

シールド掘削にともなう沈下解析

半谷 哲夫*・中井 善人*
山口 良雄**・福地 善明***

1. はじめに

最近市街地におけるトンネル工事に、シールド工法が盛んに採用されるようになったが、シールドセグメントにかかる土圧の理論的ないしは実験的研究はかなり行なわれているにもかかわらず、シールド掘削にともなう地盤沈下に関する問題は、シールド工事現場における沈下の実測以下に検討されていない。

国鉄で施工中の東海道線増工工事のうち、東京～品川間約7 km は大部分シールド工事であり、ビルディング・鉄道、橋梁など重要構造物の下を通るため、シールド掘削による沈下量が重要な問題となる。

このため東京および大阪における沈下実測例および光弾性実験による検討より、応力解放による弾性沈下の値が実測地と比較的によく一致することから、有限要素法(F.E.M.)による弾性沈下解析により、シールド掘削にともなう沈下量を求めた。

2. 概要

シールド掘削にともなうシールド周辺の応力や変形の状態、地盤沈下の解析には、その地盤材料の力学的特性が大きく影響することは明らかなので、この種の解析を行なうにあたっては、土の力学的特性(変形挙動や強度等)を詳細に把握する必要がある。

地盤材料の力学的特性は一般に非線形的であり、また時間的依存性があるため、シールドトンネルの掘削にともなう、掘削と同時に生ずる沈下のほかに、粘弾性的な沈下、逐次的に増大する圧密沈下、施工時に地山をゆるめることなどによる塑性的な沈下など、種々の要因による沈下が複雑に関係して発生する。

しかし、今回は弾性ならびに弾塑性沈下を主として取り上げ、これを有限要素法によって、解析することとした。

本解析にさきだち、解析法の妥当性を確かめ、導入すべき土質の力学的特性を検討するため、土質試験を行なうとともに、いくつかのモデル地盤に対する弾性および弾塑性沈下を計算し、また東京および大阪におけるシールド工事で観測された実測値と対比した。

なお、本解析にあたっては土質条件をかなり抽象化して取り扱った。

3. 沈下解析の方法

(1) 概要

シールド工法により地盤内にトンネルを掘削したとき起こる沈下の原因と考えられるものには、

- ① 応力解放による弾性沈下
- ② 応力解放による弾塑性沈下
- ③ 応力変化による圧密沈下
- ④ 地下水の変動による圧密沈下
- ⑤ 切羽前面の呼びみによる沈下
- ⑥ 裏込め注入の不完全施工による沈下
- ⑦ シールドの蛇行による沈下

などであるが、この論文では①、②についての解析を述べる。

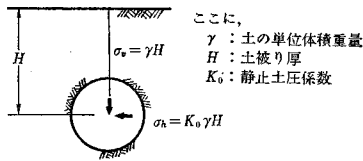
(2) 応力解放による弾性沈下

半無限の弾性体と仮定する地盤内にトンネルを掘削する場合、掘削前には深さ H の地中に垂直応力 $\sigma_v = \gamma H$ 、水平応力 $\sigma_h = K_0 \gamma H$ なる初期応力が作用していると考えられるが、掘削によりこれらの初期応力は掘削面にそって解放され、トンネル周辺での半径方向の応力は0となる(図-1参照)。

トンネル掘削による地盤内の経時的な変形の機構を粘

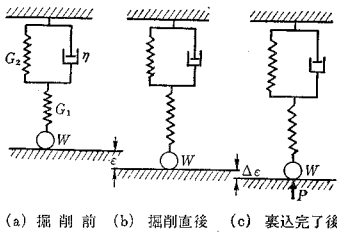
* 正会員 国鉄東京第一工務局次長
** 正会員 国鉄東京第一工務局線増第一課長
*** 国鉄東京第一工務局東京工務区助役

図-1 トンネル掘削断面周辺の応力



土の力学的モデルを用いて図示すると図-2となる。図中 W はこのモデルが負担すべき地山の重量、 P はセグメントにかかる土圧、 G_1, G_2 はばね強さ、 η は粘性抵抗である。図-2 (a) はトンネル掘削前の状態で、力学モデルは、地山の自重によって圧縮されている。図-2

図-2 地盤内の変形の経時的変化



(a) 掘削前 (b) 掘削直後 (c) 裏込注入完了後

し、そのため地盤内にひずみが起こる。図-2 (c) は裏込注入完了後の状態で掘削直後からこの時点までに、地盤材料の粘弾性的な性質によってさらにひずみ δ_s が起こる。その後 W はセグメントで止められ、セグメントに反力 P が生じる。本解析で求める弾性沈下量とは図-2 (b) の段階における変形量である。

