

兵庫県南部地震による東灘下水処理場の被害

広島大学	佐々木 康*	東京大学	古関潤一**
建設省	塩路勝久***	下水道事業団	○松井 清****
神戸市	近藤嘉宏*****	(株)日水コン	馬淵敏治*****

兵庫県南部地震によって、他の公共施設と同様に、下水道施設でも大きな被害が発生している。なかでも神戸市東灘区の埋立地に位置する東灘処理場の被害は甚大で、長期間にわたって処理機能が低下した。被害の状況は、処理場境界の護岸が海側に約2mせり出し、背後地が最大約2m沈下を起しており、目視および反射波による杭の損傷調査で、エアレーションタンク・最終沈殿池の杭は杭中間深度15m程度の砂層と粘土層の境界で多く破損していることがわかった。以上の状況から、本処理場の被害の主たる原因は、砂層の液状化とそれに伴う側方流動と考えられた。このメカニズムを解明するために、二次元の動的FEM解析、およびその結果を用いた梁・パネモデル計算を実施した。検討の結果、現実に起こったと思われる現象のメカニズムをある程度明らかにすることができた。

1. はじめに

兵庫県南部地震によって、兵庫県・大阪府・京都府で稼働中の102下水処理場の内43処理場で被害が発生した。被害を生じた施設は、建物、沈殿池等の土木施設及びポンプ等の機械設備にわたり、その結果一時的に処理機能を失った処理場は8処理場であった。なかでも神戸市東灘区に位置する東灘処理場の被害は甚大で、一時期隣接する運河を仮設の沈殿池にするなど、長期間にわたって処理機能が低下した。(図-1参照)

埋立地内の護岸近傍に位置する同処理場では、運河と接する護岸が約2m運河にせり出し、敷地の沈

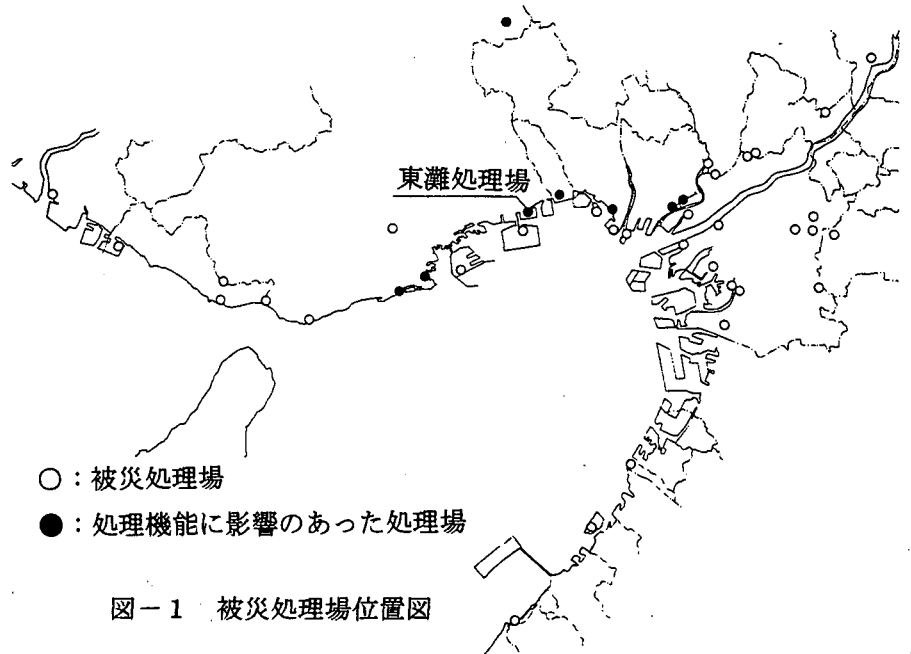


図-1 被災処理場位置図

下量も局所的には2m近くに達した。このため最終沈殿池、エアレーションタンクの継目に大きな目開きが生じ、また接続管路も破断したため、地下管廊(配管内蔵および管理用通路)が浸水し、処理機能を失ったものである。ここでは、被害の状況を調査・分析し、その状況を再現すべく数値解析を試みた。

キーワード：兵庫県南部地震、下水処理場、被害調査、液状化、液状化に伴う側方流動、メカニズム解明

* 広島大学工学部第四類教授	0824-24-7783
** 東京大学生産技術研究所第五部助教授	03-3402-6231
*** 建設省都市局下水道部下水企画課課長補佐	03-3580-4311
**** 日本下水道事業団計画部設計役	03-5572-1855
***** 神戸市下水道局次長	078-241-6540
***** (株)日水コン大阪下水道事業部事業部長	06-398-1613

