

管内コンクリート押抜き挙動に与える傾斜荷重の影響についての解析的検討

新日鐵住金
鉄道総合技術研究所
新日鐵住金エンジニアリング

正会員 ○石濱 吉郎 正会員
正会員 池田 学 正会員
正会員 和田 昌敏 正会員

日下 裕貴
西岡 英俊
中澤 公博

1. 目的

鋼管杭とフーチングの杭頭接合部は、鋼管内面に平鋼を溶接したずれ止めを配置し、フーチングコンクリートとずれ止めの支圧耐力により鉛直荷重を支持する方法¹⁾²⁾が一般的に用いられている。しかし、地震時等においては鋼管杭の杭頭接合部には鉛直荷重に加えて曲げモーメントが作用することから、ずれ止めに作用する支圧力は円周方向に均等ではなく一定の勾配を有すると考えられる。

本報は、管内面にずれ止めを有する鋼管内コンクリートの押抜き試験と有限要素解析を比較し、さらに傾斜荷重を作用させた条件で解析することで、杭頭接合部に曲げモーメントが作用した際に生じる傾斜荷重が支圧耐力へ及ぼす影響について検討した。

2. 押抜き試験

比較対象とした押抜き試験³⁾について述べる。図1に試験方法の概要を、表1に試験ケースを示す。管内面にずれ止めを配置した直径800mmの鋼管にコンクリートを充填して鋼管内部のコンクリートを押抜いた。なお、コンクリートの圧縮強度は現場封緘養生したコンクリート供試体の値である。図2に試験体の形状の詳細を示す。押抜き変位 δ は90°ずらした4断面で計測した。写真1に押抜き試験状況を、図3に試験結果を示す。Case-Iでは押抜き変位 δ が10.3mmに到達した段階で最大の載荷荷重5,101kNを示した。Case-IIでは押抜き変位 δ が10mmを超えても載荷荷重が増加し続け、載荷を終了させた段階で押抜き変位 δ が13.2mmで載荷荷重9,500kNを示した。

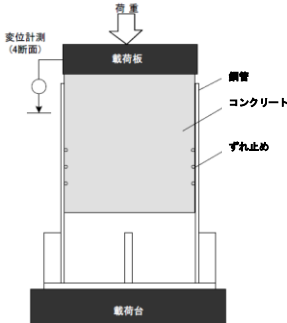


図1 試験方法の概要

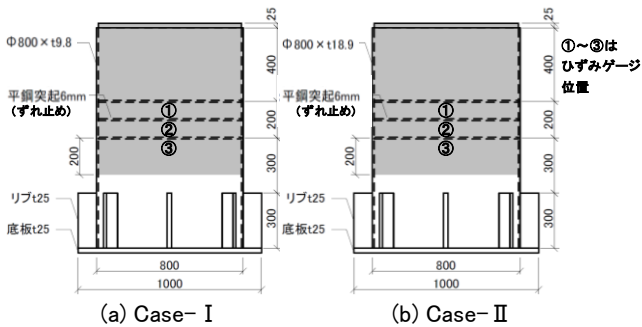


図2 試験体形状



写真1 押抜き試験状況

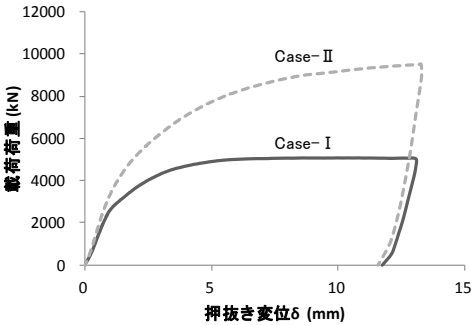


図3 押抜き試験結果

表1 試験条件

	鋼管		ずれ止め			コンクリート
	直径 (mm)	板厚 (mm)	段数 (段)	高さ (mm)	間隔 (mm)	圧縮強度 (N/mm ²)
Case-I	800	9.8	3	6	100	29.0
Case-II	800	18.9	3	6	100	28.3

