

# 北海道東方沖地震により被害を受けた 漁港岸壁の変形解析

ANALYSIS OF DEFORMATION IN FISHERY HARBOR QUAY WALL, WHICH WERE DAMAGED DURING 1994 EAST OFF HOKKAIDO EARTHQUAKE.

神原一雄<sup>1</sup>・田中則男<sup>1</sup>・服部和憲<sup>2</sup>・林克恭<sup>3</sup>・鈴木將之<sup>3</sup>

Kazuo KANBARA, Norio TANAKA, Kazunori HATTORI, Katuyasu HAYASHI  
and Masayuki SUZUKI

<sup>1</sup>北海道 水産林務部 漁港漁村課 (〒060-8588 札幌市中央区北3条西6丁目)

<sup>2</sup>正会員 北海道釧路土木現業所 中標津出張所 (〒086-1045 標津郡中標津町東5条北3丁目1)

<sup>3</sup>正会員 株式会社 アルファ水工コンサルタンツ (〒063-0829 札幌市西区発寒9条14丁目516)

On October 4, 1994, an earthquake of magnitude 8.1 occurred at east off Hokkaido. Many Port structures and fishery harbor structures in east Hokkaido were damaged. Therefore, two dimensional effective stress analyses are conducted for quay wall based on the data in there. This is analysis for -4.0m quay wall in Shibetu fishery harbor that was damaged by the earthquake. The results of the effective stress analysis of quay wall indicate that a fundamental pattern of the deformation of the quay wall is reasonably simulated by the present approach.

**Key Words :** Earthquake, effective stress analyses, deformation of quay wall

## 1. はじめに

近年, 我が国では, 大規模な地震が頻発し, 「平成5年釧路沖地震」, 「平成6年北海道東方沖地震」が発生し, さらには施設及び大きな人的被害が生じた「平成7年兵庫南部地震」が記憶に新しい. このような大規模な地震に遭遇した際においても, 十分な輸送機能を確保することを目的とした耐震岸壁の建設が, 港湾や漁港において近年進められている.

これらの耐震岸壁を設計する際に, 必要に応じてレベル2地震動を想定した動的変形照査を実施することが求められている. ここで, 動的変形照査の手法としては, FEMプログラムを用いた数値シミュレーションが一般的な手法といえる. しかし, 数値シミュレーションを行なう場合, 入力条件を十分に検証することが特に重要であると考えられる.

一方, 図-1に示す北海道の標津漁港においては, -4.0m耐震岸壁の建設が計画されている. この-4.0m耐震岸壁を設計する際には, 前述の動的変形照査が必要となる. そこで, -4.0m耐震岸壁の動的変形照査の数値シミュレーションを行なう際の諸条件を設定するために, 実際に「平成6年北海道東方沖地震」により被害を受けた既設-4.0m岸壁において,

有限要素法を用いた有効応力解析プログラム「FLIP」<sup>1)</sup>を用い, 解析パラメータの設定については簡易設定法<sup>2)</sup>を基本として, 種々のケーススタディを行ないながら変形解析を実施した. 本報告では, その解析結果について述べる.

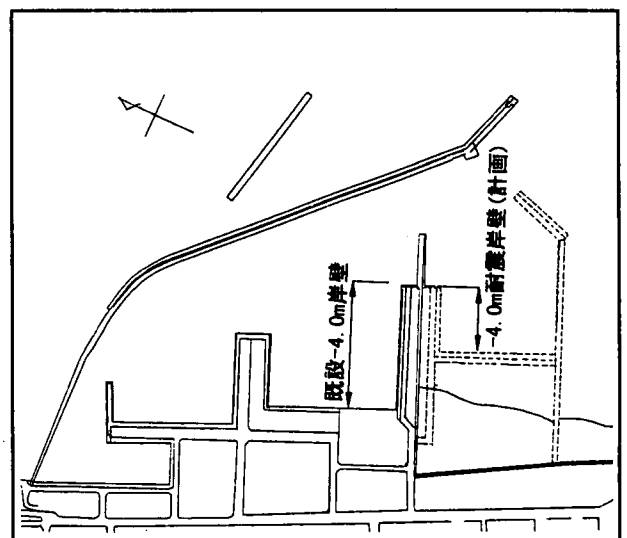


図-1 標津漁港平面図

## 2. 北海道東方沖地震による被害概要

### (1) 地震<sup>3)</sup>

平成6年10月4日22時22分56秒、北海道の東方を震源とするマグニチュード8.1の地震が発生した。この地震は「平成6年北海道東方沖地震」と命名された。本地震の震源位置は、図-2に示すとおり、北緯43度22.3分、東経147度42.5分、深さ23kmであった。本地震によって、北海道の釧路で震度VIの烈震、根室、広尾、浦河で震度Vの強震が記録されたのをはじめ、北海道及び東北の各地に激しい地震動がもたらされ多くの被害が発生した。この地震により、標津漁港も多大な被害を受け、被害金額は約7億4千万円にのぼった。