2. 東灘処理場の被害状況調査

(1) 被害状況と特徴

図-2に東灘処理場の施設配置と被害状況の概要を示す。同処理場は図のように魚崎運河を挟んだ埋立地盤上に建設されたもので、被害もこの運河を中

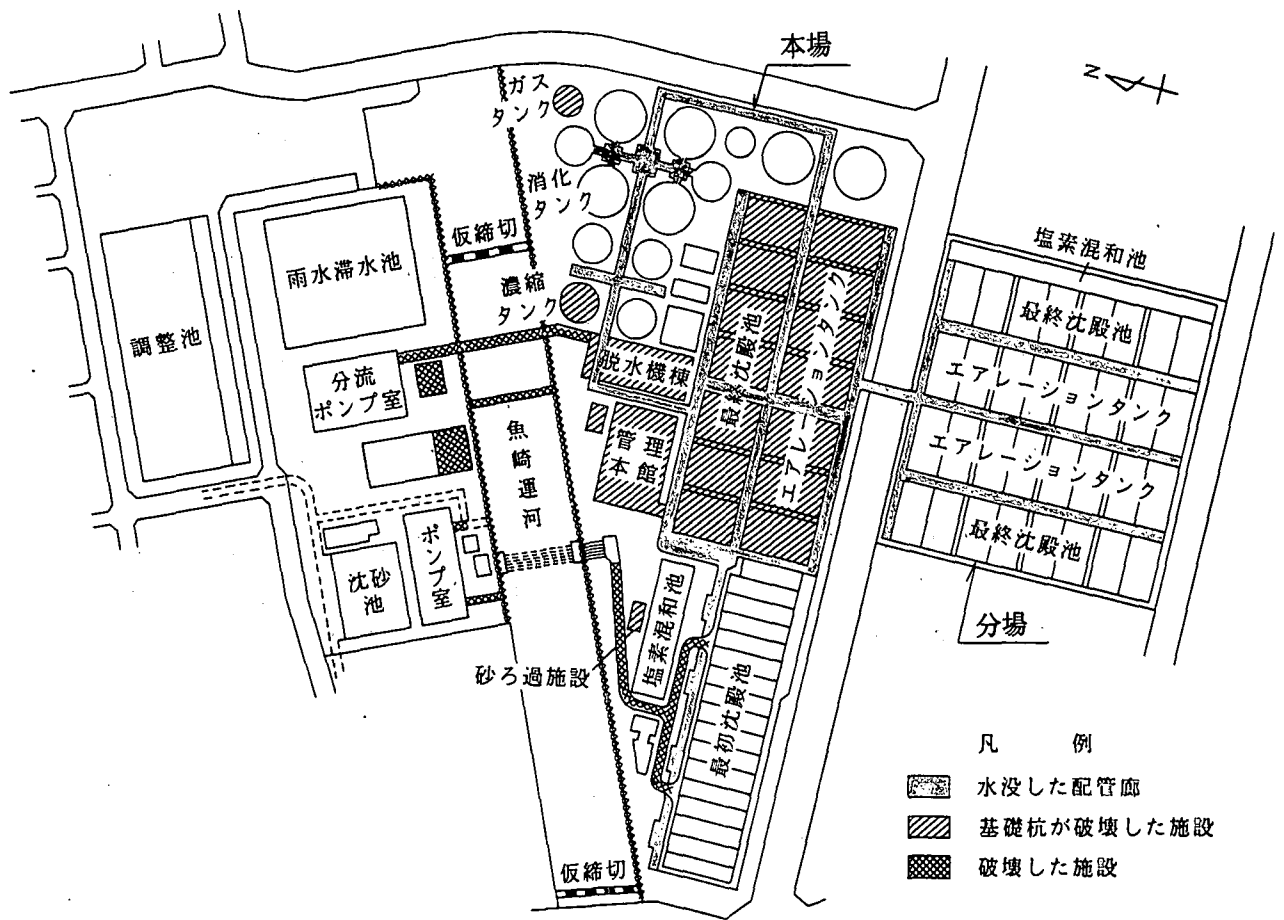


図-2 東灘処理場の被害状況

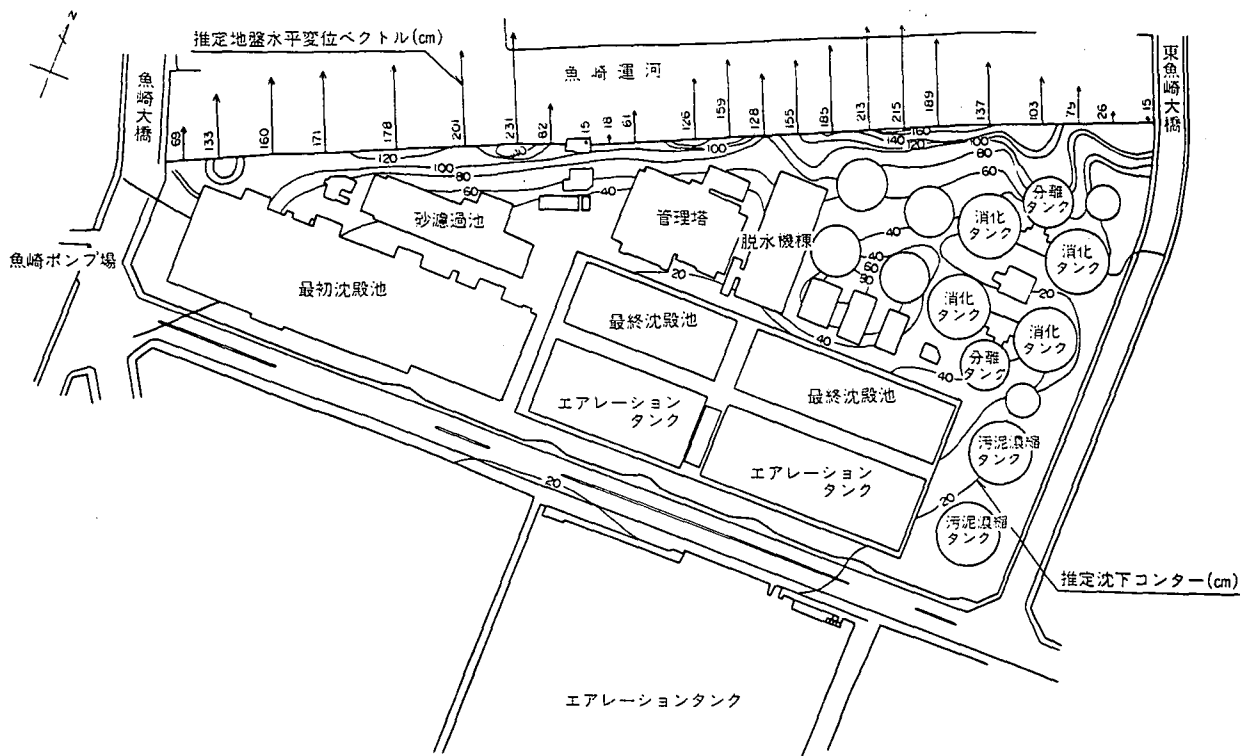


図-3 推定地盤変位量分布

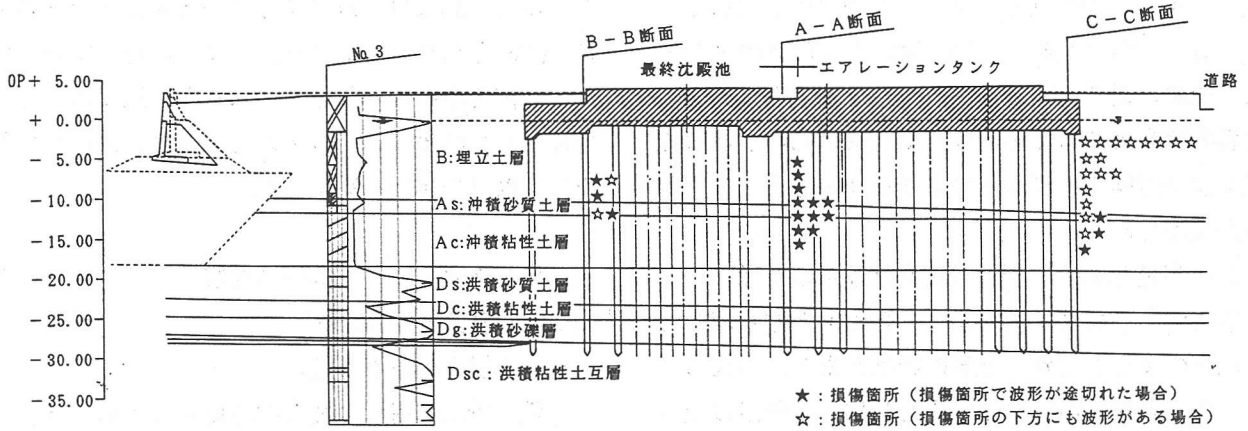


図-4 地盤断面および反射波による杭の損傷調査結果

心に起こっている。運河の護岸が前面にせり出し沈下することにより、その近傍の施設が破壊、もしくは杭が破壊する状況に至っている。ただ、水処理施設についてみると、最初沈殿池はほとんど被害がなかったのに対して、エアレーションタンク・最終沈殿池では多くの杭が破損したという特徴が見られている。いずれの構造物も杭に支持された基礎構造を有していたが、被害のなかった最初沈殿池の方が池の底面が深い構造となっている。

図-3は、東灘処理場のうち、本場についてみた地盤沈下および地盤・護岸の水平移動量の分布を示したものである（これらは基本的に測量・目視調査によったものである）。地盤の変位に着目すると、護岸が最大2m強前面にせり出し、地盤沈下はその背後で最大となり、埋立地中央に向かって減少する傾向を示している。また地盤沈下は埋立地内奥部でも10~20cm程度生じており、部分的に陥没状の沈下も起こしている。これらの状況から、処理場の位置する埋立地では、埋立土が液状化しそれに伴って起こった側方流動により、護岸がせり出したものと推定される。

