

液状化を考慮した基礎構造物設計上の問題点

や
矢は
作かなめ
枢*わ
和だ
田かつ
克や
哉**

1. まえがき

昭和39年6月に発生した新潟地震は、信濃川沿いの土木構造物に大きな被害をもたらしたが、なかでも昭和大橋の落橋は、当時まだ新しい橋であったためもあって多大の関心を集めた。この落橋の原因のひとつに、ゆるい飽和砂の液状化が多く識者より指摘され、橋リョウなどの基礎の設計者に大きな衝撃を与えた。というのは、ゆるい飽和砂がある大きさの加速度を繰り返し受けると、有効応力が減少しついにはその支持力を失う「砂の液状化」あるいは「砂の流動化」という言葉で知られ、2, 3の教科書に記載されていたが当時、液状化を考慮して基礎を設計する方法はほとんどなされていなかったからである。むしろ地表近くにゆるくとも砂層があれば、チュウ積の粘性土よりは N 値や横方向地盤反力係数 K 値が通常大きく得られるため、設計者は基礎の大きさを小さく設計していたのが大かたの実状ではなかったろうか。その後発生した十勝沖地震、あるいは遠く関東地震においても、砂の液状化による被害が報告され、また知らされるにつれ、液状化の恐ろしさが一般技術者に大いに認識されることとなった。

このような実状を踏まえて、昭和46年に制定された「道路橋耐震設計指針」¹⁾(以下、協会指針という) (日本道路協会)では、「耐震計算上支持力を無視する土層」の規定の第1項には、液状化する飽和砂質土層に関する条文が明確化された。この条文については次節で触れるが、実際の設計にあたっては、条文の運用の点で種々問題が生じてきた。その一番大きな点は、液状化する場合としない場合では、支持力が0か100%とかということになり、基礎の工費に及ぼす影響がきわめて大きいことがあげられよう。

首都高速道路公団では、協会指針をさらにきめ細かく合理的に運用するため過去3年にわたって液状化の研究委員会(委員長、建設省土木研究所、栗林栄一氏)を設置し研究してきた。研究成果については、委員会としてまだ結論は出ていないので、一貫した内容の報告は別の機会にゆずり、ここでは研究の表面的な概要と基礎設計上の問題点について触れることにする。

2. 協会指針の概要と設計に適用する上での問題点

基礎構造物設計の対象となる地盤が液状化するか否かの判定は、道路橋の場合、つぎの条文を適用している。協会指針では、流動化という文字をあてているが、ここでは液状化と直して述べる。

(1) 液状化する砂質土層

現地盤面から深さ10mより浅いところにある地表面より連続した飽和砂質土層は、現位置における標準貫入試験の N 値が10以下、均等係数が6以下でかつ粒径加積曲線の D_{20} が0.04~0.5mmの区間にあるときに液状化するものとし、耐震計算上支持力を無視する土層として扱う。なお D_{20} が上記区間以外でも0.004~1.2mmの間にあるものは液状化の可能性があるので注意を要する。ここでの深さ、 N 値および液状化の判定は既往の資料などを参考にして決めるのがよい。また特に検討を加えた場合はこの条項によらずともよい。

(2) 粘性土層およびシルト質土層

現地盤面から深さ3m以内にある粘性土層およびシルト質土層で、一軸圧縮試験または原位置試験より推定される圧縮強度が0.2kg/cm²以下のごく軟弱な土層の支持力は耐震計算上無視する。

(3) 支持力を無視した土層重量の取扱い

支持力を無視した土層の重量は、それ以下の地盤に負載重量として働くものとする。

以上が協会指針での液状化の判定規準である。(2)の粘性土に対する条文は砂の液状化とは異質な現象であるが、基礎の設計をする場合には支持力を無視しなければならない点でゆるい飽和砂の場合と同じである。ただし、この条文にも規定されているように地表面から3m以内とあり、実際の設計では(2)の規定に触れて基礎の大きさが極端に大きくなったり小さくなったりはしない。というのは、土木構造物の基礎は陸上であれば水中であれば、道路管理上あるいは河川管理上の土カブリ(大体2m程度以上)を必要とし、必然的に現地盤面から3m近くの深さに位置するからである。