トンネル掘削による弾性沈下量を求める方法として

- ① 山口の解
- ② Mindlin の解
- ③ Finite Element Method

等が考えられる。ただし、①、② はトンネル掘削後の地盤内応力を求める解で、直接沈下量を求められない。

実際の地盤は複雑な成層であるが、各層ごとの解析を電子計算機を用いることによって比較的容易に精度よく求められる。有限要素法 (F.E.M.) を採用し電子計算機プログラムの開発を行なった。

a) F.E.M. による解析法

F.E.M. の基本的な考え方は、対称とする地盤断面を有限個の小さな要素 (三角形要素) に分割して、それらの要素がそれぞれつり合い方程式と変位の適合条件を満たし、結合してできた集合体であると近似的に見なすことから成り立っている。なお、F.E.M. の計算では、トンネル方向には同じ形状と近似的に見なせる断面が無限に続くものと仮定し、トンネルの直角方向にひずみが起こり、トンネル方向は応力のみが起こり、ひずみは起こらないとする、いわゆる平面ひずみ状態を考えている。

次にトンネル掘削現象を F.E.M. に表現する方法として、次のように考えた。

トンネル掘削後の断面に対して、重力の作用を考えた

場合の各位置の変形量と、トンネル掘削前のその位置での初期変位の差から、トンネル掘削による変形が求められる (図-3 参照)。またトンネル掘削後の地盤内応力は、重力場におけるトンネル掘削断面から、求められる (図-4 参照)。

図-3 トンネル掘削による変位の求め方

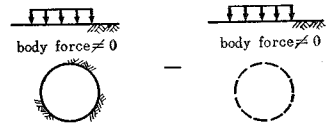


図-4 重力場におけるトンネル掘削後の断面

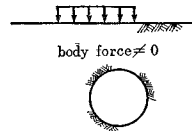
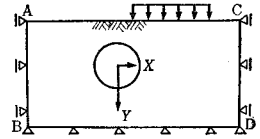


図-5 側面境界を拘束する場合



b) 境界条件

F.E.M. では半無限弾性体を近似的に、有限な境界をもって弾性体として取り扱う必要がある。本解析の境界条件としては、図-5 のように考えた。

この場合、静止土圧係数は式 (1) で与えられる。

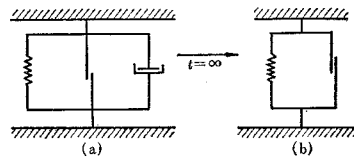
$$K_0 = \frac{\nu}{1-\nu} \quad \text{ただし、}\nu\text{: ポアソン比}$$

(3) 応力解放による弾塑性沈下

(2) の弾性沈下解析では、地盤材料の応力とひずみの関係が線形、すなわち土の変形係数 $E_s = \text{一定}$ としての条件で求めた沈下量であるが、実際の地盤内では必ずしも $E_s = \text{一定}$ ではなく、各位置における応力状態によって E_s の値も違うはずである。

従って、ここでは土の応力とひずみの関係を非線形として沈下解析を行なう。トンネル掘削による地盤内の挙動をより正確に解析するためには、土を粘弾塑性体 (図-6 (a)) として取り扱うべきであるが、本解析では便宜上土を弾塑性体 (図-6 (b)) として取り扱う。

図-6 力学的モデル

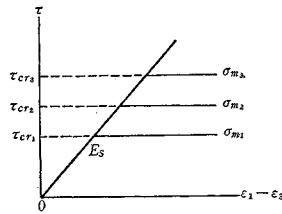


本解析も 2. (2) 同様 F.E.M. を用いて行なうが、非線形性の要素を取り入れ、次に述べる漸増法による解析を取り入れた。

すなわち、主応力の大きさに応じて土の変形係数 E_s を変化させる方法で、地盤材料の応力とひずみの関係は図-7 に示すごとく、降伏するまでは線形に変化し、降伏後は完全塑性に近い状態になると考える。

最初のおおのの三角形要素に対しある初期の変形係数 E_{SO} の値を与えて弾性計算を行ない、各三角形要素の主応力を求め、せん断力 τ が Mohr-Coulumb の破壊包絡線を越えていないかどうかを判定する。

図-7 漸増法による非線形解析の場合の応力-ひずみ関係



Mohr-Coulumb の理論により土の破壊規準は次式で示される。

$$\tau_{cr} = C \cos \phi + \sigma_m \sin \phi \dots \dots \dots (1)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$$

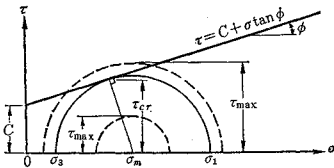
ここに、 σ_1, σ_3 : 主応力

τ_{cr} : 限界せん断応力

C : 土の粘着力

ϕ : 土の内部摩擦角

図-8 Mohr-Coulumb の破壊包絡線



弾性理論より、せん断弾性率 G は、次式で与えられる。

$$G = \frac{\tau_{max}}{\psi} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)/2}{\epsilon_1 - \epsilon_2} = \frac{E_{SO}}{2(1+\nu)} \dots \dots \dots (2)$$