(2) 地盤状況と杭の破壊状況調査

被災後に実施されたボーリング調査で、現地の地盤状況は地表から、埋土(B)および沖積砂(As)の砂質土層が約15m、沖積粘性土(Ac)が約7mの厚さでほぼ水平に堆積しており、それ以深は支持層たり得る洪積砂(Ds)、粘土(Dc)、砂礫(Dg)の互層となっている。なお、埋土は概ねまさ土とみられる。また、護岸の構造はL形擁壁タイプで構造物下は置換工法により基礎処理されている(図-4参照)。

基礎杭の被害調査には、試堀が可能な施設(管理棟、脱水機棟、旧砂ろ過池、加圧浮上濃縮槽等)については目視調査を行い、地下水面下で試堀の困難な施設(水処理施設・新砂ろ過池等)については、反射波による杭の損傷調査(Sonic Integrity Test)を実施した。

図-5は目視調査の1例であるが、護岸近傍の杭は地盤が運河側に動くことにより、杭頭もしくはその直下でせん断破壊を起こしている状況が伺える。反射波による杭の損傷調査は、施設の形状から全ての杭では実施不能のため、可能な位置(例えば管廊下など)で実施した。その結果、水処理施設では最初沈殿池の杭が概ね健全であったのに対し、エアレーションタンク・最終沈殿池の杭は、総調査本数に対し、約30%の割合で破壊もしくは破損に至っていることが判明した。図-4はエアレーションタンク・最終沈殿池における杭損傷の位置と深さを示している。これより、大半の杭の損傷は杭中間の砂質土層

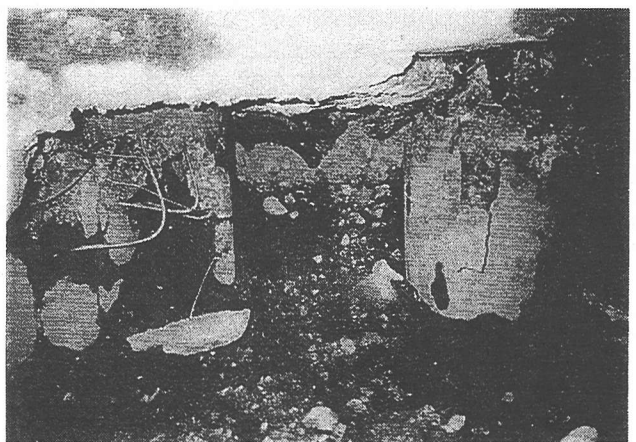


図-5 杭の破壊例(管理本館)

(B, As) と粘性土層 (Ac) の境界付近で起きていることがわかる。一部、護岸とは反対の道路側で、杭頭付近の損傷が卓越しているが、道路高は処理場敷地高よりも2m程度低く、部分的に上部水処理施設が道路側に倒れ込むような変状を起こしたものと推定される。

(3) 基礎と地盤に関わる変状と被害の特徴

以上のような被災状況から、基礎と地盤に関しては以下のような変状、被害の特徴がまとめられる。

- ① 護岸は前面に2m程せり出し、背面の地盤は護岸直近で最大2m程度沈下し、埋立地内部に向かって双曲線状に減少するものの、かなり内奥部まで0とはならない。
- ② 護岸近傍の建造物の杭は杭頭付近で破壊していることが目視で確認された。なおこれらの建造物の根入れは比較的浅く、管理本館で0.5m程度である。
- ③ 水処理施設のうち、エアレーションタンク・最終沈殿池の杭は、杭中間の砂質土層と粘性土層の境界付近で破壊もしくは破損している。
- ④ 同じ水処理施設でも最初沈殿池の杭は概ね健全であった。

なお、最初沈殿池の池構造根入れは約7mと、エアレーションタンク・最終沈殿池の約4.5mに比べ深い。

以上の特徴から、当地に起こった被害は主に地盤

の液状化、およびそれに伴う側方流動に起因するものと推測された。特にほぼ同仕様の杭基礎でありながら、被害の明暗を分けた両水処理施設には、当地で起こった現象のメカニズムを解く鍵があるものとみて、以下の解析を実施した。

3. 杭の破壊メカニズムの推定解析

(1) 二次元動的FEM解析

a) 解析目的および条件

①地震時に作用した最大加速度を求めること、②地震による液状化の範囲を求めること、③杭破壊のモードについて検討することを目的として、最初沈殿池とエアレーションタンク・最終沈殿池の2断面で2次元の等価線形化法による動的FEM解析を実施した。地盤の動的ポアソン比および初期せん断係数はボーリング調査時に実施したPS検層から設定し、非線形特性 ($G/G_0 \sim \gamma$ 、 $h \sim \gamma$ 曲線) は既存資料^{1)~4)}を参考に設定した。なお構造物物性に関しては、断面奥行単位幅当りの等価剛性にて評価した。表-1に解析に用いた地盤の定数を示す。なお動的解析に用いる入力波形は、神戸海洋気象台記録の水平加速度(NS方向)を用いるものとした。図-6に解析モデルの1例を示す。

