

高靱性能耐震ジョイント杭の地震時有効性について

泉 博允¹・三浦房紀²・宮坂享明³・福嶋研一⁴

¹正会員 株式会社篠塚研究所 主席研究員 (〒160 東京都新宿区新宿6-26-4 JMビル)

山口大学大学院 工学研究科博士後期課程 (〒755 山口県宇部市常盤台2557)

²正会員 工博 山口大学教授 工学部知能情報システム工学科 (〒755 山口県宇部市常盤台2557)

³正会員 工博 株式会社エース 構造技術本部 (〒600 京都府京都市下京区七条通木屋町上る大宮町205)

⁴正会員 工修 大成建設株式会社 土木設計計画部 (〒163-06 東京都新宿区西新宿1-25-1)

新たに開発した高靱性を有する継手(高靱性能耐震ジョイントと呼ぶ)の動的曲げ特性を静的曲げ試験から推定し、この継手を有する杭基礎と地盤および構造物との動的相互作用を考慮した地震応答解析を行い、高靱性能耐震ジョイントの有効性を検討したものである。その結果、構造物直下や地層境界にこの継手を設けることにより、杭の変形性能を増大させることができ、大きな地盤変形に対して生じる杭の曲げモーメントを大幅に低減させる効果があるために、杭基礎は破壊することなく安全であることが明らかになった。また、継手が存在しても、構造物や地盤の動的応答はほとんど変わることがないことより、継手の存在が上部構造物の応答変位を大きくするなど、何ら悪い影響を及ぼすものでないことも明らかになった。

KeyWords : *pile foundation, dynamic response, aseismic joint, high ductility, spliced pile*

1. まえがき

高靱性能耐震ジョイント杭とは、宮坂等^{1) 2)}によって開発された図-1に示す高靱性能耐震ジョイント(HDAJ; High Ductility Aseismic Joint)を有する一種の耐震性基礎杭である。構造物と杭との結合部近傍や硬い地層と軟らかい地層との境界に、この耐震ジョイントを積極的に用いることにより、PHC杭(Prestressed High Strength Concrete Pile)等の靱性や変形性能を高め、地震時における杭基礎の耐震性を向上させることができる。

1995年の兵庫県南部地震では非常に多くの杭が破壊したが、年代順にみると、地震による最初の杭基礎の代表的被害としては1964年の新潟地震の液状化に伴う大変形の地盤の側方流動に起因する例があげられ、次ぎに1978年の宮城県沖地震の上部構造の慣性力および地盤の変位に起因する例があげられる。

前者の液状化による被害例に対して、耐震性の高い杭基礎はどうあるべきかを宮坂等は考察し、高靱性能耐震ジョイント杭の開発に至り、新潟地震で見られるような地盤の側方流動による大变位を受けるPHC杭の静的応答特性を検討し、高靱性能耐震ジョイント杭の有効性を示した^{1) 2)}。

しかしながら、高靱性能耐震ジョイントは高いたわみ性を有するために、地震時の構造物の変位応答を大きくするのではないかとという危惧も考えられる。そこで、ここではこの点および慣性力による被害に対して、構造物と地盤および杭の相互作用を考慮した動的応答特性を検討し、高靱性能耐震ジョイント杭の有効性を示すものである。

2. 高靱性能耐震ジョイントの動特性と杭本体の動特性

(1) 杭の曲げ試験の概要

高靱性能耐震ジョイントの曲げ特性を求めるため、宮坂等¹⁾は継手杭の単純曲げ試験を実施している。供試体は外径 ϕ 400mm、肉厚65mm、プレストレスが80kgf/cm²導入されたB種のPHC杭で、スパン長は7.2m、中央に高靱性能耐震ジョイントを位置させ、2点載荷で変位や傾斜角等を測定している。あわせて杭本体の曲げ試験も行っている。

