

2.5 地中構造物

2.5.1 側方流動に対する検討方法

(1) 調査概要

本調査は、現行の基準類における液状化を考慮した土木構造物の耐震設計法を整理し、その課題や問題点を把握することにより、今後の調査・研究に反映し、合理的な耐震設計法の確立に資することを目的に実施したものである。

図-2.5.1.1 は、液状化を考慮した一般的な構造物の耐震設計の手順を示したものである。同図に示すように液状化の発生を考慮した構造物の設計は、大別して以下の4つの項目に分けられる。

- ① 液状化発生の予測
- ② 液状化による地盤変状および地盤物性の変化の予測
- ③ 本体構造物への影響検討
- ④ 対策工の設計

このうち、①、②は対象構造物の特性にも影響するが、地盤の評価に係わるものであり、各構造物で共通的な要素が大きい。これに対して、③、④は構造物を対象に検討することから、構造物の機能や重要度等など対象構造物の特性により検討方法も異なることとなる。図-2.5.1.2 には液状化に伴う地盤物性や地盤変状の発生を模式的に示したものである。これらの発生による代表的な土木構造物への影響程度は表-2.5.1.1 のようにまとめることができる。

上述した内容に関してここでは、液状化を考慮した構造物の耐震設計の現状を設計基準類や文献調査などにより明らかとするとともに、今後の技術動向も合わせて調査する。これらの内容から調査項目としては、以下のものを対象とした。

- ① 現行基準類の整理
- ② 地盤流動の現象、予測手法、設計手法に関する文献調査

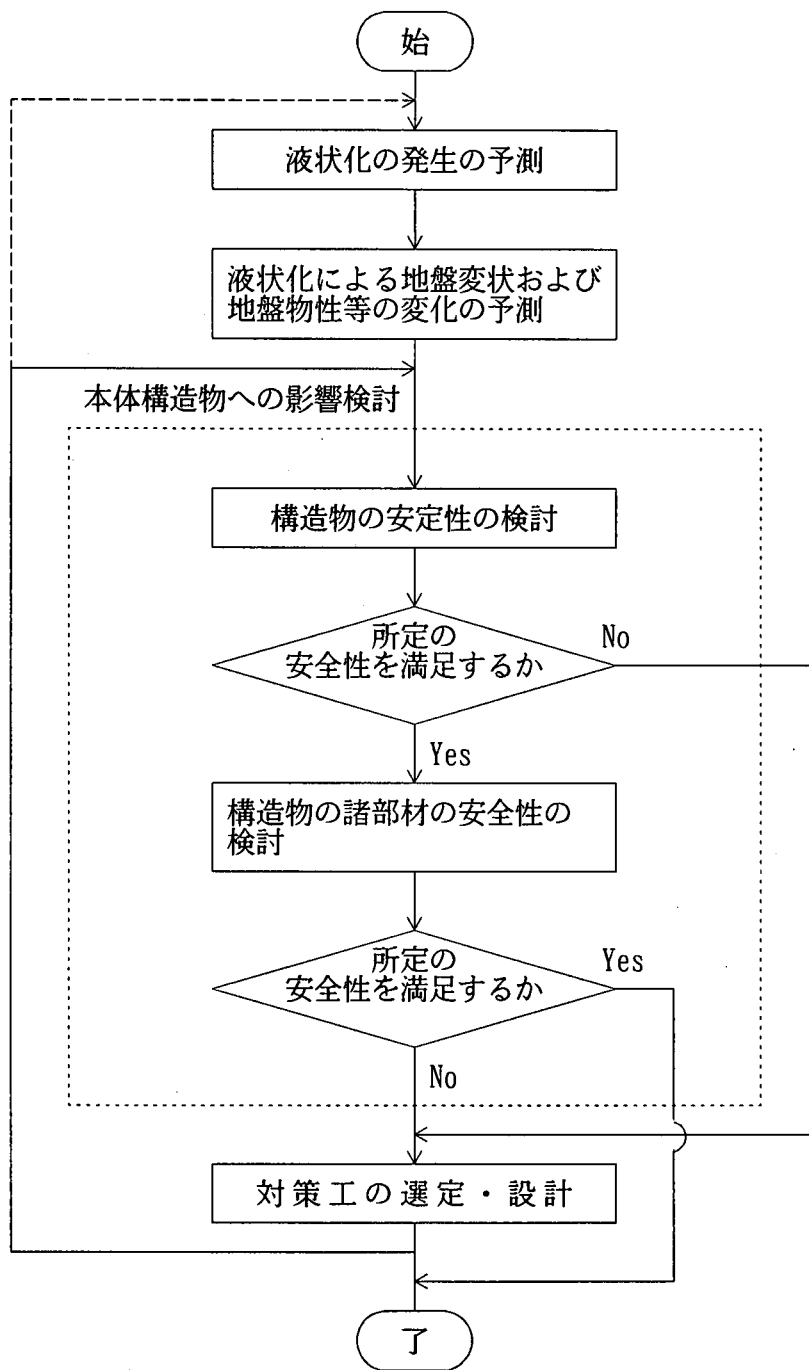
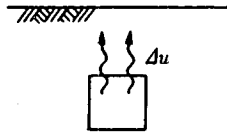
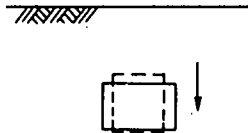


図-2.5.1.1 液化化を考慮した構造物の設計手順

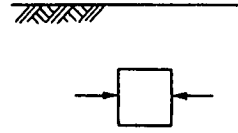
① 過剰間隙水圧の発生



② 変形係数、強度の減少



③ 水平土圧の変化



(a) 地盤の物性の変化

① 噴砂、噴水



② 永久変位



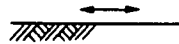
③ クラック



④ 沈下、陥没、隆起



⑤ 過大な変位振幅



(b) 地表面付近に生じる地盤変状

図-2.5.1.2 液状化に伴う地盤の物性の変化および地盤変状の種類¹⁾

表-2.5.1.1 設計にあたって考慮する必要がある地盤の変化、変状²⁾

地盤の変化、 変状 構造物	過剰間 隙水圧 の発生	変形係 数、強 さの減 少	水平土 圧の変 化	噴砂・ 噴水	永久変 位	クラック	沈下、 陥没、 隆起	過大な 変位振 幅
杭基礎の構造物		○			△			
護岸構造物	○		○					
直接基礎の構造物					△	△	○	
地中構造物	○	○	○		△	△	○	○
土構造物	○	○						

○：設計で検討する必要があり、現在設計に考慮されている。

△：設計で検討する必要があると思われるが、まだ設計に取り入れられていない。

(2) 現行基準類の調査

地中構造物は表-2.5.1.2、2.5.1.3に示すように、現行規定では液状化の発生は間隙水圧の上昇として考え、地震動の影響は考慮せず、液状化時の浮上がりの安定計算を行うこととしている。これに対し、地中構造物の耐震設計法は一般に構造物の地震時挙動が周辺の地盤振動に依存するため、地盤変位に着目したいわゆる応答変位法が適用されている。図-2.5.1.3には、線状地中構造物の長手方向に対する耐震設計の手順を示す。しかし、これらの設計法の中では液状化の発生は特に考慮されておらず、あくまで地盤は健全な状態として取扱っており、液状化と本体の耐震計算は完全に独立したものとなっている。

これに対し、これまでの液状化に伴う被災事例では、表-2.5.1.4のようなパターンが見られることが指摘されている。同表に示す構造物全体が液状化層中に位置する場合には、現行の規定のみで、ある程度検討できるが、一般に構造物の規模から非液状化層と液状化層にまたがって構造物が存在することが多いこと、また液状化の発生と地震動の作用は同時に発生するとは限らず、完全に分離して検討することが安全とは限らない可能性もある。これらの問題について今後、具体的な計算法の規定が必要と考えられる。また、液状化の発生による要因として、上述したように地中構造物は地盤の変位・変形に大きく影響されることから、液状化に伴う地盤変状（側方流動、沈下）に対する規定も必要と考えられる。

表-2.5.1.2 各基準類における液状化を考慮した安定計算法の比較（地中構造物）

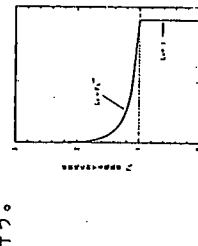
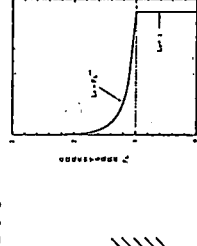
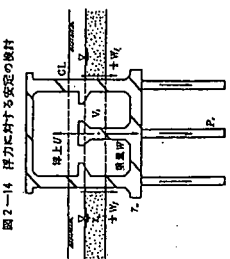
施設	基準・指針名	液状化判定法	安定計算法	備考
共同溝	共同溝設計指針 （財）日本道路協会、 1986(3) (F ₁ 法)	<p>本文中に、液状化に対する抵抗率F₁を求め、この値が1.0以下の土層については液状化の可能性があるものとする。</p> <p>ここに、</p> $F_1 = R/L$ $R = R_1 + R_2$ $L = r_1 \cdot K_1 \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma_v'}$ $R_1 = 0.0892 \sqrt{\frac{N}{\sigma_v' + 0.7}}$ $R_2 = \begin{cases} 0.19 & (0.02 \text{ mm} \leq D_{50} \leq 0.05 \text{ mm}) \\ 0.225 \log_2(0.35/D_{50}) & (0.05 \text{ mm} < D_{50} \leq 0.6 \text{ mm}) \\ -0.05 & (0.6 \text{ mm} < D_{50} \leq 2.0 \text{ mm}) \end{cases}$ $r_1 = 1.0 - 0.015Z$ $K_1 = v_1 \cdot v_2 \cdot v_3 \cdot v_4 \cdot v_5 \cdot K_2$ $\sigma_v = (r_1 \cdot \gamma_1 \cdot Z_1 + r_2 \cdot (Z_2 - Z_1)) / 10$ $\sigma_v' = (r_1 \cdot \gamma_1 \cdot Z_1 + r_2 \cdot (Z_2 - Z_1)) / 10$ <p>ここに、</p> <ul style="list-style-type: none"> F₁: 液状化に対する抵抗率 R: 動的せん断強度比 L: 地盤時せん断能力比 R₁: 地盤時せん断能力比の異なる方向の減衰係数 R₂: 液状化の判定に用いる地盤面での水平強度 σ_v: 全土圧 (kg/cm²) σ_v' : 有効土圧 (kg/cm²) R₁: N値と有効土圧σ_v'の関数で表わされる動的せん断強度比の第1項 R₂: N値と有効土圧σ_v'の関数で表わされる動的せん断強度比の第2項 Z: 地表面からの深さ (m) v₁: 重要度調整係数、通常の場合1.0としてよい。 K₂: 液状化の判定に用いる標準設計土圧強度 (0.15とする) r₁: 地下水位面より深い位置での土の単位体積重量 (t/m³) r₂: 砂質地層の場合は、おおよそ1.6~1.8 t/m³である。 r₃: 地下水位面より深い位置での土の単位体積重量 (t/m³) r₄: 砂質地層の場合は、おおよそ1.8~2.0 t/m³である。 r₅: 地下水位面より深い位置での土の有効単位体積重量 (t/m³) r₆: 砂質地層の場合は、おおよそ0.8~1.0 t/m³である。 Z₁: 地表面から地下水位面までの深さ (m) 	<p>計算されたF₁値より共同溝底面における過剰間隙水圧を求め、共同溝の浮上がりに対する検討を下式により行う。</p>  <p>図-A 液状化に対する間隙水圧の求め方</p> $F_1 = \frac{W_1 + W_2 - Q_1 - Q_2}{U_1 - U_2}$ <p>ここに、</p> <ul style="list-style-type: none"> W₁: 土層上の荷重 (水の重量を含む) (t/m²) W₂: 土層下の荷重 (建築物及びコンクリートの重量を含む) (t/m²) Q₁: 土層上のせん断強度 (t/m²) Q₂: 共同溝底面でのせん断強度 (t/m²) U₁: 共同溝底面に作用する過剰間隙水圧による土圧 (t/m²) U₂: 共同溝底面に作用する静水圧による土圧 (t/m²) $U_0 = B \cdot L_u \cdot \sigma_v' \quad (\text{図-Bに} \beta_1 \text{による})$ <p>共同溝地盤の液状化発生の可能性が高く、浮上がりに対する安全率が1.1未満となり、共同溝に液状化の発生が予測される場合には、適切な対策を講じるものとする。</p>	
地下駐車場	駐車場設計・施工指針 同解説 （財）日本道路協会、 1992(4) (F ₁ 法)	<p>本文中に、液状化に対する抵抗率F₁を求め、この値が1.0以下の土層については液状化の可能性があるものとする。</p> <p>ここに、</p> $F_1 = R/L$ $R = R_1 + R_2 + R_3$ $L = K_1 \cdot \frac{\sigma_v}{\sigma_v'}$ $R_1 = 0.0892 \sqrt{\frac{N}{\sigma_v' + 0.7}}$ $R_2 = \begin{cases} 0.19 & (0.02 \text{ mm} \leq D_{50} \leq 0.05 \text{ mm}) \\ 0.225 \log_2(0.35/D_{50}) & (0.05 \text{ mm} < D_{50} \leq 0.6 \text{ mm}) \\ -0.05 & (0.6 \text{ mm} < D_{50} \leq 2.0 \text{ mm}) \end{cases}$ $R_3 = \begin{cases} 0.0 & (0\% \leq FC \leq 40\%) \\ 0.004 FC - 0.16 & (40\% < FC \leq 100\%) \end{cases}$ $K_1 = c_1 \cdot c_2 \cdot c_3 \cdot c_4$ $\sigma_v = (r_1 \cdot \gamma_1 \cdot h_1 + r_2 \cdot (z - h_1)) / 10$ $\sigma_v' = (r_1 \cdot \gamma_1 \cdot h_1 + r_2 \cdot (z - h_1)) / 10$ <p>ここに、</p> <ul style="list-style-type: none"> F₁: 液状化に対する抵抗率 R: 動的せん断強度比 L: 地盤時せん断能力比 R₁: N値と有効土圧σ_v'の関数で表わされる動的せん断強度比Rの第1項 R₂: N値と有効土圧σ_v'の関数で表わされる動的せん断強度比Rの第2項 R₃: 粒径分布含有FCの関数で表わされる動的せん断強度比Rの第3項 c₁: 液状化の判定に用いる標準設計土圧強度 (0.15とする) c₂: 全土圧 (kg/cm²) c₃: 有効土圧 (kg/cm²) c₄: 地下水位面より深い位置での土の有効単位体積重量 (t/m³) N: 標準貫入試験から得られるN値 D₅₀: 土の平均粒径 (mm) FC: 粒径分布含有率 (%) (粒径75μm以下の土の質量百分率) z: 地表面からの深さ (m) h₁: 液状化の判定に用いる標準設計土圧強度 (0.15とする) h₂: 地下水位面より深い位置での土の単位体積重量 (t/m³) h₃: 地下水位面より深い位置での土の有効単位体積重量 (t/m³) h₄: 地表面から地下水位面までの深さ (m) 	<p>地下駐車場躯体底面以深の地盤が、液状化に対する抵抗率F₁ ≤ 1.0となる場合、必要に応じて地盤改良等の液状化対策を講じるものとする。</p> <p>地下駐車場躯体底面以深の地盤が液状化に対する抵抗率F₁ > 1.0となる場合でも、地下駐車場躯体底面以浅の場合には、浮上がりに対する検討を算出する必要がある土層と判定された場合には、浮上がりに対する検討を下式により行い、浮上がりに対する安全率F₁が1.0未満となる場合には、必要に応じて液状化対策を講じるものとする。</p>  <p>図-A 液状化に対する間隙水圧の求め方</p> $F_1 = \frac{W_1 + W_2}{U_1 - U_2}$ <p>ここに、</p> <ul style="list-style-type: none"> W₁: 土層上の重量 (UD) W₂: 地下駐車場躯体底面に作用する静水圧による土圧 (UD) U₁: 地下駐車場躯体底面に作用する過剰間隙水圧による土圧 (UD) U₂: 地下駐車場躯体底面に作用する静水圧による土圧 (UD) $U_0 = B \cdot L_u \cdot \sigma_v' \quad (\text{図-Bに} \beta_1 \text{による})$	

表-2.5.1.3 各基準類における液状化を考慮した安定計算法の比較（地中構造物）

施設	基準・指針名	液状化判定法	安定計算法	備考
下水道	下水道施設地震対策指針と解説 (財)日本下水道協会, 1981 (F.法)	「道路橋示方書・同解説：日本道路協会, 1980」に基本的に同じであり, Rは液状化強度の第3項(細粒分による補正項)を除いたもので, Lは地盤種別の分類等が若干異なる。	・安定計算法の規定は特になし。 ・液状化すると判断された土層の扱いは, 液状化に対する抵抗率F ₁ と施設の重要度とに応じ, 可能なときは, 次の対策を講ずることが望ましいとしている。 ① 地盤の改良を行う。 ② くい基礎等を用いて支持力の低下および浮力に対処する。 $F_s = \frac{W}{U} = \frac{W(1-R)}{P_1 + P_2 + P_3} \geq 1.2 \dots (2.1)$ <p>ここに、 W：浮上抵抗力= $W(1-R) + W_1 + P_1$ U：浮力 W₁：構造物本体の重量 R₁：相対密度= $\frac{1}{2} \rho_w \rho_s$ については, 第1章, 第3節, 引6を参照のこと。 W₂：構造物の側面での流動化層を除く部分の埋戻し抵抗力(浮力) P₁：くいの引抜き抵抗力= $P_1 + P_2$。又は引抜き試験による値 P₂：構造物本体の流動化層を除く地下水位以下の部分の埋戻し P₃：構造物本体の流動化層の位置にある部分の埋戻し F₁：水の単位体積重量 F₂：流動化した砂の単位体積重量 P₁：くいの埋戻し抵抗力 P₂：くいの自重</p> 	
ガス	ガス導管耐震設計指針 (財)日本ガス協会, 1982 (6)	I. 高圧ガス導管耐震設計指針 示されていない。 II. 一般(中・低圧)ガス導管耐震設計指針 判定方法については統一された基準がないので示されていないが, 液状化現象の起りやすい条件を列挙している。 (i) 沖積層に数mの砂層がある場合 (ii) N値12以下の地下水で飽和された砂層 (iii) 粒径が中砂(1.0~0.25mm), 細砂(0.25~0.06mm)の均一な砂粒子 (iv) 粘土分含有率10%以下	・安定計算法の規定は特になし。 I. 高圧ガス やむを得ず液状化の可能性のある地盤に埋設する場合には, 必要に応じて, 次のような対応を考慮するものとする。 (i) 地盤改良等の対策を講ずる(砂ぐい, 締固め等)。 (ii) 導管の強度余裕を評価し, 液状化発生時の導管の耐力の検討を行う。 (iii) 液状化の可能性のある地盤の前後にバルブ等の保安措置を設ける。 II. 一般(中・低圧)ガス導管耐震設計指針 示されていない。	
水道	水道施設耐震工法指針・解説 (財)日本水道協会, 1979 (F.法)	「道路橋示方書・同解説：日本道路協会, 1980」に基本的に同じであり, Rは液状化強度の第3項(細粒分による補正項)を除いたもので, Lは地盤種別の分類等が若干異なる。	・安定計算法の規定は特になし。 ・液状化すると判定される場合には, 必要に応じて地盤改良等の方法により対応しなければならぬとしており, 構造物への影響の評価はなされていない。	

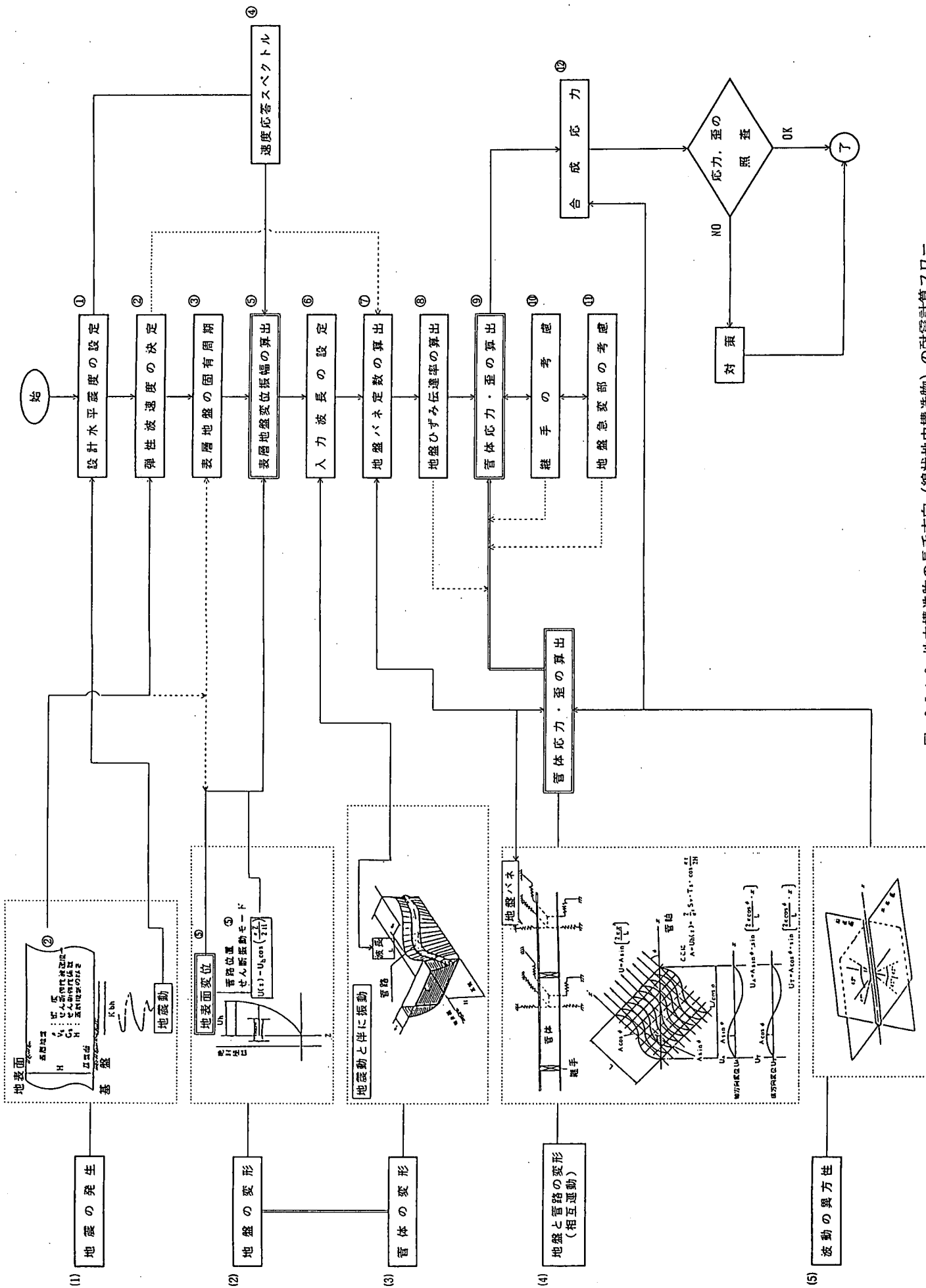
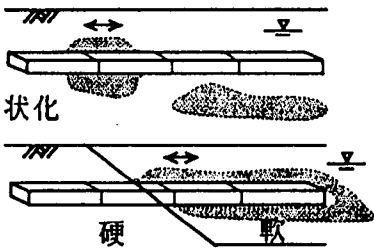
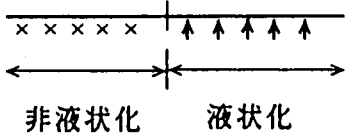
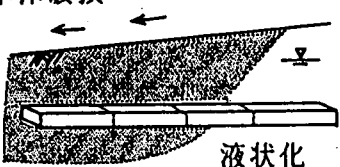
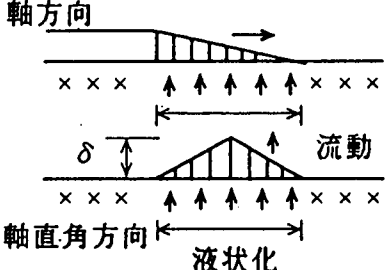
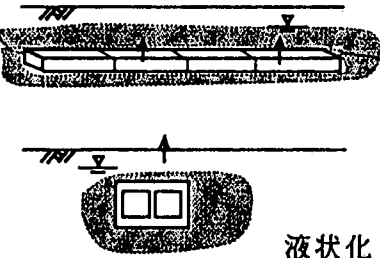
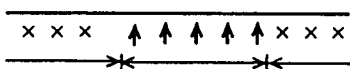
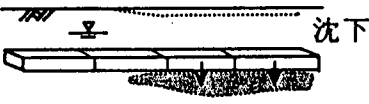
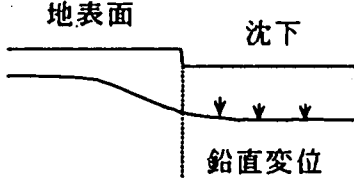


図-2.5.1.3 地中構造物の長手方向（線状地中構造物）の耐震計算フロー

表-2.5.1.4 線状構造物の被害のパターン化⁸⁾

タイプ	説明	模式図	モデル化
動的変位	地形・地質条件により、部分的液状化が発生し、局部的に変位が大きくなる。	<p>継目破損・亀裂</p>  <p>液状化</p> <p>硬 軟</p>	<p>構造物</p>  <p>非液状化 液状化</p>
永久変位	地表や地層が傾斜している場合、液状化により永久的な大変形・すべりが発生する。	<p>本体破損</p>  <p>液状化</p>	<p>軸方向</p>  <p>流動</p> <p>液状化</p> <p>軸直角方向</p>
揚圧力	地盤が完全に液状化し、その部分に過剰間隙水圧による浮力が生じる。	 <p>液状化</p>	<p>浮力</p>  <p>非液状化域 液状化</p>
液状化の沈下	地震終了後、水圧の消散により地盤が圧密沈下する。	<p>線形ずれ</p>  <p>沈下</p> <p>液状化</p>	<p>地表面</p>  <p>沈下</p> <p>鉛直変位</p>

(3) 文献等による実態調査

1) 被害の実態調査

これまで側方流動に伴う被害に関しては、ガス、水道、下水道等の埋設管を中心に実態調査が実施されており、管路被害の主たる要因として注目され、側方流動の発生メカニズムや予測手法および構造物への影響検討手法の調査・研究が鋭意進められている。

ここでは、兵庫県南部地震における典型的な側方流動の発生に伴う地中構造物の被害実態の例として、下水処理場の各施設と水道管路についてその実態を示すものである。これらの例は、被害の実態だけでなく側方流動量（沈下等も含む）が定量的に測定されたものであり、被害と側方流動との関連について具体的に言及しているものである。

a) 下水処理場施設⁹⁾

ここに示す下水処理場は、神戸市東灘処理場である。同施設の平面図を図-2.5.1.4に示す。同図に示すようにポンプ場と本場の間に運河があり、液状化により運河の護岸が運河側に水平移動し、処理場内の施設に著しい被害を生じたものである。図-2.5.1.5は運河の護岸の水平移動量と本場の地盤変状状況を示したものである。護岸は運河方向に1～2m程度移動し、その背面側は数10cmから2m近い沈下が生じていることがわかる。

これらの地盤変状の発生の結果、杭支持された水処理施設（エアレーションタンク、沈殿池）は、不同沈下が発生し（図-2.5.1.6）、継手部の目開きが発生している（図-2.5.1.7、2.5.1.8）。また、場内施設連絡管等を収納した管こうでも継手部に大きな目開きを生じている。

このように、側方流動（水平、鉛直方向）が地中構造物には直接的に作用し、構造上の弱点である継手部に被害が集中し処理場機能停止といった大被害を生じたものと言えよう。

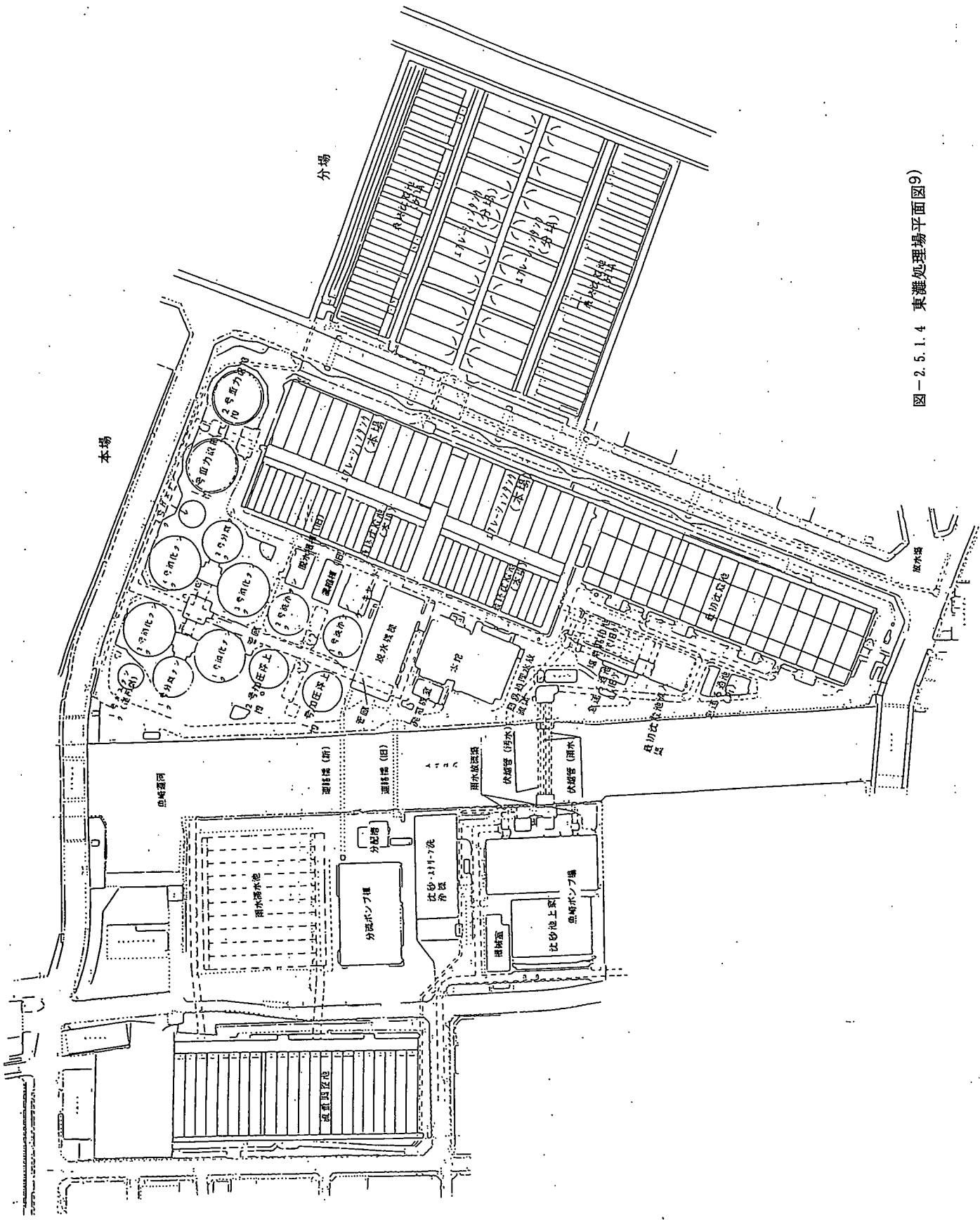
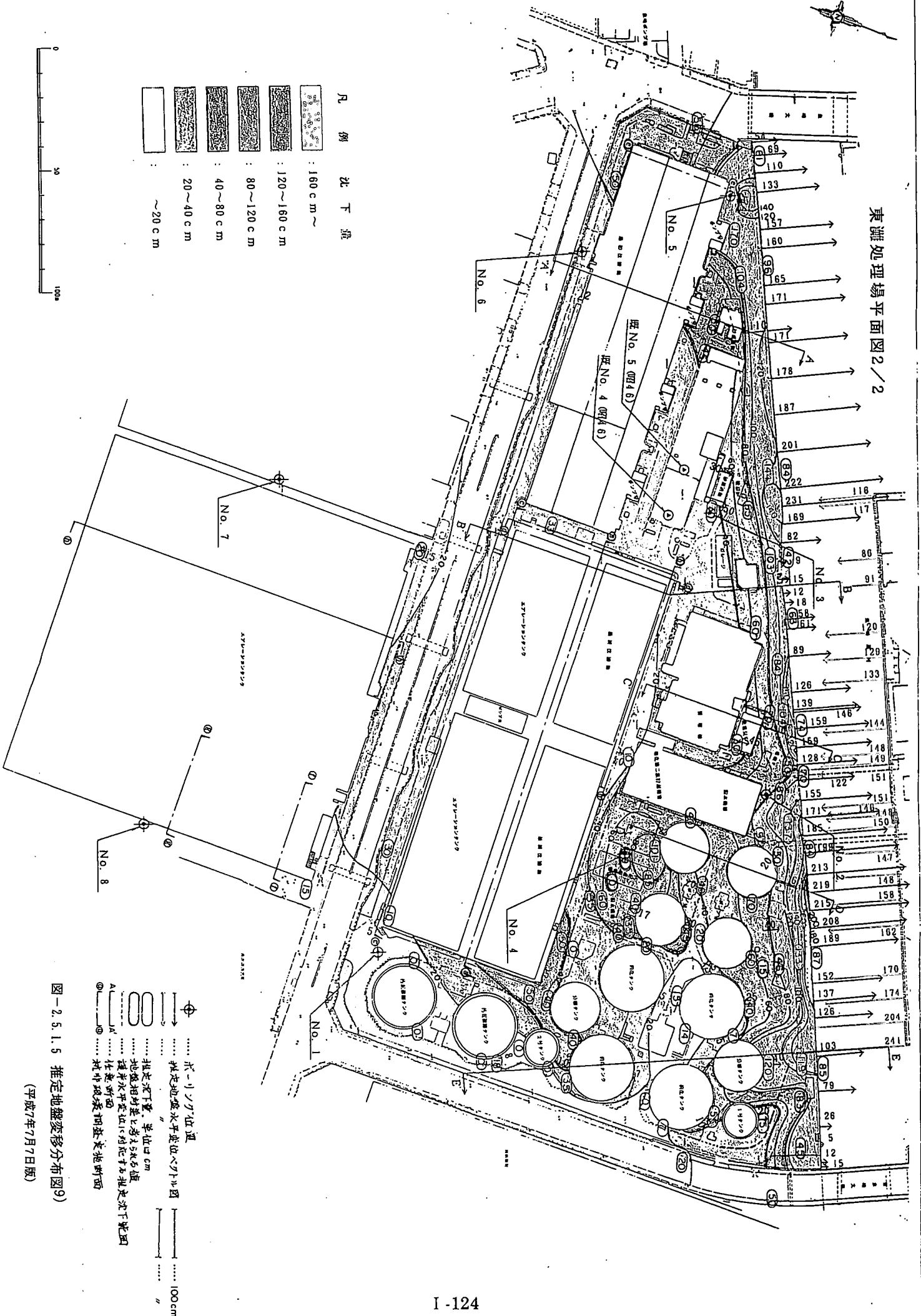