基礎を設計する上で設計者がいろいろとまよい苦慮する点は、(1)の条文を適用する場合である。

通常、道路構造物の設計では道路の路線方向に何mごと

* 首都高速道路公団浦安工事事務所 監督役

** // 工務部設計技術課

か、あるいは各橋脚位置で地質調査を行なうが、そのとき、ある橋脚位置では N 値、均等係数、 D_{20} などがすべて条文の規定どおり液状化する範囲にあり、20~30mしか離れていない隣の橋脚では、液状化を示すある指標、たとえば N 値が12~15程度あり、その他の均等係数とか粒径加積曲線の形や D_{20} なども完全に協会指針の条文に触れた場合、この橋脚を液状化しないものとして設計して良いかどうか判断にまよう場合がある。図-1は液状化判定のための調査の一例である。このような調査によって基礎を設計するわけであるが、協会指針を単純に適用できる場合は少なく、土質資料の微妙な解釈によって個人的な差が液状化か否かの判断に出ることにより、基礎の大きさに影響を及ぼし、設計者にとって液状化の問題はかなりの負担になっているといえよう。

液状化を設計にとり入れるむずかしさは、上記のような液状化の判定を設計対象地盤にどう与えるかと同時に、現在の基礎の耐震設計法にあると思われる。液状化の判定に関する研究はこれまで多くの学者によって発表され、設計指針にまとめられる段階まで進んでいるように思えるが、液状化を考慮した基礎の設計法についての文献は現在のところ少ない。地盤だけの液状化の研究でも種々問題があり、基礎に対する影響の研究はこれからの研究に待たねばならないと思われる。首都高速道路公団における研究委員会でも基礎に対する設計法まで検討することはできなかったのが実状である。以後の節で触れる事項は協会指針のより合理的な運用方法と、基礎の設計上の問題点(主に経済比較)についてである。

3. 構造物設計上の問題点

液状化する土層内の道路構造物は大別すると

- (1) 橋脚構造
- (2) 擁壁構造
- (3) トンネル構造

に分けられる。これらの構造物設計条件として、液状化の要素を取り入れる場合、支持力に関する条件と、作用力に関する条件が考えられる。協会指針では、液状化する土層の支持力を無視する。すなわち、土の粘着力(c)、および内部摩擦角(ϕ)を0と考え、作用力としては考えないものと規定しているが、設計の対象となる構造物の種類により種々の問題点が生ずる。

3.1 土圧を計算しない構造物

(1) 設計方法

クイ支持された橋脚構造物のように土圧を計算しない構造物が、液状化する土層内にある場合、図-2の計算モデルが考えられる。すなわち、液状化する土層の K 値を0と考え、耐震計算上の地盤面を液状化する土層の下面におき、その面(設計地盤面)より突出されたクイとして計算し、そのときの設計条件に対して安全に設計することになる。