(2) 高靱性能耐震ジョイントの動特性の決定

高靱性能耐震ジョイントを回転バネとしてモデル化した。この回転バネの動特性は継手杭の曲げ試験

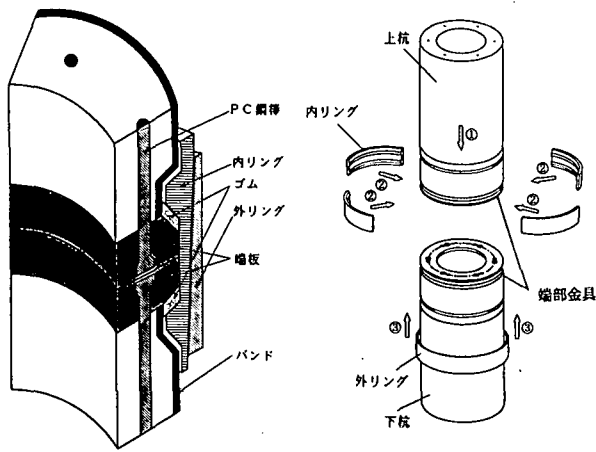


図-1 高靱性能耐震ジョイント (HDAJ)

表-1 高靱性能耐震ジョイントと杭本体の非線形回転バネの動特性

		高靱性能耐震ジョイント	杭本体の非線形回転バネ
骨格曲線 ($M-\theta$)		$\theta = (a \cdot M) / (1.0 - (b \cdot M)^n) - \theta_0$	
カーブシフト定数 θ_0		0.0	0.001
カーブフィット定数 n		0.5	0.5
初期勾配 $1/a$		$1/a = c_0 \cdot N^{d_0} + e_0$	
	定数	c_0	259.0
		d_0	0.5
		e_0	2005.0
漸近線用曲げモーメント $1/b$		$1/b = M_u \cdot (1.0 + \mu)$	
終局曲げモーメント M_u		$M_u = f_0 \cdot (N - g_0)^2 + h_0$	
	定数	f_0	-0.000370
		g_0	180.0
		h_0	28.0
割増係数 μ		$\mu = k_0 \cdot N + l_0$	
	定数	k_0	0.0
		l_0	0.37
終局回転角 θ_u		$\theta_u = i_0 / (N + j_0)$	
	定数	i_0	7.20
		j_0	111.0

結果を参考に決定した。すなわち、高靱性能耐震ジョイントの曲げモーメント M と回転角 θ との関係ここでは表-1 に示すように軸力依存性を考慮して、試験結果を良好に表わせる双曲線近似で表示した。図-2 にこの関係を示す。