図-2.5.1.4 東灘処理場平面図9)

東灘処理場平面図2/2



- 凡例 沈下盤
- : 160 cm ~
 - : 120 ~ 160 cm
 - : 80 ~ 120 cm
 - : 40 ~ 80 cm
 - : 20 ~ 40 cm
 - : ~ 20 cm

- ボーリング位置
- 標定地盤水準位置(レベル)図
- 推定沈下量, 単位はcm
- 地盤相対高さを5%の値
- 標準水準位置(列記)を推定沈下量
- 任意断面
- 斜作段差調査実施断面

図-2.5.1.5 推定地盤変移分布図9)

(平成7年7月7日版)

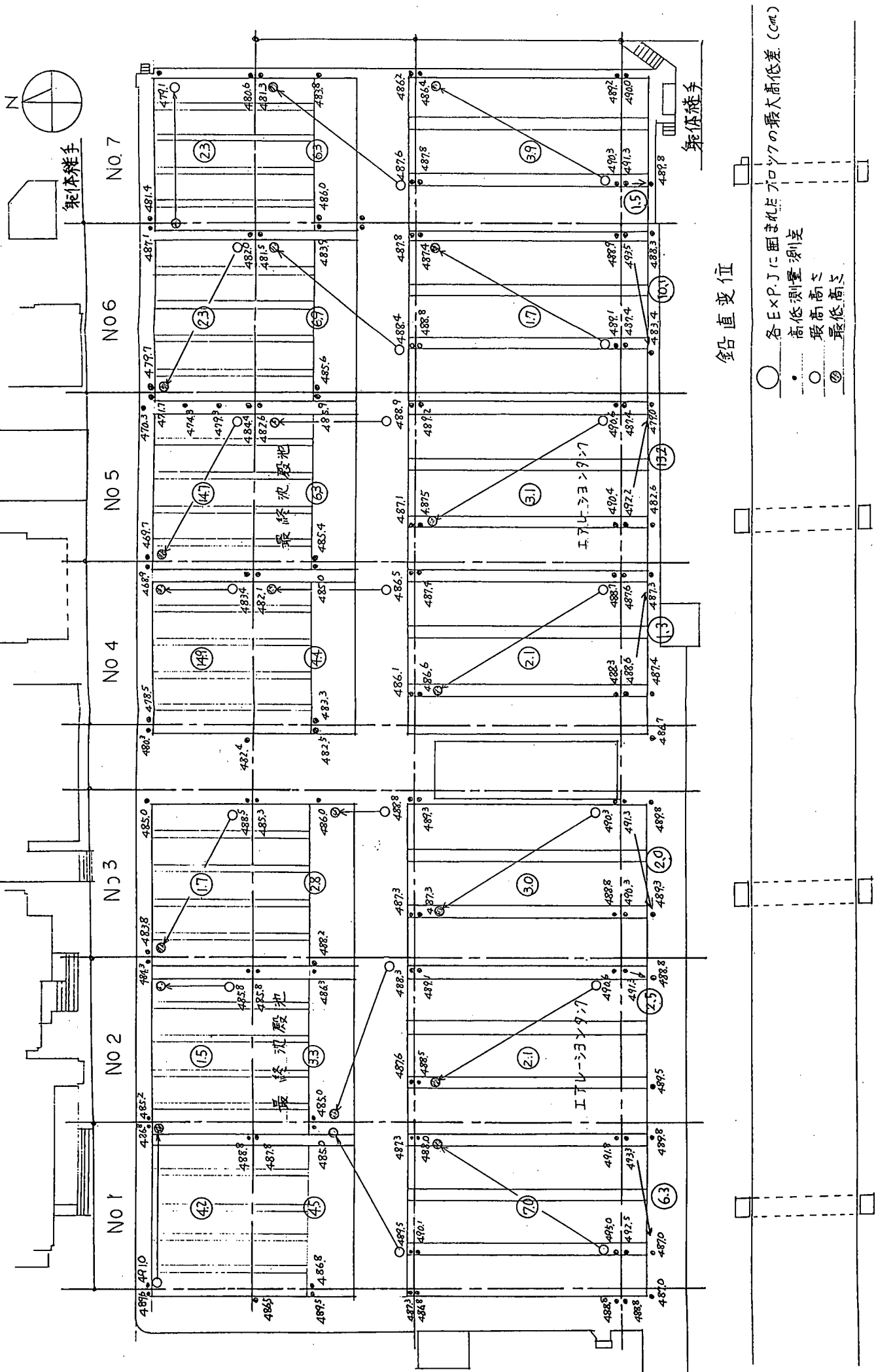
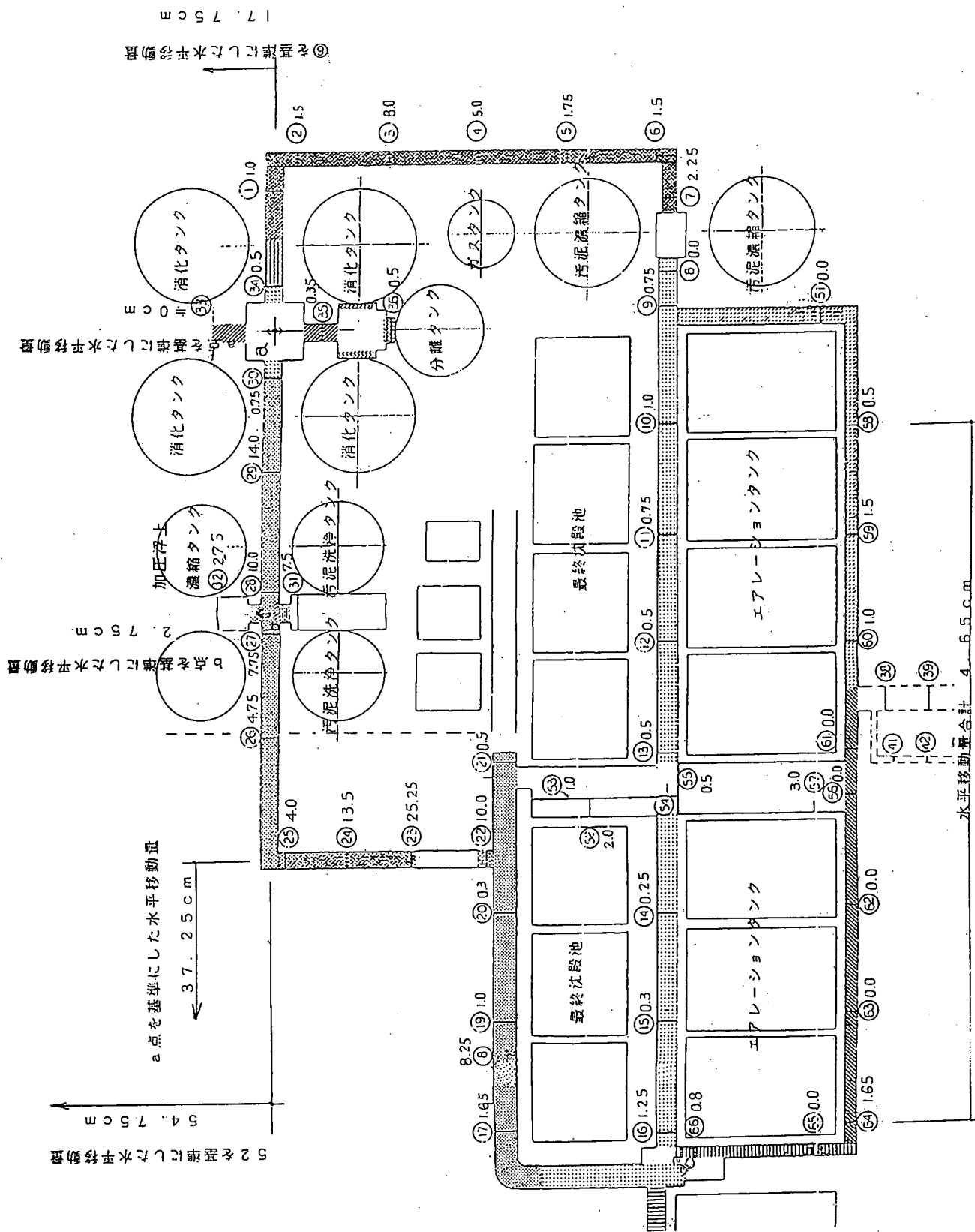


図-2.5.1.6 不同沈下図9) (本場 エアレーションタンク・最終沈殿池)



目盛り値 (cm)
継手位置

図-2.5.1.8 躯体継手の目開図9 (本場・管廊)

b) 水道管路¹⁰⁾

神戸市から西宮市にかけての沿岸部の埋立地では液状化が発生した。また、これらの一部地区、すなわちポートアイランド、六甲アイランド、芦屋浜地区では護岸の移動に伴い地盤が水平方向に移動した。さらに、三宮駅の南側の地区では、変位は小さいものの、ごく緩い勾配に沿って北から南へ向かって地盤が流動している。これらの地区を対象に、濱田他¹¹⁾による地盤の永久変位測定結果に基づき、地盤ひずみを算定し、水道管の被害との関連について分析した。

地盤ひずみの算定の対象としたのは、図-2.5.1.9に示す以下の4地区である。

- ① ポートアイランド
- ② 六甲アイランド
- ③ 芦屋浜
- ④ 三宮駅南側地区

図-2.5.1.10～2.5.1.13に示すように永久変形量の測定結果から、全体に内陸部から護岸に向かって変位しており、護岸近傍では2～3mにも及ぶ永久変位が生じている地区である。

また、同図には対象とした管路に沿った測線も表示しており合計135測線を対象に地盤ひずみの算定を行っている。

図-2.5.1.14には、人工島内での被害件数と地盤ひずみ関係を、図-2.5.1.15には傾斜地形の三宮地区での同様の関係を示す。

これらの図より以下のことがいえる。

- ① 今回の調査範囲を2～3mに及び側方流動が発生しているが管路沿いのひずみとしては最大1%程度である。
- ② したがって、水道管のような線状地中構造物では側方流動量の絶対値のみで判断できず、地盤の発生ひずみが重要である。
- ③ 管路は、地盤ひずみが0.2%を超えると被害の発生が見られ、地盤ひずみの増大とともに被害率も大きくなる。

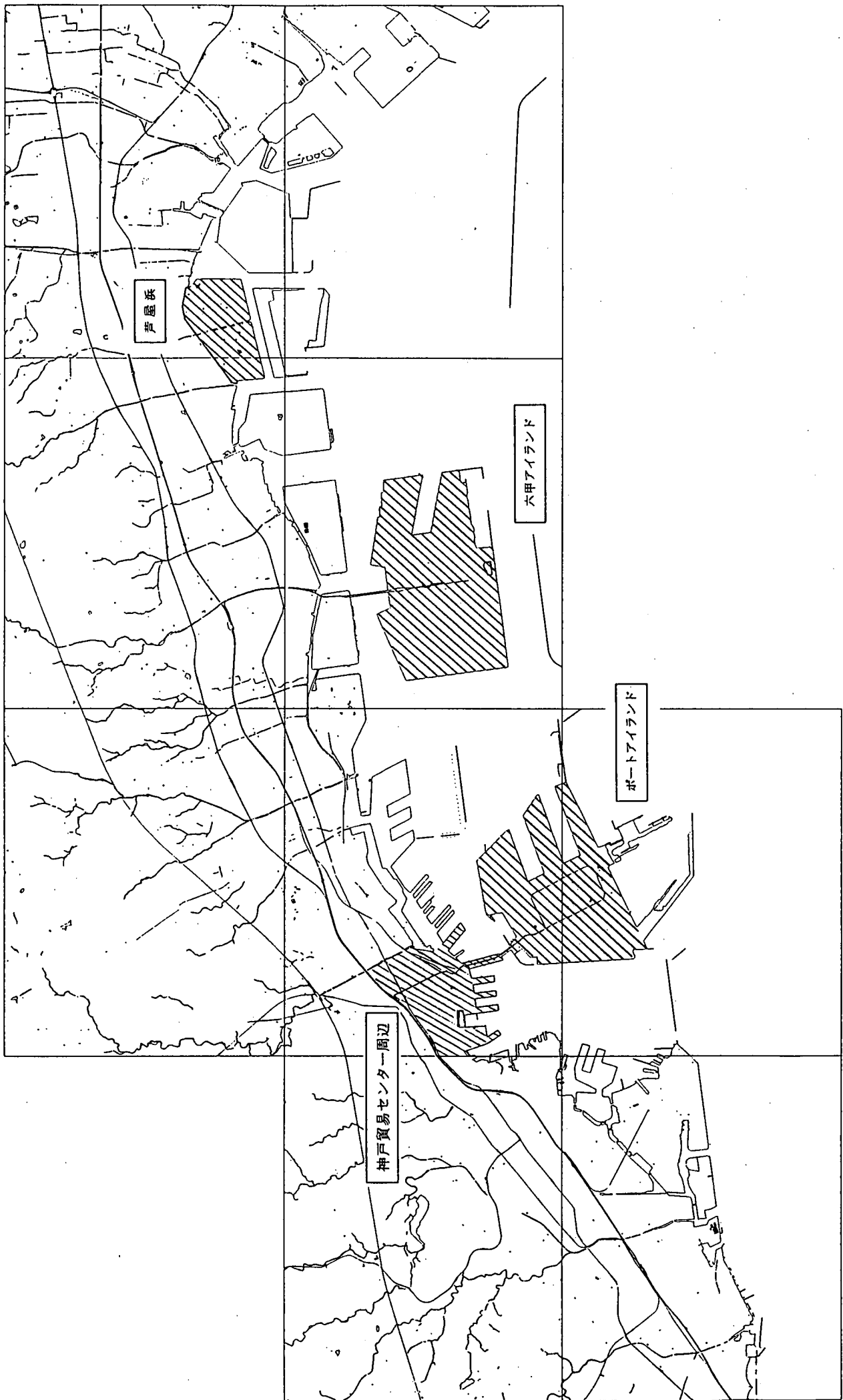


図-2.5.1.9 対象地区の位置図(10)

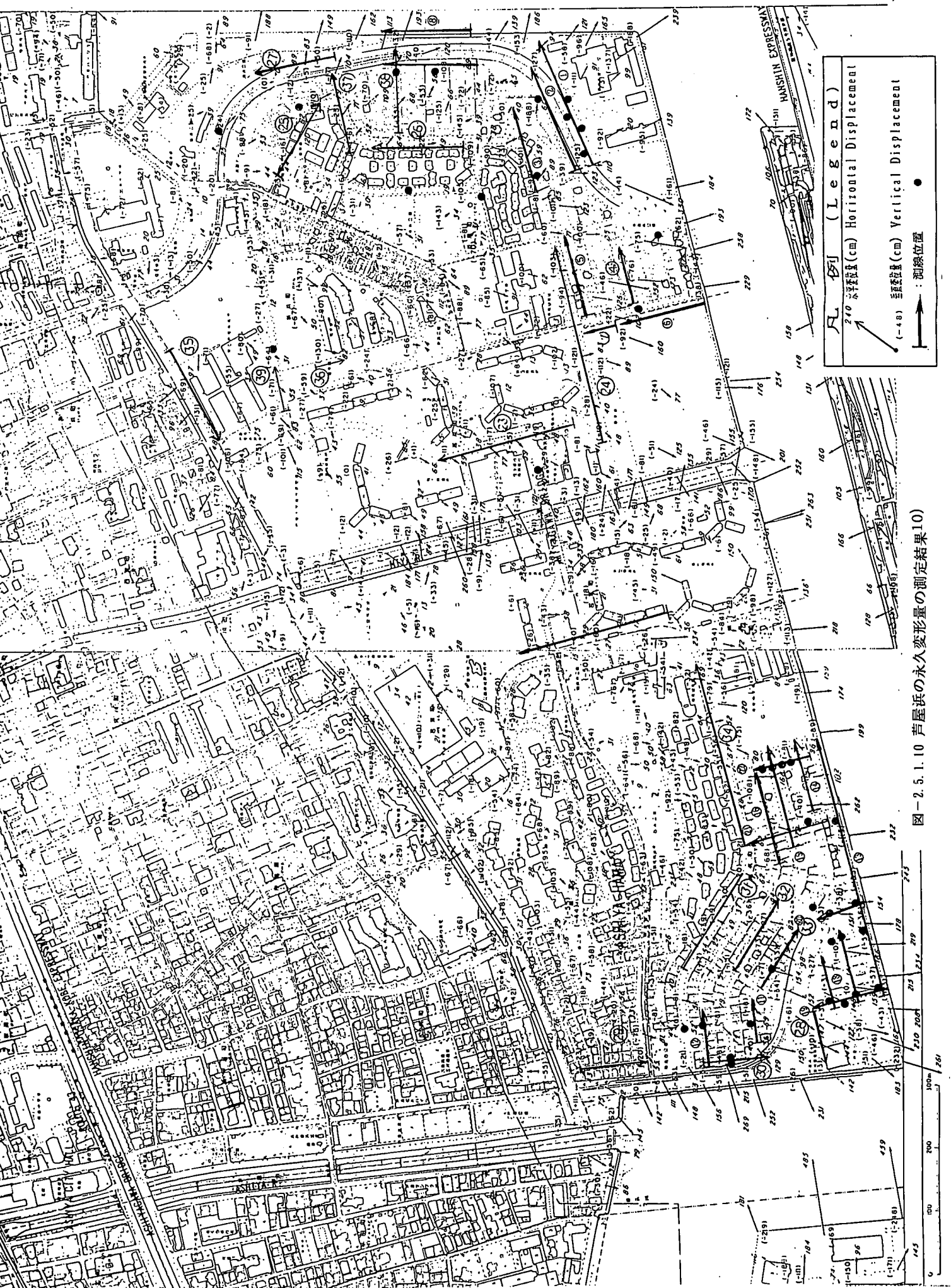
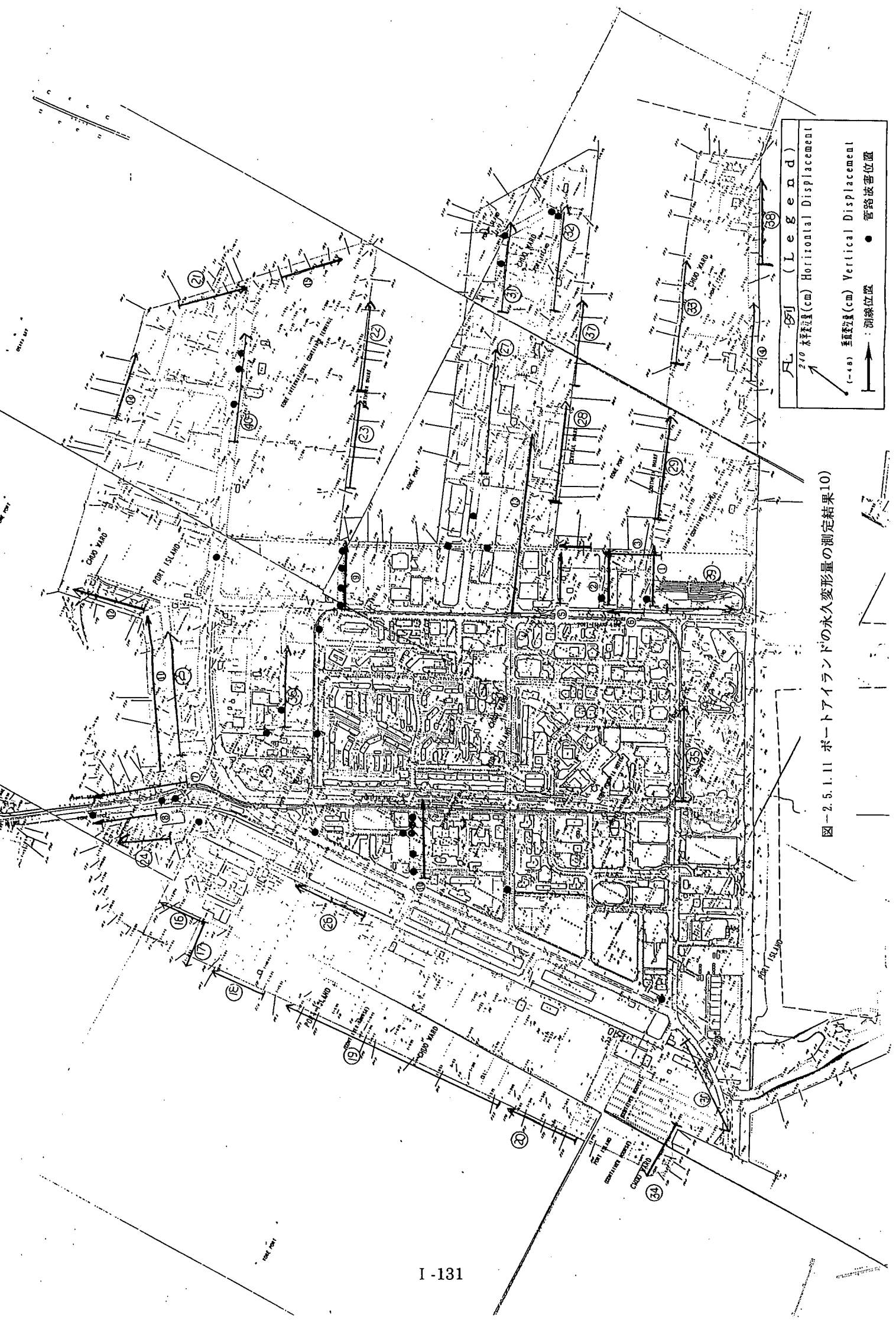


図-2.5.1.10 芦屋浜の永久変形量の測定結果(10)



凡例 (Legend)

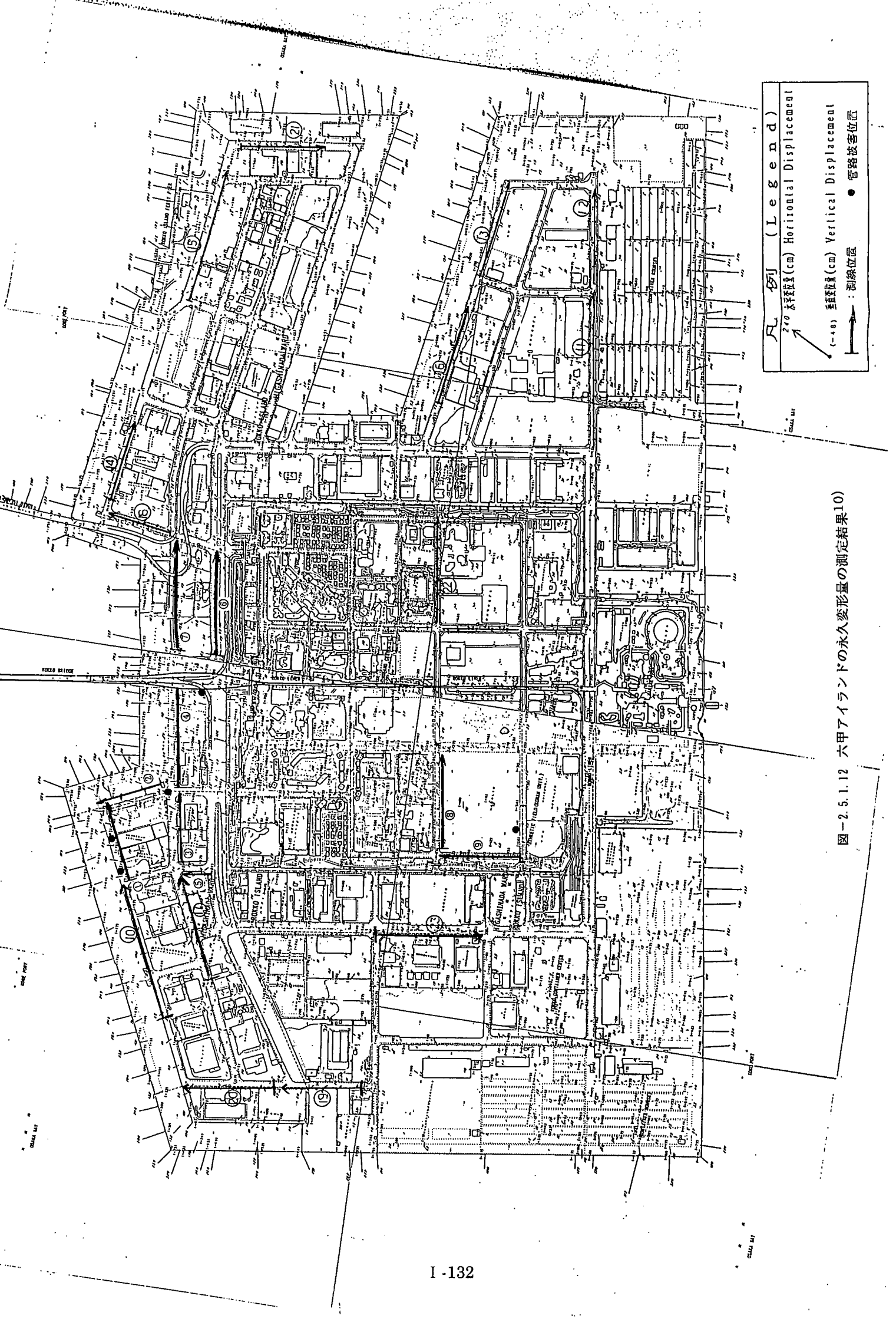
270 水準位置 (cm) Horizontal Displacement

(-488) 垂直位置 (cm) Vertical Displacement

● 測線位置 ● 管線被害位置

↑ 測線位置

図-2.5.1.11 ポートアイトランドの永久変形量の測定結果(10)



凡例 (Legend)

240 水平変位量 (cm) Horizontal Displacement

(-48) 鉛直変位量 (cm) Vertical Displacement

● 測線位置 ● 管路位置

図-2.5.1.12 六甲アイランドの永久変形量の測定結果(10)

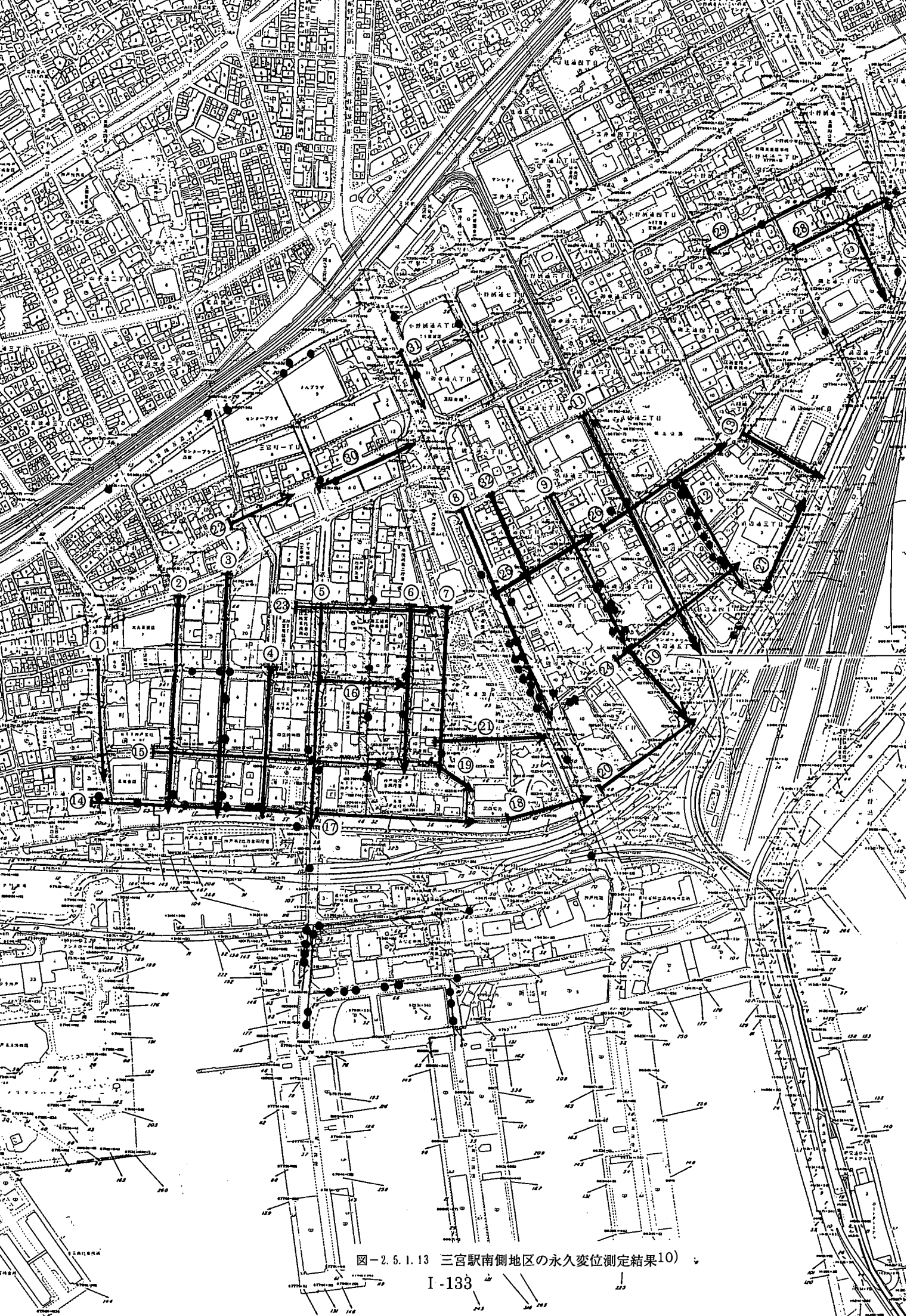


図-2.5.1.13 三宮駅南側地区の永久変位測定結果10)

