

[耐震性向上技術]

地盤・基礎・地中構造物の耐震性向上技術

松田 隆
田中 紀和

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では、神戸市内の人工島を中心に激しい液状化現象によって地盤が40~50cm沈下した(Fig. 1) ¹⁾。地震直後の映像では、人工島全体が泥の海に埋まり壊滅的な被害が生じたかのようにであった。特に、これまで液状化強度が高いと考えられていたマサ土が液状化したことに驚きがあった。しかし、その後の調査によると、地盤改良区域での沈下はほとんどなく、特に、住居地域での被害や耐震設計がなされた杭基礎に関しては変状が無かったことが明らかになった ²⁾。

基礎構造物に関しては、六甲ライナーの島側先端の橋脚や阪神高速道湾岸線西宮港橋の側橋・橋脚が周辺地盤の側方流動で移動したと考えられる被害が見られた ¹⁾。また、周辺地盤が液状化してないと判断できる地域の杭基礎構造物の杭頭部で破損が原因と見られる被害があった(Photo 1)。しかし、その多くは古い鉄筋コンクリート製打込み杭で打設時のひび割れ等の可能性もあり、鋼管杭や最新の耐震設計がなされた基礎構造物の被害はほとんどなかった。

一方、地下構造物に関しては、一部の地下鉄駅舎で原型を留めないような被害が生じ(Photo 2)、これまで、耐震性が優れているとされていただけに、「安全神話の崩壊」とまで報じられた。しかし、地下鉄に関しては、全延長に対して甚大な被害区間はわずかであり、三宮駅周辺の地下街など、同じ地区の地上構造物は壊滅的な被害が生じたのに対して、軽微なクラックが幾つかの箇所で見られたのに留まった。

これらの事実から、地盤および地盤の変形の影響が大きい基礎および地中構造物の耐震性は、現状の設計検討技術をもってすれば確保できる見通しが高いと考えられる。また、今後の直下型地震などのL2レベルの強地震 ³⁾ に対しても、適切な耐震補強を施すことで、機能を保持す

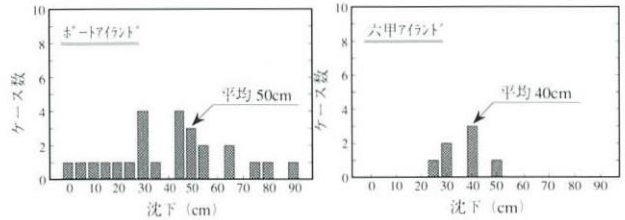


Fig. 1 人工島の地盤沈下量
Ground Subsidence of Man-made Island in Kobe

原理	大林組保有技術
土の性質改良	密度増大 サントコンパクションパイル 工法 ロッドコンパクション 工法 動圧密工法
	固結 深層(浅層)混合処理工法 事前混合処理工法
	粒度の改善 置換工法
地変中形応条件・改良	地下水位低下 ディープウェル工法 ウェルポイント工法
	排水促進 グラベルドレーン工法 過剰間隙水圧消散工法
	せん断変形の TOFT工法 地中連続壁工法

Fig. 2 液状化対策工法
Countermeasures for Liquefaction



Photo 1 基礎の破損例
Damage to Pile Foundation



Photo 2 地下鉄駅舎の被害状況
Severe Damaged Underground
Subway Station

ることが可能と思われる。ただし、前述したようにこれまでの経験したことの無い被害の現実を反映させ、先端の地震時挙動予測手法から効果的な耐震補強技術の適用が必要と考えられる。

ここでは、地盤の液状化予測および対策技術の特徴を述べ、基礎構造あるいは地中構造物の耐震性評価手法と高耐震化技術について報告する。

2. 地盤の液状化対策技術と斜面の耐震安定化技術

液状化対策工法は、液状化発生メカニズムから Fig.2 に示されている工法が用いられている⁴⁾。このうち、神戸市内の人工島で実施された地盤改良区域を工法ごとに分類したものを Fig.3 に示す¹⁾。これらの工法での液状化対策としての効果を、地盤沈下量で示したのが Fig.4 である。この図より、サンドドレーンなどの排水促進系の工法よりサンドコンパクションなどの締め固め系の工法の効果が明瞭に現れている。Fig.5 はサンドコンパクションパイルによる地盤改良の置換率と増加N値の関係およびN値と地盤沈下の関係を示している。これより、置換率とN値