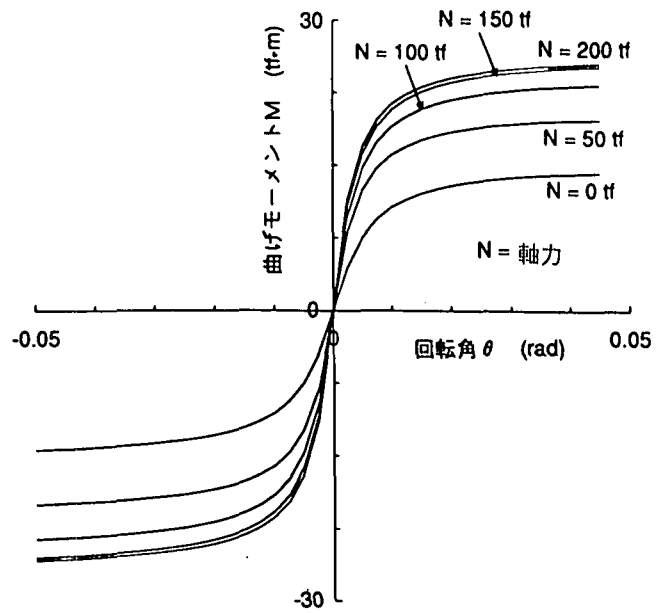


図-2 高靱性能耐震ジョイントの骨格曲線

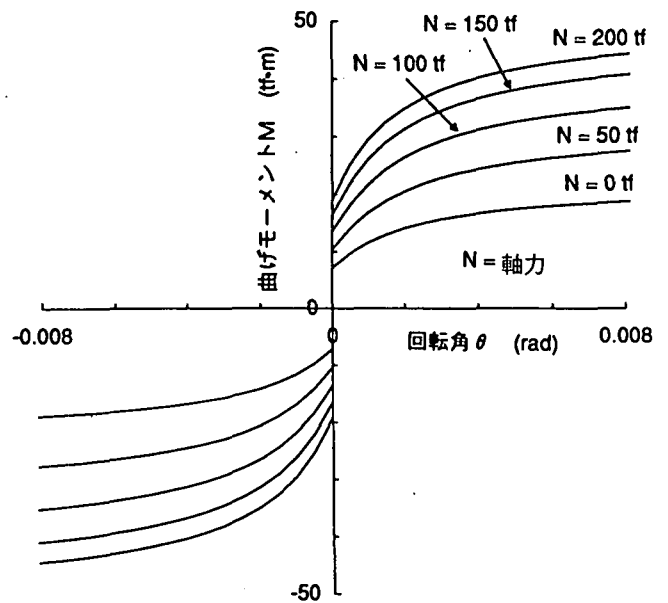


図-3 杭本体の非線形回転バネの骨格曲線

(3) 杭本体の非線形回転バネの動特性の決定

杭本体は50cmの長さの弾性体の梁要素と50cmごとに設定する非線形の回転バネ要素の組み合わせでモデル化し、この回転バネにより、杭本体の非線形性挙動を表示するという手法³⁾を本解析では適用している。

この非線形回転バネの曲げモーメント M と回転角 θ との関係をジョイントの場合と同様表-1 に示すように軸力依存性を考慮して双曲線で表示した。図-3 にこの関係を示す。図-3 では縦軸の途中より曲線が示されているが、この縦軸の値はクラック発生曲げモーメント M_c を示し、杭に生じる曲げモーメントがこの値に至って初めて、非線形回転バネの特性が現れることを示している。

3. 動的応答解析

図-4 に解析に用いた上部構造と杭基礎および地盤からなる2次元有限要素モデルを示す。杭本体の非線形挙動を表示するための非線形回転バネを50cmごとに設定するために、地盤および杭も深さ方向に50cmごとに要素分割している。

杭の配列は上部構造のロックングによる軸力変動に伴う軸力依存性を考慮できるように、 $\phi 400\text{mm}$ のPHC杭を3列とし、高靱性能耐震ジョイントを構造物直下と地盤の地層境界に位置させている。

上部構造は道路橋の橋脚部や建物を想定し、高さ6m、幅4m、単位体積重量を 2.5 tf/m^3 で剛な構造にモデル化している。

ここでは杭の非線形挙動の検討にのみ着目し、地盤の非線形性の影響が入らないように、地盤を弾性体と仮定した。地層構成はより一般性を考慮して中間部に軟らかい層を設けた3層とした。この地盤の固有周期は0.36秒で固有周期からみると、道路橋示方書でいう地盤の固有周期が0.2秒~0.6秒のII種地盤に相当するが、せん断波速度 V_s は上から200m/s、150m/s、400m/sで上2層は比較的遅い。層厚はそれぞれ、3m、6m、6m、単位体積重量 γ は 1.8 tf/m^3 、 1.7 tf/m^3 、 1.8 tf/m^3 、ポアソン比は全層0.4とし、減衰は一律に20%とした。地盤物性値を表-2に示す。側方境界は粘性境界で底部は固定境界とした。入力波はエルセントロ波のNS成分とし、加速度の最大値は-15mの固定境界で800galと大被害が予想される最大規模の地震動を想定した。

解析ケースを図-5に示す。Case-Aは杭本体を弾性体とし、すべての非線形性を考慮しないケースである。Case-Bは杭本体の非線形挙動を示す非線形回転バネを考慮したケースで、Case-CはCase-Bに、構造物の直下-0.5cmおよび地表より-3m、-9mの地層境界に高靱性能耐震ジョイントを計9箇所設置したケースである。