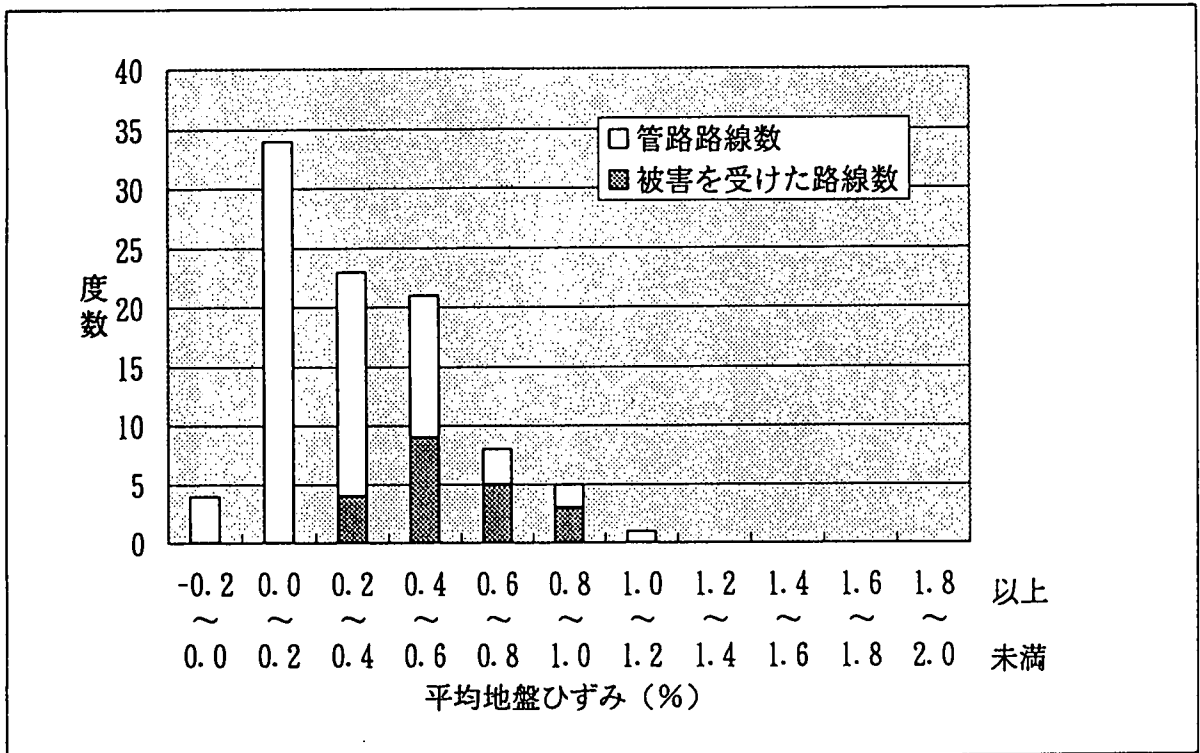


図-2.5.1.14 DIP(一般継手、耐震継手管路)の平均地盤ひずみと度数分布¹⁰⁾
(ポートアイランド、六甲アイランド、芦屋浜)

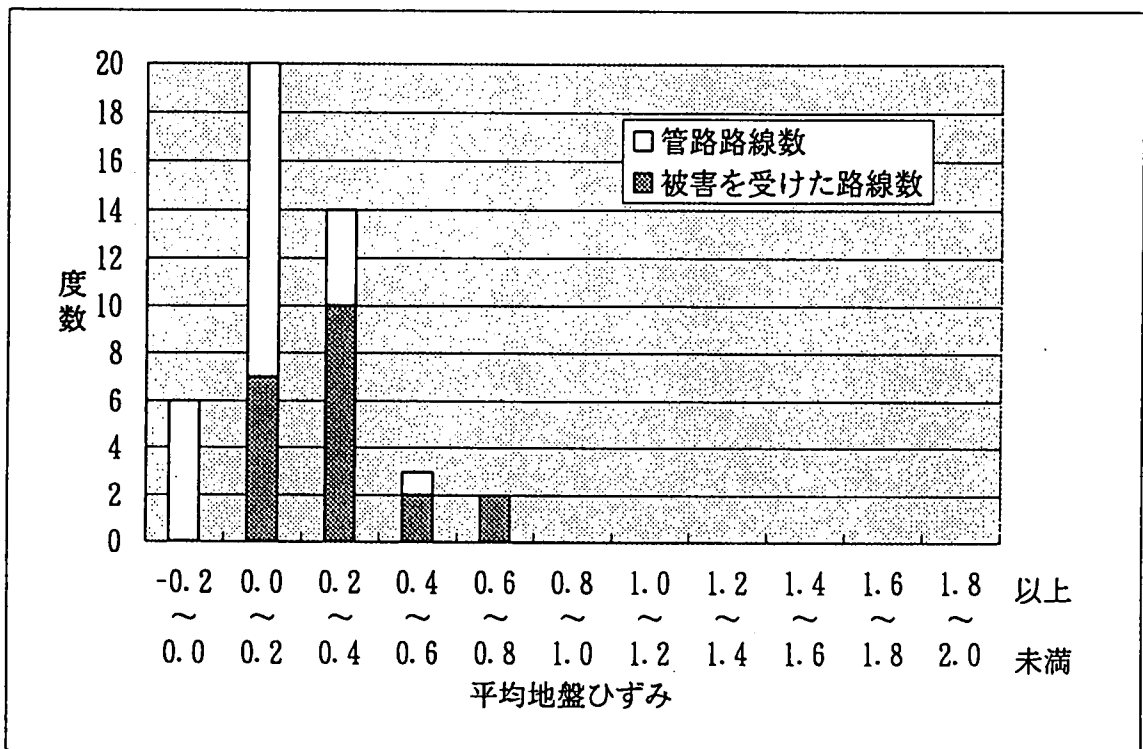


図-2.5.1.15 DIP(一般継手管路)とCIPの平均地盤ひずみの度数分布(三宮駅南側地区)¹⁰⁾

2) 予測方法および設計法

1)にも示したように液状化に伴う側方流動の発生が地中構造物の被害を主たる要因であることがわかる。側方流動の発生とその流動量を解析的に求める方法は、種々提案されているが、現状では研究レベルと言わざるを得ず、設計事務での適用はまだ困難な状況から、ここでは比較的簡易な方法を中心に調査を実施した。

表-2.5.1.5 は地盤変状に関するもので、震後の沈下量や永久変形量の算定方法と構造物への影響評価手法を示したものである。沈下量の予測手法は、室内要素試験での一次元的な沈下を対象にしたものと原地盤を対象に既往の震害事例から予測したものがある。したがって前者は、周囲地盤が拘束されていたり、締切り工法による対策が実施されるなど一次元状態が想定される場合に適用可能と考えられる。これに対して後者は原地盤状態で特に周囲の拘束がない水平地盤に適用できるものと考えられる。また後者の原地盤に対するものでは、同表に示すように線状の地中構造物を対象に長手方向に対する安定計算の方法も示されているが、分布形状の設定や非液状化部分の評価(パネ設定における液状化層の影響)など、また詳細条件の設定が今後の課題と考えられる。

地盤の永久変位、特に水平変位については、上述した原地盤を対象にした沈下の予測と同じく、既往の震害事例から地表面での値を予測する方法が提案されたものがある。また、安定計算も同じく強制変位として得られる方法が提案されているが、その分布形状や非液状化層の取扱いなどについても同様の課題が残されている。この永久変形(地盤流動)については、研究途上であるところが多いが、その発生機構を解明しその予測方法について実験等各種研究が進められている。

表-2.5.1.6 は地中構造物に対して浮上がり量を定量的に評価するための提案と液状化に伴う土圧変化を想定し締切り工法による対策工に対する設計法の提案である。このうち前者、これまで浮上がりの可能性の判定としては確立された手法があるが、実際の被害の程度を明らかにし、対策工の必要性を判断するため、その量を求めようとするものであり、比較的簡易なすべり計算を適用したものと、有限要素法を適用した変形解析により定量評価するものの2種類がある。なお、後者の有限要素法による変形解析は土構造物にも十分適用可能であり、これまで安定性のみの評価である土構造に対して変形量による検討も可能となる。また、土圧の変化は締切り工の設計への適用であるが、本体構造の水平安定に対しても適用可能と考えられる。

表-2.5.1.5 液状化に伴う地盤変状の予測とその影響の評価手法の現状

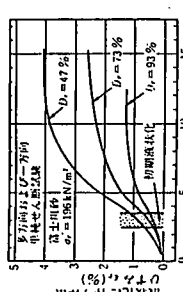
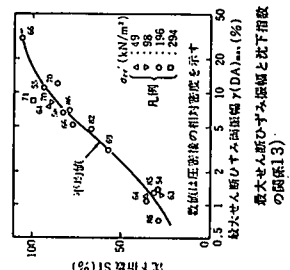
	予 測 手 法	構 造 物 の 安 定 計 算 へ の 反 映	備 考
<p>1 次元の ゆり込み 沈下</p>	<p>室内繰返し試験等にもとづき発生ひずみに応じた沈下量を算出する方法を提案している。</p>   <p>新潟地震および日本海中部地震での被害状況から液状化層厚との関係で沈下を算出する方法を提案している¹⁴⁾。</p> <p>液状化による沈下量 (S_L)</p> $S_L = 0.09 \cdot H \cdot (m)$ <p>H: 液状化層厚 (m)</p>	<p>線状地中構造物では、下図に示すように長手方向に対して沈下分布を仮定し、これを強制変位として与え、構造物の応力度照査を行っている¹⁴⁾。</p>	<p>12) 多方面不規則荷重を受け砂の沈下特性： 永瀬英生・石原研而・田部元太，第21回土質工学研究発表会講演集，pp.615～616，1986。</p> <p>13) 液状化による砂地盤の沈下予測法について： 佐々木勉・龍岡文夫・山田真一，第17回土質工学研究発表会講演集，pp.1661～1668，1982。</p>
<p>液状化 地盤の 沈下</p>	<p>新潟地震および日本海中部地震での被害状況から液状化層厚との関係で沈下を算出する方法を提案している¹⁴⁾。</p> <p>液状化による沈下量 (S_L)</p> $S_L = 0.09 \cdot H \cdot (m)$ <p>H: 液状化層厚 (m)</p>	<p>線状地中構造物では、下図に示すように長手方向に対して沈下分布を仮定し、これを強制変位として与え、構造物の応力度照査を行っている¹⁴⁾。</p>	<p>14) 例えば、液状化による鉛直方向の地盤の永久変位：浜田政則・磯山龍二・佐藤修，第19回地盤工学研究発表会，pp.181～184，1987。</p> <p>15) 例えば、地盤の液状化がライフライインに与える被害の研究：安田進 他，平成元年度文部省科学研究費補助金（一般研究(B)）研究成果報告書，pp.123～150，平成2年3月</p>
<p>永 久 変 形</p>	<p>・沈下と同じく、新潟地震や日本海中部地震での震前と震後の空中写真から変位量を求め、これと層厚と傾斜との関係から水平変位量を算出することを提案している¹⁵⁾。</p> $D = 0.75 \cdot \sqrt{H} \cdot \sqrt{\theta}$ <p>ここで、D: 地盤の永久変位 (m) H: 液状化層の厚さ (m) θ: 地表面勾配および液状化層下面勾配のうちの最大の勾配 (%)</p> <p>・上記提案の他、液状化に伴う永久変形（地盤流動）およびそれに伴う盛土等のすべりに関し、その発生機構を説明しその予測方法について実験等を含め各種研究が進められている¹⁸⁾。</p>	<p>・線状は沈下に同様に、長手方向に対して変形分布を仮定し、これを強制変位として与え、構造物の応力度照査を行っている¹⁵⁾。</p> <p>・構造物基礎では、新潟地震での建屋基礎の被害事例を参考に、深度方向の変位分布を仮定して、これを強制変位として弾性床としての梁に作用させる方法などを提案している¹⁷⁾。</p>	<p>16) 例えば、液状化による地盤の永久変位と地震被害に関する研究：浜田政則・安田進・磯山龍二・恵本克利，土木学会論文集 376，pp.221～229，昭和61年12月</p> <p>17) 例えば、地盤の永久変位による基礎杭の被害の解析：吉田望・浜田政則，第8回日本地震工学シンポジウム，pp.55～60，1990。</p> <p>18) 例えば、土木研究所資料第2768号 液状化にともなう地盤流動に関する振動台実験：建設省 土木研究所、平成元年2月</p>

表-2.5.1.6 液状化の原因および現象に着目した構造物の安定解析法（地中構造物）

要因	着目点	提案の要旨	出典
<p>地盤の強度・変形特性の低下と土砂のまわりこみ</p>	<p>浮上り量の定量評価を目的に構造物周辺から底面への砂のまわり込みを考えた計算法</p>	<p>ヒービング的な現象を想定し、図-6.1に示す円弧すべり面を想定した安定計算（安全率）を評価する。これらの結果から、浮上り量～安全率の関係を求め、浮上り量の定量評価を行う。</p> <p>図 6.1 円弧すべり安全率の計算方法 (19)</p>	<p>19) 土木研究所資料第3008号 掘削道路の地震時浮上り量に関する検討：建設省土木研究所，平成3年6月</p>
<p>同上</p>	<p>同上</p>	<p>有限要素法による静的初期応力解析および動的解析による地盤内に発生するせん断応力を求め、室内くり返し試験等での応力～ひずみの関係から、見かけの變形係数を定め、静的自重解析により残留変形量を求める¹⁹⁾。</p> <p>図 5.1 解析フロー (20)</p>	<p>(土構造物にも適用している)</p> <p>20) 例えば、掘削道路の地震時安定性に関する模型振動実験—浮上り量に関する検討—：古賀泰之，古岡潤一，森下義，土木技術資料31-1，pp.42～47，1989</p>
<p>地盤の流体化による水圧の増加</p>	<p>地盤の流体化による荷重として、泥水圧および地震時動水圧を考慮した、構造物の安定性計算法</p>	<p>液状化判定～浮上り検討を行った後、浮上り量に対する設計および水平安定に対する設計により、必要根入れ最と断面剛性を決定するものである。水平安定に対する設計で想定する荷重と抵抗は、図-4に示すように液状化層では液状化に伴い土が泥土化した状態を想定し、泥土圧と動水圧を作用させ、非液状化層は根入れ算定時では土圧、断面照査ではばねとして評価するものである。</p> <p>図 4 作用荷重と計算モデル (21)</p>	<p>矢板締切による対策工に適用 （固化改良の安定計算でも同様の考え方を提案している）</p> <p>21) 既設共同溝に対する鋼矢板締切りによる液状化対策工法の設計法について：藤井弘造，古賀泰之，古岡潤一，佐伯光昭，真鍋進，第21回地震工学研究発表会，pp.637～640，平成3年7月</p>

(4) まとめと課題

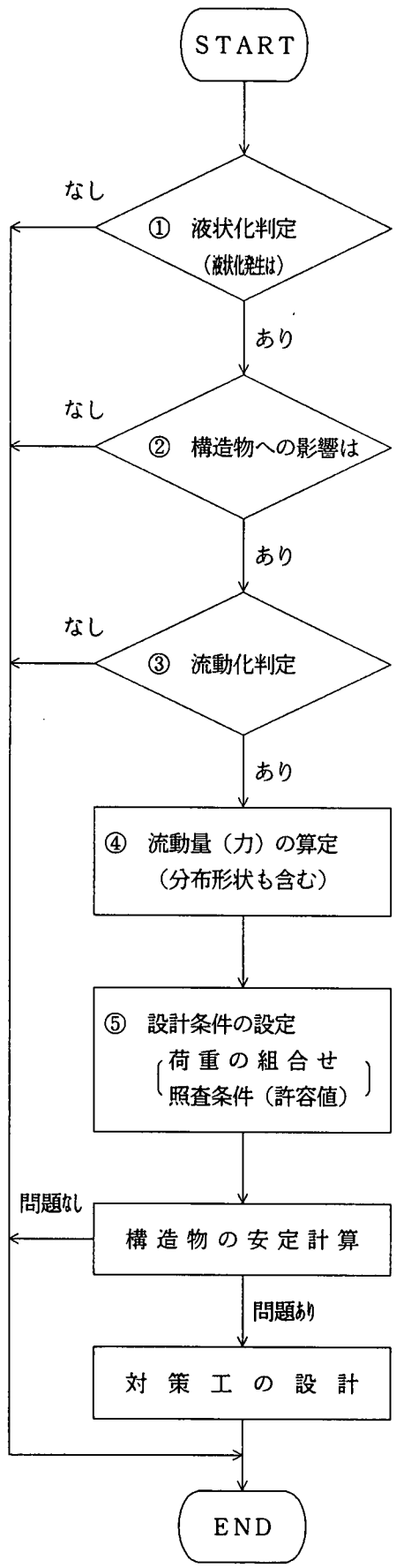
以上、液状化の発生による地盤の側方流動の予測と構造物への影響検討手法について述べてきた。現状では、確たる手法はなく今後の調査・研究によるところが大きいと言わざるを得ない。

すなわち、設計法として確立するためには以下の項目に関する開発が必要であり、これらの項目と検討課題等を整理すると図-2.5.1.16のように示すことができる。

- ① 側方流動の発生の予測手法
- ② 流動量（ひずみ）、流動力等の荷重算定
- ③ 設計計算法
- ④ 対策工法および設計法

しかしながら、これらの技術開発をすべて受けて設計上対応するには相当の時間が必要であり、現状としての対応は、これまでの調査・研究成果を踏え図-2.5.1.17に示す弾性床上の梁モデルで取り扱うことが一般的な手法であり、これらの条件となる変位量（分布形状）および地盤ばね等は、既往の研究成果をもとに設定せざるを得ないと判断できる。

これらの条件のもとに検討し、側方流動の影響が大きいと判断させる場合は、詳細な地盤調査（地盤の非線形特性等の把握）を実施し、既往提案の数値解析手法により解析的な検討を実施するのが望ましいと考えられる。



研究項目	解決すべき課題および問題点
① 液状化判定	<ul style="list-style-type: none"> 地震動外力 液状化強度 判定法
② 構造物への影響度	<p>【構造物への影響度】</p> <ul style="list-style-type: none"> 護岸等からの離れ 埋設位置 (表層非液状化層, 液状化層中)
③ 流動化判定	<ul style="list-style-type: none"> 液状化層厚, 程度および発生深度 地形, 地層構成および護岸等形状・形式 <p>【流動化判定】</p> <ul style="list-style-type: none"> 流動発生の時刻と進展過程 液状化層はΔuの発生により物性が変化する 健全時\Rightarrow不完全液状化時\Rightarrow完全液状化時 (土質材料) \rightarrow (土質\sim液体) \rightarrow (液体)
④ 流動量 (力) の算定	<ul style="list-style-type: none"> 地盤流動量と流動圧発生メカニズムの解明 (非液状化層, 液状化層) 構造物形式・形状との関連; 幅の影響(n B), 形状係数or杭力係数
⑤ 設計計算法	<ul style="list-style-type: none"> 地盤流動と慣性力との重畳? 地盤流動作用時の安全性照査基準
⑥ 対策工の設計	<ul style="list-style-type: none"> 対策工の安全性の確認 (設計法) 構造物への影響検討

図-2.5.1.16 側方流動を考慮した設計の流れと研究項目

参考文献

- 1) 安田 進：液状化の調査から対策工まで，鹿島出版会，昭和 63 年 11 月。
- 2) 安田 進：講座「基礎設計に於ける基準の背景と使い方」3. 基礎設計における液状化の評価，土と基礎，Vol. 40, No. 1, pp. 73～79, 1992.
- 3) 共同溝設計指針，(社)日本道路協会，1986.
- 4) 駐車場設計・施工指針 同解説，(社)日本道路協会，1992.
- 5) 下水道施設耐震対策指針と解説，(社)日本下水道協会，1981.
- 6) ガス導管耐震設計指針，(社)日本ガス協会，1982.
- 7) 水道施設耐震工法指針・解説，(社)日本水道協会，1979.
- 8) 建設省土木研究所他：軟弱地盤耐震対策工法に関する共同研究報告書，P. 411，平成 5 年 5 月。
- 9) 下水道地震対策技術調査検討委員会：兵庫県南部地震による下水道の被害に関する調査報告書（案）第 3 章 処理場・ポンプ場被害関係原因調査，平成 7 年 7 月。
- 10) (社)日本水道協会：1995 年兵庫県南部地震による水道管路の被害と分析，平成 8 年 5 月。
- 11) 濱田、磯山、若松：1995 年兵庫県南部地震 液状化、地盤変位及び地盤条件、(財)地震予知総合研究振興会 1995 年。
- 12) 永瀬英生・石原研而・田部元太：多方面不規則荷重を受ける砂の沈下特性，第 21 回土質工学研究発表会講演集，1986.
- 13) 佐々木勉・龍岡文夫・山田真一：液状化による砂地盤の沈下予測法について，第 17 回土質工学研究発表回講演集，1982.
- 14) 例えば，浜田政則・磯山龍二・佐藤 修：液状化による鉛直方向の地盤の永久変位，第 19 回地震工学研究発表会，1987.
- 15) 例えば，安田 進 他：地盤の液状化がライフラインに与える被害の研究，平成元年度文部省科学研究費補助金（一般研究（B））研究成果報告書，1990.
- 16) 例えば，浜田政則・安田 進・磯山龍二・恵本克利：液状化による地盤の永久変位と地震被害に関する研究，土木学会論文集 No. 376 ， 1986.
- 17) 例えば，吉田 望・浜田政則：地盤の永久変位による基礎杭の被害の解析，第 8 回日本地震工学シンポジウム，1990.
- 18) 土木研究所資料第 2768 号 液状化にともなう地盤流動に関する振動台実験：建設省土木研究所，1989.
- 19) 土木研究所資料第 3008 号 掘割道路の地震時浮上がりに関する検討：建設省土木研究所，1991.
- 20) 例えば，古賀泰之・古関潤一・森下 義：掘割道路の地震時安定性に関する模型振動実験－浮上がりに関する検討－，土木技術資料 31-1，1989.
- 21) 藤井弘造・古賀泰之・古関潤一・佐伯光昭・真鍋 進：既設共同溝に対する鋼矢板締切りによる液状化対策工法の設計法について，第 21 回地震工学研究発表会，1991.

2.5.2 レベル2の地震時の設計法

(1) 耐震設計法の現状

R C 矩形断面の地中構造物を対象に、横断方向の耐震設計法について現行の基準・指針類を調査した。調査結果を表-2.5.2.1に示す。ここに、現行の基準・指針としては阪神・淡路大震災発生以前に発行されたものとした。同表より以下のことがわかる。

- ・ 幅広な地中構造物である地下駐車場については、レベル1地震動に対して横断方向の耐震設計法が示されている。耐震計算法は近年の研究成果を取り入れた新しい応答変位法であり、部材の設計法は許容応力度法による。
- ・ 原子力発電所の屋外重要土木構造物である地中構造物については、レベル2地震動相当の地震動に対して横断方向の耐震設計法が示されている。耐震計算法は動的解析法が推奨されており、部材の設計法は限界状態設計法が取り入れられている。
- ・ 一般的なR C 矩形断面の地中構造物については、レベル1地震動に対する横断方向の耐震設計は、軟弱な地盤中に埋設されているといった特殊な場合以外は不要となっており、レベル2地震動対応の耐震設計は横断方向、縦断方向とも見あたらない。

以上より、現行の基準・指針類では、地中構造物の横断方向の耐震設計が必須となっているものはレベル1地震動対応においても地下駐車場だけといってよく、レベル2地震動対応の耐震設計に至っては原子力屋外重要土木構造物を除けば皆無である。

表-2.5.2.1 現行基準・指針における地中構造物の耐震設計法

基準・指針名	制定年月日	制定者	耐震設計法の規定	
			横断面方向	レベル2地震動対応
共同溝設計指針	昭和61年3月	(社)日本道路協会	標準的な断面に対しては地震の影響少なく、耐震設計の必要なし	縦断方向の検討に対してレベル1地震動対応のみの地震力と設計法を示す
トンネル標準示方書(開削編)同解説	昭和61年6月	(社)土木学会	ほぼ均一な地盤中にありかつ土被りが大きい場合には耐震設計の必要なし	レベル1地震動対応のみの地震力と設計法を示す
国鉄建造物設計標準解説 -基礎構造物・抗土圧構造物	昭和61年3月	(社)土木学会	軟弱地盤または地震時変位が大きい地盤中にありかつ硬質地盤に着床または縦長の地中構造物は耐震設計すること 上記以外は地震時の検討は不要	レベル1地震動対応のみの地震力と設計法を示す
駐車場設計・施工指針同解説	平成4年11月	(社)日本道路協会	地下駐車場の短手、長手両方向に対し応答変位法により耐震設計する	レベル1地震動対応のみの地震力と設計法を示す
原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震設計に関する安全性照査マニュアル	1992年9月	(社)土木学会 原子力土木委員会	海水管ダクトおよび取水ピット等の地中構造物横断面に対し動的解析により耐震性を照査	レベル2地震動相当の地震動(S2地震動)に対する限界状態設計法を示す

(注) RC矩形断面地中構造物の基準・指針が対象

(2) 現状技術による耐震設計の可能性

R C 矩形断面の地中構造物の横断方向について、現状技術に基づく耐震設計法を調査し、まとめた。

i) 阪神・淡路大震災における地中構造物の被害分析に関する文献調査

阪神・淡路大震災では数多くの地中構造物が被害を受けた。ここでは、R C 矩形断面地中構造物の横断方向を対象とした被害の分析結果に関して文献調査を実施した。文献は、1996年1月の阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集（土木学会）より抽出した^{1) 2) 3) 4) 5) 6) 7)}。被害分析結果をまとめて以下に示す。

- ・ 被害分析の対象は、神戸高速鉄道大開駅3編、神戸市営地下鉄上沢駅3編、神戸市営地下鉄三宮駅1編で、被害はいずれもR C 製中柱に損傷を受けており、上沢駅および三宮駅では中柱に斜めひび割れが発生し、大開駅では中柱が破壊に至って上床版が折れ曲がり上を走る道路が沈下した。
- ・ 耐震計算法は、2次元動的F E M非線形解析、2次元動的F E M等価線形解析と静的骨組非線形解析の組み合わせ、非線形応答変位法、が用いられており、構造物はほとんどの被害分析でトリリニア型非線形モデルで表わされ、地盤は等価剛性またはバイリニアモデル型非線形モデルで表わされていて、構造物および地盤の材料非線形性の考慮が不可欠であることを示している。また、硬軟の地層にまたがるような地中構造物については、地中構造物への地震荷重が大きく影響を受けるため、地盤のモデル化に留意する必要があることが指摘されている。
- ・ 被害発生メカニズムは、横断方向に作用した水平動による地震荷重を受けて構造物がせん断変形させられ、せん断耐力が曲げ耐力より小さい中柱がせん断破壊したものと推定されている。また、上下動の影響は小さいとする分析結果が示されている。

ii) 阪神・淡路大震災の復旧対応または改訂された基準・指針類の調査

R C 矩形断面地中構造物の横断方向について、阪神・淡路大震災の復旧設計対応として出された基準・指針類あるいは阪神・淡路大震災の被害分析に基づいて改訂された基準・指針類について調査・整理した。前者として鉄道新設構造物の当面の耐震設計の参考資料⁸⁾、後者として改訂されたコンクリート標準示方書⁹⁾、がある。以下に特徴をまとめる。

- ・ 新設鉄道開削トンネルの当面の耐震設計法では、地震力は兵庫県南部地震における強震記録の分析結果より地盤の水平震度および速度応答スペクトルを与え、耐震計算は構造物をトリリニア型、地盤をバイリニア型の非線形モデルで表した応答変位法とし、安全性評価は限界状態設計法に基づき曲げ耐力の検討、せん断耐力の検討および破壊形式の検討を行うこととなっている。
- ・ 改訂されたR C 示方書では、地中構造物については設計例で詳細に耐震設計法が紹介されており、地震力は土木学会第二次提言を受けて活断層による地震またはプレート境界地震を想定して地盤の地震応答解析を実施し、耐震計算は構造物をマクロモデル、地盤は等価剛性（ただし引張りカットを考慮）で表した応答変位法とし、安全性評価は限界状態設計法に基づき曲げ破壊モードとせん断破壊モードに分けてそれぞれ検討を行うこととなっている。設計例では、レベル2地震動に対しては周辺地盤が液状化するとして、地盤の地震応答解析として有効応力解析を実施

し、液状化の影響を今後の研究課題としながらも応答変位法に取り入れている。

iii) 地中構造物のレベル2地震動対応の耐震設計法

RC矩形断面地中構造物の横断方向について、前節までの調査結果を基にレベル2地震動対応の耐震設計法をまとめると、従来より設計基準等で採用されてきた応答変位法を基本とし、地震荷重の設定方法として、1次元地盤の地震応答解析による詳細法と設計用速度応答スペクトルによる簡易法を用いることが可能である。ここでは、応答変位法の耐震計算について本報告書の内容を補足する。

a. 地震荷重の算定

1次元地盤の地震応答解析結果より応答変位法の地震荷重を算定する方法としては、非液状化地盤を対象とした全応力動的等価線形解析による場合と、液状化地盤を対象とした有効応力動的非線形解析による場合とがある。両手法による地震荷重の算定法を表-2.5.2.2に示す。ここに、液状化を考慮した応答変位法の地震荷重は今後の研究課題であり、同表には参考例を示した。

設計用速度応答スペクトルより応答変位法の地震荷重を簡易的に算定する方法をまとめて表-2.5.2.3に示す。レベル2地震動に対応した設計用速度応答スペクトルとしては、兵庫県南部地震におけるポートアイランドGL-83mと神戸大学での観測記録に対し20%減衰として求められたものを包絡して設定したものが、鉄道新設構造物の基礎および開削トンネル設計用に暫定的に設定されている¹³⁾。