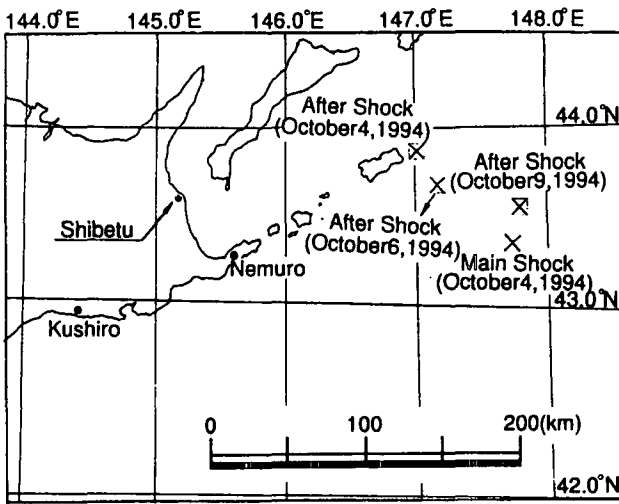


図-2 本震の位置<sup>3)</sup>

### (2) -4.0m岸壁の被災

-4.0m岸壁は昭和54年に完成した延長190.2mの鋼矢板式岸壁と、その背後のアスファルト舗装の道路で構成される。本岸壁は、「平成6年北海道東方沖地震」により被災を受けた。被災状況平面図を図-3に、被災後の変形図を図-4に、また、法線のはらみだし量を表-1に示す。

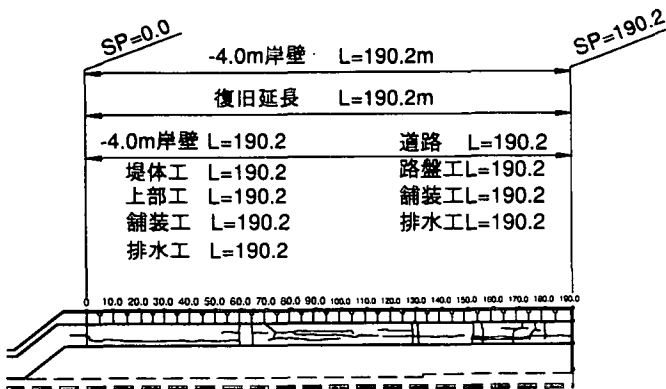


図-3 -4.0m岸壁被災状況平面図

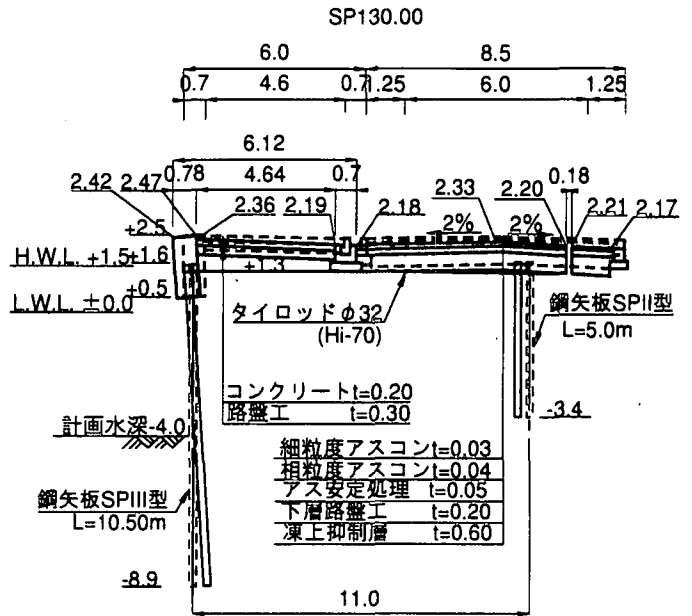


図-4 -4.0m岸壁被災後の変形図

本岸壁の被災延長は190.2m、被害状況は上部工の法線が港外側に-5cm~35cm水平変位し、エプロンが最大25cm沈下した、また、これに伴い上部工とエプロンの段差が最大24cm生じた。道路は、最大28cm沈下し、陥没も数箇所に見られる。クラックは縦断方向に12箇所（幅は最大で88cm、段差は最大で26cm）、横断方向に14箇所（幅は最大で15cm）生じた。