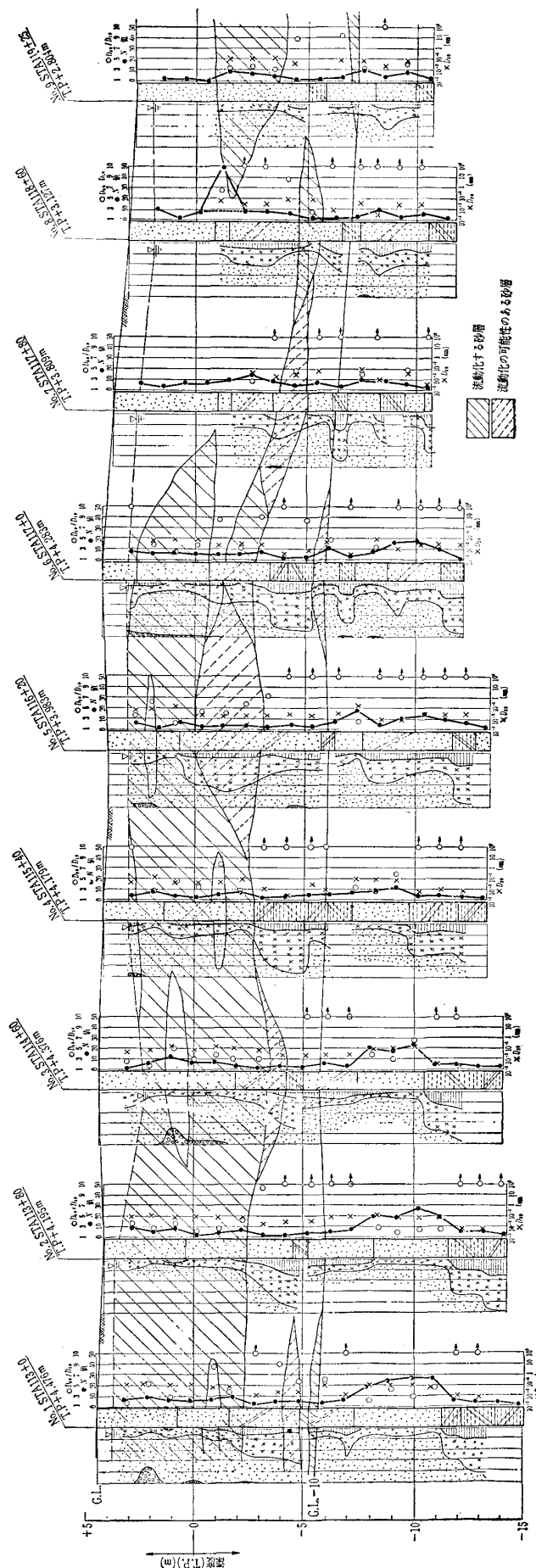


図-1 地質調査による液状化する土層の判定例



流動化する砂層



流動化の可能性のある砂層

下 表 の 凡 例

流動化判定条件

○	各流動化する条件内に入るもの
—	各流動化する条件内に入らないもの
0.004	20%粒径が0.04mmから0.5mmまでの範囲に入らないが0.004mmから1.2mmの範囲に入るもの

判 定

○	流動化するもの(砂層)
△	流動化の可能性のあるもの(砂層)
○※	軟弱な粘性土層で耐震計算上支持力を無視するもの

No.1

深 度 (m)	流 動 化 判 定 条 件				判 定
	N<10	D ₆₀ /D ₁₀ <6	0.04%<D ₂₀ <0.5% _m	S _r =100	
1.00~	○	○	○	○	○
2.00~	○	○	○	○	○
3.00~	○	○	○	○	○
4.00~	○	○	○	○	○
5.00~	○	—	○	○	×
6.00~	○	○	○	○	○
7.00~	○	—	0.004~1.2	○	×
8.00~	○	—	0.004~1.2	○	×
9.00~	○	○	0.004~1.2	○	△
10.00~	○	○	○	○	○

No.2

深 度 (m)	流 動 化 判 定 条 件				判 定
	N<10	D ₆₀ /D ₁₀ <6	0.04%<D ₂₀ <0.5% _m	S _r =100	
1.00~	○	○	○	○	○
2.00~	○	○	○	○	○
3.00~	○	○	○	○	○
4.00~	○	○	○	○	○
5.00~	○	○	○	○	○
6.00~	○	○	○	○	○
7.00~	○	—	0.004~1.2	○	×
8.00~	○	—	0.004~1.2	○	×
9.00~	○	—	○	○	×
10.00~	○	—	○	○	×

No.3

深 度 (m)	流 動 化 判 定 条 件				判 定
	N<10	D ₆₀ /D ₁₀ <6	0.04%<D ₂₀ <0.5% _m	S _r =100	
1.00~	○	○	○	—	×
2.00~	○	○	○	○	○
3.00~	—	○	○	○	×
4.00~	○	○	○	○	○
5.00~	○	○	○	○	○
6.00~	○	○	○	○	○
7.00~	○	○	○	○	○
8.00~	○	○	0.004~1.2	○	△
9.00~	○	—	0.004~1.2	○	×
10.00~	○	—	0.004~1.2	○	×