の増加および地盤沈下の減少は明瞭であり、今後の改良に有効であることが示された。この点、浅層の耐震地盤改良に動圧密工法は有効と考えられ、経済性を考慮したとき特に有利となる。しかし、これらの締め固め系の地盤改良は振動を利用することから、既設構造物周辺での実施は難しい。前述したように、今回の地震ではこれまでの検討

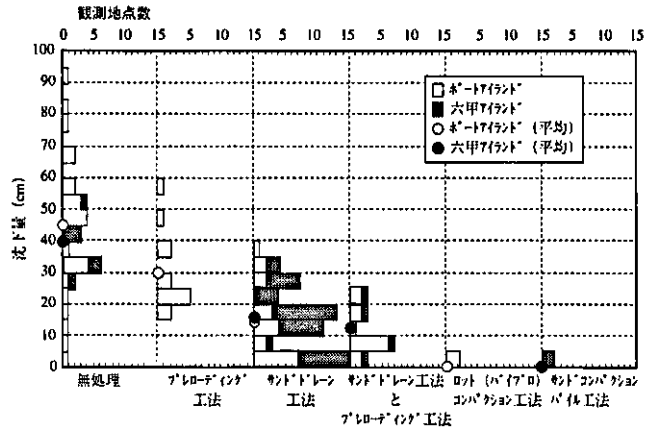


Fig.4 地盤改良地域と沈下量の関係
Relationship between Soils Improvement and Ground Subsidence

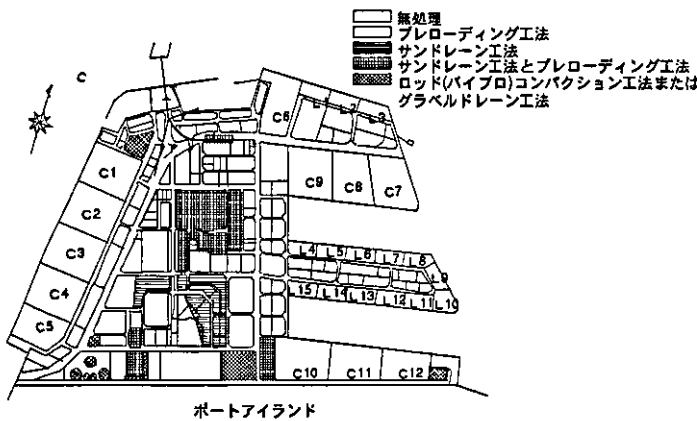


Fig.3 地盤改良地域
Soil Improvement Zone

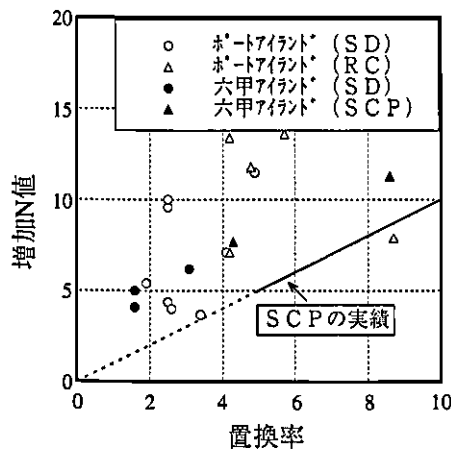
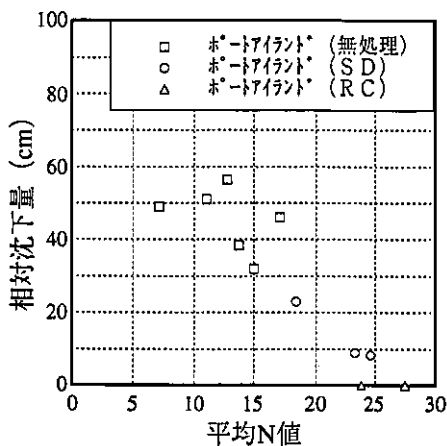
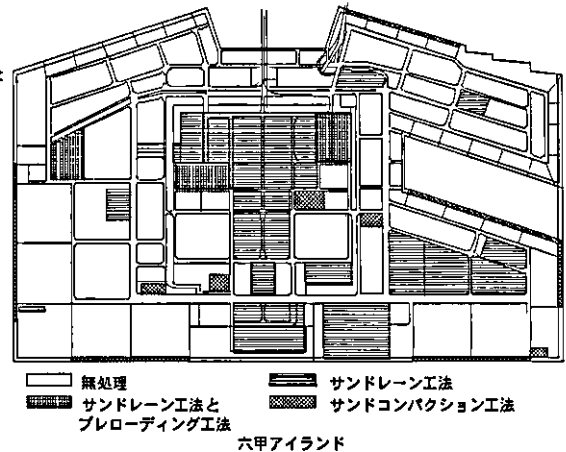


