

## 地中連続壁による新しい基礎構造

New Type of Foundation by Means of Slurry Wall

山田清臣 (やまだ きよおみ)

日本大学教授 工学部土木工学科

和田克哉 (わだ かつや)

首都高速道路公団第一建設部長

### 1. まえがき

平成7年1月17日に発生した「阪神大震災」は、我々土木工学に携わる技術者にとって、多くの教訓を示唆する地震となってしまった。「地震は、人を誰も殺していない。建物が人を殺した」と言う人もいる。確かに野原の真ん中で、今回の地震に遭遇したとしたら、活断層の割れ目にも、飲み込まれなければ死に至ることはなかった。とすると、我々が建設した構造物により、多くの犠牲者を出してしまったことになるのかも知れない。

今までに土木構造物は、「関東大震災」にも耐えられるように設計してきた。今回の地震が、「想定していた地震をはるかに超える大地震であった」と言ってしまうとそれまでかもしれないが、結果として多くの犠牲者を出したことに對する責任は大きい。

土木構造物は、一般に多くの人々に使用されている公共構造物が多く、地震が発生しても、緊急用の施設として使用可能でなければならない。すなわち、大きな地震が生じ多少被害を受けても、その構造物は倒壊してはならない使命を負っている。具体的に橋梁を例に考えると、橋脚にひび割れあるいは座屈などの損傷が生じたとしても、橋梁全体が崩壊に至るような事態だけは、避けなければならない。特に今回の地震で、阪神高速道路「深江高架橋」が横倒しになるという、象徴的な被害に遭遇しただけにその感は強い。

このように、地震により構造物が損傷しても、崩壊しないように設計するために、現在は構造部材の変形性能に着目し、「靱性」すなわち「粘り強さ」を向上させる研究がなされている。これは「保有耐力」あるいは「変形性能」の照査などと呼ばれ、構造物の降伏から終極に至る破壊形態を予測し、必要な断面・鉄筋量などを、ある安全率に収まるように定めるといふ考え方である。これらの照査により、構造物は「粘り強く」なり想定した地震より大きな地震に遭遇したとしても、構造物が降伏して終極に至るまでの安全率の中で、最悪の事態である崩壊から免れることができる。

しかし、さらに重要なことは構造物を計画する段階で揺れにくい構造、あるいは地震を受けても変形することにより力を軽減する免震構造など、地震時の挙動を考慮した適切な構造形式を定めることが必要になる。

一般に、基礎形式は杭基礎・ケーソン基礎・直接基礎に分類されるが、これらの基礎形式では新しい形式を発想するのに限界があると思われる、ここでは、地盤中に任

意形状の鉄筋コンクリート構造物の基礎が構築できる地中連続壁を中心に、新しい基礎形式を考えてみた。

### 2. 地中連続壁による新しい基礎構造形式

地中連続壁は、橋梁基礎構造に限っても種々の基礎形式が考えられる。表-1に地中連続壁を用いて構築できると考えられる基礎構造形式について、施工の実績を問わず考え得る構造形式のすべてについてまとめてみた。

まず、地中連続壁を単体で用いる形式がある。それは壁基礎であり、橋軸方向と直角方向で基礎の剛性が異なり、地中連続壁の継手が不要となることから経済的で合理的な基礎構造形式となる場合がある。また地中連続壁を連続して井筒状に閉合した基礎は、橋梁に採用される地中連続壁の代表的な基礎形式であり、現在では一般的に設計できる基礎形式である。

次に地中連続壁と杭基礎を複合して組み合わせた基礎形式がある。これは地中連続壁工法で掘削した後、現場打ち鉄筋コンクリートに変わり既成杭を使用するもの、あるいは地中連続壁と杭を複合して協同で抵抗するものなどが考えられるが、いずれも杭と井筒の荷重分担など設計上不明な点が多い。仮設兼用の基礎は水平力が卓越する基礎上部に、仮設で構築した地中連続壁をフーチングと合成してそのまま完成後まで残し、主として水平力の卓越する杭頭付近に抵抗させる基礎構造形式である。

### 3. 新しい壁基礎形式に関する実施例

#### 3.1 壁基礎形式の有用性

これら地中連続壁を用いた基礎形式のうち、実現可能な基礎形式として研究したのは壁基礎（**口絵写真-17**）であり、単体の地中壁を2枚あるいは3枚平行に打設して、頭部をフーチングで結合した構造である。この壁基礎は橋軸方向には変形しやすく、橋軸直角方向には変形しにくい異方性の基礎である。

