

固化体に支持される橋の直接基礎の支持力特性

谷本俊輔* 原田健二** 河野哲也*** 白戸真大**** 中谷昌一*****

1. はじめに

深層混合処理工法により、セメントなどを地中に供給して改良した固化体でケーソン式護岸や盛土などを直接支持することは広く行われている。固化体の配置には、固化体をオーバーラップさせて一体化を図った“ブロック式”と固化杭をある間隔をおいて複数打設する“杭式”があり、この中間に位置するのが“接円式”である。この形式は、杭状の固化体が互いに接するように配置されるものであり、ブロック式と同一の範疇で解釈されることも多い。実際には、いずれの配置の場合も、固化体と原地盤で形成される複合地盤を平均的なせん断強度や剛性からなる地盤と見なすという仮定のもとで一律に扱われている場合もある。

しかし、寺師ら¹⁾は、接円式及び杭式改良地盤の鉛直支持力を検討し、面積平均的な考え方は改良地盤が発揮し得るせん断抵抗を著しく過大に評価すると指摘している。また、北詰ら²⁾は、遠心模型載荷実験により、ケーソン護岸を支持する接円式及び杭式改良地盤とブロック式改良地盤とは水平抵抗が大きく異なること、杭式固化体は曲げ破壊や転倒を生じるなど、ブロック式固化体とは異なる破壊形態を示すことを報告している。

このように、固化体に支持される基礎の支持力特性は、平面・深度方向の改良範囲や強度もさることながら、図-1に示すように、固化体の形式によって大きく異なり、複合地盤を平均化したせん断強度や剛性を有する地盤と見なすという仮定が無条件に成立しないと考えるのが妥当である。したがって、固化体の形状や配置、施工方法、対象構造物を前提とした時の基礎的な破壊形態を把握しておくことが必要である。たとえば、道路橋は、死荷重の大きな上部構造が柱等により支持されていることや、基礎の平面寸法が小さいことから、地震時には基礎底面に大きな偏心・傾斜荷重が繰返し作用した時の破壊形態が特に懸念される。

そこで、本報では、道路橋を対象にセメント固化体により反力を得ようとする直接基礎を想定し、セメント固化体の破壊挙動を調べた結果について報告する。

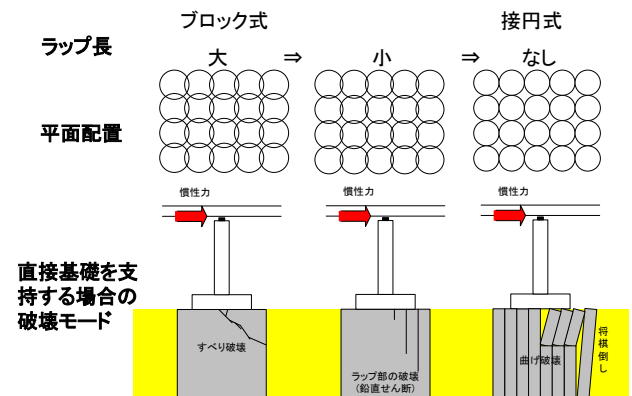


図-1 固化体形式と想定される破壊形態

2. 遠心模型実験

2.1 実験概要と実験ケース

実験は、大型動的遠心力載荷試験装置を用いて70Gの遠心力場で行った。以後の物理量は特記しない限り、すべて実物スケールに換算した値で示す。

橋脚模型は、上部構造・橋脚・フーチングから構成され、基礎の諸元の決定は、砂地盤上の直接基礎の設計を参考に行った。死荷重による地盤反力が砂地盤の地盤反力度の上限値の300kN/m²を超えず、レベル1（以下、L1）地震時に基礎底面に作用する荷重の偏心量がフーチング幅の1/3以内におさまるようにした。結果として、橋脚は、常時の死荷重による底面反力が249kN/m²、高さが11.06m、フーチング幅8.4m、奥行き7.0mのものを想定することとした。その上で、死荷重と活荷重の大きさが同一であるものと仮定すれば、常時の地盤反力度の上限値は500kN/m²程度であることを想定したことになる。また、L1地震時に想定される基礎端部下の地盤が受ける反力度は、荷重の偏心を考慮した基礎の有効載荷面積で死荷重を除いたもので近似すれば、およそ555kN/m²になる。そこで、これらを別報³⁾の式(3)と(4)に

における常時とL1地震時の疲労強度比を安全率と見なして設計基準強度（一軸圧縮強度） q_{ut} を設定したところ、 $1,000\text{kN/m}^2$ となった。