表-1 -4.0m岸壁被災後の法線はらみだし量

測点	はらみだし量 (m)	測点	はらみだし量 (m)
SP0.00	0.03	SP109.16	0.23
SP10.21	0.04	SP118.94	0.28
SP21.10	0.05	SP129.25	0.35
SP30.01	0.04	SP138.83	0.34
SP39.87	0.11	SP148.54	0.33
SP49.85	0.10	SP158.94	0.33
SP59.29	0.12	SP169.00	0.27
SP69.00	0.15	SP179.05	0.20
SP79.06	0.19	SP189.90	-0.05
SP88.90	0.22	SP190.22	-0.05
SP99.04	0.21		

### (3) 地震動<sup>3)</sup>

標津漁港と最も距離が近い位置で強震記録が取得された花咲港における補正加速度F-681(N20E)の主震動部20秒間の地震動加速度時刻暦を図-5に示す。補正加速度の最大値は、水平成分で367(Gal)を記録している。

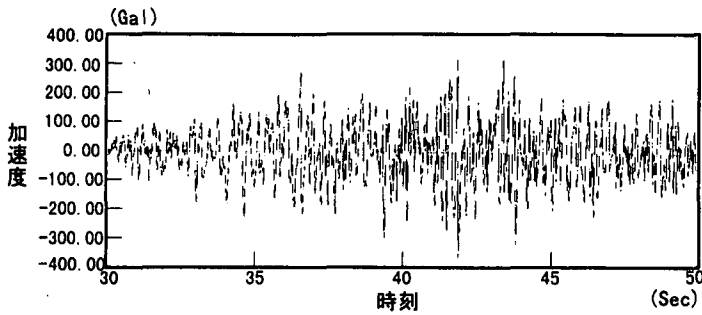


図-5 花咲港の加速度時刻歴  
(F-681 N20E 30~50sec 補正加速度)

### 3. 解析手法の概要及びパラメータの設定

#### (1) 解析手法の概要

本検討の解析手法としては、運輸省港湾技術研究所において開発された有限要素法を用いた有効応力解析プログラム「FLIP (Ver. 3.3)」を使用した。

「FLIP」は、せん断に関する応力-ひずみ関係については、任意方向のせん断面に対して仮想的な単純せん断が発生するものとして、これらのせん断面に対するモデルを、過剰間隙水圧の発生については、塑性せん断仕事の関数として与えるモデルを、それぞれ構成則として取り入れている。<sup>2)</sup>

#### (2) パラメータの設定

「FLIP」では、砂の動的変形特性を示す4つのパラメータ (せん断弾性係数Gma, 体積弾性係数Kma, 内部摩擦角φ<sub>f</sub>, 履歴減衰の上限値hmax) と液状化特性を示す6つのパラメータ (変相角φ<sub>p</sub>, 液状化特性全体を規定するパラメータW1, 液状化特性の前半を規定するパラメータp1, 液状化の後半を規定するパラメータp2, 液状化発生の下限値を規定するパラメータc1, 液状化の終局状態を規定するパラメータS1) を設定する必要がある。これらのパラメータを設定するためには、PS検層、繰返し三軸試験等の詳細な試験が必要となる。しかし、本検討を行なう上での既知データは、標準貫入試験によるN値である。このため、文献<sup>2)</sup>で示されたモデルパラメータの簡易設定法を基本としてパラメータを設定した。