Fig.5 地盤沈下とN値の関係
Relationship between N-Value and Ground Subsidence

範囲、例えば平均粒径2mm以上の土での液状化の検討や設計地震動の割増など、既設構造物周辺地盤においても液状化対策を改めて行う必要もでてくる。

既設構造物周辺では、工事進行に伴う振動や外力の変化による悪影響などを低減させる必要がある。この点、深層混合処理工法は低振動低騒音であり、目標とする地盤の強度の達成への信頼度が非常に高い。TOFT工法は、建設省と大林組を始めとする民間4社とで共同開発した、液状化対策を主眼に深層混合処理工法を適用したものである。Fig. 6にTOFT工法のイメージを示すが、この工法が当初から既設構造物の液状化対策を目標として開発してきたことから構造物間など制約条件が厳しい場所での施工が可能である。この工法の特徴は、地盤改良の効率を高めるため、格子状改良を基本としている。すなわち、格子間の地盤は囲われることでせん断変形が抑制され液状化させず、大きな格子ブロックの間の地盤も改良体全体で囲うことでせん断変形を抑制することを基本としている。

事前混合処理工法は、東京湾横断道木更津人工島のシールド発進部の人工埋立土の液状化対策として採用された。この工法の施工手順をFig.7に示す。この工法の特徴は、強度の期待できる地盤の品質を管理できることである。今回の港湾構造物の復旧にもこの事前工法が採用されている。この場合の補強のメカニズムとしては背面土砂の土圧低減になる。

3. 基礎構造の高耐震化技術

地震時には杭型式およびケーソン型式の基礎構造物は上部工慣性力の反力を受けるとともに、地盤の変形の影響を受ける。これらの基礎を採用する地盤は、一般に直接基礎を採用する地盤に比べ軟弱であることが多く、地震時の増幅率も高いと考えられる。このような地盤で、地震力が大きくなった場合、地盤の非線形性によってせん断剛性は低下し減衰が大きくなるため、地表面すなわち上部構造物の応答加速度は地震力の増大に比例しては大きくならない。これに対して、地盤の変位振幅およびせん断ひずみは大きくなり、基礎構造物にも大きな応力が生じる可能性がある。すなわち、地震力が大きくなると、上部工の反力が大きく影響する杭頭部や基礎上部での耐震安定性の他、地中部での損傷の可能性が生じる。

杭頭部の耐震補強の原理としては、その部分の強度あるいは靱性を上げることと、上部工からの反力を断ち切ることに分けられる。強度あるいは靱性の増加としては、橋脚脚柱部に採用する鋼板巻き補強やコンクリート鋼管の合成構造が挙げられる。ただし、既設の基礎に対しての適用は困難であり、上部工反力を免震装置で分断する工法が有利となる。Photo 3に免震ゴム支承を用いた例⁷⁾を示す。この場合、桁部分からのエネルギーは免震ゴムの減衰で吸収される仕組みになり、下部工には大きな力は作用しないものと考えられる。

地中部の基礎の耐震性を向上させる工法としては、連続地中壁を利用した連壁剛体基礎や継手無しタイプの

ローズファンデーション工法がある (Fig. 8)。これらの連壁基礎に高強度・高品位コンクリートを用いることも可能であり、高い強度特性が期待できる。特に、地震時に作用するせん断力に抵抗できる耐力の確保が可能である。