4. 動的応答解析結果

(1) 高靱性能耐震ジョイント杭全体の変位挙動

Case-A、Case-Cの杭の最大変位分布を自由地盤の最大変位分布と比較して図-6に示す。

両ケースの杭の変位分布は高靱性能耐震ジョイントの位置で回転角に大きな差が見られる程度で、杭全体はほぼ同様な変位挙動を示していることが分かる。

これらは次のように考えられる。杭の曲げ剛性はジョイントの有無にかかわらず地盤のせん断剛性に比較

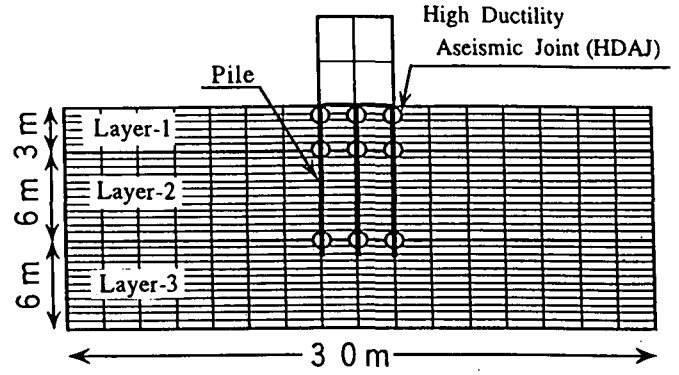


図-4 解析モデル

表-2 地盤物性

	Layer-1	Layer-2	Layer-3
Thickness	3 m	6 m	6 m
Shear wave velocity	200 m/s	150 m/s	400 m/s
Unit weight	1.8 tf/m^3	1.7 tf/m^3	1.8 tf/m^3
Poisson's ratio	0.4	0.4	0.4

$1\text{ tf/m}^3 (9.8\text{ kN/m}^3)$

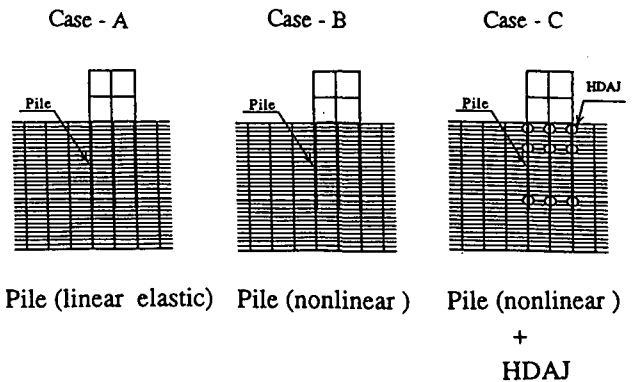


図-5 解析ケース

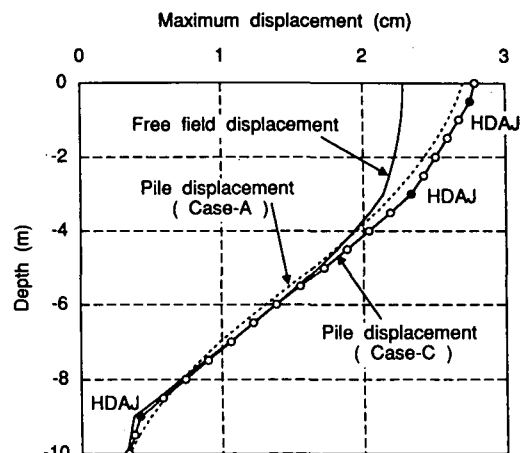


図-6 杭の最大変位分布

して、一般にかなり小さい。このため杭基礎の応答は地盤の応答に支配され、ジョイントの有無が杭基礎の応答に大きく表れることはない。厳密に見ると、図-6に見られるように多少の差は存在する。これがジョイントの存在による影響である。ジョイントは杭本体より、剛性が小さいので、構造系としてはわずかではあるが、周期を長くすることになり、結果として加速度応答は落ち、変位は増大している。しかしながら、その差は非常にわずかである。工学的にはこの差は問題にならない。