3. 押抜き試験との比較解析条件

解析ソフトは MSC. Marc を用いた。図 4 に FEM 解析モデルを示す。1/2 対称モデルとし、鋼管下端を剛体要素で鉛直方向を拘束し、鋼管下端の片側は水平方向も拘束した。上部に高剛性の載荷板を設置し、載荷板の左右に集中荷重を漸増載荷した。載荷荷重は鋼管下端の固定点におけるモデル高さ方向の反力値から求めた。

解析において設定した鋼材の材料定数を表 2 に示す。鋼管およびずれ止めは、材料非線形を考慮してバイリニアの弾塑性モデル、降伏後の剛性は 1/100 に低下するものとした。載荷板については試験機等の剛性が付加されて高剛性であるものとし、板厚を 50 mm で弾性係数が十分大きくなるように鋼材の 10^9 倍の値を用いた。コンクリートの材料定数を表 3 に示す。コンクリートについても材料非線形を考慮し、構成則は線形 Drucker・Prager 則を適用した。線形 Drucker・Prager 則の概念図を図 5 に示す。引張強度 σ_{crack} でクラックが発生し、周辺要素で応力再分配されるものとした。なお、鋼材と充填したコンクリートの界面においては、接触条件を考慮してクーロン摩擦を定義し摩擦係数を 0.1 とした。押抜き試験との比較解析条件を表 4 に示す。

4. 比較解析結果

図 6 に押抜き試験と解析の比較結果を示す。解析時の押抜き変位 δ は、載荷時の剛板の両端部および中央の合計 3 か所の鉛直変位を平均した値を用いた。初期の剛性や載荷荷重の増加勾配の変化に多少差があるが、押抜き変位 δ が 8 mm 程度以降の載荷荷重の増加勾配が緩やかになる点での載荷荷重については概ね良く合っている。

また、既往の押抜き試験結果の評価⁴⁾では、鋼管の径厚比に応じて付着強度が変化するという結論が得られており、本解析でも同様の傾向が得られた。

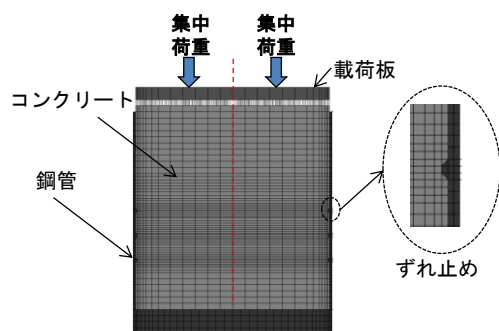


図 4 FEM 解析モデル

表 2 鋼材の材料定数

部材	鋼種	弾性係数 (N/mm ²)	降伏後の剛性	降伏応力 (N/mm ²)
鋼管	SKK490	205,000	1/100	325
ずれ止め	SM490	205,000	1/100	325
載荷板	—	2.0×10^{14}	—	—

表 3 コンクリートの材料定数

σ_c (N/mm ²)	E (N/mm ²)	ϕ (°)	C (N/mm ²)	σ_{crack} (N/mm ²)	γ (%)	α
28.9	26,000	10	12.17	2.17	5	0.071

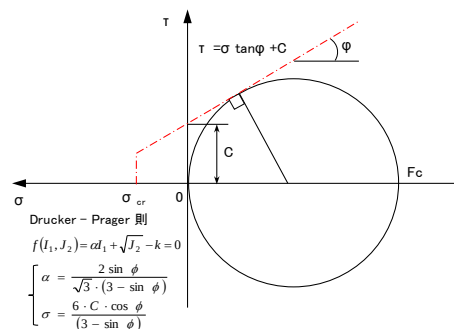
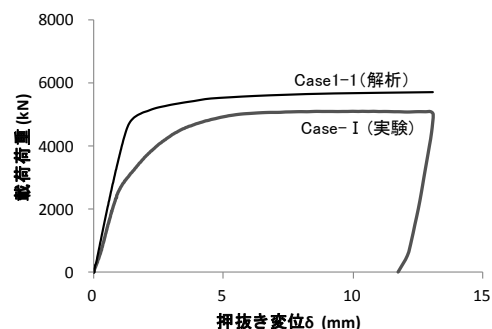