表-2.5.2.2 1次元地盤の地震応答解析による応答変位法の地震荷重

地震荷重		全応力動的等価線形解析	有効応力動的非線形解析
水平地震力	応答変位	構造物下端深さからの相対変位を上面および側面に作用	過剰間隙水圧の上昇過程における構造物下端深さからの相対変位を上面および側面に作用
	周面せん断力	構造物上面、側面、下面に相当する深さでのせん断応力を作用	過剰間隙水圧の上昇過程における構造物上面、側面、下面に相当する深さでのせん断応力を作用
	躯体・負載重量の水平慣性力	構造物上下端間の平均的加速度または構造物中央深さの加速度を重力加速度で除した値を水平震度とし、慣性力等を算定	過剰間隙水圧の上昇過程における構造物上下端間の平均的加速度または構造物中央深さの加速度を重力加速度で除した値を水平震度とし、慣性力等を算定
	内容水の動液圧		
鉛直地震力	上載土の鉛直慣性力	必要に応じて設計水平震度の1/2を設計鉛直震度とし、慣性力等を算定	必要に応じて設計水平震度の1/2を設計鉛直震度とし、慣性力等を算定
	躯体・負載重量の鉛直慣性力		
	内容水の動液圧		
	静止土圧の増分		
過剰間隙水圧		—————	過剰間隙水圧の上昇過程における構造物上面、側面、下面に相当する深さでの過剰間隙水圧

(注) 液状化を考慮した応答変位法の地震荷重は、今後の研究課題であり、本表では参考例として示した

表-2.5.2.3 設計用速度応答スペクトルによる応答変位法の地震荷重

地震荷重		設計用速度応答スペクトルに基づく計算方法
水平地震力	応答変位	<p>表層地盤の応答変位は設計用速度応答スペクトルより次式で求める</p> $u(z) = \beta \cdot \phi(z) \cdot T_g / 2\pi \cdot S_v$ <p> $u(z)$: 表層地盤の応答変位 β: 表層地盤の刺激係数 $\phi(z)$: 表層地盤の固有関数ベクトル T_g: 表層地盤の地震時の固有周期(sec) S_v: 基盤面における設計用速度応答スペクトル (m/sec) </p> <p>構造物への入力変位は構造物下端深さからの相対変位を作用</p>
	周面せん断力	<p>表層地盤のせん断応力は応答変位より次式で求める</p> $\tau(z) = G_g(z) \cdot \gamma(z)$ <p> $\tau(z)$: 表層地盤の深さzにおける地震時せん断応力 $G_g(z)$: 表層地盤の深さzにおける地震時せん断弾性係数 $\gamma(z)$: 表層地盤の深さzにおける地震時ひずみ 応答変位$u(z)$の深さ方向の平均変化率として求める </p> <p>構造物上面、側面、下面に相当する深さでのせん断応力を作用 ただし、地盤のせん断強度を上限値とする</p>
	躯体・負載重量の水平慣性力	<p>設計水平震度を構造物上下端間の平均的加速度として次式の等価震度で与え、慣性力等を算定</p> $k_h(z) = (\tau(z_u) - \tau(z_l)) / \gamma_l(z) \Delta H$ <p> $k_h(z)$: 地中構造物の設計水平震度 $\tau(z_u), \tau(z_l)$: 地中構造物の上下端における地震時せん断応力 $\gamma_l(z)$: 表層地盤の深さzにおける単位体積重量 ΔH: 地中構造物の上下端間の高さ </p>
	内容水の動液圧	
鉛直地震力	上載土の鉛直慣性力	<p>必要に応じて設計水平震度の1/2を設計鉛直震度とし、慣性力等を算定</p>
	躯体・負載重量の鉛直慣性力	
	内容水の動液圧	
	静止土圧の増分	

b. 構造解析モデルの作成

レベル2地震動対応の応答変位法の構造解析モデルと地震荷重の例を図-2.5.2.1に、RC部材の非線形特性の例を図-2.5.2.2に、地盤ばねの非線形特性の例を図-2.5.2.3に示す。ここに、地盤のせん断ばねは線形となっているが、これは応答変位と周面せん断力を作用させ、かつすべりを厳密に考慮することが困難なためである。応答変位法にすべりを厳密に考慮する方法として、地盤のばねと剥離・すべりのばねの二重ばねとする方法も提案されている¹⁰⁾。

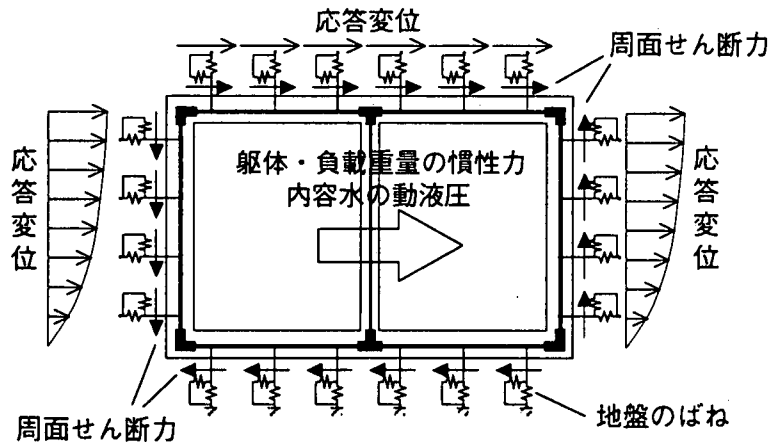


図-2.5.2.1 応答変位法の構造解析モデルと地震荷重

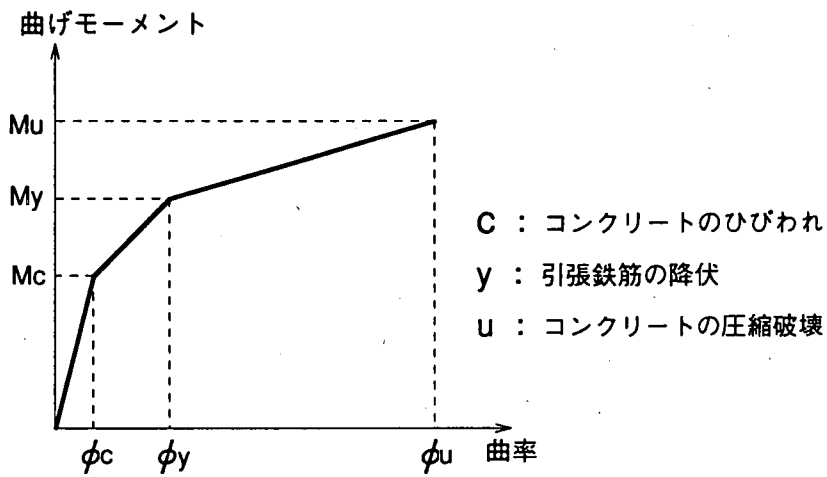


図-2.5.2.2 RC部材の非線形特性の例

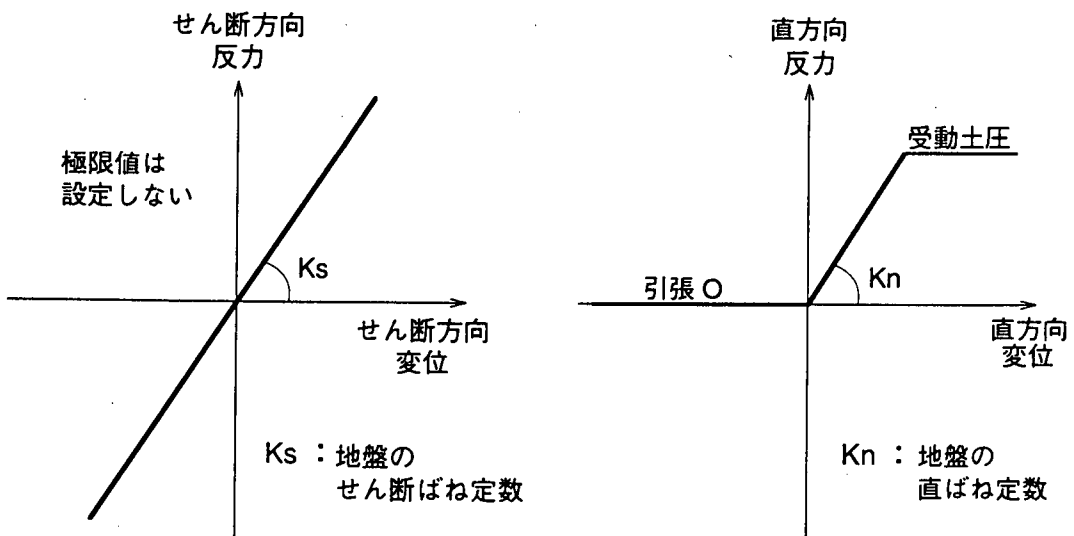


図-2.5.2.3 応答変位法の地盤ばねの非線形特性の例

参考文献

- 1) 竹脇尚信、大槻明、大西有三：兵庫県南部地震による地下鉄構造物の被害メカニズムの一考察、阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、PP. 221-226、1996年1月。
- 2) 佐俣千載、水口和彦、杉山郁夫、川満逸雄：神戸市営地下鉄三宮駅の被災原因の検討、阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、PP. 227-230、1996年1月。
- 3) 佐俣千載、長光弘司、山本一敏、森伸治：非線形応答変位法による地下鉄駅舎の被災メカニズムの考察、阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、PP. 231-238、1996年1月。
- 4) 田尻勝、佐俣千載、志波由紀夫、坂下克之、渡辺和明：地震応答解析による地下鉄駅舎の被災メカニズムの考察、阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、PP. 239-246、1996年1月。
- 5) 廣戸敏夫、梅原俊夫、青木一二三、中村晋、江寄順一、末富岩雄：神戸高速鉄道・大開駅の被害とその要因分析、阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、PP. 247-254、1996年1月。
- 6) 田尻勝、佐俣千載、松田隆、大内一：地下鉄駅舎の被害に関する一考察、阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、PP. 255-262、1996年1月。
- 7) 廣戸敏夫、飯田廣臣、青木一二三、小向将介、山原陽一、横山正樹：神戸高速鉄道・大開駅復旧工事の設計と施工、阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、PP. 467-474、1996年1月。
- 8) (財) 鉄道総合技術研究所：新設構造物の当面の耐震設計に関する参考資料、平成8年3月。
- 9) (社) 土木学会：コンクリート標準示方書 耐震設計編、PP. 70-97、平成8年7月。
- 10) 福嶋研一、立石章：地中構造物横断面のレベル2地震動に対する応答変位法、土木学会第51回年次学術講演会講演概要集—B、PP. 836-837、平成8年9月。

2.5.3 断層や地表のずれを横切る場合の対応策

(1) 概要

1) 要旨

「土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」1996-1-10（土木学会）」には「内陸直下地震に特有の問題として、地震断層のずれによる相対変位が地表面まで達し、構造物が断層を横断する場合がある。断層の正確な位置の特定が困難な場合があること、また線状構造物では断層を避けて通れない場合があることなど、現代の科学技術ではその対処が困難な場合が多く、今後の研究・開発を待たなければならない。」と記述されている。

従って、本調査では、地中構造物（トンネル、パイプライン、共同溝等）が断層や地表のずれを横断して設置された場合の事例調査、文献調査を行い、今後の断層横断部の設計課題（断層の特性、断層の位置、ずれ量の推定、設計フローチャート、対応策等）を整理することを目的とする。

現行の各種設計基準・指針についての調査も行ったが、明らかに断層や地盤のずれに対する設計基準を示している記述はほとんどみられなかった。水道施設耐震工法指針・解説に「地層の変化界等の地盤が不安定で危険な場所はできるだけ避ける」とあり、調査した設計基準・指針のほとんどに「地盤の相対変位が生じる部分には変位を吸収するなどの対策を講じる」等の記述はあるが、地盤沈下等を想定したもので、断層部を通過する場合の具体的な設計については触れていない。

断層と地中構造物に関する文献調査を行ったが、海外の文献を含めて、トンネルに関するものが一番多く国内では「丹那トンネル」「稲取トンネル」等の事例についての論文があった。断層を横断することにより生じたトンネルのずれの事例や、ロードセルや伸び計を用いて観測した結果、断層モデルを適用し地盤の地震時の変位応答を算定したものなどがあり、パイプラインについては、断層を横断する水道管の具体的な設計例の紹介、被害事例と応急対策、ネットワークとしての信頼性の検討などがあった。共同溝については、フレキシブルジョイントの地震応答挙動の解析手法やジョイントの位置についての検討などがあった。

断層そのものについては、断層の定義、種類や特徴、発見・認定方法、活動度の分類、日本における活断層の分布等について、設計上必要と思われる項目を参考文献より引用して紹介した。

断層そのもののずれ量については、阪神・淡路大震災をはじめ文献による事例調査を行った。過去の断層変位量は水平方向の方が垂直方向の変位量よりも大きいものが多い。そのずれ量の最大値は水平方向約2.3m、垂直方向約1.5mである。また、クリープ的に常時ずれているものでは、アメリカのBay Area Rapid Transitトンネルで、年間約6～8mm（6～8m/千年）のずれ量が観測されている。従って、設計対象構造物が断層を横断する場合の想定ずれ量は、その活断層の過去の活動記録や現状の観測記録より推定されるべきであるが、千年オーダーでは、約1～2m程度と思われる。

断層としてのずれ量は千年単位で評価されるものであり、設計対象構造物の耐用年数を仮に50年程度とすると、千年単位のずれ量に対して、それが発生する確立は5%程度と考えられ、そのずれ量に対して安全な耐震構造を設計するのは技術的に困難な場合もあり、その施設の重要度も十分検討して設計する必要がある。

地中構造物の断層によるずれ量は、阪神・淡路大震災においては、塩屋川トンネルで8cm程度のずれが生じたが、他の地中構造物の断層による被害はほとんどなかった。過去の事例としては丹那トンネルで最大2m、稲取トンネルで最大73cmのずれが報告されている。

断層を横断する構造物の設計手順については、フローチャートで示したが、断層横断部では構造的に対応することが困難な場合があり、レベル2地震動に対する耐震性能と同じように、「重要な構造物は、損傷が発生したり、塑性変形が残留しても地震後比較的早期に修復可能であることを原則とし」、「それ以外の構造物は損傷して修復不可能となっても、構造物全体系が崩壊しないことを原則とする」。また、第二次提言に述べられているように「ライフラインは災害時に必要な機能を維持し、早急な復旧を可能とする様、幹線の設定、多ルート化、ブロック化の推進、代替手段の採用等システム面からの対策を取り入れる必要がある」。

また、具体的な対応策を検討するために、断層横断部における地中構造物の対応策の例を調査した。対応策としては、変位量を吸収するために、可撓性を持たせた構造（可撓性継手、可撓管、二重化）にすることを基本とし、補助的なものとして強度の増加（構造物の断面量の増加）、損傷時の機能確保（断面の確保、拡幅等）、代替手段（ダブルルート化等）、ソフト面（復旧スペース、安全、避難路の確保等）などに分類され、設計上断層を考慮して実施されたものから、アイディア的なものまでであるが、いずれも断層が実際にずれてその機能を検証したものはなく、断層の位置、ずれ量を含めて、今後の研究・開発を待たなければならない。

パイプラインでは断層を考慮した設計がなされた例があるが、トンネルや共同溝については、ほとんど具体的な設計例がなかった。構造物はできるだけ断層を横断しないように設計することが望ましいが、線状構造物のように横断せざるを得ない場合には、断層の位置及びずれ量を十分検討し、構造物の重要度に応じた経済的な設計を行う必要がある。

2) 対象地中構造物

地震断層や地表のずれが発生するところは、特殊な箇所と考えられるが、地中構造物の中でもトンネル、パイプラインや共同溝のように極地的でなく線的な構造をしているものは、断層部分を避け得ない場合があり、設計上も十分な検討と配慮が必要である。

地震断層や地表のずれが発生する位置は、断層の調査データがある場合には、ある程度の推測が付くものと考えられ、スポット的な構造物、たとえば地下駐車場のようなのは、極力その場所への建設は避けるべきであり、今回は以下の構造物について調査、検討を行うことにする。

a) トンネル

トンネルのなかでも山岳トンネルのような硬質地山中のトンネルについてはほとんど被害が見られないが、断層にずれが生じた場合には、トンネルの被害は免れないと思われる。都市部のシールドトンネルのように軟質地山中のトンネルは、都市機能を保持する上で重要であり、断層がずれた場合でも、未固結被覆層の厚みにより、地表への出現形態が異なり、それに応じた対応策を考える必要がある。

<用途：鉄道、道路、地下鉄、上水道、下水道等>

b) パイプライン

パイプラインの中でも大口径については、トンネルやシールドの中に配管される場合も多いが、トンネル内部に空けきのない構造のものはパイプラインとして扱うのが妥当と考えられる。中小口径のパイプラインは直に埋設されている場合が多く、地震や断層による被害も受けやすい。パイプラインは、他の構造物に比べると断面量が小さいために、強度的に対応するのは難しく、地盤の大きな変位に対しては、可とう性を持たせて吸収する方法が一般的である。具体的な設計事例もあるが、対応策については十分な検討を行う必要がある。

<用途：上水道、下水道、工業用水等>

c) 共同溝

共同溝は比較的大都市の中心部にあり、今後は地中構造物として増加することが考えられる。共同溝は、公益物件を収容するための施設であり、開削によるコンクリート構造物（ボックスカルバート等）とシールド等によるトンネル形式に大別される。実際の被害事例は少ないが、断層のずれに対しては、変位を吸収できる構造は設計上困難であり、躯体が損傷により完全に破壊されないようにする事が大切である。

<用途：電気、ガス、上水道、電話、下水道、工業用水等>

(2) 現行の各種設計基準・指針の調査

「土木構造物の耐震基準等に関する第二次提言」には「2.3 地中構造物が保有すべき耐震性能と

と耐震設計法(4)地震断層を横切る地中構造物」で「活断層の位置が明確に知らされている場合には、その位置での地中構造物の大断面化、二重化、可とう化、構造物と内部施設の絶縁化などの対策が考えられるが、技術的に困難な場合があるので、システムとしての代替性などのソフト面からの対策も併せて考慮する必要がある。」と記述されている。

「現行の耐震設計基準・指針等」に、「断層や地表のずれ」に関する記述があるかどうかの比較調査を行った。(表-2.5.3.1 参照)

〈調査概要〉

- 1)地震断層を横切る場合の具体的な設計基準について触れているものは少ない。
- 2)地盤変化の大きな所等に対しては可とう性構造物を使用する。
- 3)ライフラインシステム計画に関するものは石油パイプラインや上下水道で多少述べられている。
- 4)地震断層を横切る地中構造物に関する記述については、水道施設設計指針に「管路は良好な位置に計画するものとし、地層の変化界等の地盤が不安定で危険な場所はできるだけ避ける」とあり、断層部を通過する場合の具体的な設計については触れていない。

〈調査概要〉

①トンネル標準示方書(シールド工法編) 土木学会	(1996.7)
②トンネル標準示方書(開削工法編) 土木学会	(1996.7)
③トンネル標準示方書(山岳編) 土木学会	(1989.9)
④石油パイプライン技術基準(案) 日本道路協会	(1974.3)
⑤水道施設耐震工法指針・解説 (社)日本水道協会	(1979.12)
⑥ガス導管耐震設計指針 (社)日本ガス協会	(1982.3)
⑦地下管路設備の耐震設計指針 NTT筑波フィールド技術開発センター	(1987)
⑧下水道施設地震対策指針と解説 (社)日本下水道協会	(1981)
⑨土地事業設計指針「耐震設計」 農林水産省構造改善局建設部	(1984.3)
⑩共同溝設計指針 (社)日本道路協会	(1986)
⑪駐車場設計・施工指針同解説 (社)日本道路協会	(1992.11)

表-2.5.3.1 「土木構造物の耐震基準等に関する第二次提言」と「現行の耐震設計基準」との比較

<p>第二次提言に述べられた地中構造物が 保有すべき耐震性能と耐震設計法</p>	<p>石油パイプライン技術基準 (案) 地震対策要綱 日本水道協会 1974.3</p> <p>(2.2.6)不平等下、地すべりの発生する所 ・堤管が損傷を受けることのないよう 必要な処置を講じる ・堤管に生じる応力を検知するための 装置を設置する (3.7.1)さや管の基本設計 解説1.1 ・地質の急変部、不沈下構造物との取付部 、断層断片において地盤及び不平等下の影 響を軽減するために、地盤との拘束を断 断する</p>	<p>水道施設耐震工法指針・解説 社団法人 日本水道協会 1979.12</p> <p>(1.1)基本的な考え方 ・施設物間に相対変位を生じる部分には 伸縮可撓性を付与し、耐震継ぎ手を設ける 等、変位の吸収や応力を緩和する構造 としなければならぬ (1.2.2)耐震設計で考慮すべき地盤の影響 ・比較的一様な力学的性質をもつ地盤に建設 される施設と力学的性質の異なる地盤に 建設される施設とは異なる</p>	<p>ガス専管耐震設計指針 高圧ガス専管耐震設計指針 社団法人 日本ガス協会 S57.3</p> <p>(3.8)急変地盤における直管の耐震設計 ・一樣地盤中よりも大きな地盤ひずみが 発生する場合がある ・地盤ひずみ ・基礎傾斜角より地盤ひずみをもとめる</p>	<p>ガス専管耐震設計指針 一般 (中・低圧) ガス専管耐震設計指針 社団法人 日本ガス協会 S57.3</p> <p>(2.4)配管系の地盤変位吸収能力 ・メカニカル継ぎ手を用いた地盤変位吸収 方法の記述がある。</p>	<p>地下管路設備の耐震設計指針 (N.I.T) NTT電気7/1社 技術開発社カ・1987</p> <p>・軟弱地盤における対策： 地盤変位を吸収できる継ぎ手を設置</p>	<p>下水道施設地震対策指針と解説 社団法人 日本下水道協会 1981</p> <p>(1.3)耐震対策のための考慮 ・(3)地震時に差動の著しく異なる箇所に は、変位を吸収するなどの対策を講ず る (1.13)耐震設計 基本方針 ・地震時の差動の異なる異種構造物間の 接続部は伸縮可とう性をとらせる (1.23)管路施設 河川等横断管まよ ・伏越し管と上下流管まよとの接続部に 変位を吸収する処置等を講ずることが 望ましい (1.26)管路施設 汚水圧送管及び送流管 ・構築物加筋等の必要箇所には、可とう 性伸縮継ぎ手を設ける</p>
<p>2. ライフラインシステムの計画 レベル2地震動： 幹線ライフラインの機能維持 これが困難な場合はシステム対策 (多ルート、ブロック化、 代替手段の採用)</p>	<p>1)緊急送断弁の設置 (5-1) ・漏洩等の異常事態が発生した場合、 直ちに異常箇所周辺の弁を閉鎖 ・設置場所についても規定している 2)漏洩検知装置 (5-2) 3)感震装置 (5-5)</p>	<p>(1.1)基本的な考え方 ・水道システム全体として給水機能をで きるだけ保持し得るように留意しなけ ればならない ・導水管・送水管路・配水幹線において 行うものとする ・隣接都市間においても、相互連絡を行う ことが望ましい ・特に、重要な施設で、被害を受けやすく、 その復旧が困難または長期を要したり、あ るいは断水箇所を見出しにくい施設につい ては、2個以上に分散するか、予備施設を 設けることが望ましい (2.5.1)管路計画 ・一系統強化、複系統化、相互連絡化、ル ープ化およびブロックシステムがある ・管路は500mから1000m間隔に制水弁を設け る、また必要に応じて緊急送断弁を設けて 管段としての機能を区分できるようにする ことが望ましい</p>	<p>なし</p>	<p>なし</p>	<p>なし</p>	<p>(1.2)下水道システム全体としての対応 地震時においてもシステム全体として の機能を保持するよう計画及び設計に あたっては、十分に配慮する必要がある (1.20)管路施設 一般事項 ・管路は効率的な整備を考慮し、可能な 場合は精緻化及び系統間の連絡をして おくことが望ましい (1.26)管路施設 汚水圧送管及び送流管 ・管路は精緻とし、それぞれ別路線に布 設して、連絡管まよを設置することが 望ましい</p>
<p>3. 地震断層を横切る地中構造物 活断層・大断面化、二重化、可撓化 代野性等ソフト面の対応</p>	<p>なし</p>	<p>(2.5.1)管路計画 ・管路は良好な位置に計画するものとし、地 層の変化界等の地盤が不安定で危険な場所 はできるだけ避ける</p>	<p>なし</p>	<p>なし</p>	<p>なし</p>	<p>なし</p>

表-2.5.3.1 「土木構造物の耐震基準等に関する第二次提言」と「現行の耐震設計基準」との比較

第二次提言に述べられた土木構造物が保有すべき耐震性能と耐震設計法	トンネル振動示方書 (シールド工法編) 土木学会 (1996.7)	トンネル振動示方書 (開削工法編) 土木学会 (1996.7)	トンネル振動示方書 (山岳編) 土木学会 (1999.9)	共同耐震設計指針 (社) 日本道路協会 (1986) 震度3.0m間隔に伸縮継ぎ手を設ける	駐車場設計・施工指針同解説 (社) 日本道路協会 (1992.11)	土地改良事業耐震設計指針 「耐震設計」 農林水産省構造改善局建設部 (S59.3)
1. 可操性構造物の積極的な採用	地震対策として、トンネル自身を可とう構造とする。異形構造物との接続部を可とう構造とすること	地震対策として、耐性、形状の奇しく異なるトンネルの接続部への可とう性継ぎ手の使用に目処している	なし	なし	なし	(2.3) 埋設管の耐震設計 (1) ③ ・管体と固有周期の異なる付帯構造物との接合部では、地震時に大きな変形や応力が発生することが考えられるので伸縮可とう性継ぎ手を設けることが望ましい
2. ライフラインシステムの計画 レベル2地震動: 併断ライフラインの機能維持 これが困難な場合はシステム対策 (多ルート、プロック化、 代替手段の採用)	なし	なし	なし	なし	なし	なし
3. 地震断層を横切る地中構造物 活断層: 大断面化、二重化、可操化 代替性等ソフト面の対策	なし	なし	なし	なし	なし	なし

<参考資料>

【書籍名】

- 石油パイプライン技術基準 (案)
- 水道施設耐震工法指針・解説 社団法人 日本水道協会
- ガス専用耐震設計指針 社団法人 日本ガス協会
- 地下管線耐震設計指針 NTT筑波7-FIELD 技術開発セク-
- 下水道施設耐震対策指針と解説 社団法人 日本下水道協会
- 土地改良事業耐震設計「耐震設計」 農林水産省構造改善局建設部
- 液状化対策の調査・設計から施工まで 社団法人 土質工学会
- 地中埋設管の調査・設計から施工まで 社団法人 土質工学会
- ライフライン地震工学 高田至朗 共立出版株式会社
- 動的解析と耐震設計第4巻7/7(1)施設 トンネル振動示方書 (シールド工法編) 社団法人 土木学会 技報堂出版
- トンネル振動示方書 (開削工法編) 社団法人 土木学会
- トンネル振動示方書 (山岳編) 社団法人 土木学会
- 共同耐震設計指針 社団法人 日本道路協会
- 駐車場設計・施工指針同解説 社団法人 日本道路協会

【発行年月】

- 昭和49年 3月 (1974.3)
- 昭和54年12月 (1979.12)
- 昭和57年 3月 (1982.3)
- 昭和62年 (1987)
- 昭和66年 (1981)
- 昭和59年 3月 (1984.3)
- 平成 5年 2月 (1993.2)
- 昭和59年 6月 (1984.6)
- 平成 3年 9月 (1991.9)
- 昭和59年 7月 (1989.7)
- 平成元年 7月 (1986.7)
- 平成 8年 7月 (1996.7)
- 平成元年 9月 (1989.9)
- 昭和61年 (1986)
- 平成 4年11月 (1992.11)

(3) 文献調査

「断層や地表のずれ」と「地中構造物（トンネル・パイプライン、共同溝等）」をキーワードに文献調査を行った。断層通過部の施工に関するもの、液状化に関するもの等は除いた。（表-2.5.3.2 参照）

表-2.5.3.2の左側に文献名・著者・参考ページ・発行年等を載せてあり、右側には日本科学技術情報センター（JICST）による文献概要を引用し、場合によっては多少の補足説明を付けた。文献名称の後に付く番号はJICSTの記事番号である。

文献調査の結果としては、トンネルに関するものが一番多く（10編）、次にパイプライン（8編）、共同溝に関してはわずかしかなかった（2編）。

文献内容の概要を以下に示す。

1) トンネル

トンネルが断層のずれにより被害を受けた事例としては、昭和5年の丹那トンネル掘削中に2mの変位が生じた例や1978年伊豆大島近海地震（M7）で伊豆急行稲取トンネルで最大73cmの食い違いが生じた例がある。ゆっくり動いている例ではHayward Faultを横断するトンネルでロードセルや伸び計を用いて計測した結果、年6～8mmずれている観測結果が報告されている。

活断層を横断するトンネルの設計では断層変位の評価が必要であるが、遠心模型実験を行い定量化したり、数値解析モデルを用いて変位等を求めている例がある。ロサンゼルスの大口径下水道トンネルでは想定される地震のマグニチュードと断層のずれに対して検討を行っており、800年毎に20cmのずれが生じM6.5の地震が発生するか、1600毎に45cmのずれが生じM7.0の地震が発生すると推定している。

設計や対策については、恵那トンネルで著しく粘土化した300mに及ぶ大断層を横断したとき、数値解析を行い、施工時の計測データで修正し最適な設計手法の確立を試みたものもある。また、前述のロサンゼルス下水道トンネルでは二重管方式による断層横断箇所設計法や水道管継ぎ手に必要な条件が述べられている。

2) パイプライン

阪神・淡路大震災においても活断層のずれにより、小口径の水道管の被害はあったが、大口径管の被害は見られなかった。文献調査でも国内ではパイプラインの大口径管の被害事例は見あたらないが、これは大口径管の場合は断層を避けるなど設計時に何らかの配慮がなされていたためと思われる。ロサンゼルスランダース地震（M7.5）では、ユッカ溪谷に大きな地表断層が現れ、水道管が非常に古かったこともあり、数百カ所で管が破壊され復旧に数週間かかった例がある。

具体的な設計事例としては、大阪の小野原断層を口径1800mmの水道管をシールド内に配管し、ダクタイト管の耐震継ぎ手（US形）を用いて断層変位を吸収するように設計されている例や横須賀市の武山活断層を通過するシールド内に口径1200mmの水道管と口径900mmの下水管を配管し、伸縮可とう管を用いて断層変位を吸収している例がある。また、サンフランシスコのHayward断層を横断する大口径水道パイプラインでは、断層によるずれを想定して、それに伴うパイプラインの応答の数値を求め、地盤とパイプの相互作用によって引き起こされるパイプの挙動を評価し

ている。断層による地表のずれが最もありそうな位置を30mから150mの範囲内とし、そこに発生するずれ量を0.5mから3mの幅と推定している。また、断層のずれ量の予測についての確率的評価も行っている。

カリフォルニア州の水道ネットワークについて貯水池、ポンプ場、トンネル等をネットワークのノードとしてモデル化し、ノードの損傷を地盤の地震動や断層による不同沈下としたネットワークの信頼性の評価を行っているものもある。

断層横断部の対応策としては、可とう継ぎ手を用いて変位を吸収する方法が一般的であり、パイプの強度で対応することは難しく、（圧縮には弱い、せん断や回転が生じる場合もある）収縮継ぎ手や回転継ぎ手（伸縮可とう管）の設置が必要になる。パイプの埋設条件に対して、浅埋設にする、肉厚を厚くする、断層を直角に横断する、砂で埋める、共同溝に入れるなどの方策を検討しているものもある。

3) 共同溝

共同溝に関する断層横断部の具体的な設計例は少なかったが、フレキシブルジョイントを設けることにより駆体の応力を軽減したり、断面サイズを大きくすることにより応力の軽減をはかった設計例がある。また、フレキシブルジョイントの位置についても、等間隔に設けるよりも、ジョイントがないとして計算された最大断面力の発生位置に設ける法が効果的であることが示されている。