No.4

深 度 (m)	流 動 化 判 定 条 件				判 定
	N<10	D ₆₀ /D ₁₀ <6	0.04%<D ₂₀ <0.5% _m	S _r =100	
1.00~	○	—	○	○	×
2.00~	○	○	○	○	○
3.00~	○	○	○	○	○
4.00~	○	○	○	○	○
5.00~	○	—	○	○	×
6.00~	○	○	○	○	○
7.00~	○	—	0.004~1.2	○	×
8.00~	○	—	—	○	×
9.00~	○	—	0.004~1.2	○	×
10.00~	○	—	0.004~1.2	○	×

No.5

深 度 (m)	流 動 化 判 定 条 件				判 定
	N<10	D ₆₀ /D ₁₀ <6	0.04%<D ₂₀ <0.5% _m	S _r =100	
1.00~	○	○	○	○	○
2.00~	○	—	○	○	×
3.00~	○	○	○	○	○
4.00~	○	○	0.004~1.2	○	△
5.00~	○	○	0.004~1.2	○	△
6.00~	○	○	0.004~1.2	○	△
7.00~	○	—	0.004~1.2	○	×
8.00~	○	—	0.004~1.2	○	×
9.00~	○	—	0.004~1.2	○	×
10.00~	○	—	○	○	×

No.6

深 度 (m)	流 動 化 判 定 条 件				判 定
	N<10	D ₆₀ /D ₁₀ <6	0.04%<D ₂₀ <0.5% _m	S _r =100	
1.00~	○	—	—	○	×
2.00~	○	○	○	○	○
3.00~	○	○	○	○	○
4.00~	○	○	○	○	○
5.00~	○	—	0.004~1.2	○	×
6.00~	○	○	○	○	○
7.00~	○	—	0.004~1.2	○	×
8.00~	○	—	0.004~1.2	○	×
9.00~	○	—	0.004~1.2	○	×
10.00~	○	○	0.004~1.2	○	△

No.7

深 度 (m)	流 動 化 判 定 条 件				判 定
	N<10	D ₆₀ /D ₁₀ <6	0.04%<D ₂₀ <0.5% _m	S _r =100	
1.00~	○	—	—	○	○※
2.00~	○	—	—	○	○※
3.00~	○	—	—	○	○※
4.00~	○	—	—	○	○※
5.00~	○	—	—	○	○※
6.00~	—	○	○	○	×
7.00~	○	—	0.004~1.2	○	×
8.00~	○	○	0.004~1.2	○	△
9.00~	○	—	○	○	×
10.00~	○	—	—	○	×

No.8

深 度 (m)	流 動 化 判 定 条 件				判 定
	N<10	D ₆₀ /D ₁₀ <6	0.04%<D ₂₀ <0.5% _m	S _r =100	
1.00~	○	—	—	○	○※
2.00~	○	—	—	○	○※
3.00~	○	—	—	○	○※
4.00~	—	—	○	○	×
5.00~	○	—	0.004~1.2	○	×
6.00~	○	—	0.004~1.2	○	×
7.00~	○	—	○	○	×
8.00~	○	○	○	○	○
9.00~	○	—	0.004~1.2	○	×
10.00~	○	—	○	○	×

No.9

深 度 (m)	流 動 化 判 定 条 件				判 定
	N<10	D ₆₀ /D ₁₀ <6	0.04%<D ₂₀ <0.5% _m	S _r =100	
1.00~	○	—	—	○	○※
2.00~	○	—	—	○	○※
3.00~	○	—	—	○	○※
4.00~	○	○	○	○	○
5.00~	○	○	○	○	○
6.00~	○	○	○	○	○
7.00~	○	—	○	○	×
8.00~	○	—	—	○	×
9.00~	○	—	○	○	×
10.00~	○	○	○	○	○