##### a) せん断弾性係数 (Gma)

せん断弾性係数は、平均的な値としてN値と以下のような関係があることが今井らの研究<sup>2)</sup>をもとに示されている。

$$Gma = 1440N^{0.68} \quad (tf/m^2) \quad (1)$$

$$(\quad = 14112N^{0.68} \quad (kN/m^2) )$$

式(1)は、図-6に示されたデータをもとにせん断波速度 (Vs) とN値の関係を式(2)のに示す回帰式で導いたもので、式(2)に対し式(3)のせん断波速度 (Vs) とせん断弾性係数 (Gma) の関係を用い式(1)が示されている。

$$Vs = 89.8N^{0.341} \quad (2)$$

$$Gma = (\gamma_v/g)Vs^2 \quad (3)$$

ここで、 $\gamma_v$ は土の単位体積重量を、gは重力加速度を示している。

本検討では、以上の平均的な値を示す経験式を用いて解析を行い、解析結果からさらに本漁港に適したせん断弾性係数の回帰式を検討することとした。

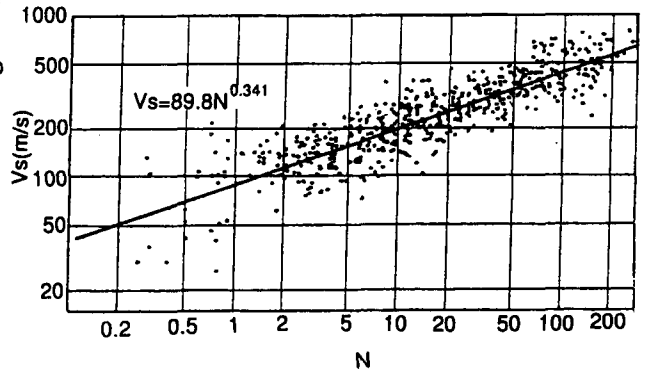


図-6 せん断波速度VsとN値の関係<sup>1)</sup>

##### b) 体積弾性係数 (Kma)<sup>2)</sup>

体積弾性係数 (Kma) は、ポアソン比を  $\nu=0.33$  と仮定して式(4)より求めた。

$$Kma = (2/3)((1+\nu)/(1-2\nu))Gma \quad (4)$$

ここで、Gmaはせん断弾性係数を示している。

##### c) 内部摩擦角 (φ<sub>f</sub>)<sup>2)</sup>

内部摩擦角は (φ<sub>f</sub>) は、式(5)より相対密度を推定し、図-7に示す既往の三軸試験結果を参照して、設定した。

$$Dr = 21\{N/(\sigma v' + 0.7)\}^{0.5} \quad (5)$$

ここに、Drは相対密度を、 $\sigma v'$ は有効上載圧力を示す。

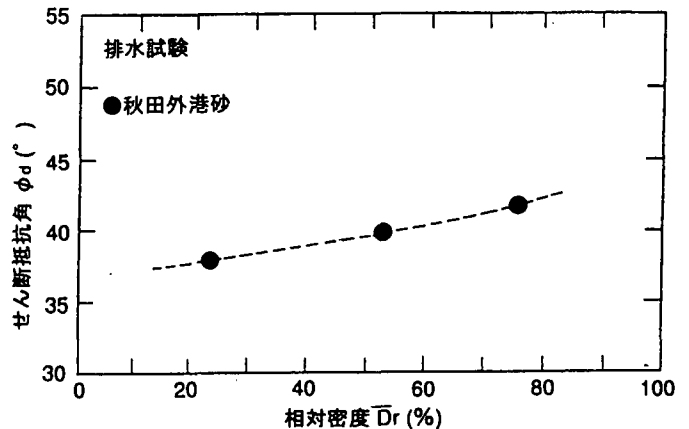


図-7 砂の内部摩擦角の試験結果の例<sup>2)</sup>

##### d) 履歴減衰の上限値 (hmax)<sup>2)</sup>

既往の動的変形特性試験結果を参照した値を用いることとし、hmax=0.24とした。

##### e) 変相角 (φ<sub>p</sub>)<sup>2)</sup>

一般に土の密度に関わらず概ね一定値をとるとされていることから、既往の試験データを参考とした

値を用いることとし、 $\phi_p=28$ 度とした。

f) その他の液化化パラメータ ( $w_l, p_1, p_2, c_1, s_1$ )<sup>2)</sup>

その他の液化化パラメータについては、FLIPを用いた繰返し三軸試験シミュレーション結果が、等価N値より簡易的に求めた液化化抵抗曲線に合うように求めた結果が示されている<sup>2)</sup>ため、これらの値を適用した。