b) 解析結果

解析の結果、最大加速度はAc層下面まで増加し、

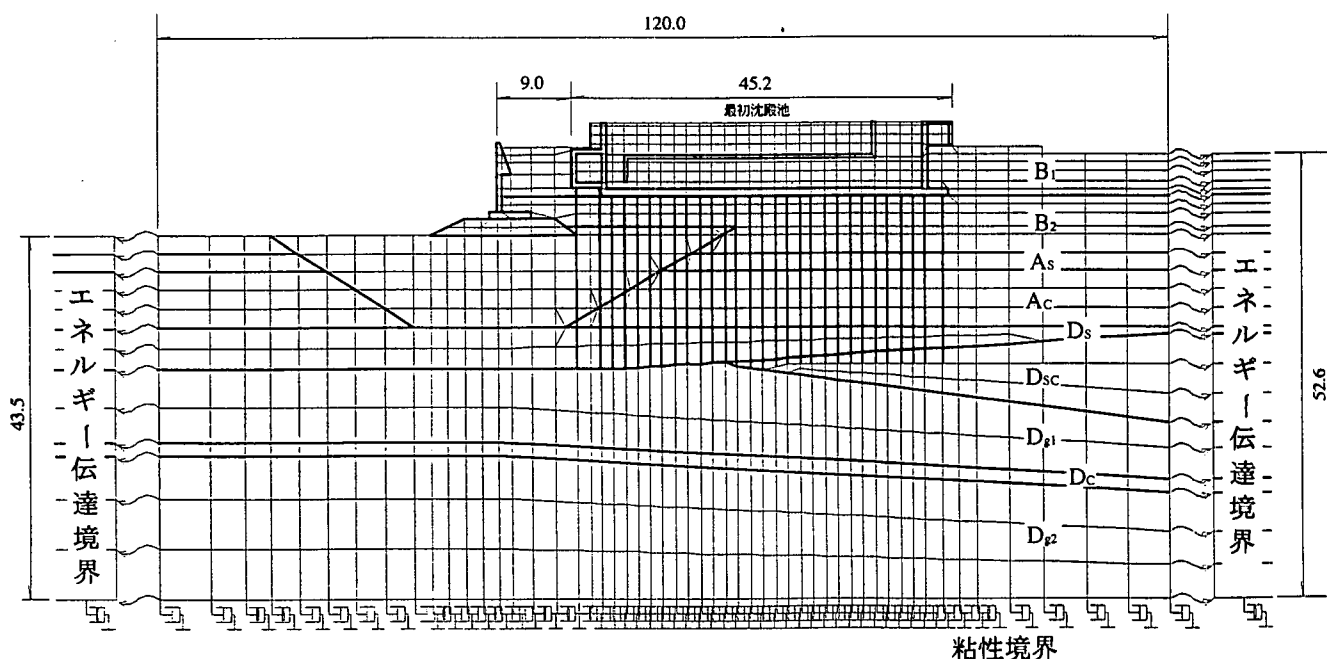


図-6 二次元動的解析モデル例

表-1 地盤の解析諸定数

材料番号	地盤種類	単位体積重量 (tf/m ³)	動的ポアソン比	初期せん断 弾性係数 Go(tf/m ²)
1	B ₁ :まさ土	2.00	0.49	3800
2	B ₂ :まさ土	2.10	0.49	4170
3	A _s :沖積砂	2.15	0.49	6550
4	A _c :沖積粘土	1.65	0.49	3320
5	D _{s,c} :洪積砂(含粘土)	2.00	0.49	9210
6	D _{g1} :洪積砂礫	2.25	0.49	26070
7	D _c :洪積砂	1.90	0.49	12510
8	D _{g2} :洪積砂礫	2.25	0.49	26070

用が考えられる。そこで地震発生から終息に至る時間経過を、杭が破壊に至る可能性のある4つのモードに集約し、それぞれのモードの試算から求められる破壊モードと実際の破壊モードを比較して、破壊メカニズムを検討した。検討したモードを図-7に示す。

梁・パネモデルにおいて、地震時慣性力は杭頭の水平力として取扱い、液状化は地盤

Ac, As, B層で減少し、地表付近で若干増加する傾向を示した。杭頭部での応答は平均380galであった。また解析結果を用いたF_L値(道路橋示方書においてKs=αmax/gとした)によれば、B, Asの砂質土層は全領域で液状化するという判定結果が得られた。

また、杭の変形モードについては、杭頭付近に最大のモーメントが生ずる結果となり、実際の破損状況を再現し得なかった。これは当然のことながら、動的FEM解析では液状化に伴う側方流動といった大変形、残留変位は取扱えないため、手法的な限界と考えられた。そこで、本解析で得られた最大水平加速度は380gal、砂質土層は全領域で液状化という結果を用いて、以下の梁・パネモデルによる検討を行うものとした。