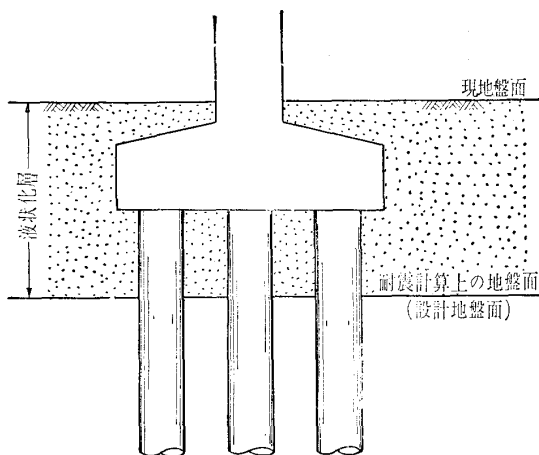


図-2 計算モデル

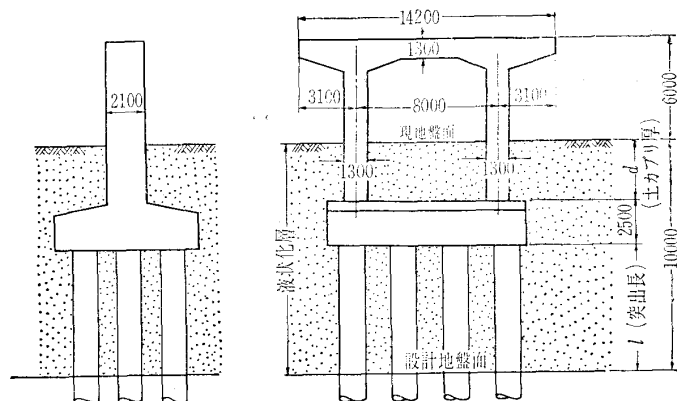
首都高速道路公団の構造物のように比較的重要度の高い構造物、上部構造に与える影響の大きい基礎構造物では、設計での実用性も配慮して、クイ天端での変位量を規定している²⁾。このため液状化を考慮して設計する場合も、設計地盤面での変位量が設計許容変位量に入るようクイ本数を配置し、設計地盤面より突出されたクイの変位、クイ本体の応力、支持力、が設計条件を満たす必要がある。しかし、このとき作用させる水平力としては、協会指針で規定されている設計震度をそのまま設計地盤面より上の構造物重量に乘以、そのときの液状化層の K 値を0として取り扱っている。これを現象的にみると、地震発生後震度に対応する加速度のときに、全層完全液状化状態となり、支持力が期待できない状態を想定していることになる。しかし、種々の実験、実際の被害データによると、地震発生後ある時間を経過した後、液状化現象が地表よりはじまり深さ方向に進行し、全層完全液状化状態を経た後に、砂粒子の再配列が深い位置より浅い位置へと進み、砂層はより安定な状態になるものと考えられる。

これらのことを考えると、全層が完全に支持力を失っている時間はごく短く、そのときの加速度も、地震発生後の最大加速度に比較して小さな値であろうと推定できるが、定量的な値は明らかにはされていない。このため現在では、安全側の設計として前述の設計方法がとられている。

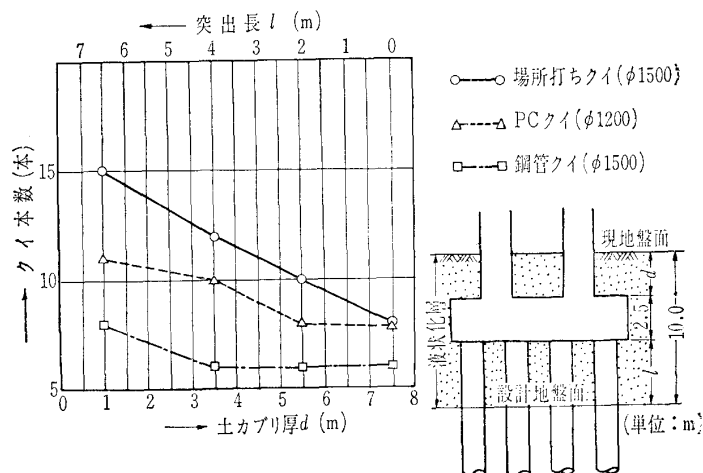
(2) フーチングの位置およびクイの種類

液状化が予想される土層に橋脚を計画する場合、フーチングをどの深さに位置させるか、またクイの種類として何を選定するかが問題となる。

この比較のため、図-3に示す標準橋脚を考え、フーチング上端面を現地盤面より、1.0m、3.5m、5.5m、7.5mの位置に変化させ、各々のケースについて、場所打ちグイ（ $\phi 1500$ ）、P Cグイ（ $\phi 1200$ ）、鋼管グイ（ $\phi 1500$ ）の各種クイを、設計変位量（ここでは、場所打ちグイ 5mm、P Cグイ、鋼管グイ 10mm）、その他許容値におさまるように計算した。計算された必要本数を図-4にまとめた。



