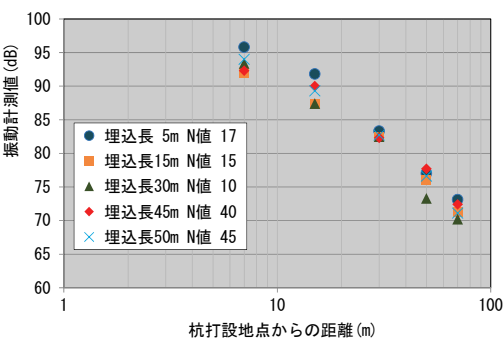


図-6 杭打設時の振動値(埋込長・N値別の整理 杭 a)

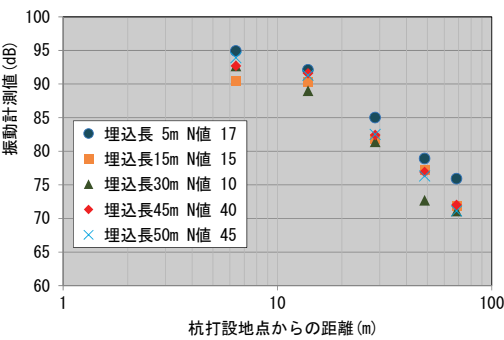


図-7 杭打設時の振動値(埋込長・N値別の整理 杭 b)

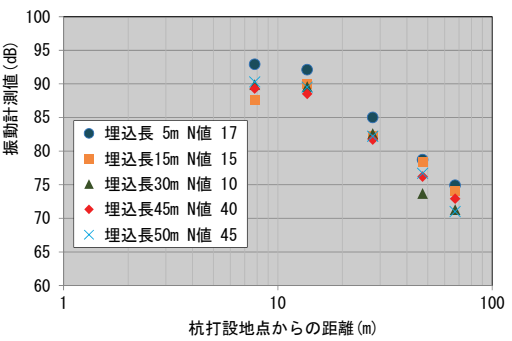


図-8 杭打設時の振動値(埋込長・N値別の整理 杭 c)

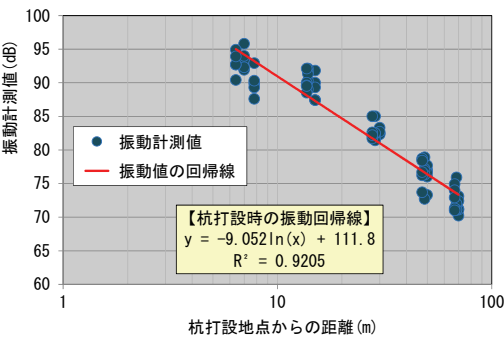


図-9 杭打設時の振動値(回帰分析)



# 【建設機材の振動予測で多用される振動値の予測式】

$$L(r) = L(r_0) - 15 \times \log_{10}(r/r_0) - 8.68 \times \alpha \times (r - r_0) \quad (2)$$

ここに、

- $L(r)$  : 振動源から任意の水平距離での振動レベル (dB)
- $L(r_0)$  : 基準点の振動レベル (dB)
- $r$  : 振動源の稼働位置から任意の予測地点までの距離 (m)
- $r_0$  : 振動源の稼働位置から基準点までの距離 (m)
- $\alpha$  : 内部減衰係数
  - 関東ロー層 : 0.01
  - 砂礫層 : 0.01
  - 粘土、シルト層 : 0.02~0.03
  - 造成地盤 : 0.03~0.04
  - 軟弱シルト層 : 0.04(東京下町、臨海埋立地のいわゆる軟弱地盤)

## (2) 振動予測値の比較

今回、実測から得られた式(1)の予測値と、式(2)による予測値の比較を行った。式(2)の中で、実測結果から基準点までの距離  $r_0 = 7\text{m}$ 、基準点の振動レベル  $L(r_0) = 94\text{dB}$  と設定した。地盤の性状を反映する内部減衰係数  $\alpha$  は、地表面部分はもともとN値10、細砂・シルトの埋立地盤であり、またLNG貯槽の施工箇所全体は大部分が砂とシルトの中間土に近い性状を有していることから、軟弱シルト層もしくは造成地盤に近いと考えて0.03を採用した。ただし、振動の実測時には、深さ約10mまではN値17まで地盤改良を実施していたことから、一般的に用いられる0.01でも検討を行った。

横軸に鋼管杭打設地点からの水平距離 (m)、縦軸に振動値 (dB) とし、式(1)、式(2) ( $\alpha=0.01, 0.03$ ) での予測値と実測値を整理した結果を図-10に示す。実測から得られた式(1)による予測値と、内部減衰係数  $\alpha=0.01$  とした場合の式(2)の予測値は水平距離100mまでは、実測値、予測値ともほとんど差がなかった。一方、内部減衰係数  $\alpha=0.03$  を使用すると、距離50m以上で実測値よりも過小評価する結果となった。今回の実測結果及び式(1)、式(2)の予測結果から、施工箇所全体の地盤が水平成層を呈し、地表から10m程度を事前に地盤改良した場合には、軟弱な造成・埋立地盤であっても、一般的な内部減衰係数  $\alpha=0.01$  を用いた方がより良い振動予測値を得られる場合があると確認された。

## (3) 日々の施工管理データによる予測精度の検証

当現場では、現場周辺への影響を把握するため、自動計測により施工中の振動を継続的に計測している。そこで、今回の杭打設地点から概ね200m程度離れた位置に

ある自動計測点 (図-11) の計測値と、式(1)、式(2)の振動予測値を比較し、その予測精度の検証を実施する。

自動計測点の計測値は、振動の計測実施日と同日のデータを用い、時刻もほぼ同じ時刻の計測値を採用した。ただし、自動計測点付近は、工事車両の走行、他の作業等の影響があるため、バラツキが大きかった。式(2)については、4 (2)での検討結果から、地盤の内部減衰係数は0.01を採用した。横軸に鋼管杭打設地点からの水平距離 (m)、縦軸に振動値 (dB) とし、式(1)、式(2)の振