表-2.5.3.2. 「断層や地表のずれ」と「地中構造物(トンネル、パイプライン、共同溝等)」に関する文献調査(1)

No	文献名・著者等	文献内容要旨	分類
①	鉄道と地震 活断層と鉄道構造物 池田俊雄 (国鉄構造物設計事務所) JICST 95A0821395 VOL. 38, NO. 9 PAGE. 23354-23357 1995	地震の原因となる断層、活断層とはどんなものかを解説し、実際に活断層がどのように鉄道構造物と関係しているか二三の実例を示した。実例としては、1) 丹那トンネル掘削中の昭和5年11月の地震でトンネル部分に2mの変位を生じた、2) 1978年伊豆大島近海地震(M7)で伊豆高行鉄道箱取トンネルは最大73cmの食い違いを生じた、3) 山陽新幹線新神戸駅高架橋は設計上特別な配慮をしたこともありほとんど無被害であった、ことなどを挙げた。	(トンネル) 事例
②	78伊豆大島近海地震によるトンネル構造物の変形の解析 JICST 83A0178588 川上英二(埼玉大工) S0494A 日本地震工学シンポジウム講演集 VOL. 6th PAGE. 1857-1864 1982	箱取トンネルに断層モデルを適用しトンネル軸に対する地盤の地震時における変位応答を算定した。また計算結果を標記の際の同トンネルの変形の実測結果と比較し、トンネル構造物の地震時における変形応答が断層モデルによってどの程度推定できるかを検討したところ概略の傾向は一致した。大きさについては半無限体モデルが良い一致を示した。	(トンネル) 解析
③	地震断層による鉄道トンネルの被害 吉川恵也(国鉄鉄道技研) JICST 82A031384 F0369A (0041-3798) 土と基礎 VOL. 30, NO. 3 PAGE. 27-32 1982	トンネルは地震に強い構造物といわれているが、1978年の伊豆大島近海地震では地震断層の活動によって引き起こされた箱取トンネルの変位をはじめ、大きな被害例が数多く見受けられた。本報では地震被害のうち地震断層の活動に起因するものを中心に紹介し、地震対策の一端を述べる。	(トンネル) 事例 対策
④	唐那トンネル(2期線)工事(設計編) 井上定昭(道路公団名古屋建設局) JICST 84A0321772 F0029A (0285-5046) 土木技術 VOL. 39, NO. 5 PAGE. 39-48 1984	標記工事で技術的に問題となった長平沢断層、大断面交差部における設計について報告。前者は、著しく粘土化した約300mに及ぶ大断層で、NATM工法とし、補助坑において試験施工を行ない、この計測結果で設計検討した。後者は、構造系が非対称で三次元性が著しく、地山の動き等を考慮し、最も合理的な手法での数値解析を行ない、施工時の計測データにより修正し、最適な設計手法の確立に努めた。	(トンネル) 設計 解析
⑤	活断層を横切るトンネルの挙動について JICST CN 82A029154 Some aspects of the behaviour of tunnels that cross active faults. BROWN I, BREKKE T L (Univ. California) K820043 (0110-1358) 3rd Aust New Zealand Conf Geomech 1980 Vol 2 PAGE. 189-194	従来ライフラインの耐震設計原理は地表構造物に対して発達してきたが、活断層を横切る地下構造物は一般的でなく、できるだけ避けられてきた。本論はトンネルが活断層を横切る場合における問題点とその解決策を示唆するものである。事例研究としてカリフォルニアのHayward断層を横切るトンネルを取り上げ、それらの施工以後の挙動をロードセルと伸び計を用いて観測し、その結果を示している	(トンネル) 事例 対策
⑥	Hayward 断層における Bay Area Rapid Transit トンネルの挙動 JICST 82A0317480 Behavior of the Bay Area Rapid Transit Tunnels through the Hayward Fault. BROWN I R, BREKKE T L, KORBIN G E(San Francisco Bay Area Rapid Transit District, California) No. PB-82-127705 PAGE, 224p 1981	Berkeley Hills を通る双設トンネルは西坑口付近で、ゆっくりに動いている右ずれ断層を貫いている。工事中及び供用後の観測データから、断層の動きは年6~8mmで、せいまい範囲で生じていることがわかった。トンネルの挙動を解析するためにFEMを用い、断層に対する地震動の影響については、ひずみ軟化型モデルを使用した。将来の観測計画を含め、カリフォルニア州の多数のトンネルについて、断層の動き、地震による変形観測計器の設置、地震動を示した図表を入れた。このトンネルの正確な挙動の予測は困難であるが、断層のいずれは今後も継続し、定期的な保守が必要であると結論	(トンネル) 事例 観測
⑦	震動とずれに耐えられるトンネルの設計 JICST 90A0065929 "Shake and slip to survive" tunnel design. DESAI DB, CHANG B (Daniel, Mann, Johnson, & Mendenhall); MERRITT J L (B. D. M Corp.) K8905 03 (0-87335-083-9) Proc 1989 Rapid Excav Tunn Conf PAGE. 13-30 1989	地震多発地帯であるロサンゼルスの大口径下水道トンネルを対象に、都市部の浅い土砂トンネルに利用できる技術と材料を紹介した。計画路線の地質と交差する断層、想定される地震の規模とくにマグニチュードと断層のずれ、二重管方式による断層横断箇所設計方法、水道管継手に必要な条件とこれに対するシールおよびガスケットなどを説明した。	(トンネル) 構造 設計
⑧	地中構造物の耐震設計法 JICST CN 85A0059220 Seismic design considerations for underground structures. ST JOHN C M, ZAHRAH T F (Aghabian Assoc., California) B0677B (0275-5416) Adv Tunn Technol Subsurf Use VOL. 4, NO. 3 PAGE. 105-112 1984	活断層、地すべり崩壊、振動による地震被害の対策を論じ、最後の振動波によるトンネル覆工のき裂発生に対する設計法を、Owen & Scholl, Mow & Paoの方法を例に解説している。	(トンネル) 解析

表-2.5.3.2. 「断層や地表のずれ」と「地中構造物（トンネル、パイプライン、共同溝等）」に関する文献調査（2）

No	文献名・著者等	文献内容要旨	分類
⑨	南カリフォルニアにおける地殻ブロック回転のモデル化 地質工学に対する結論 JICST 96A0346175 Modelling of crustal block rotations in southern California Conclusions for geotechnics. SCHELLE H, GRUENTHAL G (Geoforschungszentrum Potsdam, DEU) K950148 (90-5410-393-0) Earthq Resist Constr Des Vol 1 PAGE. 11-18 1994	観測された地殻ブロックの回転のシミュレーションを目的として数値モデル化を行った。San Andreas 断層の東の区域を対象として選び、この区域の変形と回転の過程を2次元個別要素法を用いてモデル化した。以下の結論を示した。1) 大部分の変形は横ずれ過程と個々のブロックの時計回り回転による特性付けが可能である、2) 断層を横切るトンネルや橋のような構造物の設計に滑り速度の考慮は不可欠である。	(ト) 析 解
⑩	遠心模型試験を用いたトンネルに対する断層の影響に関する研究 JICST 89A042302 Centrifuge study of faulting effects on tunnel. BURRIDGE P B (Lindvall, Richter and As soc., CA, USA) ; SCOTT R F, HALL JF (Calif. Inst. Tech., CA, USA) D0424A (JGEND) (0733-9410) J Geotech Eng VOL. 115, NO. 7 PAGE. 949-967 1989	活断層を含む地層を横切るトンネルの設計では断層変位の可能性を考慮しなければならぬ。トンネルが土中に埋設されている場合には断層運動の影響を簡単に評価することはできないため、解析指針として一連の縮尺の遠心模型試験を実施した。試験では断層変位や地震動によりトンネルに誘起されるたわみや応力を有限長トンネル模型を用いて定量化した結果を用いて、トンネル相互作用効果に関する次元要素モデルの較正を行った。さらに数値解析モデルを用いて設計目的の無限長トンネルの応答を予測し、曲げモーメント、変位、せん断を表示した結果、有限長から無限長への曲げモーメントの変化は極めて小さいことが分かった。	(ト) 析 解 実 験
⑪	シールド工法による断層が所挿進 大岩根誠 (大阪府庁水道部) JICST 84A0380436 G0370B 大阪府建設技術発表会論文集 VOL. 11th PAGE. 297-300 1984	φ1, 800mm送水管(セグメント外径2, 700mm)を開放型半機械式(バックホウ)で千里山丘陵北側の小野原断層を突破して布設した。そこで、断層破砕帯における異常出水および切羽の崩壊防止のため実施した2か所の工区での薬液注入工法を紹介するとともに、地震時の断層変位に対応するため使用したUS形管とその継管の断層変位吸収量の検討結果を示した。	(ト) 事 例 事 例 対 策 設 計
⑫	活断層を通過する太田和配水幹線築造工事の報告 猪狩 弘和 (構賀市水道局) 第47回全国水道研究発表会 平成 8. 5	水道企業団の武給水地点から一騎塚を経由し、津久井までの送水幹線であり、本市の西部地区一帯及び津久井地区、さらには三浦市への供給を賄うものである。 この幹線は総延長6. 3kmのうち、1. 5kmを武山活断層を通過する下水道とシールド工事による共同溝4. 2kmを築造するものである。 三浦半島は、断層銀座とも呼ばれるほど、至る所にて断層があり、大きな活断層だけでも武山断層を含め、5本の活断層が判明している。これらの中で今後最も動きにくいと予測される武山断層に沿ってルートを選択した。 この断層による地層の変動に対し今回、対策を考慮して施工したので、ここに工事概要を報告するものである。	(ト) 事 例 設 計
⑬	1992年6月28日カリフォルニア州ランダース地震 (Ms 7. 5) 及びビッグベア地震 (Ms 6. 6) の時のライフラインの挙動 JICST 94A0628059 Lifelines Performance in the Landers and Big Bear (California) Earthquakes of 28 June 1992. LUND L V (Technical Council on Lifeline Earthquake Engineering, New York) B0145A (BSSAA) (0037-1106) Bull Seismol Soc Am Vol. 84, NO. 3 PAGE. 562-572 1994	表題の地震はロスアンゼルス東約100kmで発生し、砂漠地帯と山地を襲った。 高速道路・水道・電力系統に対する衝撃が大きかった。ユッカ渓谷の大きい地表断層の結果、及び他地区の非常に古い管のため数百ヶ所水道管が破壊し、完全復旧には数週間かかった。電線が大きく揺られて遮断器が作動したため、南カリフォルニア全域で電気が止まった。数秒間で回復したところが多いが、完全復旧は翌日であった。断層変位・舗装の亀裂・落石のため州の高速道路が数カ所で閉鎖された。その他、空港・貯水層・ポンプと井戸・下水・ガス・通信・応急対策について述べた。	(ト) 事 例
⑭	サンフランシスコの下水吐き口 JICST 87A0229274 San Francisco outfall. The champ? MURPHY G J, EISENBERG Y (Parsons Brinck erhoff, CA, USA) B0282A (0360-0556) Civ Eng ASCE (Am Soc Civ Eng) VOL. 55, NO. 12 PAGE. 58-61 1985	サンフランシスコの下水吐き口の設計と施工を報告した。この吐き口はサンフランシスコ湾内の汚染防止のため、太平洋沖合4. 5mileまで達している。設計に際し、吐き口はサンフランシスコの断層上を通り地震により大きな外力が作用することが予想されるので、セグメント間の相対変位に対応できる継手を採用した。また、地震発生時のパイプ破壊に備え、500ft毎にマンホールが設けられている。建設中、26ftの波により作業船が流され、17箇月工事が遅れたが1986年7月には工事が完成する予定である。	(ト) 事 例 設 計

表-2.5.3.2. 「断層や地表のずれ」と「地中構造物（トンネル、パイプライン、共同溝等）」に関する文献調査（3）

No	文献名・著者等	文献内容要旨	分類
⑮	耐震パイプラインの設計法 I I I JICST 83A0424194 How to design pipelines for earthquake resistance III. SINGHAL A (Arizona State Univ.) A0373A(0032-0188) Pipeline Gas J VOL. 210, NO. 11 PAGE. 50-52 1983	埋設主要パイプラインの地震に対する設計パラメータとして地盤の最大ひずみ及び液體燃料のパイプラインで慣性効果による動的振幅はあまり重要な作用はしない。断層線を横断せねばならぬ場合は特別な考慮が必要。耐震設計のため、接続部（機械的または溶接）、交差したパイプの接続、パイプラインの直径や方向変換について特に注意を要す。	設計 対応
⑯	Whitfield 貯水池の入口、出口パイプライン JICST 91A0179516 Whitfield reservoir inlet outlet pipeline. BLAIR W H (Alameda County Water District, CA) ; CREEGAN P, LYNCY T, WEINBRENNER L (Engineering Science Inc., CA) K901046 (0-87262-749-7) Pipeline Des Install PAGE. 458-467 1990 International Conference on Pipeline Design and Installation ; Las Vegas, Nev.	アラミダ郡水道局が計画、設計、施工した水道本管についての報告。5 取締機関の承認を受け種々の環境基準を満足しなければならなかった。18%の部分は公道、鉄道、住宅地などを通るので非開削工法によった。また、地震断層を通るために可とう継手を用いるなどの処置をとるなど、契約上も工事上也革新的な所があった。	設計 対応
⑰	カリフォルニア州水道プロジェクトに対する信頼性 JICST 81A0165753 Reliability of the california state water project. KIREMIDJIAN A S (Stanford Univ., Calif.) A0478B (ASMSA) Pap Am Soc Mech Eng NO. 80-C2-PVP-63 PAGE. 1-10 1980	本研究の目的は標題プロジェクトの地震時の信頼性に関して評価することにある。水道システムは貯水池、ポンプ場およびトンネルをネットワークのノードとしてモデル化される。これらノードの損傷の要因は基本的に地盤の震動であり、トンネルの場合は横断する断層の不同沈下による。各々のノードの反応は通常の給水システムを無理に切りつめ、ありそうなことを仮定して説明。各々のノードならびに全体システムに対する信頼性を評価した。系統の一番の弱所はTehachapiトンネルである。総合的に信頼性はかなり高いということが判明。	信頼性 評価
⑱	地震下における埋設管の現地調査と解析 (film) JICST 84A0276695 Field investigation and analysis of buried pipelines under various seismic environments. WANG L R L (Univ. Oklahoma) P0999A PB Rep NO. PB-84-124775 PAGE. 19p 1982	この研究は、石油用、上水道用、下水道用及びガス用パイプラインが、いろいろな地震があつた場合にどういふ挙動を示すかという目的のため実施されたもので、地震動と大きな地盤変形下という条件も含まれている。調査は、北京と唐山地域で行われた。被害は大きく3つに分けられる。1) 波動の伝搬効果によるもの、2) 断層線に沿った地盤の破壊と不等移動に基づくもの、3) 地盤振動による地盤の液状化によるもの。特に断層地帯において地盤が動くことにより、パイプが破損したり変形したりする被害が問題である。この条件下における埋設管の縦方向挙動を評価するための数学モデルも提案した。	解析
⑲	断層横断区域にある大口径パイプラインの性状 Behavior of Large-Diameter Pipeline at Fault Crossings T. P. Desmond, M. S. Power, C. L. Taylor, and R. W. Lau	サンフランシスコ湾岸地域にある活断層を横断する大口径水道用パイプラインの評価について概要を述べてある。断層に予想されるずれを推定して、断層の移動におけるパイプラインの応答の数値を求め、地盤とパイプの相互作用によって引き起こされるパイプの挙動を評価している。これらの解析結果はパイプラインの設計変更等の基礎データになる。	設計 対応 解析
⑳	フレキシブルジョイント付き共同溝の地震挙動 JICST 91A0829255 Seismic behavior of common ducts with flexible joints. FUCHIDA K (Yatsushiro National Coll. Technology.) ; AKIYOSHI T (Kumamoto Univ.) S0494A 日本地震工学シンポジウム論文集 VOL. 8th, NO. Pt 2 PAGE. 2079-2084 1990	近年都市部においてライフラインの共同溝建設が盛んであり、地震時の設計方法の適切なガイドラインが求められている。フレキシブルジョイント付きの共同溝の地震応答挙動の解析手法について述べた。モデル化は共同溝の慣性力と減衰力を無視し、軸方向と水平方向の方程式を弾性支承上の梁として行っている。数値計算の結果、縦方向の継手は軸応力を軽減し、横方向の継手はせん断や曲げ応力を軽減しない。また断面サイズを大きくすることは応力を低減するうえで有利であることがわかった。	共同溝 解析
㉑	共同溝の地震時挙動について Behavior of structure joints of common duct during earthquake. 小泉淳 (東洋大) ; しま田富雄 (日本環境技研) ; 藤田久之 (北陸電力) ; 村上博智 (早稲田大) S0902A 土木学会年次学術講演会講演概要集 第3部 VOL. 43rd PAGE. 820-821 1988	ボックスカルバートにより構築された共同溝は、地震時に地盤が急変する部分や他構造物との接合部において非常に大きな断面力が発生し、被害を受ける。そこで、昨年度行った不等沈下を受ける場合と全く同様に継手は等間隔に設けるよりも、継手がないとして計算された最大断面力の発生位置に設ける方がより効果的であることがわかった。	共同溝 対応 解析

(4) 断層横断部の設計方法と対応策

1) 断層の概要

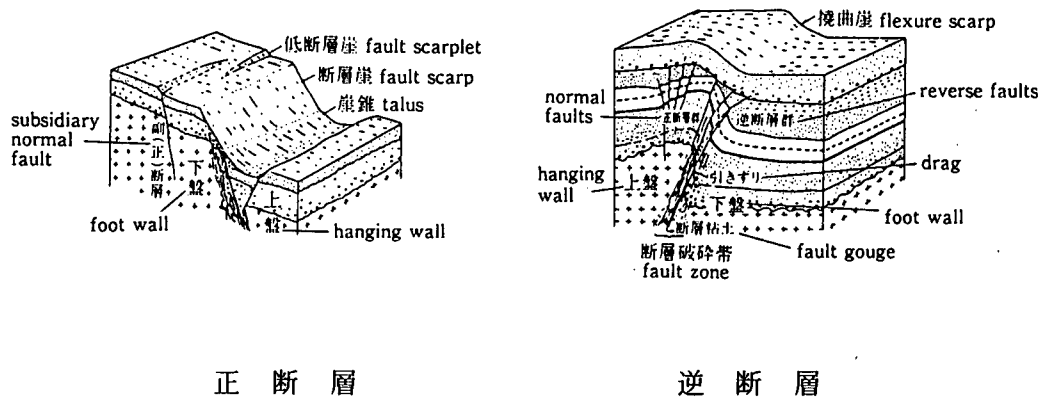
断層とはどのようなものか、以下に「活断層と鉄道構造物」（池田俊雄著）と「日本の活断層図 [地図と解説]」（活断層研究会編）」から抜粋して以下に示す。

a) 定義と種類¹⁾

断層 (Fault) とは、ある面を境として地層の食い違い相対変位のあるものをいう。

地球の表面を構成する地殻にはプレートテクトニクスで説明されるような圧縮、引っ張り、剪断等の応力が働いており、この応力による歪みが地殻（主として岩石よりなる）のある限界

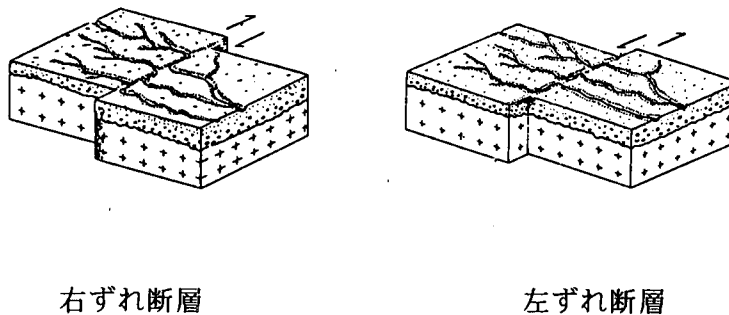
(10^{-4} 程度といわれている) を超えて作用すると破壊を生ずる。この破壊時に発生する振動が地震であり、応力の性質によって縦ずれ断層（正断層、逆断層）、横ずれ断層（右ずれ断層、左ずれ断層）に分けられる。



正断層

逆断層

図-2.5.3.1 縦ずれ断層の模式例（岡田、1979^{4,3)}を改訂）



右ずれ断層

左ずれ断層

図-2.5.3.2 横ずれ断層の模式例（岡田、1979^{4,3)}を改訂）

b) 地形的特徴¹⁾

断層とくに新しい時代に活動したことがある断層は一般によく地形に現れていて、断層崖、直線谷、河川や尾根の屈曲等の特徴ある地形が直線状に分布すること等からその存在を知ることができる。

c) 地質的特徴¹⁾

断層付近では岩石は破碎されて断層破碎帯を形成する。破碎帯では割れ目が多く、岩石は角礫状となって断層角礫を生じ、さらに繰り返し断層活動が行われることによって細分化して断層粘土となる。破碎帯は割れ目が多いため断層方向には地下水の通路となりやすいが、不透水性の断層粘土がある場合には直角方向には地下水を遮断する。破碎帯の幅は数cmの小さなものから、100m以上におよぶものまでである。このような地質をもつため、トンネル掘削において断層破碎帯では崩壊を生じやすい。

d) 活動の仕方¹⁾

活断層の活動の仕方にはいろいろの型のものがあり、つぎの三つに大別される。

- i) 周期的に地震をともなって変位を生じ、間に永い休止期間のあるもの
 - ii) クリープ的に常時ずれ動いているもの
 - iii) 上記のi)とii)の二つの性質を共有しているもの
- ① が最も一般的であるが、一度の地震での動きはせいぜい数10cmから大きくても数mのオーダーであり、またその時間間隔は短い活動的なものでもおおよそ1000年位の間隔といわれている。
- ② のクリープタイプものは地震と関係なく常時移動しているものでアメリカのサンアンドリアス断層の一部にこのタイプのものがみられる。
- ③ のタイプのもは上記二つの性質を合わせ持つもので、地震時の変位とクリープ変位の方向が逆向きのものもあるとされている。

e) 空中写真判読による活断層の認定^{4,5)}

活断層の発見、認定に当たっては、活断層に伴う変位地形が重要な手懸になる。そのためには空中写真による地形の判読がもっとも重要な手法である。もちろん個々の活断層の過去の履歴をくわしく知るためには、野外調査によって地層や地形の変位の累積の様子を精査することが必要であるが、精査すべき位置の選定に空中写真判読はかかせない。現在、ふつう用いられている空中写真の縮尺は2万分の1または4万分の1である。この研究ではおもに4万分の1の空中写真を用いた。空中写真の判読による活断層認定の手順は図-2.5.3.3に示した。以下この順にしたがって説明する。

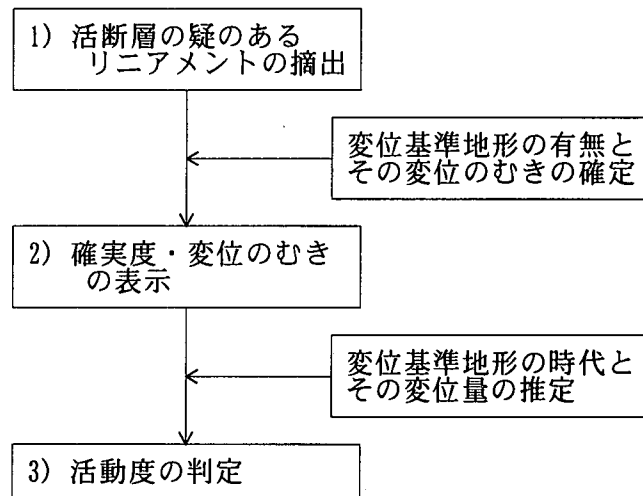


図-2.5.3.3 空中写真による活断層認定の手順（松田ほか、1977を一部修正）

i) まず、線状に続く谷地形や崖、異なる種類の地形の境界などの地形的に続く線状模様（リニアメント）を抽出する。あるリニアメントを活断層であると判定するためには、同時代にできたひと続きの地形面または地形線を基準として、それらが問題とするリニアメントの両側でくいちがっていることが確かめられなければならない。このような断層変位の有無を知るのに役立つ地形を（変位）基準地形という。これには、面状をなす基準地形面（種々の段丘面、浸食小起伏面、火山斜面など）と線状をなす基準地形線（旧汀線、段丘崖と段丘面の交線、河谷の谷筋、稜線など）とがある。日本列島では、現在保存されているこのような基準地形の形成年代は第四紀、すなわち約200万年以内と考えられているから、上述のような基準地形がリニアメントを境にくいちがっていることが確かめられれば、そのリニアメントを活断層とみなし、基準地形のくいちがいの状態から、横ずれ成分と上下成分を求めることができる。または断層運動に伴って特有の地形（断層変位地形、たとえば断層崖、低断層崖、逆むき低断層崖、撓曲崖、地溝、断層池、地塁、ふくらみ、横ずれ尾根、横ずれ谷、閉塞丘など）が形成されるので、地形的リニアメントに沿ってこれらの断層変位地形が認められるかどうかによって活断層の認定を行うことも多い。

ii) 活断層の認定に必要な基準地形が、問題のリニアメントの両側に都合よく分布しているとは限らない。また、両側に認められる似た形状の地形が、同じ時代に同じ作用で生じたかどうかは写真判読から確かめにくいことがある。このような基準地形の欠如や性質の不確かさに応じて、そのリニアメントを活断層とする判断は不確かになる。しかし、そのリニアメントを抽出しておくことは将来の精査のためには有益である。その際にはそのリニアメントの“活断層らしさ”の程度がわかるように、以下のような確実度の表示を行った。

〈活断層の確実度〉

活断層であるかどうかの確からしさ（確実度）を以下のⅠからⅢで示した。

確実度Ⅰ：活断層であることが確実なもの。具体的に次のどれかの地形的特徴をもち、断層の位置、変位の向きがともに明確であるものをいう。

i) 数本以上にわたる尾根・谷の系統的な横ずれ、

- ii)ひと続きであることが確かな地形面を切る崖線、
- iii)時代を異にする地形面群を切っている崖線があり、古い地形面ほど変位が大きい（変位の累積が認められる）場合、
- iv)同一地形面の変形（たわみ・傾斜など）、
- v)第四紀層を変位させている断層の露頭、など。

確実度Ⅱ：活断層であると推定されるもの。すなわち、位置・変位のむきも推定できるが、確実度Ⅰと判定できる決定的な資料に欠けるもの。たとえば以下のような場合である。

- i) 2～3本程度以下の尾根や谷が同じむきに屈曲している場合、
- ii)断層崖と思われる地形の両側の変位基準地形が時代を異にする場合、
- iii)明瞭な基準地形がない場合（山地など）。

確実度Ⅲ：活断層の可能性はあるが、変位のむきが不明であったり、他の原因、たとえば川や海の浸食による崖、あるいは断層に沿う浸食作用によってリニアメントが形成された疑いが残るもの。

確実度Ⅰはきわめてきびしく限定されることになり、およそ九分通りの確実さをもつといえる。ⅡとⅢとの区別は、Ⅲは活断層でない可能性が大きいということでⅡと区別され、一応その境を活断層である可能性が半ば以上であるか、それ以下であるかにおく。

iii)活断層の活動の程度を活動度と呼び、長期間（多くの場合過去数万年間）の平均変位速度（基準地形や第四紀層の変位量をその形成時から現在までの年数でわった値）を以て表す。その値の大小によってA級（m/1000年のオーダー）、B級（0.1m/1000年のオーダー）、C級（0.01m/1000年オーダー）のように分類して表示した（表-2.5.3.3）、活動度は、地震の発生間隔や今後の地震活動の推定のために重要な指標である。活動度に関する資料が不十分の場合には地形の新鮮さなどにもとづいてA～C級を推定した場合も少なくない。なお、平均変位速度を求める時の変位量は縦ずれ成分と横ずれ成分を合成したネットスリップ値を用いて平均変位速度を求めている。

なお、ある断層が第四紀前半までの地層を切っているが、その上に形成された第四紀中・後期の段丘を変位させていない場合も『新編』では活断層として扱い、他の活断層と同様な方法で平均変位速度を求めた。これらについては上記のようにして求めた級別の記号に〔 〕を付して、第四紀後半には変位していないことを示すようにした。このような例は、とくに大阪層群分布地域などに見出されている。

表-2.5.3.3 平均変位速度による活断層の活動度の分類（松田、1975）

活断層の分類	第四紀の平均変位速度 S（単位はm/1000年）		
	A	B	C
	$10 > S \geq 1$	$1 > S \geq 0.1$	$0.1 > S \geq 0.01$

f) 地震断層の出現形態とその形成条件⁴⁶⁾

地震断層の出現形態が多様化する要因と断層の出現形態の関係をj知るため、1927年北丹後地震と1945年三河地震で生じた地震断層を主として調査し、断層地形の形態（断層崖、地割れ帯、撓曲などの別とその変形帯の幅）や断層の変位量、その地点の被覆層の厚さ等の資料を断層沿いの多くの地点について集めた。また、地震断層の出現形態を客観化するためこれらを数値表現することを試みた。すなわち、断層沿いに生じた変形帯の幅（W）と、そこに生じた正味の変位量（d）の比（d/W）をもって地震断層の地形特徴を表示することにした。d/Wが大きな値の場合、食い違いが明瞭な出現形態を示し、d/Wが小さくなるほど出現形態は不明瞭なものになっていく。

以上のようにして得た断層の正味変位量、未固結被覆層の厚さ、d/W値を用いて図を作成した。図中の破線はd/W値の等値線にあたるものである。

①日本の内陸に出現する地震断層では、断層変位量が一定ならば未固結被覆層の厚さが薄いときに食い違いの明瞭な断層地形（d/W値は大きい）が出現し、未固結被覆層の厚さが厚い地点ほど断層地形は不明瞭になる。（d/W値は小さくなる）

②未固結被覆層の厚さが一定の場合には、断層変位量の大きな地点で明瞭な食い違い（d/W値が大きい）の断層が出現し、末端部のような小さな地点では不明瞭な（d/W値の小さな）断層地形となる。

以上のような地震断層の出現形態と変位量及び未固結被覆層の厚さとの関係を利用して、将来出現し得る断層地形の形状の予測や既に発見されている断層地形の特徴とその地点の未固結被覆層の厚さから、将来の断層運動時の変位量を推定することなどが可能である。

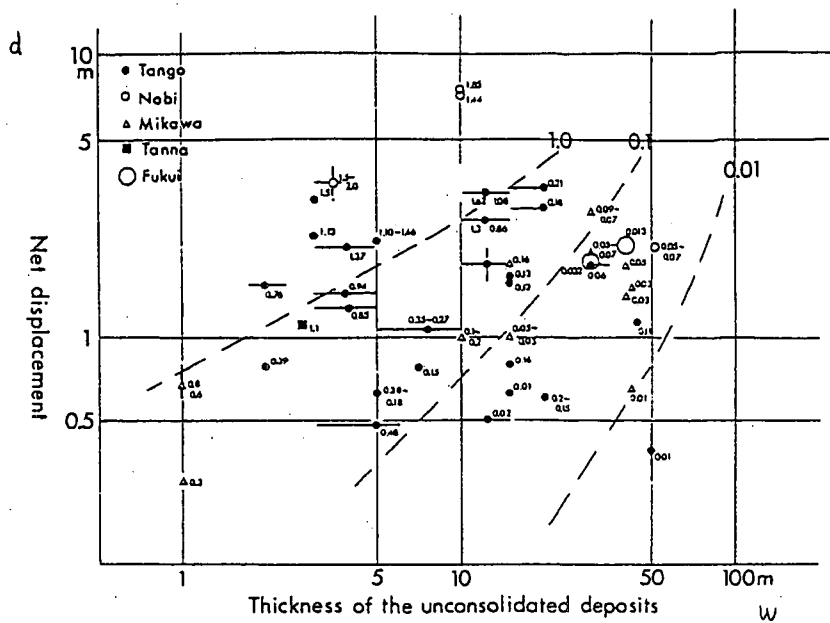


図-2.5.3.4 地震断層の出現形態とその地点の変位量及び未固結被覆層の厚さとの関係

g) 活断層の定義とわが国における分布

活断層とは“一般に最近の地質時代（約200万年前から現在まで）に繰り返し活動し、将来も活動することが推定される断層をいう”と定義されている（東京大学出版会、日本の活断層1991）。