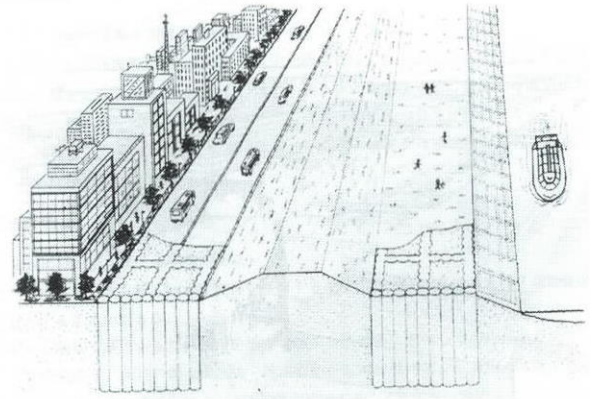


Fig.6 TOFT工法
TOFT Method of Soils Improvement

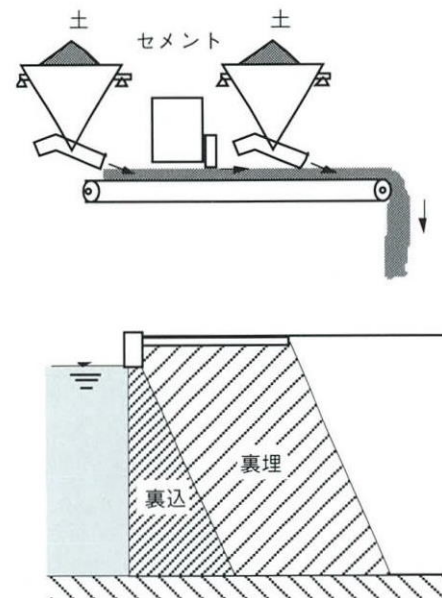


Fig.7 事前混合処理工法
Pre-Mixing Method of Soils Improvement

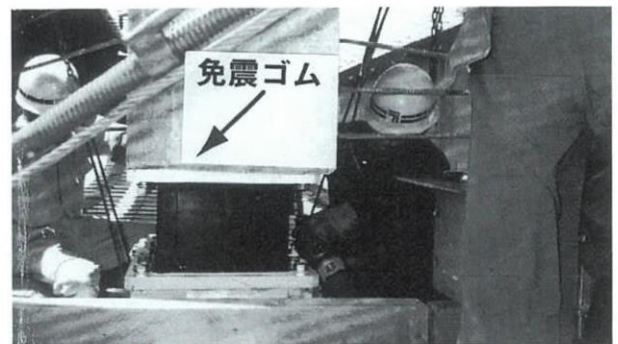
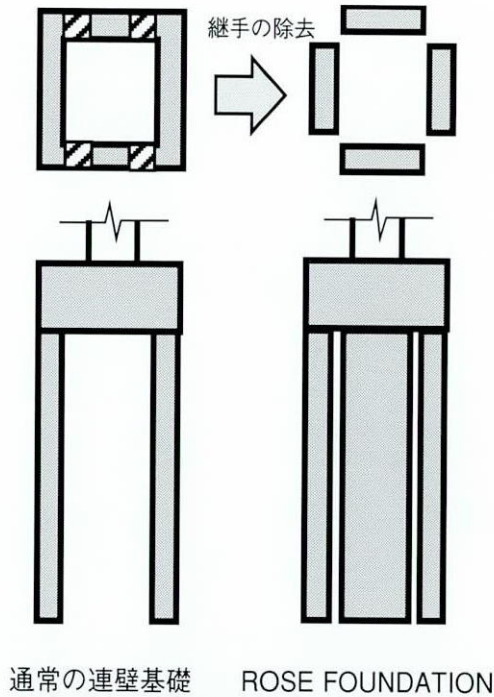