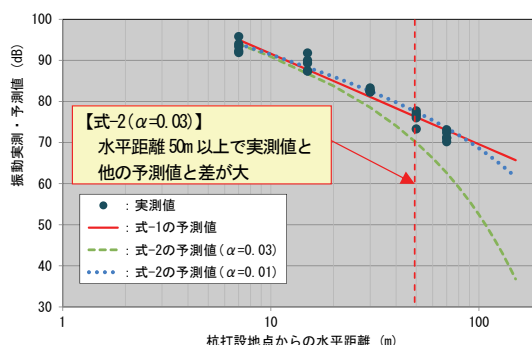


図-10 振動実測値と振動予測値との比較



図-11 杭打設位置と自動計測点の概要

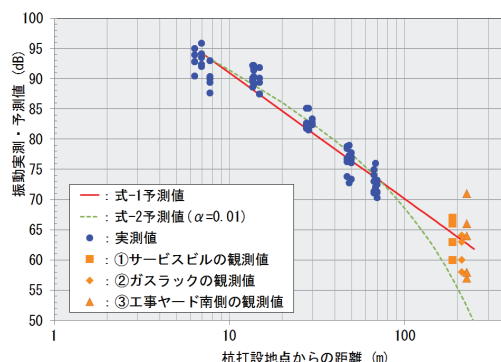


図-12 振動予測式と自動計測値との比較

動予測値、振動計測値および自動計測点の振動計測値を整理した結果を図-12に示す。

図-12に示すように、式(1)、式(2)とも杭打設点からの距離100m程度までは、振動の実測値と差は見られない。しかし、より離れた距離200m程度では、式(2)の振動予測値は自動計測値を10dB前後下回り、過小評価となっている。一方、今回の現場での実測から得られた式(1)による振動予測値は、自動計測値のほぼ中心点を示しており、精度良く振動値を予測していると判断される。振動発生源である杭打設点から、200m程度と遠距離においても精度よく予測できている理由として、今回の現場は広大な範囲で地層が水平成層を呈し、振動の伝搬が均質の物体内を伝搬する、距離減衰が水平距離に依存する理想的な状況であったと考えられる。

## 5. まとめ

### (1) 振動値の特性および振動予測式の算出

施工時の振動データが少ない油圧ハンマについて、使用機材、杭径等の施工条件、地層分布やN値等の地盤条件が明確な現場で精緻な振動の実測を行った。

今回の施工条件（杭径φ800mm）、地盤条件（N値10～45程度）では、杭の埋込長と杭先端のN値による振動値への影響は見られなかった。

実測値の回帰から、信頼性の高い振動予測式を得られた。その理由として、今回の現場は広大な範囲で地層が水平成層を呈しており、振動の伝搬が水平距離に大きく依存する状況であったと考えられる。

### (2) 振動予測値の比較

建設機材等の振動予測で多用される一般的な式と、実測値から得られた振動予測式の比較を実施した。

施工箇所全体の地盤が水平成層を呈し、地盤表面を深さ10m程度地盤改良した場合には、軟弱な造成・埋立地盤であっても、一般的な地盤と同じ内部減衰係数を使用した方が、より良い予測結果が得られる場合があると確認された。

杭打設点から200m程度と遠距離の日々の管理用計測値と、一般的な振動予測式、今回得られた振動予測式の比較を行った。一般的な振動予測式は、距離100m以上では過小評価する傾向であった。一方、今回得られた振動予測式は、高い精度で予測できることが確認された。

既存データの少ない油圧ハンマによる杭打設の振動の検討に、今回のデータが活用されれば幸いである。

### 参考文献

- 1) 関口雄介，若松洋介，都築顕司，佐藤充史，宮瀬文裕：LNG貯槽の基礎部鋼管杭打設時の振動特性について，土木学会 第70回年次学術講演会 講演概要集 VI部門，pp1463-1464，2015.9.
- 2) 若松洋介，関口雄介，都築顕司，佐藤充史，宮瀬文裕：実測結果によるLNG貯槽の鋼管杭打設時の振動予測式について，土木学会 第70回年次学術講演会 講演概要集 VI部門，pp1465-1466，2015.9.
- 3) 社団法人 日本建設機械化協会：建設工事に伴う騒音振動対策ハンドブック 第3版，pp63-65，平成13年

(2015.7.16 受付)

## VIBRATION OF FOUNDATION STEEL PIPE PILE AFTER CASTING OF THE LNG STORAGE TANK - ACTUAL EXAMPLE OF A HORIZONTAL STRATIFICATION GROUND -

Yusuke SEKIGUCHI, Yosuke WAKAMATSU, Kenji TUDUKI,  
Mitsushisa SATO, Fumihiro MIYASE

Foundation steel pipe pile work of the LNG storage tank, piled a lot by hydraulic hammers, generates large vibration and has an influence on the working accuracy and the finish to adjacent different work. Data of vibration generated by a hydraulic hammer is few, compared with one of the general-purpose equipment such as a backhoe, also shows large variations due to various conditions (construction conditions, soil conditions, etc.). Therefore it is difficult to predict in advance precise vibration value. So we actually measured vibration values on the construction site where the construction conditions of use equipment and pile diameter, etc., ground conditions such as stratum distribution and N value are clear. As a result, highly reliable prediction formula of vibration applicable to our site and machine was obtained. Furthermore, based on the day-to-day construction management data, we compared our prediction formula and generally used vibration prediction formula for backhoe and the like. This paper shows these summary.