(2) 梁・パネモデルによるメカニズムの推定

a) 検討の手順および条件

被災当時に杭に作用した外的影響としては、杭頭部へ作用する慣性力に加えて、液状化に伴う水平地盤反力の減少、ならびに側方流動に伴う流動圧の作

反力係数の低減(低減率β)として計算に反映するものとした。側方流動については強制変位と流動圧の2通りの入力方法が考えられ、また分布形状についても矩形、台形、三角形といった形状が考えられる。これらの点についてはさらに検討が必要であるが、本検討では土被圧に準じた三角形分布の流動圧を基本として、流動圧の大きさ(係数α:図-7参照)を変化させるものとした。即ち図-7の4つのモードのうち、杭中間で杭が破壊するモードを選定すると共に、エアレーションタンク・最終沈殿池の杭が壊れて、最初沈殿池の杭が壊れないα、βを求め、メカニズムを定量的にも明らかにしようとしたものである。図-8に検討の基本定数をまとめて示す。なお以下の項目を検討の前提条件とした。

- ① 検討は終局耐力検討条件法とし、その極限曲げモーメントはJISA 5335-1979でのPC杭のInteraction Curveより求めた。
- ② 検討震度は、動的解析より得られる380galより、k=380/980=0.39とした。

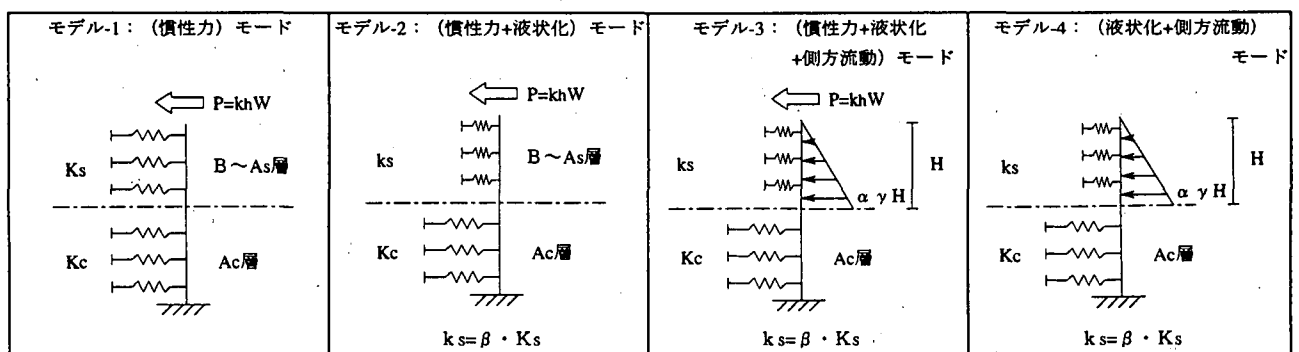


図-7 梁パネモデルでの検討モード

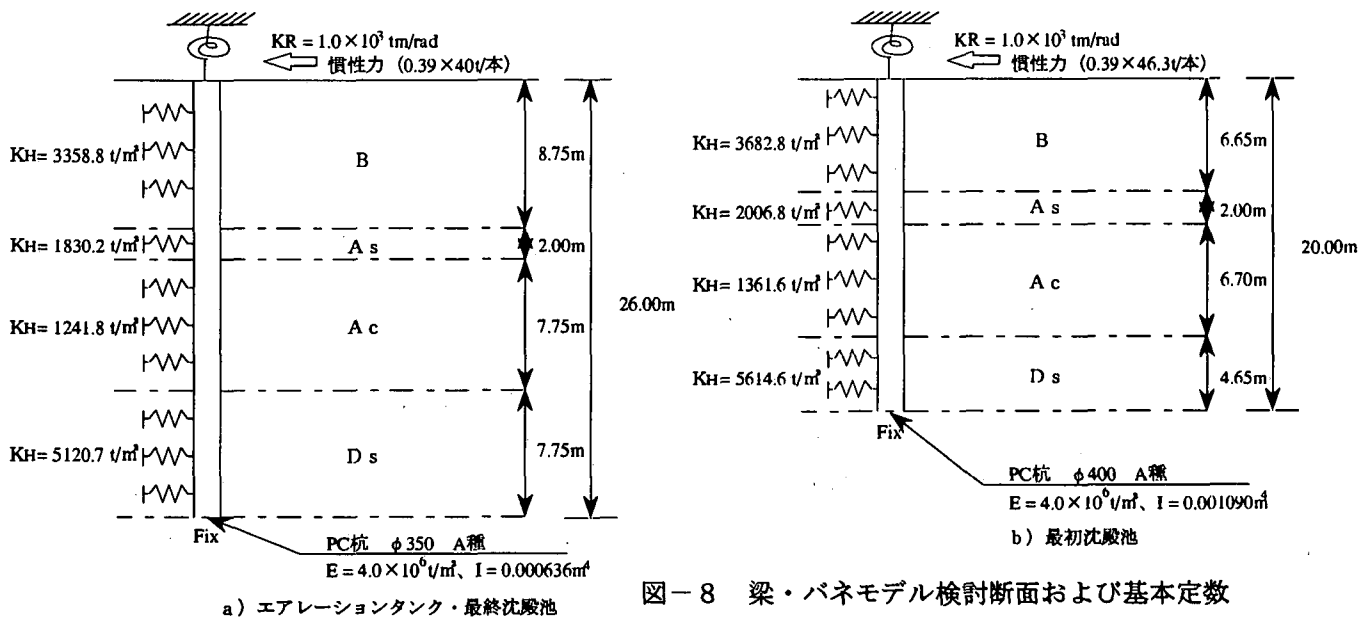


図-8 梁・バネモデル検断断面および基本定数

- ③ 事前の検討より杭頭は回転バネ支承 ($K_r = 1 \times 10^3 \text{ tm/rad}$)⁵⁾ 杭先端は固定条件とした。