わが国における地震の原因は、大部分が断層の活動によるものである。1960年代以降わが国においては活断層の調査が急速に進展し、地形学的、地質学的調査、古地震の記録等の検討によって全国的な活断層分布図が作成されており、図にその概略を示す。

図-2.5.3.5より東北地方では南北方向の逆断層が、中部地方と近畿地方では北西～南東方向と北東～南西方向の二つの共役する横ずれ断層が卓越している。これらの活断層群は東西方向の圧縮力に因るものとされている。一方九州では東西方向の正断層が卓越している。

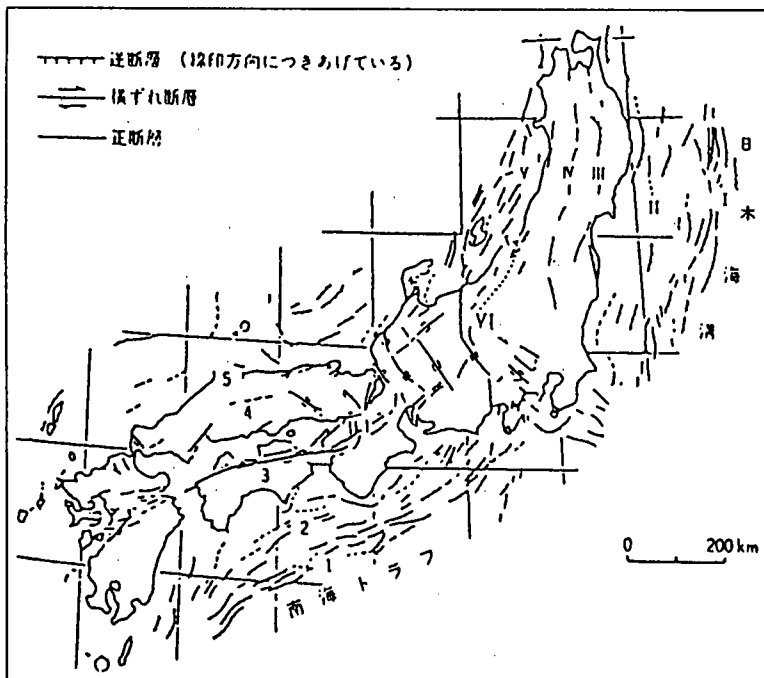


図-2.5.3.5 わが国の活断層の分布

活断層の詳細図については、資料の「日本の活断層図 [地図と解説]」（活断層研究会編）⁴⁵⁾ 参照。

都道府県別の活動層については、資料の「最新活断層、危険度アップ」⁴⁷⁾ 参照。

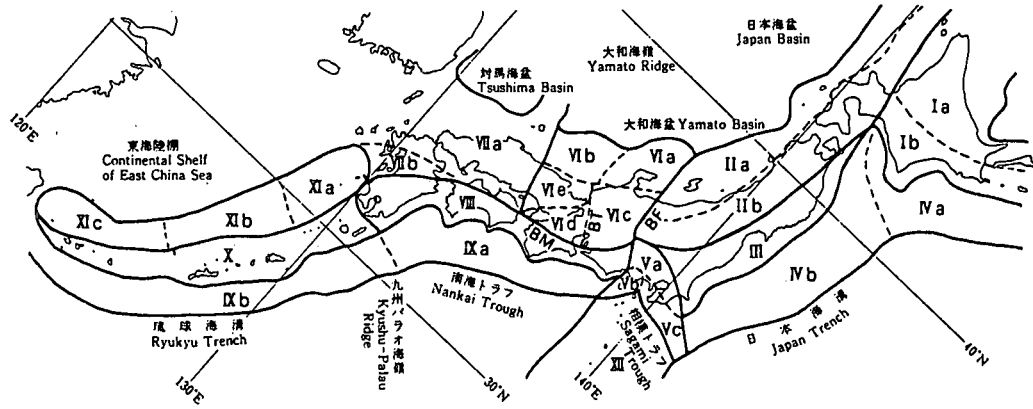


図 - 2.5.3.6 活断層区 (区の名称と特性は表4参照)

表 - 2.5.3.4 活断層区とその中での断層の特性

大区分	小区分	密度	主要断層の長さ※	主要断層の活動度	卓越する断層型※※	備考
I 北海道主部	a 北海道主部内帯	小	小	C	逆?	
	b 北海道主部外帯	小	中	B	逆	
II 東北日本内帯	a 東北日本内帯大陸斜面	大	大	A?	逆	海底
	b 東北日本内帯陸上	中	中	B	逆	火山地帯
III 東北日本外帯		極小	中	B	逆・横	
IV 東日本太平洋斜面	a 北海道南岸沖	大	大	A?	逆・横?	海底
	b 三陸・常磐・鹿島沖	大	大	A?	逆	海底
V 伊豆小笠原弧先端部	a 関東山地周辺	中	小	B	逆・横	
	b 伊豆半島周辺	大	小	A・B	横	火山地域
	c 相模トラフ北縁	大	大	A	逆・横	主に海底
BF フォッサマグナ西縁地帯		大	小	A	横・逆	
VI 西南日本内帯東部	a 能登半島周辺	小	小	B・C	逆	陸と海底
	b 隠岐トラフ周辺	中	中	B?	逆?	海底
	c 中部山地	大	大	A	横・逆	
	BT 敦賀湾-伊勢湾線地帯	大	中	A・B	横・逆	
	d 近畿三角地域	大	中	B・A	逆・横	
VII 西南日本内帯西部	a 中国・瀬戸内・北九州	小	小	B・C	横・逆	
	b 中九州火山地域	大	小	B	正	火山地域
BM 中央構造線地帯		大	大	A	横	
VIII 西南日本外帯		極小	小	B・C	逆・横	
IX 西日本太平洋斜面	a 南海トラフ陸側斜面	大	大	A	逆・横	海底
	b 琉球海溝陸側斜面	中?	大	A?	逆・横	海底
X 琉球弧		中・大	中	B・C	正	海底と陸
XI 沖縄トラフ	a 沖縄トラフ北東部	中	大	B?	正	海底
	b 沖縄トラフ中部	大	中	A?	正	海底
	c 沖縄トラフ南西部	大	大	A	正	海底
XII 伊豆小笠原弧北部						海底・西半は火山地域

※ 小: 20km以下、中: 20~50km以上、大: 50km以上、海底と陸上は元の資料がちがうが、付図による長さ。

※※ 逆: 逆断層、正: 正断層、横: 横ずれ断層。

2) 断層によるずれの大きさ

平成7年1月に発生した阪神・淡路大震災は、活断層の運動による内陸地震によって引き起こされたが、全国には陸域で2000以上の活断層が存在するといわれており、これらの活動層を設計上考慮しておく必要がある。

活断層を横断する施設を設計する場合、活動層によって生じる地盤のずれの位置の推定とその大きさが最も重要な要素となる。

a) 阪神・淡路大震災の事例

今回の地震における活断層によるトンネルの被害は割に少なく、断層通過箇所当たるトンネルもいくつかあったが、塩屋川トンネルの断層部で8cmのずれが生じたが、他のほとんどが坑口部の崩壊等を除けば、クラック程度の被害であった。

野島断層の最大変位量は水平方向の方が大きく約1.8m、鉛直方向は約1.5mであった。この断層を横切る地点で水道管の被害が発生している。

b) 文献等の事例

- i) 丹那トンネルは掘削中の地震（昭和5年11月）でトンネル部分に最大2mのずれを生じた。¹¹⁾
- ii) 伊豆大島近海地震（M7, 1978）で伊豆急行稲取トンネルは最大73cmのずれを生じた。¹¹⁾
- iii) アメリカのBay Area Rapid Transitトンネルでは、ゆっくりとした右ずれ断層があり、年6~8mm動いているのが観測されている。¹⁶⁾
- iv) 過去の断層変位量（シルト工法による断層カ所掘進 大岩著）²¹⁾

表-2.5.3.5

地震名	年代	断層名	位置	延長 (km)	最大変位(m)	
					水平	垂直
関 東	1923	下浦	三浦半島			1.0
比丹後	1927	郷村	網野-峰山	15	2.3	0.5
"	"	山田	四辻-岩滝	10	0.8	0.7
鳥 取	1943	吉岡	吉岡-野坂	4.5	0.9	0.5
"	"	鹿野	鷲峰山比-口細見	8	1.5	0.25
福 井	1948	福井	福井平野	25	2.0	0.75
琵琶湖西岸	1662	琵琶湖西岸	滋賀県高島郡今津町	-	2.5	1.3 ^{注1)}

注1) 朝日新聞 9月4日夕刊より

c) 過去の設計事例

現在のトンネルの設計においては断層のずれを考慮している例はほとんどないが、設計時に断層のずれ量を想定しているいくつかの例を挙げる。

- i) アメリカのサンフランシスコ湾東海岸にあるHayward断層とCalaveras断層では0.5mから3.0mのずれ量が想定されている。⁴²⁾
- ii) 横須賀市の武山断層を通過する太田和幹線共同溝内に配管された水道管（口径1200mm）ではM7の地震時に約1.6mの変位量が推定されている。²²⁾
- iii) 大阪府北部の小野原断層を通過する2700mmのシールド内の水道管（口径1800mm）では、ダブル管の耐震継ぎ手を使用し、約1mの変位量を吸収できるように設計されている。²¹⁾

d) 今後の設計想定ずれ量

地震断層の長さ l や変位量 d は、地震のマグニチュード M が大きいほど大きい傾向がある。それらの間には日本の内陸の地震断層の場合、次の式に見るような関係がある。⁴⁸⁾

$$\log l = 0.6M - 2.9 \quad (l \text{ の単位は km}) \quad (1)$$

$$\log d = 0.6M - 4.0 \quad (d \text{ の単位は m}) \quad (2)$$

大ざっぱにえば、M7の地震ではおよそ $l = 20\text{km}$ 、 $d = 1.5\text{m}$ 、M8の地震ではおよそ $l = 80\text{km}$ 、 $d = 6\text{m}$ である。この M と l と d の関係には大きなばらつきがあるので、上式の関係はごく大略の目安になるにすぎない。なお、この場合、一つの地震で複数の地震断層が生じた場合は、それらを包括する円の直径をもって l としている。

活断層の動きはある程度の周期性があるものの、要注意の活断層でも動く確率は数百年単位であり、トンネル等の設計の耐用年数を考えると、遭遇する確率の方が低く、万が一活断層が動いたとしても、過去の事例からは軽微な被害留まっている。

従って、活断層のずれ量を設計にどれだけ見込むかは、施設の重要度の評価が大切であり、経済性も考慮する必要がある。

しかし、活断層部のずれ量を見込む必要がある場合には、その断層の過去の動きや最近の観測データを検討し、1000年単位でメートルオーダー（約1~2m）のずれ量を想定する必要があると考えられる。

e) 具体的な設計例

<断層部配管>

大阪府営水道第7次拡張事業で実施される導水管・連絡管及び北部系送水管路については耐震管路設計検討を行っている。

断層部について基盤入力加速度100galを加えて応答計算した結果、最大管体応力は 97.16kg/cm^2 、最大継手伸縮量は2.2mmであり、ともに許容量以下であることが確認された。しかし、地震時の断層変位に対応するため、4工区、5工区とも断層部分にはUS形（離脱防止形内面継手）管（図-2.5.3.7）を約100m使用して地われをカバーし、さらに中央部にはUS形縦輪4個を用いて断層変位吸収量の検討を図-2.5.3.8のように行った。

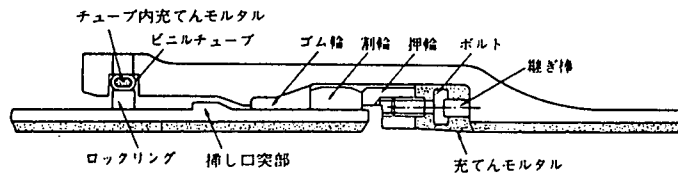


図-2.5.3.7 U形（離脱防止形内面継手）管

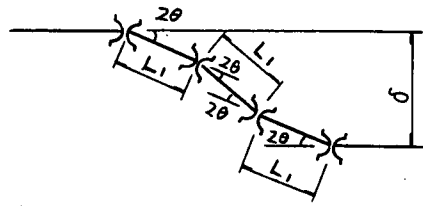


図-2.5.3.8 断層変位吸収量

ここで切管長さを $L_1=3.70\text{m}$ とすると、

$$\delta = 2 \cdot L_1 \sin 2\theta + L_1 \sin 4\theta \text{ となる。}$$

U形地震時（限界）屈曲角（ θ ）は $\phi 1800\text{mm}$ で $\theta = 1^\circ 52'$ であるから

$$\delta = 2 \times 370 \times \sin (2 \times 1.867^\circ) + 370 \times \sin (4 \times 1.867^\circ)$$

$$= 48.2 + 48.1 = 96.3 (\text{cm})$$

したがって、U形（離脱防止形内面継手）継輪を4個使用すれば、少なくとも1m近くの地震時断層変位量を吸収することができる。

3) 断層を考慮した設計手順

従来の施設の設計時には活断層に対しては、その活動に対する出現率の低さから、設計時にはあまり考慮されていない。活断層部には破碎帯等の施工上問題が生じる地盤が出現することが多く、施工に関してはかなり検討されてきている。しかし、線状地中構造物の多くはライフラインであり、断層横断部が破壊された場合の社会的な影響は大きく、第二次提言のレベル2地震動に対しても、構造物が損傷しても機能に重大な支障が発生しないようにし、かつ短時間で復旧が可能な範囲の損傷に留めることが必要である。

断層についてはその存在を含めて不明確な部分も多いが、できるだけ上記のような安全性を確保するために、断層横断部に対する設計手順の検討を行った。

断層の活動周期は約1000年とも言われており、またその変位量についてもかなりのばらつきがある。断層のずれに対して十分安全な設計を行い、その性能の確証を得た例はほとんどなく、断層の変位量を吸収できるように設計されたものでもその吸収量は1mから2m程度である。

しかし、断層を発見し、その変位量を想定し、設計を行った場合、行わなかったものよりもその構造物の安全性は遥かに高く、想定された設計条件を越える確率はかなり低いものになる。

断層横断部の設計はレベル2地震動の設計を目標にすべきであるが、機能を維持できない場合にはシステム的な対応を十分に考えておく必要がある。トンネルや共同溝の場合は特に大きな変位量に対して仮に追従したとしても、内空断面が確保できなければ施設の機能を確保したことにはならず、本体構造の壊滅的な破壊を避けると共に、被害後の断面の確保を考えておく必要がある。

パイプラインについては、他の構造物に比べると断面量が小さいために、強度的に対応するのは難しく、基本的には可とう継ぎ手や可とう管を用いて断層部の大きな変位量を吸収することが考えられる。また、損傷した場合のことも考慮し、システム的な対応策も検討しておく必要がある。

図-2.5.3.9に断層横断部の設計フローチャートを示したが、想定される断層の変位量に対して構造物の損傷をどこまで認めるかはその施設の重要度によるところが大きく、すべての施設を設計上安全な構造にするか、システム的な対応策を講じるかは検討の余地を残している。水道管のように管網状に配管されているものすべてに対して断層に対する検討や設計を行うことは難しく、口径が小さいものに対しては耐震性能ができるだけ高いものを使用し、断層活動時における施設の損傷する確率を下げ、復旧材料の確保などを行うことにより、早期のライフラインの回復をはかる方が現実的な場合もある。

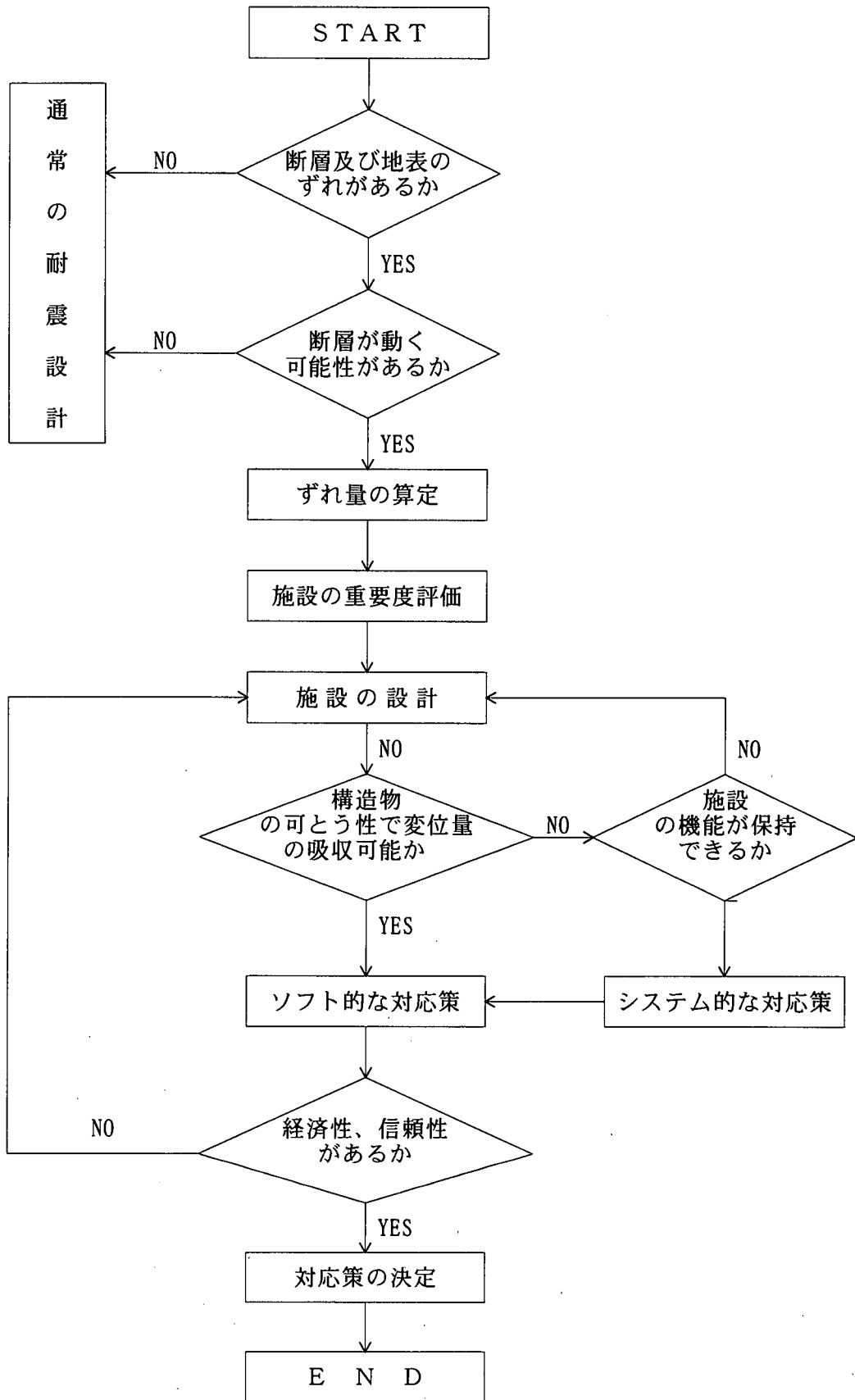


図-2.5.3.9 断層を考慮した設計手順

4) 施設別の対応策

断層のずれ量に対して構造的に力で抵抗する（許容応力、伸び等）には限界がある。変位量の吸収方法においても、現在使用されている構造では大きな変位量に対しては安全を確保するのは難しい。しかし、断層に対する構造を設計時に考慮することにより、

- ①現在よりも少しでも耐震性を強化し、万一の場合にできるだけ機能を保持する。
- ②施設が損傷を受けた場合にも早期の復旧が可能である。

ことは重要である。

断層部のような大きな変位を伴う箇所に対する対応策としては、現在の工法や製品では不十分な場合もあるが、現在変位吸収に用いられている対応策の例を挙げると、以下のような方法が考えられる。（T:トンネル、K:共同溝、P:パイプラインに関すること）

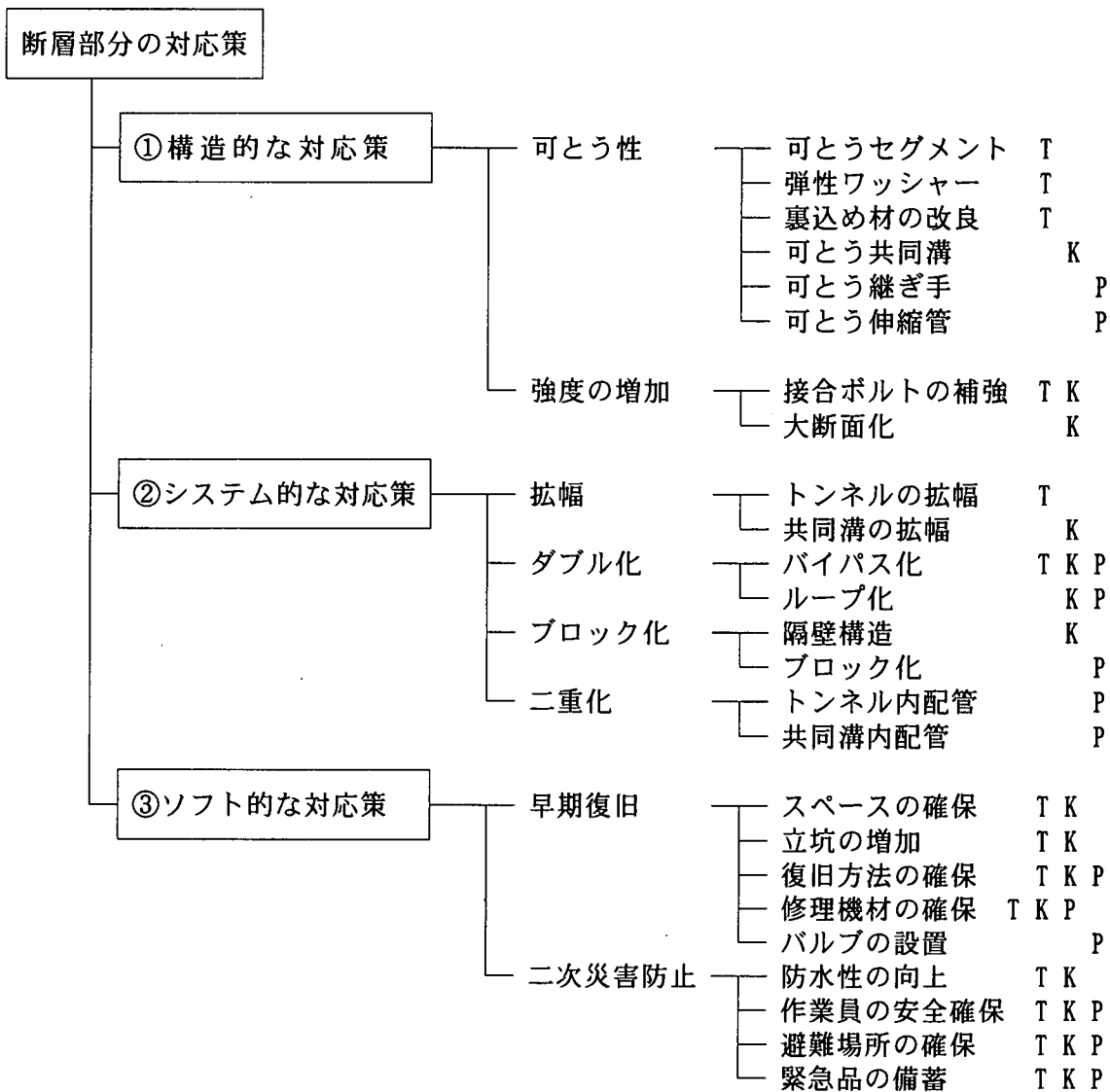


図-2.5.3.10 断層部分の対応策

a) 構造的な対応策

i) トンネル、共同溝

現在、トンネルや共同溝の設計では、地盤の変位を吸収できるような構造があるが、主に坑口部等の挙動変化部や全体的な沈下による変位を吸収するための構造であり、断層によるずれ量を吸収できるようなものはほとんどない。

① 接合ボルトの補強

トンネルに大きな変位量が作用すると、それに伴いシールドのセグメント等に大きな曲げモーメントやせん断力が作用する。そのために、接合ボルトの数を増やしたり、増径による強度の増加をはかる。

② 大断面化

共同溝の場合は、出来るだけ駆体の断面を大きくする。実績的にも、大断面の共同溝は強度的にも強く、共同溝内の施設の安全性を高めることができる。公益施設の種類、数により共同溝の断面は決まるが、復旧等を考慮し断層通過部のみ大断面化する方法も考えられる。

③ 可撓セグメント

トンネルや共同溝の建設にはシールド工法が普及しているが、昭和50年頃に可撓セグメントが開発され、軟弱地盤や地震に対する変位吸収用として使用されてきた。変位吸収量は口径や種類により異なる。

神戸では、地盤変位が吸収量を上回り破壊された例もあり、断層のずれ量を吸収するには変位量が少ない。東京湾横断道路でも使用されている。

<φ3800の場合>

①沈下量 200mm ②伸び 50mm ③縮み 50mm

④曲げ角度 0.75° ⑤振れ角度 5°

<φ10000の場合>

①沈下量 150mm ②水平変位 60mm

である。

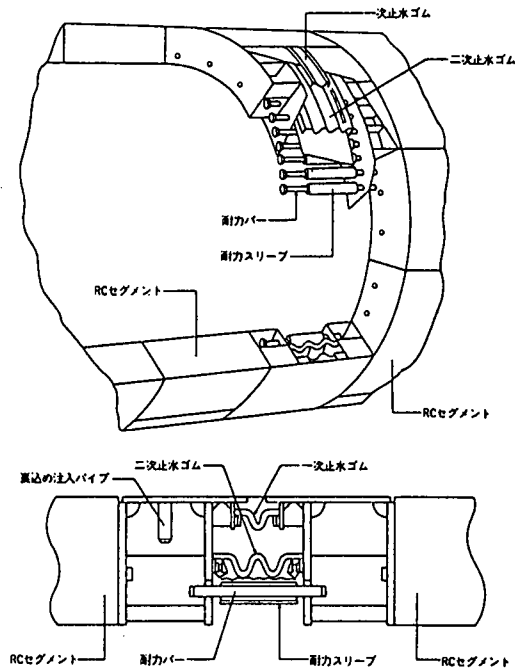
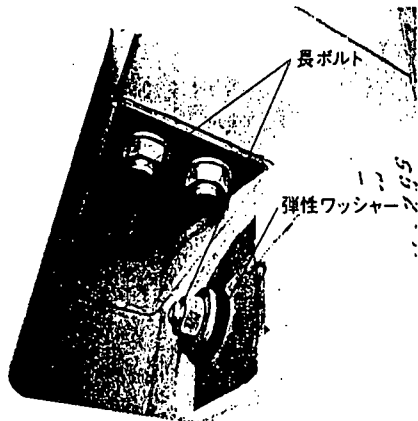


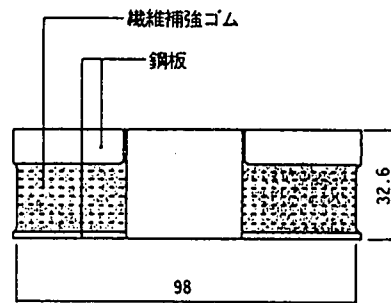
図-2.5.3.11 可とうセグメントの構造 (例)

④弾性ワッシャー

東京湾横断道路のシールドトンネルでは、地盤が急変する箇所やトンネル地中接合部に引張力を低減する弾性ワッシャーを使用している。これを使用することにより継ぎ手部に生じる引張力は約10分の1、曲げモーメントやせん断力は6分の1～7分の1に抑えられている。



●弾性ワッシャーの構造 (単位:mm)



リング間に弾性ワッシャーを使用したセグメントの継ぎ手部。セグメント間にもトンネル全長にわたって長ボルトを採用している

●トンネルに生じる断面力の比較

	弾性ワッシャーなし	弾性ワッシャー設置	耐力	(注) 地盤剛性の急変部に直径10m程度のシールドトンネルを建設し、最大応答加速度200galの地震が生じた場合、どのような力がボルトに生じるのかを想定した。ボルトの耐力を100とし比率で表した
軸力(tf)	239	27	100	
曲げモーメント(tf・m)	353	48	100	
せん断力(tf)	143	22	100	

図-2.5.3.12 弾性ワッシャーの構造 (例)

⑤裏込め材の改善

シールドトンネルの裏込め材の強度を平常時の外圧に対しては十分な強度を持つが地震時の荷重に対しては変形して、トンネル本体への荷重を低減するような裏込め材を使用する方法も検討されている。周辺地盤の沈下等が問題である。

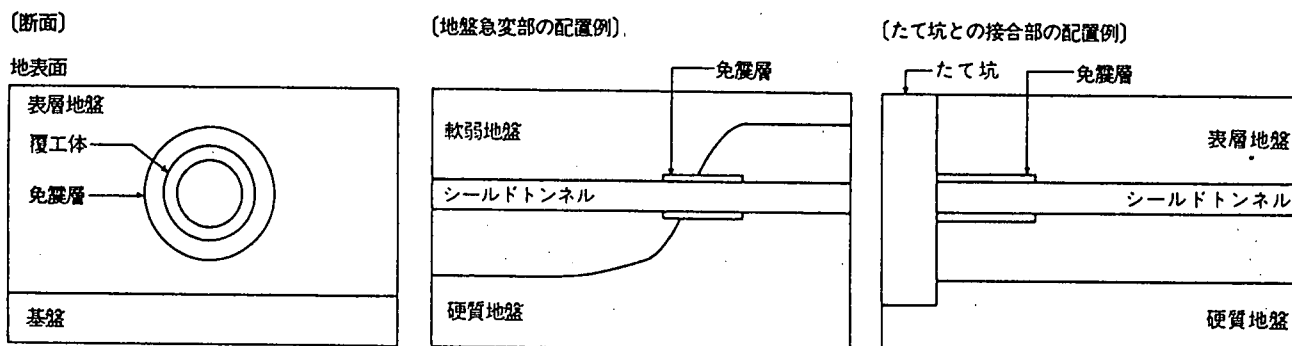


図-2.5.3.13 免震層の概念図(例)

⑥可とう共同溝

東京臨海副都心の共同溝は30mピッチに可とう性継ぎ手(ゴムリング)を入れており、止水性を保ちながら伸縮や曲げを許容する構造になっている。許容変位量は継ぎ手1カ所当たり50~100mmとなっている。