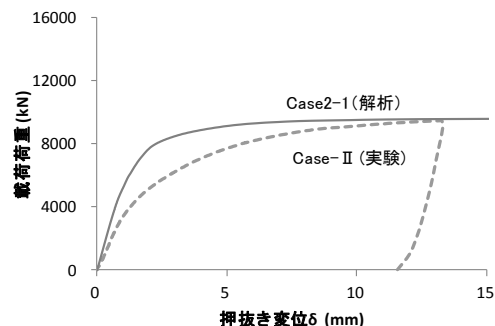
図 5 コンクリートのモデル概念図

表 4 解析条件

	鋼管		ずれ止め			コンクリート
	ϕ (mm)	t (mm)	段数 (段)	高さ (mm)	間隔 (mm)	一軸圧縮強度 (N/mm ²)
Case1-1	800	9.8	3	6	100	28.9
Case2-1	800	18.9	3	6	100	28.9



(a) Case-I (押抜き試験) と Case1-1 (解析)



(b) Case-II (押抜き試験) と Case2-1 (解析)

図 6 押抜き試験と解析の比較（荷重—変位関係）

図 7 に押抜き試験と解析で得られた載荷荷重と軸方向および周方向のひずみ関係を示す。押抜き試験でのひずみゲージは図 2 に示す①～③の位置に 2 軸ゲージを鋼管の軸方向と周方向のひずみを計測できるように貼付している。荷重の増加勾配が緩やかになった後の、ひずみの発生量の点で差があるものの、押抜き試験と解析では載荷荷重－押抜き変位関係と同程度の精度で一致していることが分かる。荷重増加とともに周方向および軸方向のひずみ量がほぼ同程度まで増加し、特にずれ止め位置の近傍においてコンクリートが鋼管により周方向に拘束されていることが確認できた。

5. 傾斜荷重に対する影響評価のための解析条件

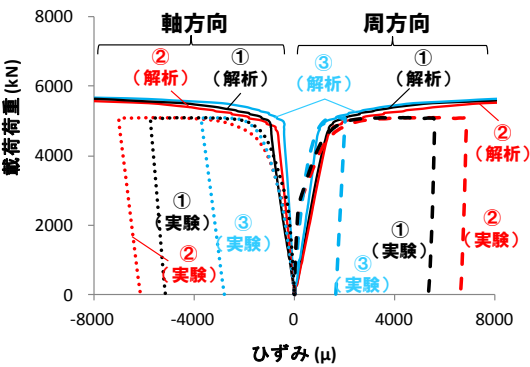
傾斜荷重の解析条件を設定するため、図 8 に示す荷重分布形状を想定した。まず、載荷板に図形 ABDG からなる滑らかな分布荷重が発生すると仮定した。解析時の荷重は、図形 ABDG を線分 BD の中心を通る平面で分割し、ABCEHF で囲まれる部分（ハッチング部）と HFCEGD で囲まれる部分のそれぞれの体積、つまり合計の荷重をそれぞれの図形の重心位置に集中的に与えた。図 9 に荷重条件を示す。図中の P1、P2 が合計荷重であり、x1 および x2 が面 FCEH から各図形の重心までの水平距離となる。

表 5 に傾斜荷重をかけた際の解析条件を示す。載荷荷重 P1 と P2 の比を 1.0 : 1.0～1.4 : 0.6 まで変化させた。P1:P2=1.4 : 0.6 の際、図 8 に示す線分 GD の長さがゼロになる条件、つまり最外縁に曲げによる引張力が発生しない条件の中では最も極端な条件となる。