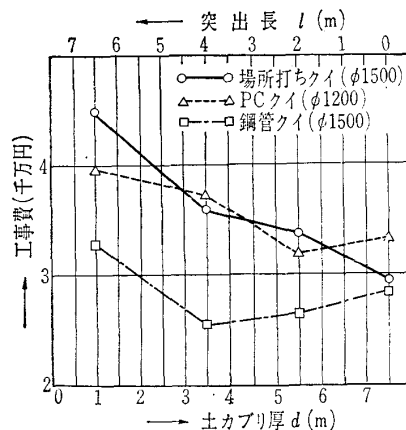
圖一-3 標準橋脚断面圖



図一4 フーチング位置とクイ本数

これによると場所打ちグイでは、地震時水平力による設計地盤面での変位量制限でクイ本数が決まっているため、土カブリ厚に反比例してクイ本数は少なくなる傾向を示している。逆の見方をすれば、設計地盤面よりの突出し長さに比例してクイ本数は多くなっている。PCグイ、鋼管グイも同じ傾向ではあるが、場所打ちグイほど顕著な傾向はみられない。

つぎに各ケースにおける全体工事費を図—5に整理した。



図—5 フーチング位置と工事費（昭和49年3月単価）

設計計算上では、フーチングの位置をできるだけ液状化する土層の下面（設計地盤面）に近づけることが、構造的には経済的であると思われるが、現地盤面よりフーチング位置を深くすればするほどフーチング構築に伴う仮設費がかさみ、全体工事費としては必ずしも経済的とはならない。すなわち、図—5からもわかるとおり、基礎グイ費、仮設費、本土工費を含めた全体工事費は、フーチング上面より現地盤面までの距離（土カブリ厚：3.5 m）と、フーチング下面より設計地盤面までの距離（突出し長：4.0 m）がほぼ同じとなる位置にフーチングを置き、鋼管グイ $\phi 1500$ を使用した場合が最も経済的な組合わせとなる。

3.2 土圧を受ける構造物

(1) 設計方法

液状化が予想される地盤に、盛土（図—6（a））、あるいは切土（図—6（b））をして偏土圧を受ける構造物を設計する場合、支持力を無視する。すなわち c 、 ϕ を 0 と考え、作用力には考えないとする思想を設計に適用する場合、まず支持力を無視する立場から橋脚と同様に、クイを設計地盤面より突出したクイとして設計する。つぎに作用力を考える場合の考え方として、

(a) 砂層の地震時土圧（内部摩擦力を考える）

(b) c 、 ϕ を 0 とし、土圧係数 1 の土圧

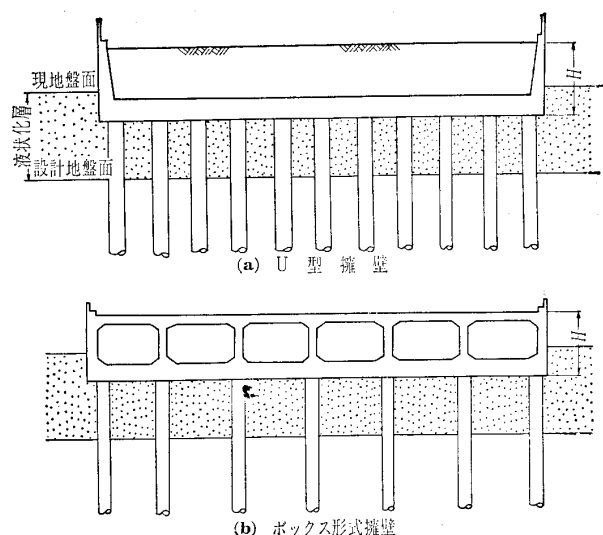
(c) 水と砂が 1 体となった泥水の動水圧的土圧

などが考えられる。もし、液状化による作用力を考えないとするならば、(a) による土圧にて設計すべきであろうが、現実には、(b)(c) による力が作用する可能性が大きい。