#### 4. 入力断面のモデル化および入力地震動

##### (1) 入力断面のモデル化

被災を受けた-4.0m岸壁において、前面矢板の最大水平変位箇所は、SP130付近である。検討に用いる土質データは、SP130に最も近い地点のボーリングデータを用いることとした。ボーリング調査位置を図-8に示す。ボーリングデータについては、被災後に震度10mまで行われた調査結果と、さらに新規の耐震岸壁を設計するために基盤まで行われた平成9年度No. 8号孔およびNo. 10号孔の調査結果があり、本検討では、両方のデータを合成し検討を行なうこととした。ここで実際に使用したデータは、平成7年のNo. 3号孔と平成9年のNo. 8号孔である。両方のデータを合成した土質柱状図を図-9に示す。なお、図-8に示されている平成9年度のNo. 9号孔については、基盤までの深度のデータが得られていないため、検討対象から除外した。

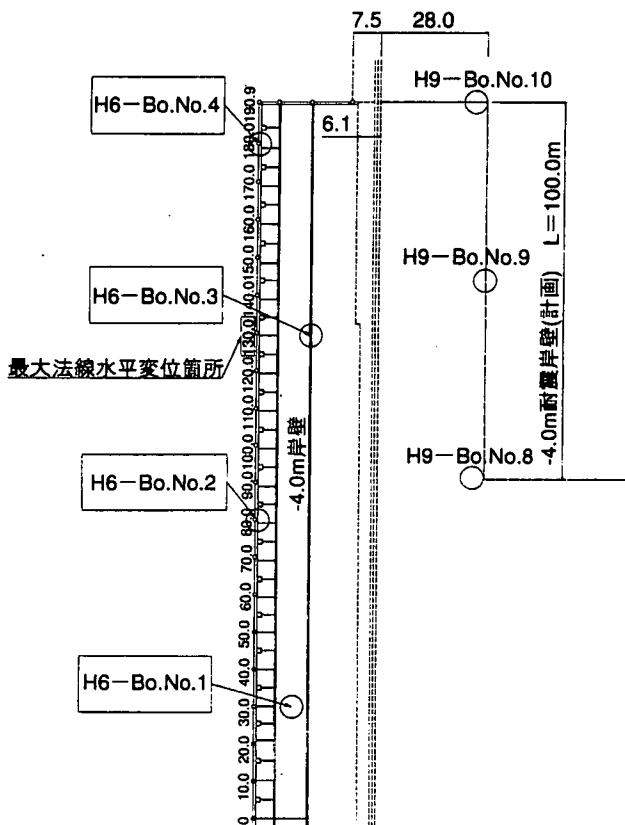


図-8 ボーリング調査位置図

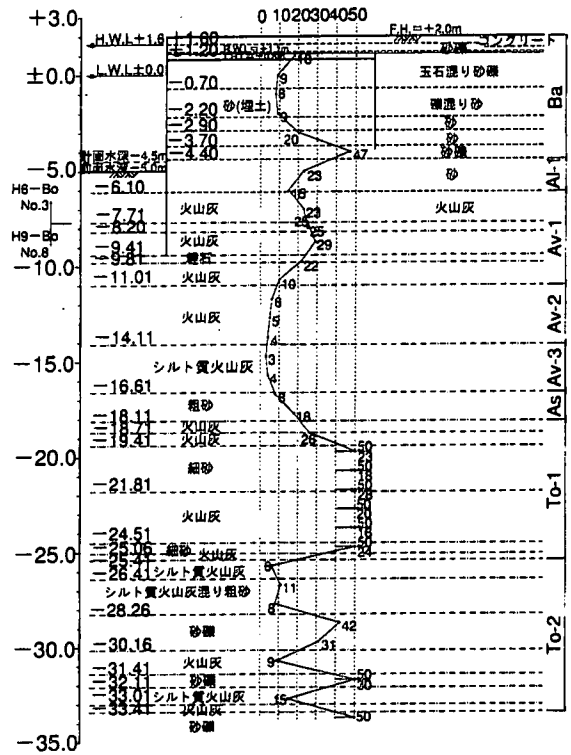


図-9 -4.0m岸壁の土質柱状図

##### (2) 入力地震動

###### a) 入力基盤最大加速度

入力基盤最大加速度は、文献<sup>5)</sup>より基盤の最大加速度とマグニチュード・断層面距離の関係を表わした次式により算定した。

$$\text{Log}_{10} \text{Acor} = 0.55M - \log_{10}(X + 0.005 \cdot 10^{0.55M}) - 0.00122X + 0.502 \quad (6)$$