固化体の形式は、図-1に示すブロック式と接円式の2通りとした。ブロック式とは、幅9.8m、奥行き8.4m、高さ10.5mの直方体状の固化体であり、接円式とは、直径 $\phi 1.4\text{m}$ 、長さ10.5mの円柱状の固化体を載荷方向7列×奥行き方向6列の接円配置としたもので、互いに接してはいるが付着はしていない。改良面積の占める比率である改良率でいえば78.5%である。いずれの形式においても、東北硅砂7号に早強ポルトランドセメントを乾燥密度で10%（ 147kg/m^3 ）添加することで作製し、固化体の底面は支持層に着底させた。通常的设计では、用地の制約を受けるので、平面方向に際限なく固化体を配置することはできない。本研究では、基礎の平面寸法よりも一回り大きい両脇に0.7m（固化杭直径の半分）の範囲まで固化体を配置した。なお、配置寸法が異なる場合の結果については、文献4)を参照されたい。

実験土槽は、図-2に示すように、模型スケールで幅300mm、奥行き1,500mm、高さ500mmの剛土槽である。この土槽内に東北硅砂7号を使用して固化体の支持地盤（相対密度 $D_r=90\%$ ）を作成後、固化体を設置した。その後、固化体の周辺地盤を $D_r=60\%$ になるように作成し、剛土槽を脱気槽内で脱気した状態で間隙水を少量ずつ滴下して地表まで飽和させ、固化体上に橋脚模型を設置した。

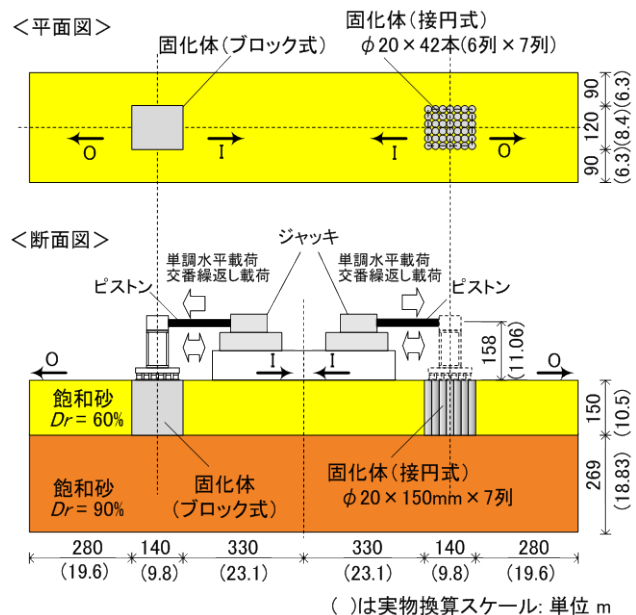


図-2 実験概要図

これらの模型を搭載した土槽に70Gの遠心加速度を載荷した時点で、上部構造・橋脚・フーチンの自重によって基礎底面には死荷重相当の鉛直反力度が発揮され、その状態から、載荷を開始した。載荷実験では、載荷速度 0.15mm/sec の変位制御で、上部構造位置に水平変位を与え、載荷パターンは単調および正負交番繰返しとした。繰返し載荷の載荷パターンは、正負交番載荷実験の標準的な方法がまとめられている文献5)にある交番繰返し載荷のうち、図-3に示す繰返し回数の多いTYPE1のものとした。ただし、ここでの基準変位は単調水平載荷実験における最大荷重時の水平変位 δ_0 としている。水平載荷の場合の荷重の符号は、図-2に示すように、初期位置からO方向に押した時が正であり、変位の符号は初期位置からO方向に変位したときが正である。また、鉛直変位については下方（沈下方向）を正とした。

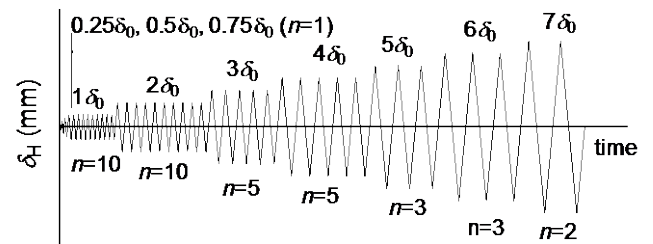


図-3 載荷パターン図

実験ケースを表-1に示す。固化体形式としてブロック式としたものをB1、接円式としたものをC1とし、載荷パターンについて、単調水平載荷をH1、交番繰返し載荷をH2として、対象の固化体仕様と組み合わせてケース名としている。

表-1 実験ケース

載荷パターン	固化体形式	
	ブロック式	接円式
単調水平載荷	B1-H1	C1-H1
交番繰返し載荷	B1-H2	C1-H2

2.2 実験結果

2.2.1 単調水平載荷実験

図-4に単調水平載荷実験で得られた載荷点における水平荷重 P_H ・水平変位 δ_H 関係を示す。図中の記号は、(b)浮上り開始時、(c)最大荷重時である。最大耐力は固化体形式に応じて異なり、ブロック式に比べて接円式は80%程度になっている。固化体の改良率に応じて最大耐力が異なっている