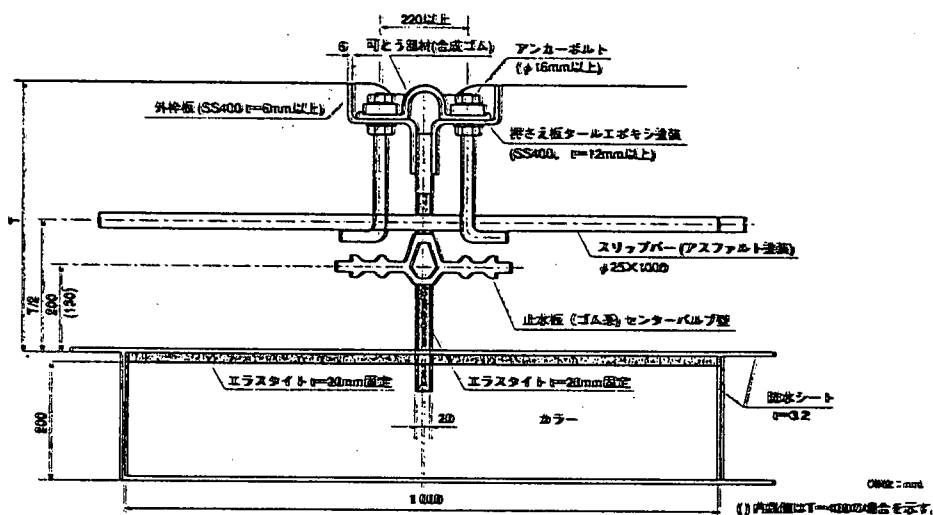


図-2.5.3.14 可とう共同溝の構造(例)

ii) パイプライン

① 可とう継ぎ手

ダクタイル管の耐震継ぎ手に代表されるように、パイプラインの継ぎ手が可とう伸縮性と離脱阻止性を併せ持つものがあり、局部的な大きな変位に対しても、追従性がある。後述の設計例によると、口径1800mmのパイプラインで約1mの変位量を吸収している。

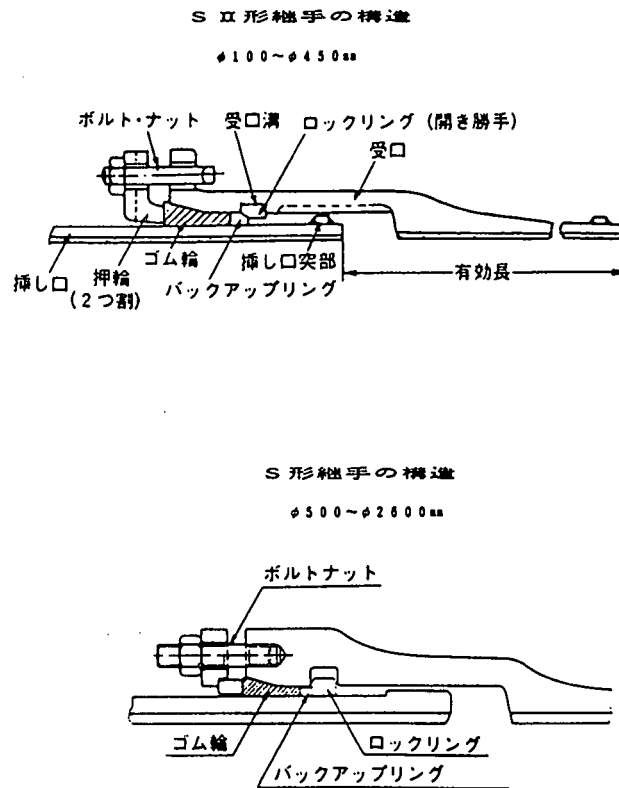
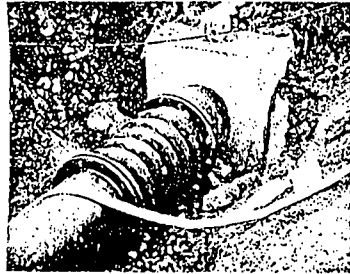


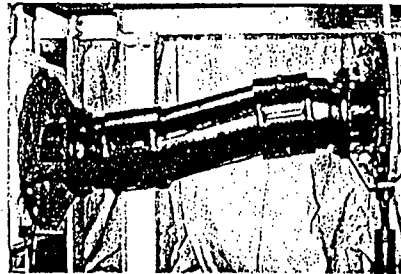
図-2.5.3.15 可とう継ぎ手の構造 (例)

②可とう伸縮管

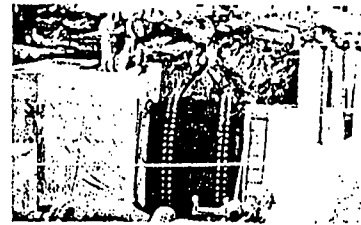
構造物とパイプラインの接合部によく使用されるもので、ゴム製のものと鋼板製のものがあり、大きな変位に追従できる。口径により異なるが、約1 m位の変位量が吸収できる。



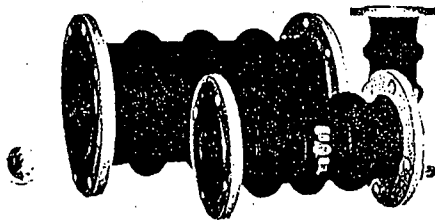
LSコネクタ



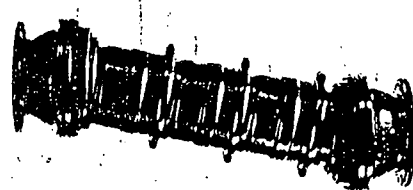
伸縮可とう管



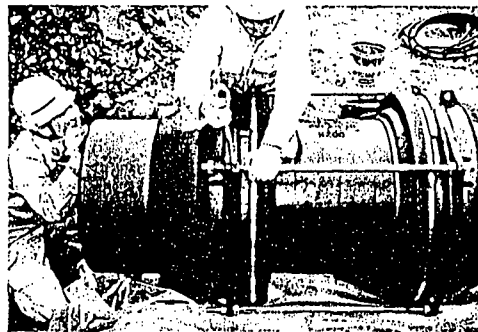
スーパージョイント



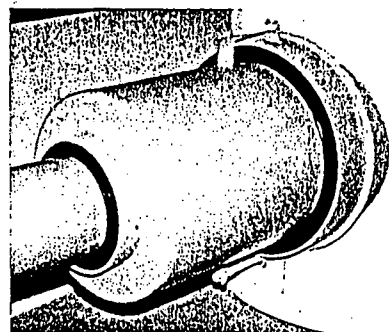
上下水道用可とう管



フレキシベnder



タイフレックス



ヴィテクター

●主な可とう管および可とう継ぎ手

名称	開発者	工法の概要	問い合わせ先 (電話)
フレキシベnder	水研	ダクタイル製ボール型可とう伸縮管。ボール1カ所につき最大で15°曲がる。	水研 (0726-77-3355)
タイ・フレックス	大成機工	ダクタイル製ボール型可とう伸縮管。ボルトなしの一体構造が特徴。	大成機工 (06-344-7771)
伸縮可とう管	コスモ工機	二重管構造でゴムの動きによって偏心する。	コスモ工機 (03-3503-8838)
SPスライダー	土井製作所	地震・地盤沈下対策用の鋼管	土井製作所 (03-3647-0210)
スーパージョイント	西武ポリマ化成	ゴム製の伸縮可とう継ぎ手管。ジャバラ構造で可とう性に優れる。	西武ポリマ化成 (03-5956-8881)
ヴィテクター	日本ヴィクトリック	マンホール用の可とう継ぎ手。最大100mmの沈下を吸収する。	日本ヴィクトリック (03-3212-8531)
上下水道用可とう管	八千代ゴム研究所	高偏心タイプのゴムジョイント	八千代ゴム研究所 (048-281-3615)
LSコネクタ	トーゼン産業	フランジ接続タイプのゴム製伸縮可とう伸縮継ぎ手	トーゼン産業 (03-3801-2091)

図-2.5.3.16 可とう伸縮管の例

b) システム的な対応策

i) トンネル、共同溝

① 拡幅

シールド工法でも工法的にも確立しており、断層のずれによりトンネル断面が縮小しても本来目的の機能を維持できるだけの断面を事前に確保しておく方法である。つまり、断層通過部の前後50mなり100mのトンネル断面を大きくしておく。トンネルが道路や鉄道に使用される場合は、断層によりずれが生じて、道路や鉄道のためのスペースを確保することができれば、二次災害防止や早期復旧に役に立つことが考えられる。トンネル標準示方書（シールド編）・同解説の第38条地盤沈下の影響、²⁾ トンネルと立坑との接合部にも「ある程度の補修で必要断面の確保が可能ないように内空断面を拡大しておく、さらに接合部を鉄筋コンクリート等により補強しておくなどの対策を検討することが必要である。」とある。

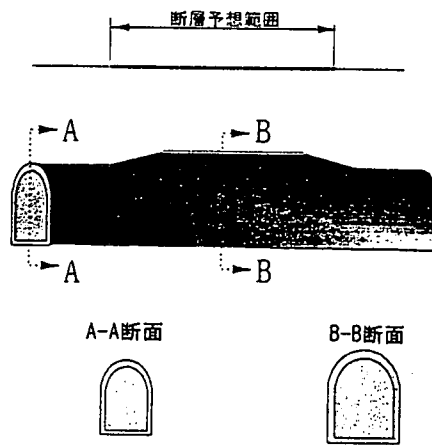


図-2.5.3.17 トンネル拡幅の例

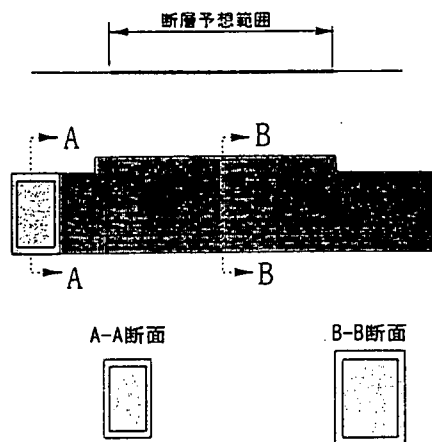


図-2.5.3.18 共同溝拡幅の例

②ダブルルート化

断層が明らかに存在し、施設がその断層を横断せざるを得ない場合は、断層通過部にそれなりの対応策を講じる必要があるが、目的の施設へのルートを実線と点線でダブルし、万が一方のルートが破壊されても、最小限の機能が確保できるようにする。

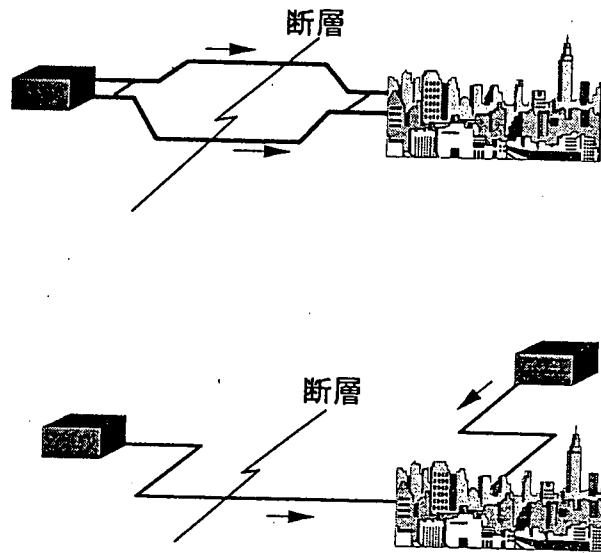


図-2.5.3.19 ダブルルート化の例

③ループ化

水道やガスのように面的な供給を行っている場合は、幹線のループ化を含め、パイプラインを管網化する事により、いくつかのルートが寸断されたとしても、供給先に送れるようなループ化を図っておく。

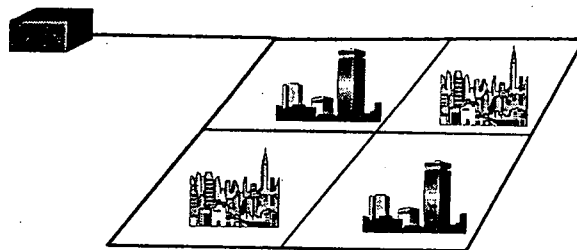


図-2.5.3.20 ループ化の例

④ 隔壁構造

共同溝で断層通過部が破壊された場合、パイプライン内の水やガスが共同溝全体に被害を広げる可能性があり、その前後に隔壁等を設けて、他の部分と遮断できるような構造が望ましい。

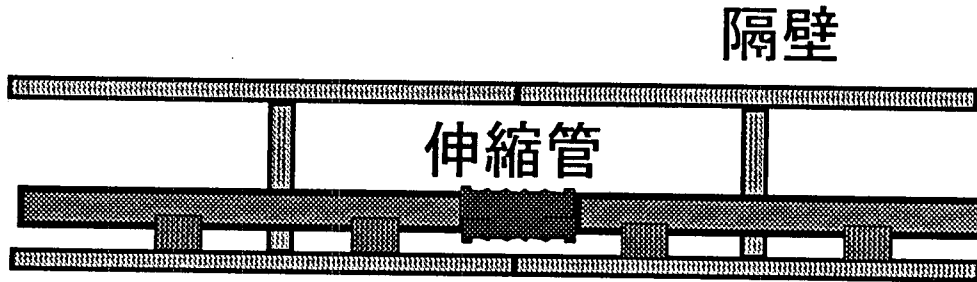


図-2.5.3.21 隔壁構造の例

⑤ ブロック化

パイプラインなどでは、管網状にしたり、ダブル化をはかって、ライフラインの機能確保をはかっているが、それらに加えて、各パイプラインをブロック化することにより、被害の影響を最小限にするとともに、復旧スピードの促進をはかっている。

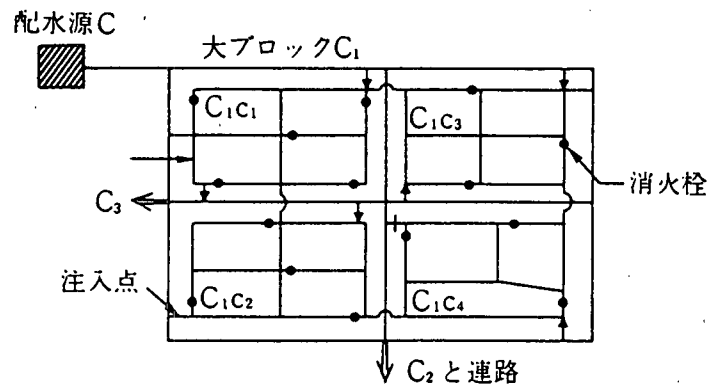


図-2.5.3.22 ブロック化の例⁽⁴⁷⁾

⑥ トンネル内配管

埋設されているパイプラインの一部が断層等により破壊されても、パイプを二重化しておき、外側のパイプが破壊されても、内側のパイプライン機能が維持できるようにする。既設のトンネルやパイプに新しいパイプを挿入して布設するパイプインパイプ工法は実用化されているが、吸収できる変位量は小さい。神戸の千苅り導水路にはφ1350の管が5.1Km配管されている。

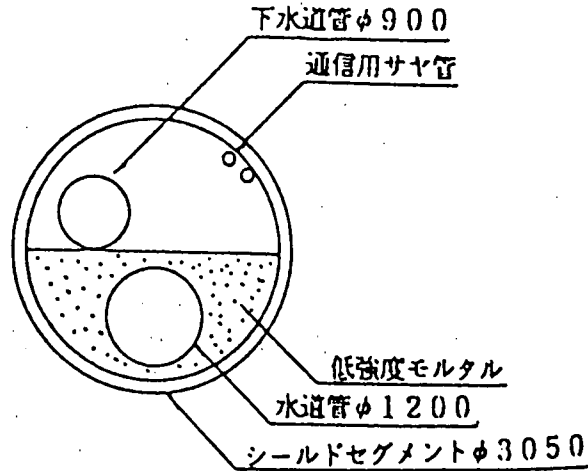


図-2.5.3.23 トンネル内配管の例

⑦共同溝内配管

神戸の地震でも共同溝内の配管は被害が軽微であり、共同溝内の配管の安全性は実績的には高いとされている。また、漏水が生じた場合も、発見が早くできること、道路を掘削することなく復旧できる等のメリットがある。

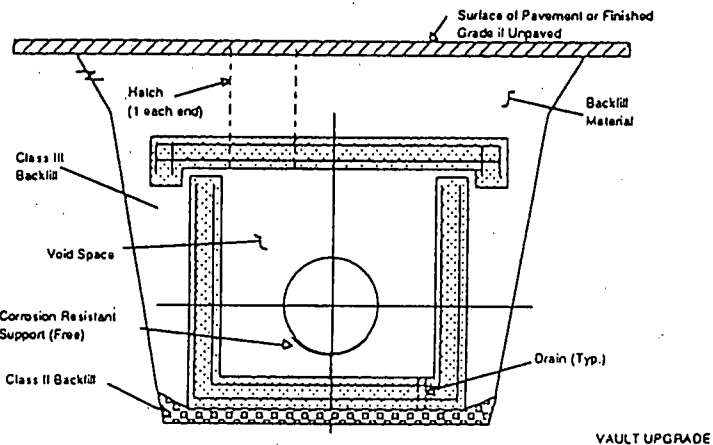


図-2.5.3.24 共同溝内配管の例

c) ソフト的な対応策

断層部の施設の破壊は十分に予想されることであり、災害時の復旧作業を行う可能性が高い。また、システム的な対応策も重要な位置づけを占めるが、線状構造物の場合、破壊された箇所がボトルネックとなるため早期復旧が必要となる場合も多い。断層部には破碎帯を含めて作業に危険を伴う可能性が高く、ソフト的な対応策には早期復旧（①～⑤）と二次災害の防止（⑥～⑨）が大きな目的と考えられる。

①スペースの確保

断層によりトンネルや共同溝が破壊されたとき、内部の施設復旧用の資材の搬入や仮設用の配管等のスペースの確保ができない場合には、復旧作業を妨げ、復旧を早急に行うのが困難になるため、メンテナンススペースを確保しておくことが必要である。

②立坑の増加

トンネルの構造が破壊されても、避難や緊急物資の搬入、修理機材の搬入が出来るように、断層による破壊が予想される部分の前後に立坑を設け、復旧作業を容易にすることが必要である。

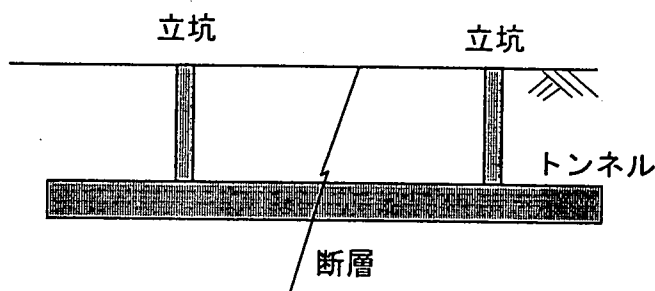


図-2.5.3.25 立坑増加の例

③復旧方法の確保

断層横断部のトンネル、パイプラインや共同溝は断層のずれにより破壊される可能性があり、破壊された場合の復旧方法を事前に検討し準備しておくことが必要である。

④修理機材の確保

施設が破壊された場合、土木的な資材は比較的容易に準備できるが、製品の資材については製作期間等に日数がかかるものもあり、復旧に必要な資材のリストアップや資材そのものの準備が必要である。

⑤バルブの設置

断層通過部ではパイプラインが破壊される確立が高いため、その前後にはバルブを設置し、事故発生時にはバルブを閉め、二次災害の防止や復旧の作業環境を確保するようにする。

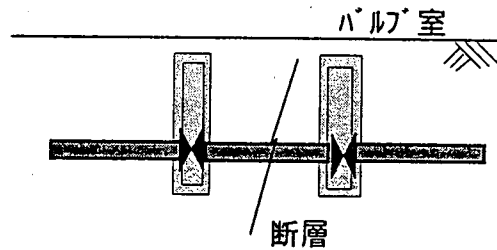


図-2.5.3.26 バルブの設置例

⑥防水性の向上

トンネルや共同溝で躯体が破壊されたとき、破損した部分から地下水等の漏水があると二次災害の原因にもなり、復旧作業の大きな妨げになるので、出来るだけ漏水が発生しないような構造が望ましい。

⑦作業員の安全確保

断層部では、災害復旧を想定し、作業坑等の復旧作業の安全を図るための施設を考慮しておくことが必要である。

⑧避難場所の確保

トンネルなどの災害時に人災を伴う可能性が高い施設については、避難場所等を設けるようにする。また、危険な個所からの退避路の確保も考慮しておく必要がある。

⑨緊急品の備蓄

断層のずれにより施設が破壊された場合を想定し、救急用品、医薬品、食料、水等の緊急品を備蓄しておくことが必要である。

d) 対応策の留意点

i) 施設の種類

鉄道、道路、地下鉄、上水道、下水道、工業用水、電気、ガス、電話等施設によりその重要性、必要復旧スピード、復旧費用等が異なるため、施設の種類により設計方法、対応策は異なってくる。施設の種類により最低限何を確保するのか（空間、送水機能、復旧のしやすさ等）を明確にして、断層通過部の設計を行う必要がある。

ii) 施設のレベル

同じ施設の中でも、幹線、支線、供給線等にその役割も異なり、自ずから重要度も異なってくる。細いパイプラインのように復旧が簡単なものについては、その重要度が低い場合には、断層通過部は壊れること前提に、すぐ直せるような構造にしておく方がよいものもある。

iii) 工法

共同溝の場合などは、開削で建設するときには断面の拡大を含めて、対応策は各種考えられるがトンネルやシールド工法による場合には工法的にかなり制約を受ける。従って、施設の構造だけでなく、その建設方法も考慮して断面横断部の設計を検討する必要がある。

iv) 二次災害に対する対応

施設を守るだけでなく、その施設が破壊されたときに重要な事故が発生する可能性があれば、その施設そのものの重要性には関係なく、対応策を取る必要がある。

(5) まとめと今後の課題

活断層については、未解明な部分も多く、地形・地質調査、物理探査、ボーリング調査、トレンチ調査等により、活断層の位置、長さ、活動履歴等を解明する調査を今後行っていく段階であり、断層による地盤のずれが発生する確率も数百年単位の幅での予測であり、またずれ量についても数10cmから数mの幅がある。地中構造物の構造上も数mのずれに対応するのは容易ではなく、費用的にも大きな負担となる。従って設計条件の設定も難しく、施設の重要性を考慮しながら、ある程度の変位に対しては対応できるようにすることにより、断層のずれによって施設が破壊される確率をできるだけ下げ、万一の場合の代替策や復旧方法を確保するなどのシステム的な対応策を講じるのが現状でできるレベルである。

今後は、断層のずれによる地中構造物の被害例を蓄積し、断層の正確な把握と挙動の予測、またそれに応じた製品の開発、設計手法の確率の研究が必要である。

<参考文献>

- 1) 石油パイプライン技術基準 (案) 日本道路協会 昭和49年 3月 (1974. 3)
- 2) 水道施設耐震工法指針・解説 (社)日本水道協会昭和54年12月 (1979. 12)
- 3) ガス導管耐震設計指針 (社)日本ガス協会 昭和57年 3月 (1982. 3)
- 4) 地下管路設備の耐震設計指針NTT筑波フィールド技術開発センター-昭和62年 (1987)
- 5) 下水道施設地震対策指針と解説 (社)日本下水道協会昭和56年 (1981)
- 6) 土地改良事業設計指針「耐震設計」 農林水産省構造改善局建設部 (1984. 3)
- 7) 液状化対策の調査・設計から施工まで (社)土質工学会 (1993. 2)
- 8) 地中埋設管の調査・設計から施工まで (社)土質工学会 (1984. 6)
- 9) ライフライン地震工学 高田至朗 共立出版株式会社 (1991. 9)
- 10) 動的解析と耐震設計第4巻ライフライン施設 (社)土木学会 技報堂出版 (1989. 7)
- 11) 鉄道と地震 活断層と鉄道構造物 池田俊雄 (国鉄構造物設計事務所)
VOL. 38, NO. 9 PAGE. 23354-23357 1995
- 12) 7 8 伊豆大島近海地震によるトンネル構造物の変形の解析
川上英二 (埼玉大工) S0494A 日本地震工学シンポジウム講演集
VOL. 6th PAGE, 1857-1864 1982
- 13) 地震断層による鉄道トンネルの被害 吉川恵也 (国鉄鉄道技研)
F0369A (0041-3798) 土と基礎 VOL. 30, NO. 3 PAGE. 27-32 1982
- 14) 恵那トンネル (2期線) 工事 (設計編) 井上定昭 (道路公団名古屋建設局)
F0029A (0285-5046) 土木技術 VOL. 39, NO. 5 PAGE. 39-48 1984
- 15) 断層を横切るトンネルの挙動について
Some aspects of the behaviour of tunnels that cross active faults.
BROWN I, BREKKE T L (Univ. California)
K820043 (0110-1358) 3rd Aust New Zealand Conf Geomech 1980 Vol 2 PAGE.
189-194
- 16) Hayward 断層における Bay Area Rapid Transit トンネルの挙動
Behavior of the Bay Area Rapid Transit Tunnels through the Hayward
Fault. BROWN I R, BREKKE T L, KORBIN G E (San Francisco Bay Area Rapid
Transit District, California) No. PB-82-127705 PAGE, 224p 1981

17) 震動とずれに耐えられるトンネルの設計

"Shake and slip to survive" tunnel design.

DESAI DB, CHANG B (Daniel, Mann, Johnson, & Mendenhall); MERRITT J L
(B. D. M. Corp.) K8905 03 (0-87335-083-9) Proc 1989 Rapid Excav Tunn
Conf PAGE. 13-30 1989

18) 地中構造物の耐震設計法

Seismic design considerations for underground structures.

ST JOHN C M, ZAHRAH T F (Agbabian Assoc., California)

B0677B (0275-5416) Adv Tunn Technol Subsurf Use VOL. 4, NO. 3
PAGE. 105-112 1984

19) 南カリフォルニアにおける地殻ブロック回転のモデル化地質工学に対する結論

Modelling of crustal block rotations in southern California

Conclusions for geotechnics.

SCHELLE H, GRUENTHAL G (GeoForschungsZentrum Potsdam, DEU)

K950148 (90-5410-393-0) Earthq Resist Constr Des Vol 1 PAGE. 11-18 1994

20) 遠心模型試験を用いたトンネルに対する断層の影響に関する研究

Centrifuge study of faulting effects on tunnel.

BURRIDGE P B (Lindvall, Richter and As soc., CA, USA) ; SCOTT R F,

HALL JF (Calif. Inst. Tech., CA, USA)

D0424A (JGEND) (0733-9410) J Geotech Eng VOL. 115, NO. 7 PAGE. 949-967 1989

21) シールド工法による断層か所掘進 大岩根誠 (大阪府庁水道部)

G0370B 大阪府建設技術発表会論文集 VOL. 11th PAGE. 297-300 1984

22) 活断層を通過する太田和配水幹線築造工事の報告

猪狩 弘和 (横須賀市水道局) 第47回全国水道研究発表会 平成 8. 5

23) 1992年6月28日カリフォルニア州ランダース地震 (Ms 7.5) 及び

ビッグベア地震 (Ms 6.6) の時のライフラインの挙動

Lifelines Performance in the Landers and Big Bear (California)

Earthquakes of 28 June 1992. LUND L V (Technical Council on Lifeline

Earthquake Engineering, New York)

B0145A (BSSAA) (0037-1106) Bull Seismol Soc Am

Vol. 84. NO. 3 PAGE. 562-572 1994

24) サンフランシスコの下水吐き口

San Francisco outfall. The champ?

MURPHY G J, EISENBERG Y (Parsons Brinck erhoff, CA, USA)

B0282A (0360-0556) Civ Eng ASCE (Am Soc Civ Eng)

VOL. 55, NO. 12 PAGE. 58-61 1985

- 25)耐震パイプラインの設計法 I I.I
How to design pipelines for earthquake resistance III.
SINGHAL A (Arizona State Univ.)A0373A(0032-0188) Pipeline Gas
J VOL. 210. NO. 11 PAGE. 50-52 1983
- 26)Whitfield 貯水池の入口、出口パイプライン JICST 91A0179516
Whitfield reservoir inlet outlet pipeline.
BLAIR W H (Alameda County Water District, CA) ; CREEGAN P, LYNCY T,
WEINBRENNER L (Engineering Science Inc., CA)
K901046 (0-87262-749-7) Pipeline Des Install PAGE. 458-467 1990
International Conference on Pipeline Design and Installation ;
las Vegas, Nev.
- 27)カリフォルニア州水道プロジェクトに対する信頼性 JICST CN 81A0165753
Reliability of the california state water project.
KIREMIDJIAN A S (Stanford Univ., Calif.)
A0478B (ASMSA) Pap Am Soc Mech Eng NO. 80-C2-PVP-63 PAGE. 1-10 1980
- 28)地震下における埋設管の現地調査と解析 (film) JICST CN 84A0276695
Field investigation and analysis of buried pipelines under various
seismic environments.
WANG L R-L (Univ. Oklahoma)
P0999A PB Rep NO. PB-84-124775 PAGE. 19p 1982
- 29)フレキシブルジョイント付き共同溝の地震挙動 JICST 91A0829255
Seismic behavior of common ducts with flexible joints.
FUCHIDA K (Yatsushiro National Coll. Technology.) ;
AKIYOSHI T (Kumanoto Univ.)
S0494A 日本地震工学シンポジウム論文集
VOL. 8th, NO. Pt 2 PAGE. 2079-2084 1990
- 30)共同溝の地震時挙動について
Behavior of structure joints of common duct during earthquake.
小泉淳 (東洋大) ; しま田富雄 (日本環境技研) ; 藤田久之 (北陸電力)
村上博智 (早稲田大)
S0902A 土木学会年次学術講演会講演概要集 第3部
VOL. 43rd PAGE. 820-821 1988
- 31)Kennedy, R. P., Chow, A. W., and Williamson, R. A.,
"Fault Movement Effects on Buried Oil Pipeline," Journal of
Transp. Engr., ASCE, TE5, 617-633, 1977
- 32)Kennedy, R. P., Darrow, A. D. C and Short, S. A., "Seismic Design of

- Oil pipeline Systems," Journ. of Tech. Councils, ASCE, TC1, 119-134, 1979
- 33) Newmark, N. M., and Hall, W. J. "Pipeline Design to Resist Large Fault Displacement," Proc. U. S. Nat'l Conf. on Earthquake Engineering, Montreal, 177-204, June 4-6, 1979
- 34) Bonilla, M. G., R. K. Matk, and J. J. Lienkaemper, 1984.
"Statistical Relations Among Earthquake Magnitude Surface Rupture Length, and Surface Fault Displacement," Seismological Society of America Bulletin, V. 74, P. 2379-2411.
- 35) Fuerst, R. P., 1987. "Santa Clara Conduit: A Case History of the Calaveras Fault Crossing," United States Bureau of Reclamation.
- 36) Narvaiz, J., 1984. A Case History of the Design of a 60-inch Diameter Pipeline that Crosses an Active Creeping Fault Under a River, United States Bureau of Reclamation.
- 37) LOUDERBACK, G. D. 1942. Fault and earthquakes. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 32, pp 305-330
- 38) NASON, R. D. 1971. Investigations of Fault creep slippage in northern and central California.
University of California, San Diego, Ph. D. Dissertation.
- 39) 松田時彦 1975 : 活断層から発生する地震の規模と周期について.
地震, 269-283
- 40) Matuda, T. 1981: Active fault and damaging earthquakes in Japan-
Macroseismic zoning and precaution fault zone . Earthquake Prediction-
An International Review, M. Ewing Ser. 4, 279-289, AUG, Washington, D. C.
- 41) 山崎晴雄 「地震断層の出現形態とその形成条件」 地質調査所月報、第32巻 第10号 574-575
- 42) 断層横断区域にある大口径パイプラインの性状
Behavior of Large-Diameter Pipeline at Fault Crossings
T. P. Desmond, M. S. Power, C. L. Taylor, and R. W. Lau
- 43) 岡田篤正 (1979) : 愛知県の地質地盤 (その4) 活断層, 愛知県防災会議地震部会, 122P
- 44) 松田時彦他 (1979) : 空中写真による活断層の認定と実例 地震研究所彙報, 52, 461-496
- 45) 日本の活断層図「地図と解説」 活断層研究会編, 東大出版会, 1992
- 46) 地質調査所月報 (第32巻 第10号)
- 47) 都道府県政令市別「最新活断層-危険度マップ」 This is 読売 1996, 10
- 48) 松田時彦 (1975) : 活断層から発生する地震の規模と同期について
地震, 28, 269-283
49) 配水ブロック計画の実施例,
(財)水道管路技術センター 小林敏彦他 平成4年3月