ここで、Acorは基盤の最大加速度(Gal)を、Mは地震のマグニチュードを、Xは断層面距離(km)をそれぞれ示している。また、断層面距離については、高橋・首藤・越村により提案されたDCRC-3c<sup>6)</sup>がFLIPを用いた予備計算の結果、最も整合性が良好であったため適用した。

以上から、地震のマグニチュード8.1、断層面距離88kmの基盤最大加速度を求め、結果としてAcor = 307(Gal)を入力データとした。

###### a) 入力地震動の加速度波形

入力地震動の加速度波形は、標津漁港と最も距離が近い位置で強震記録が取得された花咲港における強震記録F-681 (N20E成分)の主震動部20秒間(30sec~50sec)を用いた。

#### 5. 被災岸壁の変形解析

ここでは、3.で述べたパラメータ及び4.で述べた入力断面および入力地震動をもとに被災岸壁の変形解析を行なった。変形解析は、被災を受けた-4.0m岸壁の前面矢板の頭部水平変形量とエプロン背後の沈下量の残留値を指標値として評価を行なうこととした。この理由については、現在、港湾および漁港における設計に用いられる動的変形照査の評価が、

主として地震後の残留変形量の許容値を目安として行われているためである。

(1) 解析ケース

解析ケースは、液状化を対象とする地層をどの地層まで考慮すべきかという点と、3. で述べたせん断弾性係数 (Gma) の本漁港における適性値を示す回帰式を求めるといふ点の2点について種々のケースを設定し、検討を行なった。

ここでは、最終的な結果を表現するために、解析を行なった6つのケースを表-2に示した。

表-2 解析ケース一覧表

ケース	せん断弾性係数 (Gma) の算定式	液状化の範囲
1	$1440N^{0.68}$	液状化無
2	$1440N^{0.68}$	Ba
3	$1440N^{0.68}$	BaおよびA1-1
4	$643N^{0.68}$	液状化無
5	$643N^{0.68}$	Ba
6	$643N^{0.68}$	BaおよびA1-1

(2) 解析結果

解析結果の一覧表を表-3に示す。

表-3 解析結果一覧表

ケース	前面矢板の頭部水平変形量 (cm)	エプロン背後の沈下量 (cm)
1	4	5
2	10	6
3	17	7
4	11	9
5	17	7
6	31	14

まず、平均的な方法でせん断弾性係数 (Gma) を求め解析を行なった結果について述べる。地盤の液状化を考慮しないケース1については、前面矢板の頭部水平変形量が4cm、エプロン背後の沈下量についても5cmと小さな値を示している。一方、盛土 (Ba) および盛土 (Ba) と上層の砂層 (A1-1) を液状化層と見なしたケース2、ケース3について見ると、ケース1よりは液状化の影響により前面矢板の頭部水平変形量が大きく現れるが、実際の被災岸壁の最大変形量35cmと比較し、解析値が小さく、実際の被災状況を再現するに至っていないことが判断された。

次に、ケース4から6の解析結果について述べる。これらの解析ケースの特徴は、今井らの研究<sup>1)</sup>をもとに示されたせん断弾性係数とN値との関係式において、式中の係数を現地の被災状況を再現できるように試算した結果から求めたものである。この補正を行なった式は、図-10に示すとおり、今井らの研究<sup>1)</sup>で示されたせん断波速度 (Vs) とN値の関係を表わすデーターのほぼ下限値を示す以下の回帰式として

示すことができる。

$$Vs = 60N^{0.341} \quad (7)$$

$$Gma = 643N^{0.68} \quad (tf/m^2) \quad (8)$$

$$= 6301N^{0.68} \quad (kN/m^2)$$

ここで、Vsは弾性波速度、NはN値、Gmaはせん断弾性係数を示している。また、式(8)は式(7)と前述の式(3)の関係より導いたものである。また、液状化の範囲については、盛土 (Ba) および上層の砂層 (A1-1) を液状化層と見なすことで、図-11に示すとおり、実際の被災状況をほぼ再現することができた。