一般に、多径間連続桁では、橋軸直角方向の地震に対し、基礎構造物の変形を制限して耐震性を高め、軸方向の温度変化・乾燥収縮などによる力に対しては、変形することにより力を軽減することが合理的な構造形式となる。

また、基礎構造物の水平方向の許容変位量は、道路橋示方書で基礎幅の1%（最小1.5cm、最大5.0cm）と規定されており、橋軸方向と橋軸直角方向の基礎の許容変位量を変えるためには、基礎幅を変える必要がある。これらの条件を満足する構造物としては、壁構造が最も

表-1 地中連続壁による基礎構造

種類	構成要素	概念図	設計および構造上の特徴	施工上の特徴および問題点	構造細目の特徴および問題点	備考
単体基礎	壁杭		<ul style="list-style-type: none"> <li>①壁軸方向の曲げ剛性が高く、剛体変形をする</li> <li>②水平荷重が壁軸方向に卓越する場合、有利</li> <li>③壁の大きさを任意に変更できる</li> <li>④多径間連続桁では有利となる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①壁軸方向が広くなると、結合部が必要</li> <li>②結合部がないため、経済的となる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①フーチングとの結合部</li> <li>②フーチング縁端距離</li> <li>③最小鉄筋量および最大鉄筋径</li> <li>④コンクリート打設時にシートを用いると周面摩擦力は低減</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①</li> <li>1) 鉄道では擁壁に実績あり</li> <li>2) 建築ではかなりある</li> </ul>
		連続基礎		<ul style="list-style-type: none"> <li>①頂版の地震時慣性力は無視できる</li> <li>②仮設工が小さくてすむ</li> <li>③壁の組合せにより任意の平面形状、大きさができ、大型基礎に適する</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①鉄筋籠が重く、大型クレーンが必要</li> <li>②仮設備用敷地が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①継手の構造とそれに伴う剛性評価</li> </ul>
複合基礎	連壁+既製コンクリート杭		<ul style="list-style-type: none"> <li>①頂版の地震時慣性力は無視できる</li> <li>②杭材の品質の信頼性が高い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①杭間の結合方法</li> <li>②コンクリートが固化するので長尺杭には不適</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①継手の評価と設計方法</li> <li>②杭と頂版との結合方法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①既製コンクリート杭(最大寸法70×70cm)</li> <li>②建築ではプレキャスト板を適用した実績あり</li> <li>③設計計算は確立されていない</li> </ul>
	連壁+壁杭		<ul style="list-style-type: none"> <li>①中打ち単独杭の鉛直支持力が期待できる</li> <li>②中打ち単独杭により頂版がうすくなる</li> <li>③頂版の地震時慣性力は無視できる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①鉄筋籠が重く、大型クレーンが必要</li> <li>②仮設備用敷地が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①単独杭と頂版との結合方法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①実績あり(サイロ基礎)</li> <li>②設計計算法は確立されていない</li> </ul>
	連壁+杭		<ul style="list-style-type: none"> <li>①中打ち単独杭の鉛直支持力が期待できる</li> <li>②中打ち単独杭により頂版がうすくなる</li> <li>③頂版の地震時慣性力は無視できる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①2種類の施工機械が必要</li> <li>②鉄筋籠が重く大型クレーンが必要(連壁)</li> <li>③仮設備用敷地が必要(連壁)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①単独杭と頂版との結合方法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①併用効果(鉛直支持力、水平抵抗、曲げ剛性のアップ、応力分担比率等)の定量的評価方法の確立が必要</li> </ul>
	既製杭+連壁		<ul style="list-style-type: none"> <li>①鉛直および水平支持力が大きい連壁は杭頭部のみ結合</li> <li>②頂版の地震時慣性力は無視できる</li> <li>③支持層が深い場合に有利</li> <li>④杭本数を鉛直支持で決定できる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①2種類の施工機械が必要</li> <li>②杭と連壁との結合方法</li> <li>③杭のハンマー打設の場合、環境上問題あり</li> <li>④施工スペースは大きくない</li> <li>⑤地盤貫入性は良好</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①杭と連壁との結合方法および剛性評価</li> <li>②基礎と頂版との結合方法</li> <li>③鋼管杭の場合、防食対策が必要</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①設計計算法は確立されていない</li> </ul>
	場所打ち杭+連壁		<ul style="list-style-type: none"> <li>①鉛直および水平支持力が大きい連壁は杭頭部のみ結合</li> <li>②頂版の地震時慣性力は無視できる</li> <li>③支持層が深い場合に有利</li> <li>④杭本数を鉛直支持で決定できる</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①杭と連壁との結合方法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①杭と連壁との結合方法および剛性評価</li> <li>②杭と頂版との結合方法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①実績あり</li> <li>②設計計算法は確立されていない</li> </ul>
	連壁+既製杭		<ul style="list-style-type: none"> <li>①頂版の地震時慣性力は無視できる</li> <li>②杭材の品質の信頼性が高い</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①コンクリートが固化するので長尺杭には不適</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①杭間を埋めるコンクリートの品質の信頼性</li> <li>②継手の評価と設計方法</li> <li>③杭と頂版との結合方法</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①設計計算法は確立されていない</li> </ul>
基礎	杭頭補強壁		<ul style="list-style-type: none"> <li>①連壁の前面抵抗が期待できる</li> <li>②連壁の側面摩擦力が期待できる</li> <li>③フーチングの地震時慣性力を無視できる</li> <li>④フーチング施工に仮設兼用できる</li> <li>⑤支持層が深く、上部が軟弱層である場合に有利</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①フーチング上載土埋戻し時の連壁上部の処理</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>①連壁とフーチングの一体化</li> </ul>	