ように見えるが、実際の破壊形態は全く異なるものであった。

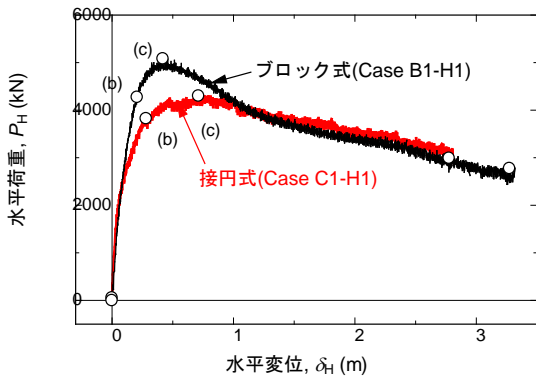


図-4 荷重点における水平荷重・変位関係 (単調水平載荷)

図-5に水平載荷実験終了後に掘り出して観察した固化体のスケッチによる上面図と側面・断面図及びO側フーチング下端付近の固化体天端の沈下量を示す。ブロック式固化体にはブロック中に局部的なすべり破壊が生じているのに対し、接円式固化体では固化杭がそれぞれ抵抗し、O側に位置する各固化杭には曲げ破壊が生じていた。

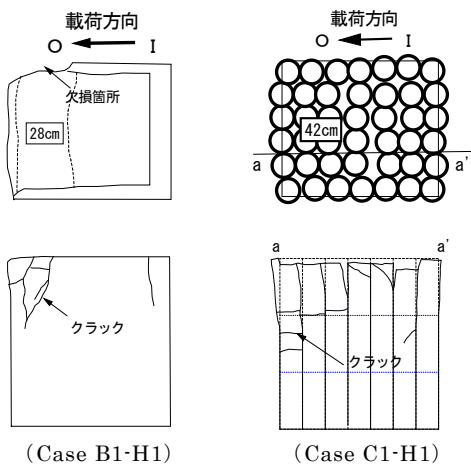


図-5 固化体の損傷状況 (上：上面、下：側面・断面)

2.2.2 交番繰返し載荷実験

基準変位 ($1\delta_0$) は、前述したように単調水平載荷実験で得られた図-4の水平荷重・変位曲線において、最大荷重が生じた時 (c点) の変位とし、ブロック式では42cm、接円式では70cmとした。そして、主として中小地震時の挙動を念頭に、 $1\delta_0$ に達する前の $\delta_0/4$, $\delta_0/2$, $3/4 \delta_0$ の変位レベルでも繰返し変位を与えた。ただし、Case C1-H2は、後述のように $1\delta_0$ の荷重終了時点で極めて大きな沈下が生じ、荷重ジャッキが治具と接触するなどによって計測データに異常が見られたため、 $1\delta_0$

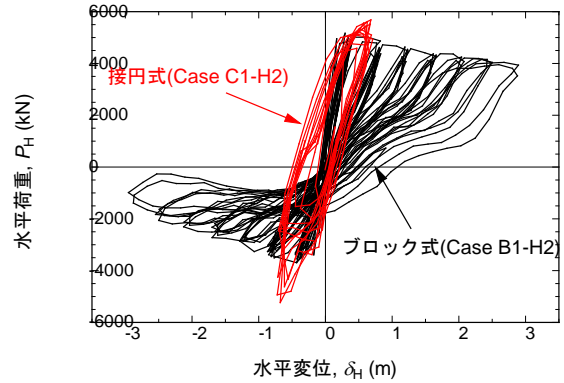


図-6 荷重点における水平荷重・変位関係 (交番繰返し載荷)

までの結果を示す。

荷重作用位置で計測された水平荷重と水平変位の関係を図-6に示す。実験における最大荷重は $1\delta_0$ の変位レベルで生じる。その後は、変位の増加に伴って、各荷重サイクルで生じる最大荷重が低下していくとともに、剛性が低下する傾向が見られた。

図-7は、交番載荷を行ったケースにおける基礎底面中心位置の鉛直変位 v_f と荷重位置の水平変位 δ_H の関係を示したものである。縦軸の v_f は下方方向が正(沈下方向)であり、いずれのケースについても、 $1\delta_0$ に達する前までは残留沈下が殆ど発生しないものの、 $1\delta_0$ に達した後は、繰返し載荷に伴って沈下が進行しているが、その程度は接円式の場合において著しい。その結果、図-8に示すように、 $2\delta_0$ 終了後には、固化体両側の中央部で100cm以上の鉛直変位と固化杭の大きな水平変位が確認されるとともに、固化杭の上部が押し潰された状態 (図-8のCase C1-H2の断面図の黒塗部) が観察された。すなわち、固化体形式によって、全く異なる挙動を示した。これらの挙動の相違は、接円式固化体とブロック式固化体の耐荷メ