それよりむしろ、地震力により、砂層のせん断力が失われ、泥水状態となり、偏土圧による作用力のため、土が側方流動的に流れを起こし、その力がクイおよび構造物に作用すると考えると、構造上の解析は現在ではほとんど不可能であるし、図—6 に示す構造形式では、成り立たないものと思われる。

(2) 構造形式と経済性

前述のとおり、液状化する土層内での自立形式擁壁では液状化による土の動きに対して、抵抗できないと考えると偏土圧を受け、液状化に対して安定している構造物として図—7 に示す構造形式があげられる。その 1 つは U 型擁壁



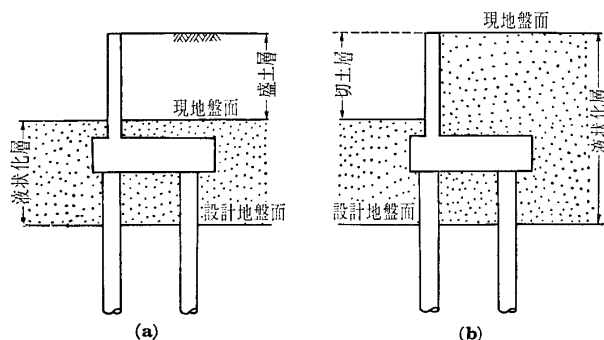
図—7 構造形式

であり、他はボックス形式の擁壁である。いずれの構造も液状化時に予想される土の動きに対し、比較的安定した構造形式である。すなわち、砂層のせん断力が失われてもクイは突出しグイとして、U型およびボックス形式擁壁をささえ、作用力も両側から対称に作用し、大きな変動は起こさないものと推定される。ただこのとき、砂層が泥水状態となり比重の軽い構造は浮力を受け、浮き上がることが想像されるため、クイ頭部をく体内に十分定着し、この浮き上がる力に抵抗するように設計しなければならない。

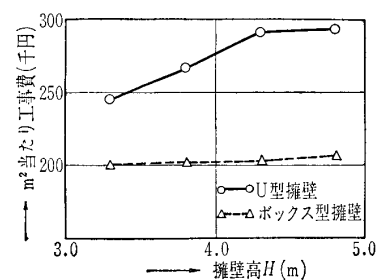
また、この 2 形式の経済性は図—8 に整理したとおり、擁壁の高さに関係なくボックス形式が経済的になる。これは、U型擁壁内の土砂重量が地震時水平力として働くため、中空断面であるボックス形式との間に、その差分だけのクイ本数が増加し、経済的断面としてボックス形式擁壁構造が経済的となる。しかし、前述のとおり液状化時に浮き上がる力は、U型擁壁に比較して、ボックス形式擁壁のほうが軽いため、その力は大きく、一概に経済性のみからは決定できない要因を含んでいる。

4. 首都高速道路公団における研究の概要

ここでは、液状化の研究委員会にて昭和47年度から、昭



図—6 液状化層と土圧を受ける構造物



図—8 擁壁高と工事費

和50年度の間になされた研究概要について簡単に触れる。前述のとおり、委員会としては、まだ最終結論を得ていないため、正式な報告としては別の機会にゆずりたい。

委員会3年間の主要研究内容はつぎのとおりである。

(1) 昭和47年度³⁾

東京下町のチュウ積層の砂を都内葛飾区(小菅)と、足立区(綾瀬川千住付近)から採取し、同時に新潟市大川前通から採取した砂も加え、振動台による加振実験を行なった。

(2) 昭和48年度⁴⁾

ゆるい砂で厚く埋め立てられた、東京都江東区14号埋立地内首都高速湾岸線の現場において、火薬を用いた現場爆発実験と、振動クイ打ち機(バイプロ)を用いた現場加振実験を中心に、液状化判定方法の整理と、液状化防止対策工法について検討を加えた。