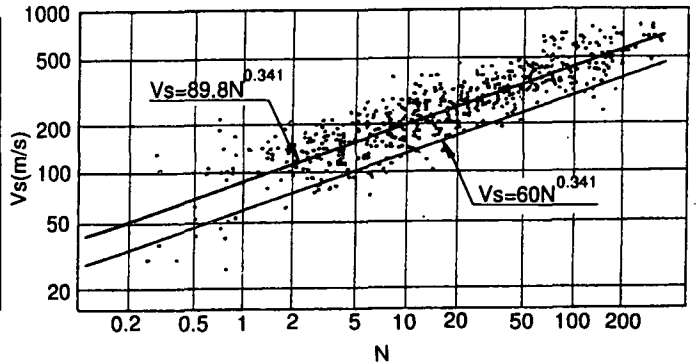


図-10 解析より得られたせん断波速度とN値の回帰式のプロット

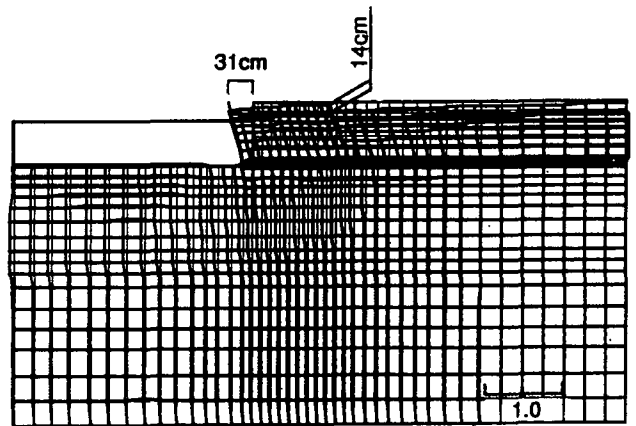


図-11 ケース6の残留変形図

5. 結論

本検討においては、実際の地震動により被害を受けた鋼矢板岸壁の変形解析を、有効応力解析によるFEMプログラム「FLIP」を用い、さらに、解析パラメータの設定を簡易設定法<sup>2)</sup>を基本として検討を行なった。その結果、以下の結論を得た。

- ① 耐震岸壁の動的変形照査を実施する際、実際の

地震による被害から計画地点の土質定数を設定することが重要と考え、変形解析を実施した。

- ② 変形解析の評価を被災後にデータが得られている-4.0m岸壁の前面矢板の頭部水平変形量とエプロン背後の沈下量の残留値を指標として行なった。
- ③ 地質調査により得られている既知データはN値がであるため、解析パラメータの設定は、簡易設定法を基本とした。解析結果として、液状化の対象範囲を盛土(Ba)と上層の砂層(A1-1)とし、また、せん断弾性係数を設定するための経験式の係数を補正し $G_{ma}=643N^{0.68}$ とすることにより被災状況と整合性の取れた解析結果が得られた。
- ④ 動的変形照査を行なう時に、対象施設周辺に過去の被災履歴がある場合、地質調査からの情報がN値程度であったとしても、変形解析を行ない種々の条件を補正することにより、解析条件の検証を行なうことが有効である。

謝辞：本検討を行なうにあたり、北海道東方沖地震における花咲港で観測された地震動の補正加速度記録を提供していただきました、運輸省港湾技術研究所構造部地盤震動研究室の皆様に対し、深く謝意を表します。

#### 参考文献

- 1)井合 進, 松永康男, 亀岡都知弘:ひずみ空間における塑性論に基づくサイクリックモビリティの地震による被害から計画地点の土質条件を設定モデル, 港湾技術研究所報告, 第29巻 第4号, pp. 27-56, 1990. 12.
- 2)森田年一, 井合 進, Hanlong Liu, 一井康二, 佐藤幸博:液状化による構造物被害予測プログラムFLIPにおいて必要な各種パラメータの簡易設定法, 港湾技研資料, No. 869, 1997.
- 3)稲富隆昌, 上部達生, 井合 進, 田中祐人, 山崎浩之, 宮井真一郎, 野津 厚, 宮田正史, 藤本義則:1994年北海道東方沖地震による港湾施設被害報告, 港湾技研資料, No. 856, 1997.
- 4)井合 進, 土田 肇:建設技術者のための耐震工学, 山海堂, 1991.
- 5)野津 厚, 上部達生, 佐藤幸博:工学的基盤における最大加速度の断層面からの距離減衰の検討, 第二回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp27-34, 1997.
- 6)高橋智幸, 首藤伸夫, 越村俊一:北海道東方沖で発生する地震津波の災害アセスメント, 海岸工学論文集, 第42巻(1), pp. 356-360, 1995.

(1999. 4. 19. 受付)