相応しくこの壁を橋軸直角方向に配置することにより、橋軸方向の安定計算では「壁幅」が載荷幅となり、橋軸直角方向は「壁厚」となるため、許容変位量は橋軸直角方向に比較して、橋軸方向は数倍大きな値となる。

さらに、荷重が大きくなると、1枚の壁では抵抗できないため、数枚の壁を並べ壁の頭部を連結した、壁基礎とせざるをえない。この形式は、我が国の橋梁基礎としての実績がないため、模型実験・現場試験を実施して設計法を提案し、横浜ベイブリッジと鶴見つばき橋を結ぶ横浜市鶴見区大黒埠頭内高速湾岸線の基礎で施工を終え平成6年12月21日に無事開通した。本基礎形式の主たる特徴は、次のとおりである。

- ① 基礎の抵抗特性がその方向により大きく異なるため、その特性を利用した配置や組合わせ枚数を調整する事により、合理的な設計が可能となる。
- ② 長辺10mまでの壁が1枚で施工でき、壁間の継手を必要としないことから、構造が比較的単純となり、施工の効率化が図れ、また継手がないことから水平断面に弱点を残さない。
- ③ 杭基礎に比べ平面寸法を小さくすることができ都市内高架橋など狭い場所に基礎を建設する場合有利となる。
- ④ 橋軸方向は柔軟性に富み、大きな変位を有効に活用できる基礎であり、橋軸直角方向では、対照的に変位の小さい基礎として設計できる。このため、橋軸直角方向の地震に対して、橋脚間の位相差を小さくすることが可能となり、橋梁全体の安定に優れた基礎となる。

3.2 室内模型実験および現場実物載荷試験結果

実験は室内模型実験と、本基礎形式を採用した大黒埠頭で実物載荷試験を実施し、壁基礎の支持機構について考察した。これらの実験は、面内方向と面外方向の水平支持機構の相違に着目し、室内模型実験(図-1)では砂地盤と粘性土地盤の2種類の地盤を形成して鉛直・水平載荷試験を行い、地盤の相違に関する支持機構を、原位置試験(図-2)では実物と同様の施工により1/2の壁基礎を2基構築し、水平載荷試験を実施して設計荷重レベルにおける支持機構を各々考察した。この研究の結果、明らかになった事柄とこれを反映した設計法の提案は、概略以下のとおりである。