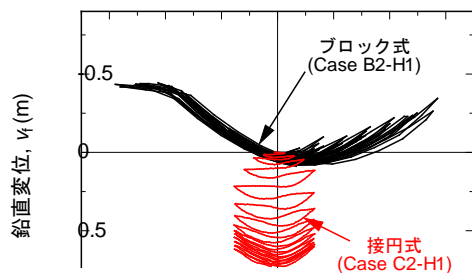


図-7 基礎の底面位置の移動状況 (交番繰返し載荷)

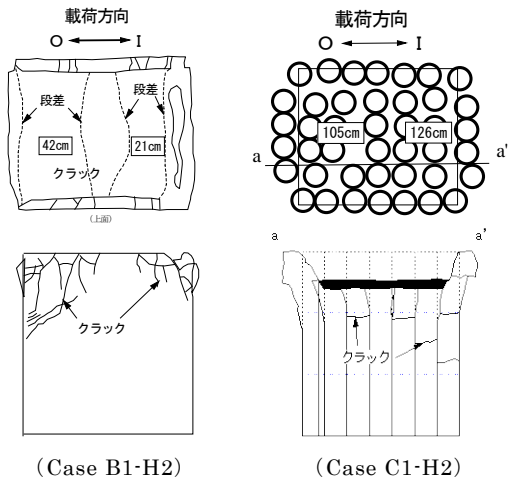


図-8 固化体の損傷状況 (上：上面、下：側面・断面)

カニズムの違いに起因するものと考えられる。

固化杭の集合体である接円式固化体の場合、水平力や転倒モーメントに対して、個々の固化杭が個別に抵抗・破壊し、基礎下の固化杭が曲げ破壊しつつ頭部が圧縮により押しつぶされている。一方、ブロック式固化体の場合には、内部破壊や基礎端部の沈下が生じているものの、その損傷は限定的なものであったため沈下量は小さなものにとどまったものと考えられる。

3. まとめ

固化体に支持される橋の直接基礎の支持力特性の解明を目的として、ブロック式と接円式の固化体形式の相違に着目して遠心場において模型実験を実施した。その結果、固化体形式に応じて、異なる破壊形態と荷重に対する耐荷メカニズムが発揮されることが明らかになった。文献 4) では、

改良強度を上げた場合や、改良範囲を広げた場合についても実験結果を示しているが、いずれも本報告と同様の破壊形態や耐荷メカニズムを示していた。すなわち、固化体であっても形式によっては通常の地盤では見られない曲げ破壊等の挙動が確認された。

なお、周りに接円式固化体を配置した場合の杭基礎の破壊形態についても実験を行ったところであり、やはり各固化杭の一体挙動は確認されないようであった。今後、破壊形態を考慮し、固化体の効果が有効とみなせる条件や設計法について研究を進める必要があり、機会を得て報告したい。

参考文献

- 1) 寺師昌明、田中洋行：深層混合処理工法による杭状改良地盤の支持力および圧密特性、港湾技術研究所報告、第22巻、第2号、1983
- 2) 北詰昌樹、山本浩司：着底型杭状深層混合処理地盤の破壊挙動、港湾技術研究所報告、第37巻 第2号、pp.3~27、1991
- 3) 原田健二、谷本俊輔、河野哲也、白戸真大、中谷昌一：セメント固化改良体の許容圧縮応力度に関する研究、土木技術資料、第52巻、第3号、pp.30~33、2010
- 4) 谷本俊輔、原田健二、河野哲也、佐藤洋、白戸真大、中谷昌一：ブロック式・杭式固化体上の橋梁直接基礎の挙動に関する研究、第54回地盤工学シンポジウム論文集、pp.323~330、2009
- 5) 運上茂樹、星隈順一、西田秀明：橋の耐震性能の評価に活用する実験に関するガイドライン(案)(橋梁の正負交番載荷実験方法及び振動台実験方法)、土木研究所資料第4023号、pp.20~25、2006

谷本俊輔*



独立行政法人土木研究所つくば中央研究所材料地盤研究グループ土質・振動チーム 研究員
Shunsuke TANIMOTO

原田健二**



株式会社不動産テトラ (前独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 交流研究員)、博士 (工学)
Dr.Kenji HARADA

河野哲也***



独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 研究員
Tetsuya KOUNO

白戸真大****



独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 主任研究員、博士 (工学)
Dr.Masahiro SHIRATO

中谷昌一*****



独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 上席研究員、博士 (工学)
Dr.Shoichi NAKATANI