2.5.4 地中化構造物の重要度の考え方

(1) 現状での構造物の重要度の設定方法

道路橋道橋示方書1996年12月改訂では、耐震性能を評価する目的で重要度A Bのランクが決められた。他の指針では、耐震性能という概念で定義されていない。

(2) 重要度の考え方の整理

i) 構造物の耐震補強の重要度と優先度

表-2.5.4.1 構造物の耐震補強の重要度と緊急度

項目	内容	構成要素
重要度	①人命への影響	直接被害
	②再建費用	直接被害
	③避難・救援・救急活動及び二次災害防止活動への影響	1次波及
	④地域の生活・経済（流通・生産）活動への影響（範囲・度合い）	1次・2次波及
	⑤沿道の近接構造物への影響	1次波及
	⑥復旧の難易度	
	⑦路線の重要度（交通量・迂回路の有無）	
	⑧構造物の目的・用途（地域防災計画に基づく規定）	
緊急度	①地盤・地形条件	土質性状・液状化
	②地震危険度	地震発生確率・活断層の距離
	③構造物の建設年次	老朽化・適用指針基準

ii) 優先度の構成要素

優先度は重要度と緊急度から各構造物によって以下のように定めることが出来る。

新設構造物の耐震性能＝重要度 既設構造物の耐震補強＝重要度・緊急度

既設構造物の復旧＝重要度・緊急度・許容損傷と実被害・被害の拡大

iii) 既往の文献調査

日本と米国における構造物の重要度決め方に関する文献調査を行った。

a. 日本における重要度の決め方

表-2.5.4.2 日本における構造物の重要度の考え方

No	文献名・著者等	内 容	テーマ
①	都市型震災の波及構造モデルに基づく公共土木施設の震災対策の重要性川島 土木技術資料 Vol. 36-4 1994	本文は従来の震災と異なる未経験の災害である都市型震災に対するインフラストラクチャーの震災対策の重要性を明らかにするために、ブレインストーミング手法を用いて、震災波及の構造モデルを検討した。	インフラストラクチャーの震災対策の重要性
②	「水道の地震対策マニュアル」水道管路技術センター	整備効果、整備費用、現況の耐震性能を総合的に判断。[判断基準]（整備優先順位）：水道施設の形態は樹枝状なので上流側の被害の方が全体に与える影響は大きい。従って、上流側より整備。配水管は常時における流量の大きい順に整備。建設年度の古い施設より整備。	水道施設の整備優先順位
③	「道路橋示方書・同解説（V：耐震設計編）」日本道路協会	重要度については、標準的な橋と特に高い橋の2つに区分。重要度を構成する要因として、①地域の防災計画上の位置づけ：橋が地震後の避難路や緊急物資の供給等の輸送を確保の度合い。②2次災害の可能性：橋が被害を受けた時、他の構造物・施設に影響を及ぼす度合い。③利用状況と代替性の有無：橋が通行機能を失った時、機能を維持の代替性④機能回復の難易：橋が被害を受けた後に、その機能回復に要する時間、費用の大きさ。	道路橋の耐震設計上の重要度
④	震災直後における道路網復旧順位決定のための支援システム池本 土木学会第46回年次学術講演会 Vol. I-566 H3.9	震災後の合意形成のプロセスを支援する一つの方法であるVISMSを用いた道路復旧順位決定システムを伊豆半島の道路網に適用した。震災道路の応急復旧優先順位を決定するために必要な規定要因を要素の階層構造化により選定できた。震災後の道路復旧順位を決定する判断の分析を行った。	震災後の道路復旧順位
⑤	被災したネットワークの構成要素の重要度評価 奥村 土木学会第46回年次学術講演会 Vol. I-567 H3.9	本研究では「そのリンクを修復しなければ機能が回復しないノード数」を破壊したリンクの重要度と定義し、この重要度を近似的に算定する方法を提案した。	破壊したリンクの重要度
⑥	「土木構造物の震災復旧技術マニュアル」建設省	応急復旧の優先度：二次的影響の程度と可能性（確率）を基本に被災状況及び程度、応急復旧に対する制約条件等を加味して総合的に定める。	土木構造物の応急復旧の優先度
⑦	「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」日本道路協会	道路橋の復旧仕様を準用して設計・補強する上での重要度：高速自動車国道。都市高速道路、指定都市高速道路、本州四国連絡道路、一般国道（指定区間）。	道路橋設計・補強上の重要度
⑧	大都市における既設道路橋の地震防災上の重要度の評価手法 佐藤 土木学会 土木学会論文集 Vol. I-31 No. 513 1995.4	既設道路橋の耐震補強および震災後の対策のため重要度を定めるとしている。橋の被災した場合の影響度を、地震の強さ・橋の耐震性・重要度で評価し、震災対策目標値を設定している。重要度の考え方の要素として：○路線・区間の重要度（路線の属性）○路線・区間の重要度（ネットワーク特性）○橋の被災した場合の影響度の組み合わせにより橋の地震防災上の重要度を定めるものとしている。	震災前・震災後の対策

b. 米国における重要度の決め方

表-2.5.4.3 外国（米国）における構造物の重要度の決め方

文献名・著者等	内 容	テーマ
① Study on the Seismic Performance of Bridge Freeways during the Jan. 17, 1994 Northridge Earthquake related with Retrofitting 建設工学研究所報告 Vol.36号 1994	[橋梁復旧の優先順位付け] 橋梁復旧の優先順位付けは、財源が少ないので、信頼を得られるように実施しなければならない。橋梁の潜在的損傷は復旧の優先順位を考える上で最も重要な事実であり、それは道路網の重要部の分断の発生率に直接関係する。橋梁構造の設計哲学は、「橋梁は地震後、落橋により重要な社会的・経済的施設の分断の原因となつてはならず、また、緊急対策の用に供しなければならない」ということである。橋梁復旧の優先順位付けで、現在、考慮されているのは、いろいろある中で、次の要素である。 ・構造物の歳、設計 ・地質及び地学的条件 ・地震危険度・交通量 橋梁の重要度は、ハイウェイシステムと地域社会、救難活動の可能性、国の安全・防衛網、地震後の地域の復旧と橋の喪失を一緒にした効果を考慮して評価する。	橋梁復旧の優先順位
② Procedure of the Second International Workshop on Seismic Design of Bridges	[橋梁復旧優先順位付けの式] 橋梁復旧優先順位付けの式はそれぞれに強みと弱みを有する。蓋然性に基づく危機分析法は、全リスクや地震による見込み被害を決められる利点がある。 蓋然性に基づく危機分析法を現行の方法の向上に使う。 基本的なステップは以下の通り 1 橋の構造を5～10のカテゴリーに分ける。 2 過去の地震被害と専門家の意見により被害/地震強度カーブをつくる。 3 各々の橋に対し地震蓋然性を決める(土質条件を考慮)。 4 被害カーブと想定地震強度カーブに基づき、各クラス毎に被害見込みベースラインを決める。 5 橋毎に、そのリスク因子に対する損害を調整する。 6 対象期間中の、橋の被害損失、橋使用不能による損失、見込み死傷者数などの地震損失結果を計算する。 7 橋の閉鎖による見込み損失により橋の重要さを決める。 8 各々の橋毎に損傷費用を使用損失費用に加算する。この合計の最も高い橋が復旧最優先の橋である。	橋梁復旧の優先順位
③ Selection of Critical Bridges for Retrofitting JICST H0043B A.Longinou ASCE Journal of the Technical Councils of ASCE Vol.105Page197～210p 1979	橋の値打ちを以下の点で評価 行政/運輸システム効果 社会/生存効果 保安/防衛効果 経済/個人的効果 橋の構造ファクターを加味して復旧(耐震補強)する橋を決める (設置場所に係わるファクターも考慮する)	橋の復旧の値打ち
④ Prioritizing Bridges for Seismic Retrofit JH.Gates Public Works Research Institute Proceeding of the First US Japan Workshop of Seismic Retrofit of Bridges 1990	橋のリスク分析の手順 1. 危険度の高い構造特性、輸送特性に重み付けする。 2. 重みの計算方法を決める。 3. 全サイトの地盤の加速度を計算する。 4. 危険度の高い地盤のサイトを決める。 5. 重み付けした橋の構造特性、輸送特性合計し、橋を優先順位付けする。	橋梁復旧の優先順位

iV)重要度の判断因子・決定要因

a. 重要度の判断因子

ii) 項の既往の文献等の重要度の決め方をもとに重要度判断因子を列举すると以下の表のようにまとめられる。

表-2.5.4.4 重要度判断因子

対象耐震設計	重要度判断因子	出典資料
新設構造物	①構造物の建設費用②構造物の格(道路の規格・橋梁の対象荷重等)③必要度④迷惑度⑤代替性⑥機能回復の難易度⑦構造物が受け持つ生活形態範囲⑧経済活動の範囲⑨機能損傷の波及範囲の大小施設⑩構造物の連結性	道路橋示方書他
既設構造物の補強	①補強費用②形状建設年度(強度)③防災計画上の位置付け④路線等から判断される要件⑤構造物の連結性⑥補強の難易度	復旧仕様、米国の事例等他
既設構造物の復旧	①復旧費用②地震規模③被災地域の特性④二次災害の発生の可能性⑤供給元に近づくの幹線⑥多施設との関連性⑦構造物の連結性⑧復旧の難易度	土木構造物の震災復旧マニュアル、米国の事例等

上記判断因子をもとに表-2.5.4.1項で整理した構成要素にそって主な地中構造物を対象にした、重要度決定要因とその内容を整理する。

b. 重要度の決定要因

地中構造物のうち地下鉄、ライフライン、共同溝、地下駅、地下駐車場について整理した。

表-2.5.4.5 重要度

要因	内容	地下鉄	ライフライン	共同溝	地下駅・地下駐車場	備考
人命への影響	当該構造物が被災した際に、直接人命に関わる影響に関して	死傷者数？	ガス漏れや漏電による負傷者数？	ガス漏れや漏電による負傷者数？	死傷者数？	
再建費用	当該構造物が被災した際に生じる機能喪失を復旧するのに必要と考えられ得る再建費用。	復旧工事費	復旧工事費	復旧工事費	復旧工事費	
避難・救援・救急活動及び二次災害防止活動への影響	当該構造物に想定される機能喪失の程度に応じて発生する2次的被害、3次的被害を防止する活動を妨げる要因	地上交通に混雑を引き起こし、緊急・救急車両の通過の阻害	ライフラインへの被害により、引火や消火活動の遅延	収容しているライフラインへの被害と、それによる消火活動に与える影響	地上交通に混雑を引き起こし、緊急・救急車両の通過の阻害	
地域の生活・経済（流通・生産）活動への影響（範囲・度合い）	地域生活や経済活動に対する支障（迷惑度）（治安等も含む）	産業上の重要ルートか 地域社会にとって重要か	流量・容量の大きさ上流側か 日常生活への影響 産業活動へのダメージ	収容しているライフラインの流量、容量の大きさ上流側か 代替ルートの有無	接続している鉄道への影響 駅・駐車場の利用者に対する影響	
沿道の近接構造物への影響	当該構造物が被災した際に、沿道の近接構造物に与える支障	他の地下トンネルに与える影響 地下駅や地下街に与える影響 地上構造物に与える影響	他のライフラインに与える影響	他のライフラインに与える影響	接続している地上構造物に与える影響？ 他の地下構造物（地下駐車場や地下街等）に与える影響	
復旧の難易度	当該構造物が被災し、復旧作業をする際、立地条件や技術条件、経済条件等によって生じる問題等	復旧工事の際の人の行き来、資材の運搬等に支障を来さないか 安全上の問題は無い	復旧工事の際の人の行き来、資材の運搬等に支障を来さないか 安全上の問題は無い	復旧工事の際の人の行き来、資材の運搬等に支障を来さないか 安全上の問題は無い	復旧工事の際の人の行き来、資材の運搬等に支障を来さないか 安全上の問題は無い	
路線の重要度（交通量・迂回路の有無）	当該構造物が果たしている役割の重大さや機能損傷・喪失の場合に与える影響の大きさ。	輸送量（人・貨物）の大きさ 代替交通手段の有無	流量・容量の大きさ上流側か 代替ルートの有無	収容しているライフラインの流量、容量の大きさ上流側か 代替ルートの有無	地下駅・地下駐車場の利用者数や代替駅・駐車場の有無、代替交通手段の有無	
構造物の目的・用途（地域防災計画に基づく規定）	構造物の域防災計画上の重要性	構造物の域防災計画上の重要な施設か否か	構造物の域防災計画上の重要な施設か否か	構造物の域防災計画上の重要な施設か否か	構造物の域防災計画上の重要な施設か否か	

表-2.5.4.6 緊急度

	内容	地下鉄	ライフライン	共同溝	地下駅・地下駐車場	備考
地盤・地形条件 (土質性状・液状化)	構造物が立地している地盤の地震動に抵抗する地盤の強度(地質データ、地盤と地震動との関係、液状化)	沿道の地盤の強度は充分か	沿道の地盤の強度は充分か	沿道の地盤の強度は充分か	地盤の強度は充分か	
地震危険度 (地震発生確率・活断層の距離)	・発生が想定される地震の強度およびその確率 ・活断層が構造物の付近通過しているか、通過している際にはその距離	地震危険度は？ 活断層上を通過していないか	地震危険度は？ 活断層上を通過していないか	地震危険度は？ 活断層上を通過していないか	地震危険度は？ 活断層上を通過していないか	
構造物の建設年次(老朽化・適用指針基準)	建設年次の古いもの(古い基準・規格によるもの)ほど、耐震性が低いと考えられる。	トンネル本体はレベル2に耐えられるか	配管やケーブル、継ぎ手等はレベル2に耐えられるか	共同溝本体はレベル2に耐えられるか 収容しているライフラインの配管やケーブル、継ぎ手、支持金具等はレベル2に耐えられるか	地下駅・地下駐車場はレベル2に耐えられる構造か	

(3) 共同溝を例にした重要度の設定検討

(2) 項の重要度の考え方をもとに地中化構造物のうち共同溝を例にとって重要度の評価を行ってみる。

i). 対象共同溝

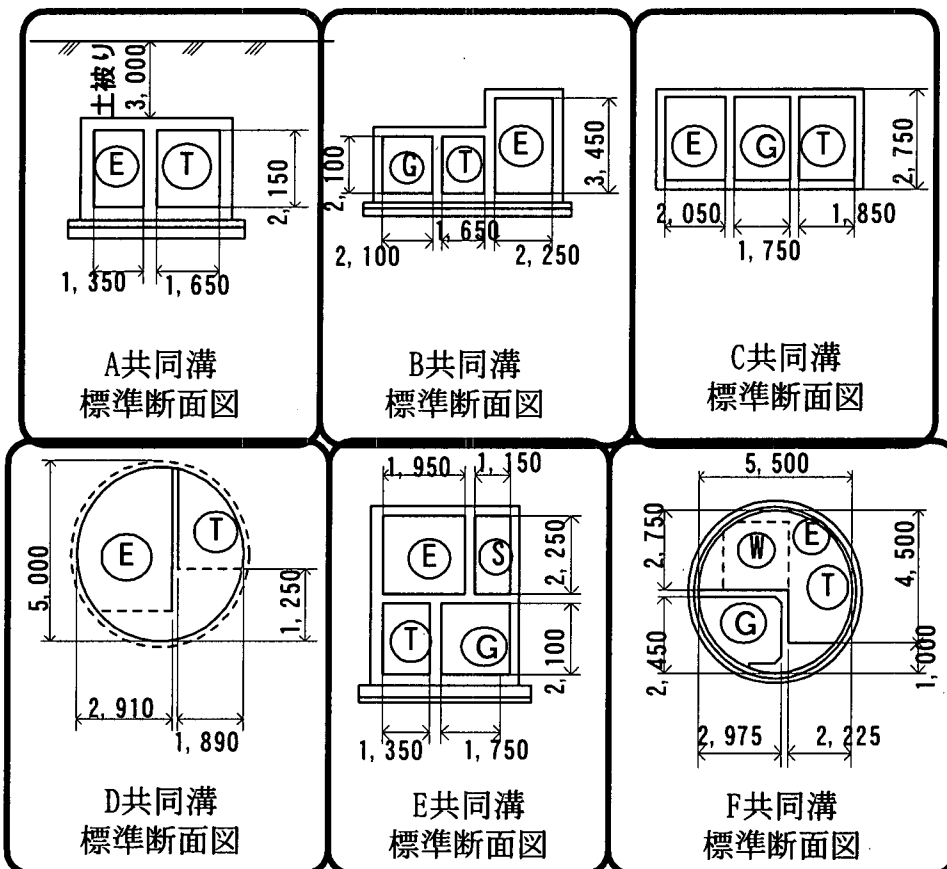


図-2.5.4.1 共同溝断面図

ii) 評価条件

日本の主要大都市に設けられている上記共同溝5例をもとに、重要度の評価要因①～⑧と緊急度①～③を以下の仕様で評価した。

a. 評価指標

表-2.5.4.7 重要度

要因	内容	共同溝	評価指標	評価区分	得点	備考
①人命への影響	当該構造物が被災した際に、直接人命に関わる影響	① 共同溝本体の破損による、人命への影響	維持管理のための入溝の可能性（施設数）	3施設以上	5	共同溝への入溝は管理者のみ。
				2施設	0	
②再建費用	当該構造物が被災した際に生じる機能喪失を復旧するのに必要と考えられ得る再建費用。	① 復旧工事費	復旧工事費	250万円/m以上	5	復旧費用は建設費の30%と想定
				250万円/m未満	0	
③避難・救済・救急活動及び二次災害防止活動への影響	当該構造物に想定される機能喪失の程度に応じて発生する2次的被害、3次的被害を防止する活動を妨げる要因	① 収容しているライフラインへの被害	維持管理のための入溝の可能性（施設数）	3施設以上	5	共同溝は2企業以上で成立。
				2施設	0	
④地域の生活・経済（流通・生産）活動への影響（範囲・度合い）	地域生活や経済活動に対する支障（迷惑度）（治安等も含む）	② それによる消火活動等の防災活動への影響。	沿道利用状況	ビル化率50%以上	5	ビル化率=沿道にビル占める比率。
				ビル化率50%未満	0	
⑤沿道の近接構造物への影響	当該構造物が被災した際に、沿道の近接構造物に与える支障	③ 復旧道路の利用への影響。	地上道路の利用状況	交通量4万台/日以上	5	交通センサス
				交通量4万台/日未満	0	
⑥復旧の難易度	当該構造物が被災し、復旧作業をする際、立地条件や技術条件、経済条件等によって生じる問題等	① 収容しているライフラインの流量、容量の大きさに上流側か否かによる影響度。	ライフラインのネットワーク上の重要度	3施設以上	5	
				2施設	0	
⑦路線の重要度（交通量・迂回路の有無）	当該構造物が果たしている役割の重大さや機能損傷・喪失の場合に与える影響の大きさ。	② 収容施設数。	占有企業数	3施設以上	5	
				2施設	0	
⑧構造物の目的・用途（地域防災計画に基づく規定）	地域の防災計画上の構造物の持つ重要性・必要性。	③ 代替ルートの有無。	ネットワーク上の代替ルートのあるライフライン数	3施設以上	5	
				2施設	0	
① 人命への影響	当該構造物が被災した際に、沿道の近接構造物に与える支障	① 他のライフラインに与える影響	ライフラインの近接の有無	ライフラインが近接して有る	5	
				ライフラインが近接して無い	0	
② 再建費用	当該構造物が被災した際に生じる機能喪失を復旧するのに必要と考えられ得る再建費用。	② 近接地中構造物への影響。	近接構造物（橋梁・地下鉄等）の有無	近接構造物が有る	5	
				近接構造物が無い	0	
③ 避難・救済・救急活動及び二次災害防止活動への影響	当該構造物に想定される機能喪失の程度に応じて発生する2次的被害、3次的被害を防止する活動を妨げる要因	① 復旧工事の際の人の行き来、資材の運搬等への支障。	地上交通量への影響	交通量4万台/日以上	5	
				交通量4万台/日未満	0	
④ 地域の生活・経済（流通・生産）活動への影響（範囲・度合い）	地域生活や経済活動に対する支障（迷惑度）（治安等も含む）	② 安全上の問題。	構造物の深さや構造による判断	シールド（深く・地上の制限がある構造）	5	
				開削共同溝（比較的浅く・地上の制限が無い構造）	0	
⑤ 沿道の近接構造物への影響	当該構造物が被災した際に、沿道の近接構造物に与える支障	① 収容しているライフラインの流量、容量の大きさに上流側か否かによる影響度。	収容幹線施設のネットワーク上重要度の高い施設かどうかを判断。	収容施設はネットワーク形成上重要度が高い施設を含む。	5	例：電力特高圧・水道φ600・電話光ケーブル・ガス高圧
				収容施設はネットワーク形成上重要度が高い施設を含まない。	0	
⑥ 復旧の難易度	当該構造物が被災し、復旧作業をする際、立地条件や技術条件、経済条件等によって生じる問題等	② 収容施設数。	占有施設数を共同溝の重要性判断指標と想定	3施設以上	5	
				2施設	0	
⑦ 路線の重要度（交通量・迂回路の有無）	当該構造物が果たしている役割の重大さや機能損傷・喪失の場合に与える影響の大きさ。	③ 代替ルートの有無。	共同溝ネットワーク上の代替ルートの有無。	共同溝の代替ルート無し。	5	ネットワーク形態から判断
				共同溝の代替ルート有り。	0	
⑧ 構造物の目的・用途（地域防災計画に基づく規定）	地域の防災計画上の構造物の持つ重要性・必要性。	① 地域防災計画上の規定の有無	地域防災上重要な位置づけがあるか無いかの評価	地域防災計画上の規定がある区間	5	
				地域防災計画上の規定が無い区間	0	
① 人命への影響	当該構造物が被災した際に、直接人命に関わる影響	② 緊急輸送道路等との関係	共同溝通過路線が緊急輸送路に指定されているかどうか。	緊急輸送道路に指定されている。	5	緊急輸送道路に指定されていない。
				緊急輸送道路に指定されていない。	0	

表-2.5.4.8 緊急度

要因	内容	共同溝	評価指標	評価区分	得点	備考
①地盤・地形条件(土質性状・液状化)	・構造物が立地している地盤の地震動に抵抗する地盤の強度(地質データ、地盤と地震動との関係、液状化)	① 周辺の地盤の種類。	共同溝設計指針(現行)の地盤種別・地域区分	地盤種別4種・A地域	5	
				地盤種別3・2・1種・A地域	0	
		② 液状化の可能性と対策の有無。	液状化地盤と対策が施されているかどうか。	液状化地盤で対策が施されていない。	5	
				液状化地盤で対策が施されている、あるいは液状化しない。	0	
②地震危険度(地震発生確率・活断層の距離)	・発生が想定される地震の強度およびその確率・活断層が構造物の付近通過しているか、通過している際にはその距離	① 地震危険度	共同溝設計指針(現行)の地域区分で判断	地域区分A地域	5	
				地域区分A地域以外	0	
		② 活断層の近接の有無。	共同溝ルートと活断層の近接度合いで判断。	共同溝ルートと活断層の100mほど近接している。	5	
				共同溝ルートと活断層の近接度合いで判断。	0	
③構造物の建設年次(老朽化・摘要指針基準)	建設年次の古いもの(古い基準・規格によるもの)ほど、耐震性が低いと考えられる。	① 共同溝本体はレベル2に耐えられるか否か。	レベル2で設計されたものかどうか。	レベル2で設計されている。	5	現行指針では設計されたものはレベル2に対応していない。
				レベル2で設計されていない。	0	
		② 収容しているライフラインの配管やケーブル、継ぎ手、支持金具等はレベル2に耐えられるか否か。	レベル2で設計されたものかどうか。	レベル2で設計されている。	5	現行指針では設計されたものはレベル2に対応していない。
				レベル2で設計されていない。	0	

c. 重要度の総合評価

重要度を総合総合評価すると以下の結果となった。

表-2.5.4.9 重要度の総合評価

項目	要因	内容	評価指標	各共同溝の評価					
				A	B	C	D	E	F
重要度	①人命への影響	当該構造物が被災した際に、直接入る影響	① 共同溝本体の破損による、人命への影響	5	0	5	0	5	5
			② 収容物件の、ガス漏れや漏電による人命への影響	5	5	5	5	5	5
	②再建費用	当該構造物が被災した際に生じる機を復旧するのに必要と考えられ得る再建費用。	①復旧工事費	5	0	0	5	5	0
			② 当該構造物の資産価値の逸失。	0	0	0	0	0	0
	③避難・救護・救急活動二次災害防止活動への影響	当該構造物に想定される機能喪失の発生する二次的被害、三次的被害をる活動を妨げる要因	① 収容しているライフラインへの被害	5	0	5	0	5	5
			② それによる消火活動等の 防災活動への影響	5	5	5	5	5	5
	④地域の生活・経済(流通・生産)活動への影響度合い	地域生活や経済活動に対する支障(迷惑度)(治安等も含む)	③復旧道路の利用への影響。	0	5	0	0	5	5
			① 収容しているライフラインの流量、容量の大きさ上流側か否かによる影響度。	5	0	5	0	5	5
			②収容施設数。	5	0	5	0	5	5
⑤沿道の近接構造物への与える支障	当該構造物が被災した際に、沿道の与える支障	③代替ルートの有無。	5	0	5	0	5	5	
		① 他のライフラインに与える 影響	5	5	5	5	5	5	
		②近接地中構造物への影響。	0	0	0	0	5	5	
⑥復旧の難易度	当該構造物が被災し、復旧作業をす件や技術条件、経済条件等によって	① 復旧工事の際の人の行き来、資材の運搬等への	0	5	0	0	5	5	
		②安全上の問題。	0	5	5	5	5	5	
⑦路線の重要度(交通量・迂回路の有無)	当該構造物が果たしている役割の重大さや機能損傷・喪失の場合に与えさ。	① 収容しているライフラインの流量、容量の大きさ上流側か否かによる影響度。	5	5	5	5	5	5	
		②収容施設数。	5	0	5	0	5	5	
		③代替ルートの有無。	5	5	5	5	5	5	
⑧構造物の目的・用途(防災計画に基づく規定)	地域の防災計画上の構造物の持つ重	① 地域防災計画上の規定の有無	5	5	5	5	5	5	
		②緊急輸送道路等との関係	5	5	5	5	5	5	
合計				70	50	70	45	90	85
緊急度	①地盤・地形条件(土質性状・液状化)		共同溝設計指針(現行)の地盤種別・地域区分	5	5	0	5	0	0
			液状化地盤と対策が施されているかどうか。	5	5	5	5	5	5
	②地震危険度(地震発生率・活断層の距離)		共同溝設計指針(現行)の地域区分で判断	5	5	5	5	5	5
			共同溝ルートと活断層の近接度合いで判断。	0	5	0	0	0	0
③構造物の建設年次(老朽化・摘要指針基準)	共同溝本体はレベル2に耐えられるか否か収容しているライフライン、継ぎ手、支持金具等はレベル2に耐えられるか否か	レベル2で設計されたものかどうか	レベル2で設計されたものかどうか	0	0	0	0	0	0
			レベル2で設計されていない。	0	0	0	0	0	0
合計				15	20	10	15	10	10
総合評価				3.4	2.8	3.2	2.4	4.0	3.8
		重要度の順位		3	5	4	6	1	2

d. 重み付けを変えた順位の評価表

工事費・交通量・構造物施工法が重要度の評価に大きく影響している。

項目	重みの付け方	各共同満の順位					
		A	B	C	D	E	F
p1	重みを付けなかった場合	5	3	3	6	1	2
p2	復旧工事費に重みを付けた場合	6	2	5	3	1	4
p3	交通量に重みを付けた場合	3	4	4	6	1	2
p4	シールド工法か否かに重みを付けた場合	4	6	3	5	1	2
p5	復旧工事費と交通量に重みを付けた場合	4	3	6	5	1	2
p6	復旧工事費と交通量に重みを付けた場合（但し、交通量は2倍）	3	4	6	5	1	2
p7	復旧工事費とシールド工法か否かに重みを付けた場合	6	4	4	2	1	3
p8	交通量とシールド工法か否かに重みを付けた場合	3	6	4	5	1	2
p9	復旧工事費と交通量とシールド工法か否かに重みを付けた場合	3	5	5	4	1	2

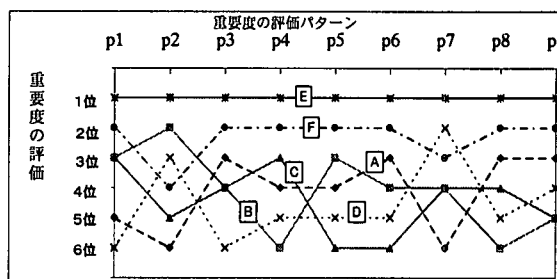


図-2.5.4.2 重み付けを行った際の順位

(4) 地下構造物全体の重要度の関係

前項までの検討から明らかなように評価する要素によって重要度の重み付けが異なってくる。今後、がどのように相互依存しているかを明確化する必要がある。一例として川島らの研究では都市型の波及経路を図-2.5.4.3のように明確化し、都市の機能低下に影響を及ぼしやすい基盤施設を二次波及による機能損傷に至る波及経路数から検討すると、道路施設の物的被害を震災対策により100%防止できれば、全波及経路数のうち約36%を遮断できるとしている。

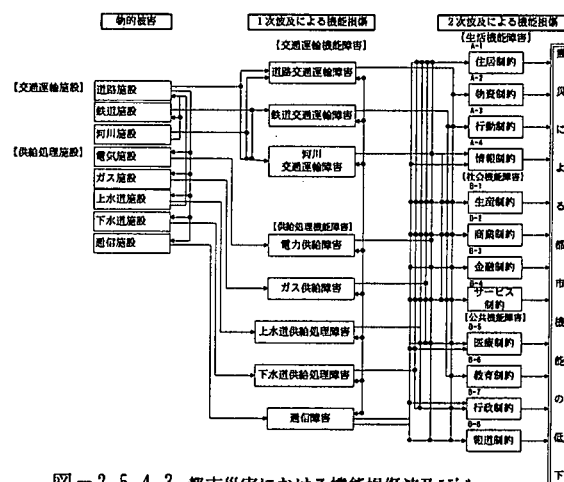


図-2.5.4.3 都市災害における機能損傷波及経路
(川島他：「都市型震災の波及構造」に基づく公共土木施設の震災対策の重要性」1995土木技術資料の内地中構造物部分)

(5) 阪神・淡路大震災

1994年度のGDP(国内総生産は約468兆円(国民経済計算より))の減少率は0.1~0.45%(各研究機関試算)という大きな影響を与えた大災害となった。限られた予算の中で耐震補強を行うことになるので、補強の優先順位の決定についても早急に基本的な考え方をまとめる必要がある。優先順位の決定で、参考になるのは前述した今後の耐震設計における重要度の考え方である。さらに、耐震補強に要する費用とその分担方法等についても広範な議論に基づいたコンセンサスが必要となる。

(6) まとめと今後の課題

本検討では、重要度決定の考え方の手順を整理するとともに、評価因子について抽出する。ただし、これは、重要度の考え方の一手法を示すものであり、その評価に関して、様々な観点からの意見があり、また、重要度の重み付けも異なる。構造物の特性により重要度の定義づけが大きくことなる。今後、各機関における、重要度の位置づけ構造物の相関関係を考慮した重要度の相対性、評価因子等この検討の手がかりとした研究が進められる必要がある。