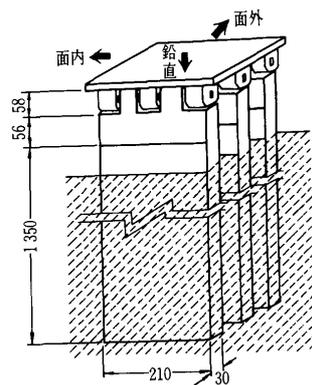


図-1 多壁基礎の模型

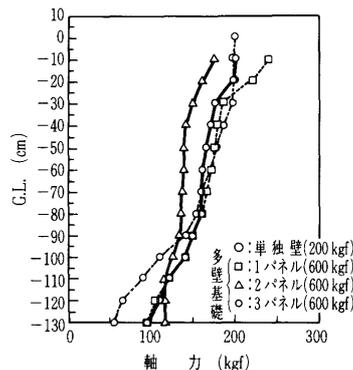


図-4 深度方向の軸力分布 (3T: 多壁基礎)

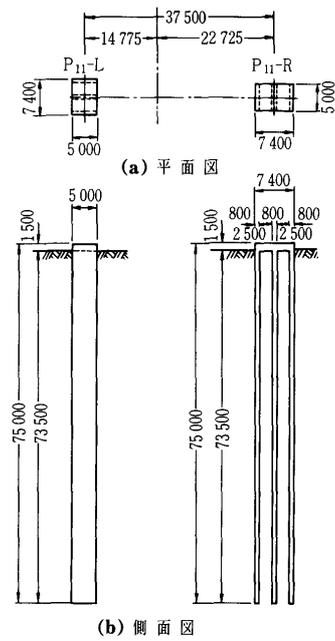


図-2 試験体

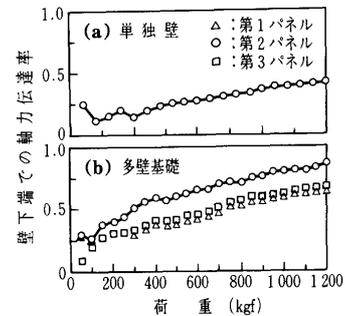


図-3 載荷荷重と軸力伝達率(壁下端)との関係

- ① 鉛直方向の壁基礎(壁間隔3T, T:壁厚)の軸力伝達率は、単独壁(壁1枚の基礎)の約2倍程度大きく先端地盤の支持力分担が大きい支持機構が認められた(図-3)。
- ② 壁間隔3Tの場合、中間壁の周面支持力は両側壁の1/2程度である(図-4)。
- ③ 壁間隔3T程度あれば、設計荷重レベル(350~400tf)における水平方向の杭頭ばね比(面内方向ばね/面外方向ばね)は室内実験と現場試験とは異なるが面内方向は面外方向に対して、土の種類によらず2.5倍程度以上確保できる(図-5)。

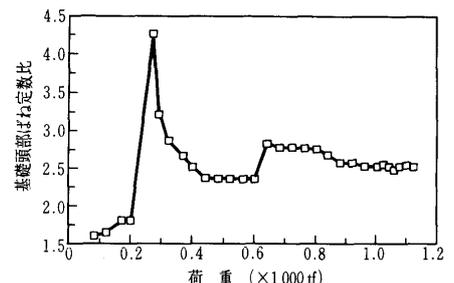


図-5 基礎頭部水平ばね係数比と荷重の関係(現場実物載荷試験)

- ④ 室内実験、現場試験とも面内方向の変形時に中間土のすり抜けは認められず、基礎と一体になって挙動している。
- ⑤ 壁基礎の水平挙動は、道路橋示方書IV下部構造編に示されている林-Changの方法により、推定 $k$ 値と逆算 $k$ 値を用いた弾性解析より、推定 $k$ 値を用いたラーメン計算により地盤の極限抵抗を受働土圧強度（二次元的な地盤抵抗）、あるいは3倍の受働土圧強度（三次元的な地盤抵抗）を考えた弾塑性解析の方が、実験結果を良く反映している（図-6）。ただし弾塑性解析は地盤反力係数 $k$ 値を適切に評価する必要があるが推定精度の誤差は相当鈍い。