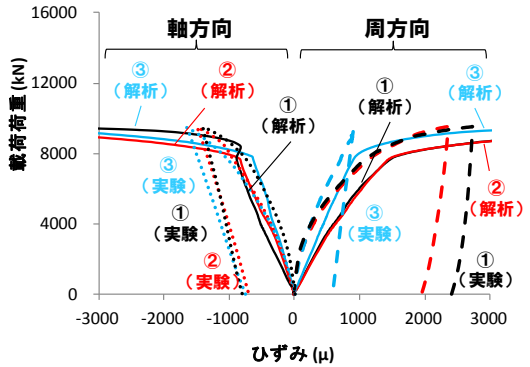
6. 傾斜荷重条件での解析結果

図 10 に解析で得られた、傾斜荷重を与えた際の載荷荷重－押抜き変位関係を示す。初期剛性には荷重の傾斜の影響はほとんど見られず、傾斜が大きい Case1-4、1-5 の条件では載荷荷重の増加勾配が他のケースより早期に低下した。Case2-1～5 では Case1 と比較すると各ケースの差が小さかった。図 10 において、初期の載荷荷重の増加勾配を初期剛性 E' として、1/3E' の勾配で引いた直線と各ケースの載荷荷重－押抜き変位曲線の接点を求めた。表 6 に 1/3 E' と交差する点での載荷荷重と、解析上で載荷荷重の増加がほぼ完了する $\delta=8\text{mm}$ 時点の載荷荷重を示す。P1 と P2 の比率が 1.5 以下である Case1-1～3 の範囲ではほぼ差が見られず、P1 と P2 の

比率が 2 倍以上になってもその影響は、Case1 では 5～10%程度、Case2 では 5%以内に収まっていた。Case2 で変化が小さかった理由としては、鋼管板厚が比較的厚く、傾斜荷重による局所的な変形が生じにくかったためだと考えられる。



(a) Case-I (押抜き試験) と Case1-1 (解析)



(b) Case-II (押抜き試験) と Case2-1 (解析)

図 7 押抜き試験と解析の比較 (荷重－ひずみ関係)

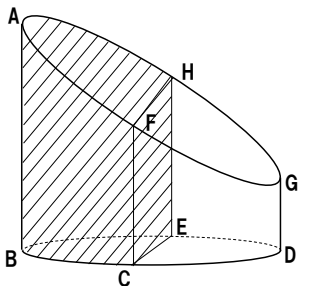


図 8 荷重分布イメージ

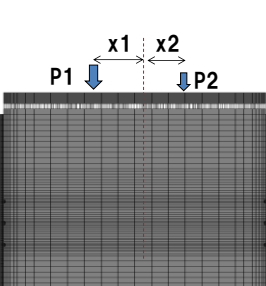


図 9 荷重条件

表 5 荷重条件

Case※	P1:P2	線分 AB:GD
Case○-1	1.0:1.0	1.0:1.0
Case○-2	1.1:0.9	1.2:0.8
Case○-3	1.2:0.8	1.5:0.5
Case○-4	1.3:0.7	1.8:0.2
Case○-5	1.4:0.6	2.0:0.0

※ (○は 1・2)

図 11 に、Case1-1, 1-5 および Case2-1, 2-5 で押抜き変位 δ が 1.0mm に達した時点でのコンクリート部で発生した軸方向圧縮応力と塑性領域のコンターを示す。相当塑性ひずみについては、黄色に塗りつぶした領域に塑性ひずみが発生していることを示す。いずれも、ずれ止め直上のコンクリートの塑性化が顕著であり、これは押抜き試験後の解体調査でずれ止め上部のコンクリートが圧壊しているという結果と一致している。また、Case1-5 では荷重が小さい P2 側の端部で一部コンクリートの塑性化が小さい領域が見られ、Case2-5 では荷重が大きい P1 側のずれ止め間のコンクリートの塑性化が顕著であった。

7. 結論

ずれ止めによる鋼管とコンクリートの付着耐力が傾斜荷重によって受ける影響を解析的に検討した結果、以下の結論が得られた。

- ①引き抜き力が生じない程度の滑らかな荷重の傾斜条件下では、押抜き時の載荷荷重に与える影響は小さく、荷重の傾斜がない条件と比較して、その低下度合いは数%程度であった。
- ②鋼管の板厚が厚い条件の方が、荷重の傾斜による影響がより小さくなった。