- ④ 側方流動圧は便宜的に単位幅 (奥行き 1m) 当たりの土圧として係数 α を算定した。実際の杭が $\phi = 0.35\text{m}$ である場合には、 $(1.0/0.35)$ 倍の流動圧が杭に作用することになる。

b) 検討結果

エアレーションタンク・最終沈殿池の計算例として、各モードにおける変位とモーメントの分布図を図-9に示す。各々のモードでパラメータを変化させてもモーメント分布は相似的に変化するのみで、最大値を生じる位置は変化しない。したがって、エアレーションタンク・最終沈殿池の杭が、杭中間で破壊している事実と考え合わせれば、破壊に至ったモードはモデル-3もしくは4によるものしかなく、本処理場被災の主たる原因は地盤の液状化に伴う側

方流動ということができる。また α 、 β のパラメータについては、以下のような知見が得られた。

- ① モデル-2でエアレーションタンク・最終沈殿池は地盤反力の低下率 $\beta = 1/20$ 、最初沈殿池は $\beta = 1/50$ で杭頭が破壊に至る。両施設の杭頭はほぼ健全であることから、当地の地盤は液状化したものの、地盤反力の低下率 β は $1/20$ 以上であったと推定される。
- ② モデル-3で仮に地盤反力の低下率を $\beta = 1/10$ と設定して、側方流動圧を作用させるとエアレーションタンク最終沈殿池は、 $\alpha = 0.6$ で、最初沈殿池は $\alpha = 1.05$ で破壊に至る。(図-10参照)したがって、現実に起こった現象を考え合わせ $\phi = 350 \text{ mm}$ の杭幅を考慮すると、当地で起こった側方流動の流動圧は土圧係数換算で $k = 1.7 \sim 3.0$ 程度であった