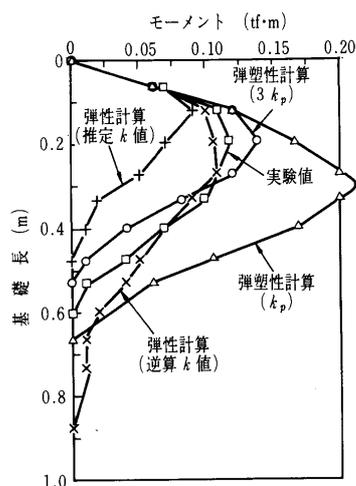


図-6 深さ方向モーメント分布の比較（面外方向）

- ⑥ 受働土圧強度程度を地盤反力度の上限値とすれば、基礎の変位、最大曲げモーメントとも実測に対して十分安全側の評価となる。しかし橋梁形式によっては基礎を軟らかく評価することは、必ずしも安全側とはならないこともあるため、設計に当たっては十分留意する必要がある。

### 3.3 壁基礎の設計の考え方

壁基礎の室内実験と現場実物載荷試験で得られた結果をもとに壁基礎の設計法についてまとめた。

設計は、支持（鉛直・水平支持）、転倒（押込み・引抜き支持）、転倒に対して安定し、基礎頭部の水平変位量は、橋軸方向（壁面外方向）については基礎編、橋軸直角方向（壁面内方向）については壁厚の1%を越えないことを基本とした。

壁基礎は杭基礎に比べ、基礎1枚あたりに周面積が大きいいため、側面と前面（荷重に対して）の水平地盤反力係数を分離して考慮した。前面の地盤反力は前面地盤の圧縮応力度に対する係数であり、側面は側面地盤のせん断応力度に対応する係数を考えた。また基礎全体としては弾性的挙動であっても、砂地盤の地表付近では、局部的に塑性化していることが予想されるため、地盤反力度の側面と前面には上限値を設けることが合理的となる。このため、壁基礎の安定計算は、壁前面と側面そして基

礎底面の水平・せん断・鉛直の4種類のばねを考慮した弾塑性計算により行い、この時壁前面の水平地盤反力度の上限値は受働土圧強度とし、側面の水平方向せん断地盤反力度の上限値は、静止土圧強度から求めるせん断力（砂質地盤）または粘着力（粘性土地盤）とした。壁基礎の底面は、基礎長が長く、基礎の大変形を許していないことから、地盤の弾塑性計算は考慮していない。

鉛直方向に対する壁基礎の支持力評価は、基礎底面地盤の鉛直支持力と基礎周面の摩擦力を考えるが、壁内側の基礎周面の摩擦力は、壁外側の1/2とした。また、水平方向の支持力の分担は、2列目以降の壁の前面抵抗を最前列の壁の1/2とし、通常的设计で考えている壁間隔では、壁間の土のすり抜けは観測されなかったことから、面外方向はケーソンとしての安定計算を行うこととした。

次に、基礎側面の水平方向せん断地盤反力係数は、FEM解析結果より、橋軸方向は基礎前面（壁幅）の水平方向地盤反力係数の30%、橋軸直角方向は基礎前面（壁厚）の水平方向地盤反力係数の10%を用いている。

## 4. あとがき

ここでは、地中連続壁工法で構築可能な基礎構造形式をすべて洗い出し、その中で実現可能な基礎形式として我が国で初めて単体の地中壁を2枚、あるいは3枚平行に打設して、頭部をフーチングで結合した壁基礎を採用した。この報告は、従来の基礎構造物に対する考え方の発想を転換し、あえて基礎を異方性にするにより、橋軸方向は変形しやすくさせて、橋梁下部構造物の軽減を計り、橋軸直角方向は変形しにくくさせて、耐震性を高めようとするものである。すなわち、多径間連続桁に適した基礎構造物を開発することが目的であり、上部構造のみで構造解析が行われている多径間連続桁に、基礎構造物の要因を取り入れようとするものである。

さらに、地下鉄・共同溝など帯状の地下構造物が、既に建設されている幹線街路上などに高架橋を建設する場合には、これをまたいで基礎を構築するため、この壁基礎を採用せざるを得ないことも多々ある。

したがって、今後これらの基礎形式が多くなることが予想されるとともに、異方性の基礎の可能性を探ることからも、壁基礎の支持機構を研究し設計法を提案することにより、新しい基礎形式の開発に対する可能性が高まるものと思ふここにまとめてみた。何かの参考になれば幸いである。

## 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，IV下部構造編，1994。
- 2) 日本道路協会：地中連続壁基礎設計施工指針・同解説，1991。
- 3) 和田・若林・五瀬・馬場：地中多壁基礎の水平載荷試験，第25回土質工学研究発表会，1990。

(原稿受理 1995.5.17)