Photo 3 免震橋
Isolated Bridge



通常の連壁基礎 ROSE FOUNDATION

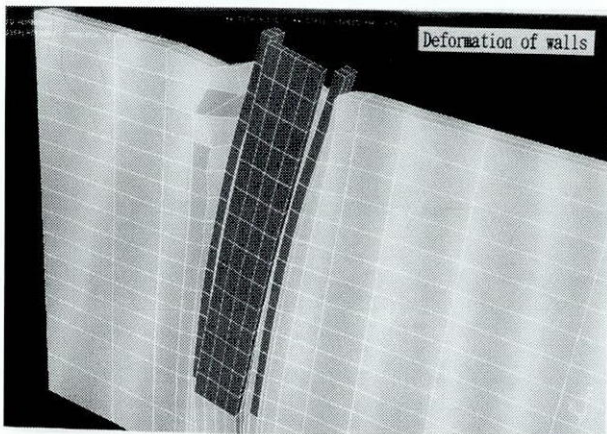


Fig.8 連壁基礎とローズファンデーション
Wall Foundation Method and Rose Foundation

ローズファンデーション工法は継手に係わる施工過程がないため工期短縮が図れているうえに、直行2方向の配列によって地震動に抵抗する。

護岸近くで液状化による側方流動が原因し、ケーソン式の基礎が変状した。このような変状に対して、深い基礎の場合特に、背面から水平方向に固定しておくことが重要となる。このような水平方向の構造物の固定にVSL-J1永久アンカー工法は有効と考えられる (Fig. 9)。

4. 地中構造物の高耐震化技術

地下構造物は地盤の変形が支配的であり、応答変位法など周辺地盤の変位を考慮した設計法が確立している。今後L2レベルの地震において問題となるのは地盤変位の予測方法とその結果を反映しての耐震補強である。前者の地盤の応答変位の予測については、本報告書の土木構造物の耐震設計の動向と対応技術を参照されたい。

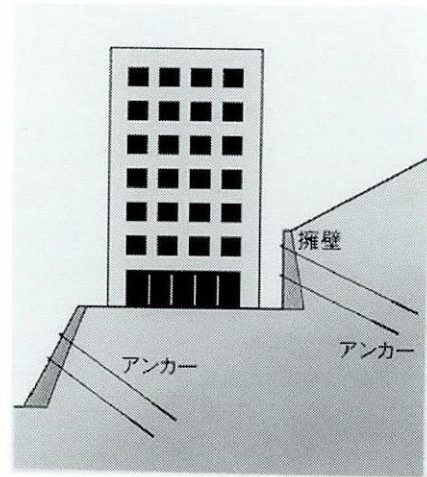


Fig.9 VSL-J1 永久アンカー
VSL-J1 Soil Anker

地下構造物の耐震補強工法は、橋脚の耐震補強で述べた鋼板巻き補強や炭素繊維補強などの方法が同じように採用できる。同様に、地下構造物の免震化も実施が可能である。本報告書の地下鉄駅舎に関する地震応答解析結果で述べたように、L2レベルの地震において柱構造のせん断耐力が不足する可能性が生じる。このとき、柱をピン結合とすることで発生断面力は大きく低減できる。柱とスラブをピン結合にするための措置として免震ゴムの採用が考えられる。この柱の免震化に関しては既設の柱にも適用が可能である。

5. おわりに

兵庫県南部地震での地盤の変状や基礎構造物を含む地中構造物の被害実態を踏まえ、土木学会・日本建築学会・地盤工学会や関係各省庁では、指針の見直しや提言を発し、耐震設計と対策工・高耐震化の重要性を明確に打ち出している。これに対応して、特徴的な工法に関して概要を述べた。これらの工法は、新設のみならず既設構造物の耐震性向上にも大きく寄与するものであり、事前の耐震評価手法により現状の耐震性を定量的に把握した上で、合理的に適用して行くべきと思われる。

参考文献

- 1) Masanori Hamada, Ryoji Isoyama, Kazue Wakamatsu : Liquefaction-Induced Ground Displacement and its Related Damage to Lifeline Facilities, Soils and Foundations, Special Issue, p.81~97, (1996)
- 2) Susumu Yasuda, Kenji Ishihara, Kenji Harada, Naotoshi Shinkawa : Effect of Soil Improvement on Ground Subsidence Due to Liquefaction, Soils and Foundations, Special Issue, p.99~107, (1996)
- 3) 土木学会：土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」, (1996)
- 4) 土質工学会編著：液状化対策の調査・設計から施工まで, p.140, (1993)