(2) 高靱性能耐震ジョイント杭の最大曲げモーメントと最大軸力分布

各ケースの3本の杭のうち右側の杭の最大曲げモーメント分布と最大軸力分布を図-7に示す。

杭を弾性体としたCase-Aでは、構造物直下と杭下端の地層境界に、終局曲げモーメントの最大値 28 tf·mをはるかに超える曲げモーメントが生じている状況が見られる。杭の非線形性を考慮したCase-Bでは曲げモーメントの値の低下が構造物直下および上下の地層境界で顕著に見られるものの、広い領域にわたってクラック発生曲げモーメントを超えている。杭下端の地層境界で曲げモーメントの集中の程度が他のケースに比較して弱いが、これは次ぎのように説明できる。境界部で非線形回転バネの回転角は集中する傾向を示すが、軸力がこの部分では減少するために、これに伴い曲げ剛性が低下するので、曲げモーメントとしては集中の程度が弱くなるのである。これらに対して、Case-Cの高靱性能耐震ジョイント杭では杭全長にわたり、曲げモーメントの値の低下がより顕著であり、杭頭部を除いて、杭全体はクラック発生曲げモーメントを下回り、クラックも生じることがない結果となっている。したがって、杭本体の安全性はかなり高い状態に確保されていると見ることができる。また、ジョイントに生じる曲げモーメントは下の地層境界で最大値 11.7 tf·mを示しているが、終局曲げモーメントに対して、十分な安全性を有している。これらの結果より、高靱性能耐震ジョイントの効果の大きいことが明らかである。

5. 結論

高靱性能耐震ジョイントを有する杭は基盤入力 800gal の大地震を想定しても地盤が健全であれば十分に安全であることが示された。杭本体および高靱性能耐震ジョイントに発生する曲げモーメントは終局曲げモーメントに対して十分余裕があり、また、

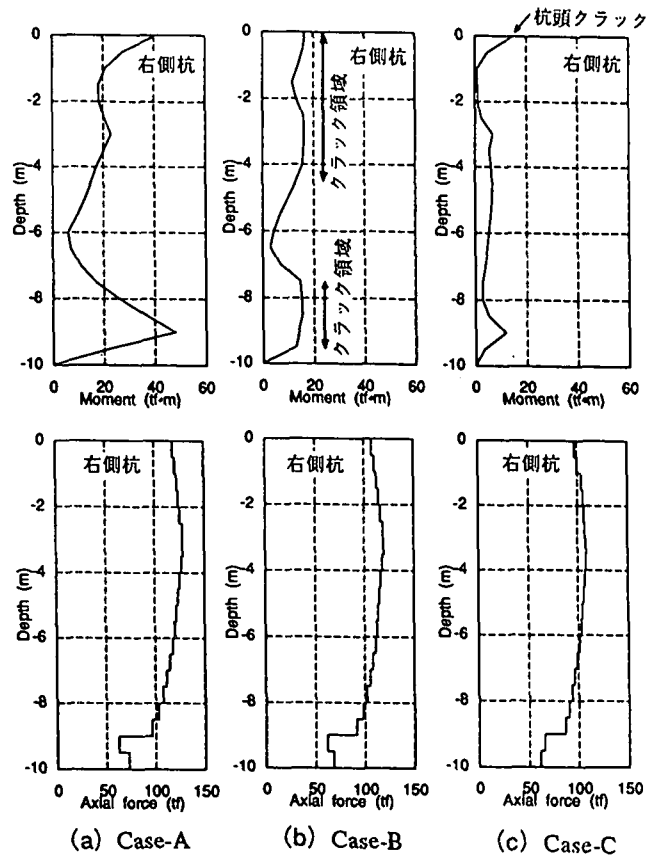


図-7 杭の最大曲げモーメントと最大軸力分布

高靱性能耐震ジョイントに発生する回転角も終局回転角の1/15程度であり、地盤の大きな水平変位に十分耐えられることが分かった。

高靱性能耐震ジョイントは今回の解析モデルのように、複数設置されることが考えられるが、その高いたわみ性により、上部構造の応答変位を大きくするという危惧も考えられたが、検討の結果、その影響はほとんどなく、高靱性能耐震ジョイントの存在が何ら悪い影響を及ぼさないことも明らかとなった。

参考文献

- 1) 宮坂享明、三浦房紀、平田大三：高靱性能耐震ジョイント杭の開発とその側方移動する液状化地盤に対する応答、土木学会論文集、No.513 / I-31、pp.201-211、1995.4.
- 2) 宮坂享明、三浦房紀、平田大三：改良型高靱性能耐震ジョイント杭の液状化による地盤の側方移動に対する応答、土木学会論文集、No.525 / I-33、pp.287-298、1995.10.
- 3) F. Miura and T.D.O' Rourke : Nonlinear analyses of piles subjected to liquefaction-induced large ground deformation, Proc. of the third Japan-U.S. workshop on earthquake resistant design of lifeline facilities and countermeasures for soil liquefaction, pp.497-512, 1990.