(3) 昭和49年度

東京都内の地層を整理し、液状化のおそれのある地盤モデルを5ケース選定し、地盤の応答計算を行ない、振動三軸試験より得られた限界せん断力と合わせて、液状化判定手法について考察した。

5. あとがき

液状化を考慮した基礎構造物設計上の問題点について静的な計算を主体に述べてきたが、液状化が、地震による外

力によって生ずる現象であることを考えると、地盤と基礎構造物を含めた動的解析による設計がなされるべきであり、より正確な問題点がそこから生ずると思われるが、今回の報告には、その点について、時間的に間に合わなかったため、触れることはできなかった。

いずれにせよ、液状化現象が構造物に及ぼす影響、液状化を考慮した合理的な設計方法についての研究は、ほとんどなされておらず、現行の設計方法を若干修正して使用しているのが実際の姿であろうと思われる。これは液状化現象が、地震と、土に関する各々の不確定な要素を多く含んでおり、設計に導入すべき支持力、作用力の決定が十分な精度で行なえないためであろう。

今後、液状化の可能性のある地盤内に、構造物を計画し設計する機会が多くなることが予想される。この場合の合理的設計手法を確立するため、液状化現象のは握と、構造物を含めた相互作用について、研究すべき多くの課題が残されていると思われる。

参 考 文 献

- 1) 道路橋耐震設計指針・同解説(日本道路協会)
- 2) 基礎構造物設計規準(首都高速道路公団)
- 3) 砂層の流動化に関する研究報告書(昭和48年3月, 首都高速道路協会)
- 4) 砂層の流動化に関する研究報告書(昭和49年3月, 首都高速道路協会)

(原稿受理 1975. 3. 25)

『傾斜地造成の防災』発行!!

学 会 新 刊 案 内

土質工学会編

わが国において最近20年たらずの間に大規模な宅地造成が行なわれるようになり、従来のような平野部だけにとどまらず、山地や丘陵地などの傾斜地で土地造成が行なわれるようになった。そのような地盤では平野部と違って特有な複雑な特性があるため、自然斜面に人工を加えることによりいろいろ不安定な地盤条件を生み出すことになる。これらの多くの問題についての実態を調べ防災技術とを関連づけ体系化するために、昭和45年に土質工学会関西支部に「階段状造成地の防災に関する研究委員会」が発足された。この本はその委員会が数年にわたる研究成果をとりまとめたものである。

本書の内容は傾斜地の形成過程から掘起こし、環境条件の調査、傾斜地開発と環境保全、新しい調査方法や設計手法の導入にわたっている。さらにとり上げられた問題点のいくつかを上げると、悪条件を有する自然斜面を切取るときの安定対策、谷間に施工された盛土に生ずる不等沈下、地下水や浸透水の効果的排除方法、造成による流域の形質を変えることに起因する河川流出状況、造成中と造成後の豪雨による土砂流出とその防止、植生の破壊と保護、植樹・緑化の問題を含めた環境の保全と造成等、土質工学的問

題だけでなく防災計画・地質学・水文学等の点をも考慮し環境問題にもメスが入れている。問題の性質上今日未解決で十分解明しえなかった点もあるが、それらについては問題点の指摘は行なわれている。研究委員会の性質上本書中にとり上げられた事例は近畿地方のものが多く、基本的な考え方としては日本全国どのような場所にも、おおいに参考になることはいうまでもない。また本書には付図として「近畿圏における地質系統分布図」があり、近畿地方の今後の造成に大いに利用できるばかりでなく、地質・土質の多くの問題にも大いに利用していただきたい。

発行 (社)土質工学会

著者 土質工学会関西支部 階段状造成地の防災に関する研究委員会

定価 7,500円 会員特価 6,000円 送料 200円

本文 334ページ, 上製本, B4判

申込み先: 土質工学会関西支部 ☎(06)271-6485

〒541 大阪市東区船場中央2丁目2

船場センタービル4号館409号