さらに、本検討より、極端な曲げモーメントが作用する条件を除き、鉛直方向の荷重のみを対象にずれ止めを設置すればよいと考えられる。

表 6 傾斜荷重条件での解析結果

(a) Case1

Case	載荷荷重 (kN)	
	E'/3 との交点	$\delta = 8\text{mm}$
Case1-1	4,600 (1.00)※	5,652 (1.00)※
Case1-2	4,640 (1.01)	5,617 (0.99)
Case1-3	4,520 (0.98)	5,596 (0.99)
Case1-4	4,240 (0.92)	5,440 (0.96)
Case1-5	4,120 (0.90)	5,319 (0.94)

(b) Case2

Case	載荷荷重 (kN)	
	E'/3 との交点	$\delta = 8\text{mm}$
Case2-1	7,040 (1.00)※	9,467 (1.00)※
Case2-2	6,640 (0.94)	9,421 (1.00)
Case2-3	6,920 (0.98)	9,566 (1.01)
Case2-4	6,920 (0.98)	9,249 (0.98)
Case2-5	6,680 (0.95)	9,129 (0.96)

※ () 内は Case1-1・Case2-1 に対する比率

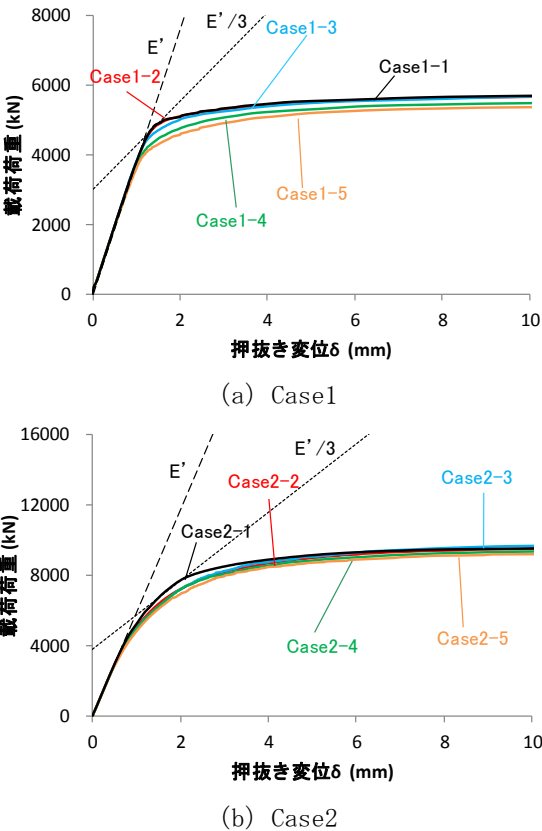


図 10 傾斜荷重条件での荷重－変位関係

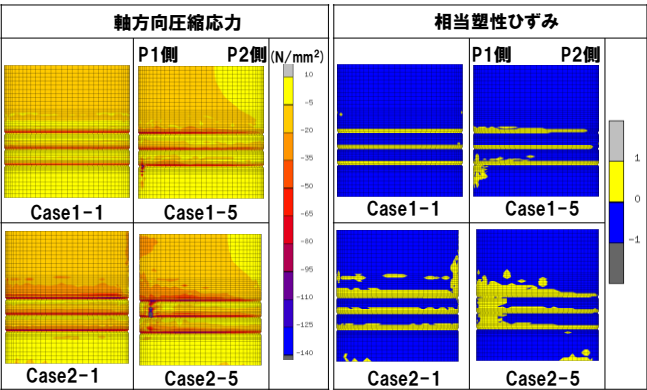


図 11 コンクリート部の塑性領域と圧縮応力

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物, 2012 年 1 月
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説, 2012 年 3 月
- 3) 建築技術性能証明評価概要報告書 ハイブリッド鋼管杭工法, 日本建築総合試験所, 2013 年 5 月, pp. 22-36.
- 4) 平成 26 年度全国大会第 69 回年次学術講演会講演概要集, 土木学会, 2014 年 9 月, pp. 355-356.