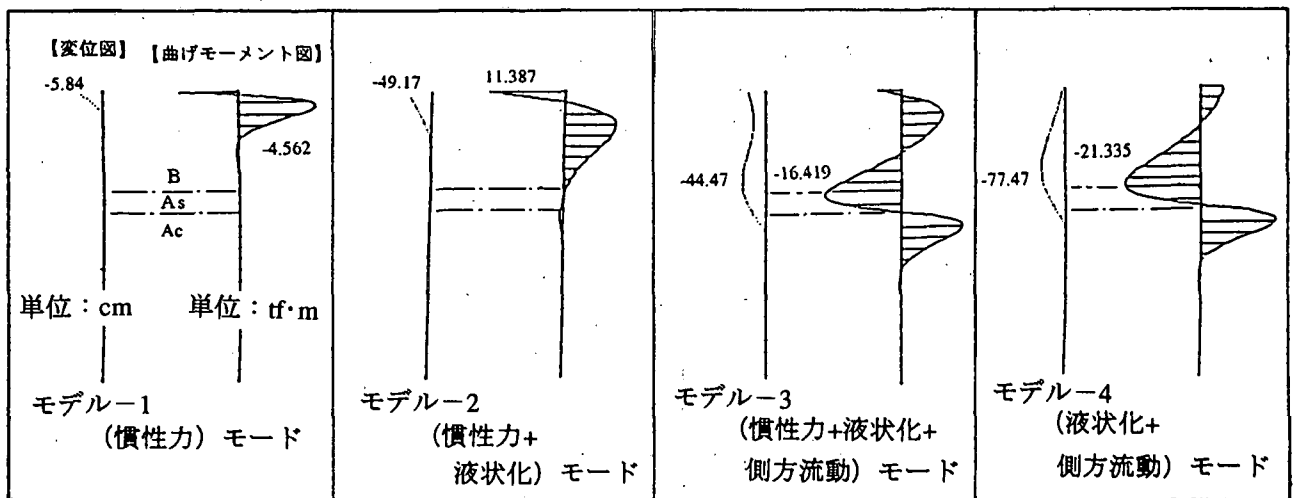


図-9 各モード毎の変位・モーメント分布図例

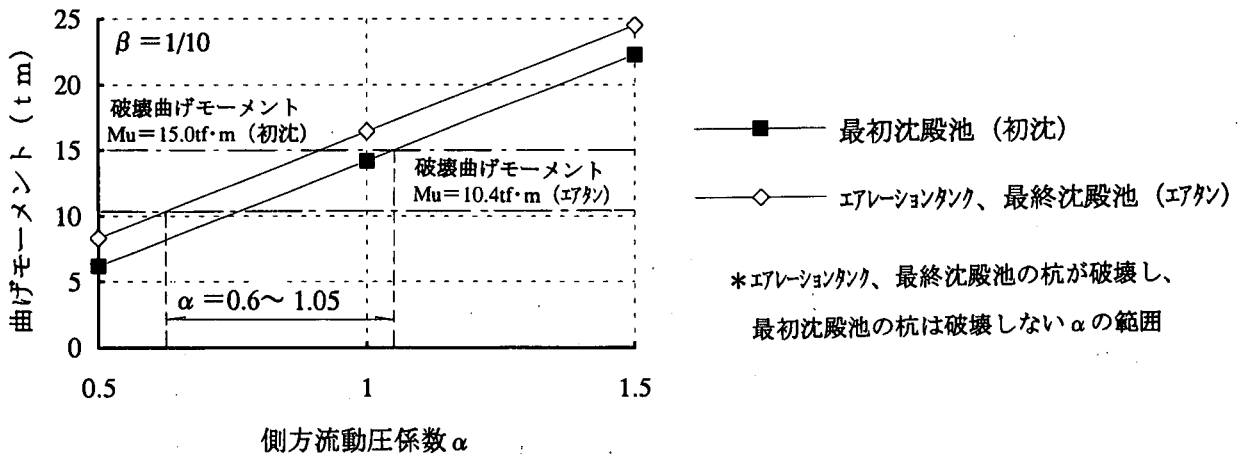


図-10 側方流動圧係数 α と発生曲げモーメントの関係

(モデル3：慣性力+液状化+側方流動)

ものと推定される。

- ③ モデル-4では、上記と同様の検討で、 $k = 1.9 \sim 2.6$ 程度の値が得られる。

4. 今後の課題

今回、兵庫県南部地震において被害を受けた東灘下水処理場について、様々な角度からの調査および、いくつかの解析・計算手法を用いて、地震時に当地で起こった現象をある程度明らかにできたかと思う。特に梁・バネモデル計算法に関しては、今後いろいろな施設で行なわれるであろう耐震診断等を念頭において、簡易手法の確立を目指した1ステップととらえている。その面からみて、現状では流動圧の深度方向分布の検討、②最大流動圧発生時期およびその大きさに関する検討、③液状化に伴う側方流動対策の設計手法の確立などが、設計指針策定に向けての課題ととらえ、今後静的なFEM解析等を応用して、検討を進める予定である。

最後に、今回我々は兵庫県南部地震という希有の直下型大地震を経験した。尊い犠牲の上に成り立った地震に対する教訓を、技術者の立場からさらに確かなるものとするためにも、関係各機関が協力してデータ・情報を提供しあい、議論が深められんことを切に希望する次第である。

なお、本報告をまとめるにあたっては、日本工営(株)都市土木部寺田俊朗氏にご協力を頂いた。ここに謝意を表する次第である。

【参考文献】

- 1) 岩崎、龍岡、高木：地盤の動的変形特性に関する実験的研究(II)，土木研究所報告台153号，1980年3月
- 2) 岩崎、常田、吉田：沖積粘性土の動的変形・強度特性について，第15回土質工学研究発表会，1980年6月
- 3) 横田、龍岡：不攪乱洪積粘土のせん断変形係数について，土木学会第32下位年次学術講演概要集第3部1980年
- 4) 関西における地下空間の活用と技術，土木学会関西支部1994年8月
- 5) 杭基礎設計便覧，(社)日本道路協会，1986年1月

Damage to Higashi-Nada Sewerage Treatment Plant by the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake.

Yasushi sasaki, Junichi Koseki

Katsuhisa Shioji, Kiyoshi Matsui

Yoshihiro Kondo, Toshiharu Mabuchi

The 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake inflicted significant damage on public facilities, and the sewerage system was no exception. The damage to a treatment plant located on reclaimed land in Higashi-Nada Ward, Kobe, was particularly severe, and treatment performance was impeded over a long term. Here the coastal revetment bordering the treatment plant was thrust approximately 2 meters seawards, the land behind subsided by a maximum of 2 meters, and, according to visual inspection and sonic integrity testing, many piles of the aeration tank and the final sedimentation tank were fractured at the bedding-plane between the sandy and clayey layers. Judging from this condition, the main cause of damage to the treatment plant was thought to be lateral spread of foundation ground induced by the liquefaction of sandy.