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

ある三角形要素のせん断応力 τ が $\tau \leq \tau_{cr}$ ならば、その三角形要素に対しては、当初の E_{SO} を用いる $\tau > \tau_{cr}$ ならば、図-7 より

$$G' = \frac{E_{SO} \cdot \tau_{cr}}{(1+\nu)(\sigma_1 - \sigma_3)} \dots \dots \dots (3)$$

$$E_S' = \frac{2 E_{SO} \cdot \tau_{cr}}{\sigma_1 - \sigma_3} \dots \dots \dots (4)$$

$\tau > \tau_{cr}$ となる三角形要素については、式 (4) で求まる修正弾性係数 E_S' ($E_S' < E_{SO}$) を用いて再び全断面に対して弾性計算を行なう。この手順ですべての三角形要素において $\tau \leq \tau_{cr}$ が成り立つまで繰り返す。

4. 解析

(1) 地質

本トンネル計画路線の地質縦断面図によれば、

東京駅から新橋に至る区間と品川駅構内周辺は、ほぼ平坦な地を構成しているが、浜松町駅と田町駅付近では埋没谷を形成し、軟弱なる沖積世の粘性土層が厚く堆積している。いま、この区間の地質を大別し、その特性を考えてみると次のように分類される。

- ① 上部に粘土層があって、粘土層により上部の地下水がさえぎられ、粘土層の下は洪積世の砂礫、または砂利であるが地下水は少ない場合：この解析方法は、弾性沈下による。
- ② 粘土層が薄く、大部分が砂、砂礫の互層からなる地盤で地下水がほとんどない場合：解析方法は、弾性沈下による。
- ③ 地下水が地表面近くからシールド掘削深さまでである場合：解析方法は弾性沈下、または弾塑性沈下による。

図-9 STA~2 km 付近代表断面

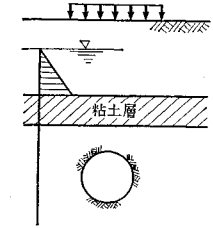
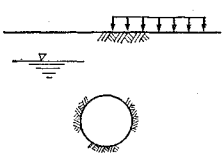


図-10

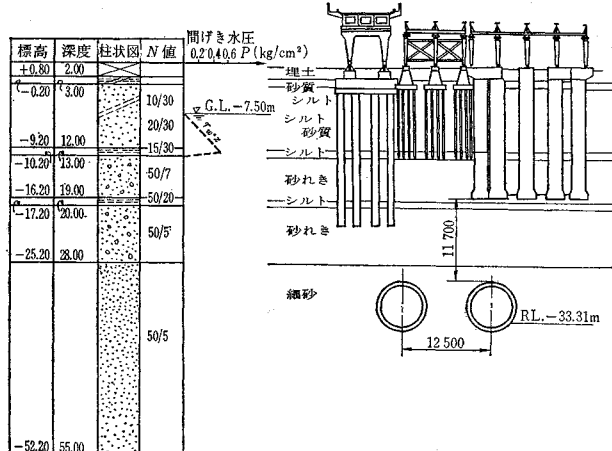


なお、解析方法に必要な土質条件は次の通りである。

- ① 弾性沈下
 - γ_t : 土の単位体積重量
 - E_S : 土の変形係数 (弾性係数)
 - ν : 土のポアソン比
- ② 上記 γ_t, E_S, ν のほかに
 - C : 土の粘着力
 - ϕ : 土の内部摩擦角

地盤材料の変形係数 E_S の値が、F.E.M. による弾性沈下ならびに弾塑性沈下の計算結果におよぼす影響はきわめて大きい。従って、解析に導入すべき地盤材料の E_S は、種々の土質試験結果から、総合判断して定める

図-11 沈下解析断面



必要がある。

トンネル掘削による地盤内の応力の変化や変形を算定する場合には、短期載荷重に対する変形特性を考えればよい。しかし、厳密にはトンネル掘削後の応力が掘削前の初期応力より小さくなる場合には、除荷時の変形特性（リバウンド時の変形係数）を考えるべきである。

本解析では、リバウンド時も近似的に、載荷時と同じ変形係数をとるものと仮定する。

ポアソン比はいくつかの提案値から判断して定めた。

① K. Terzaghi の提案

砂 : $\nu=0.3$

粘土 : $\nu=0.41\sim0.43$

② G.I. Pokrovsky の提案

乱された粘土 : $\nu=0.38\sim0.40$

③ Barkan の提案

砂 : $\nu=0.30\sim0.35$

粘土 : $\nu=0.50$ に近い

(2) 解析結果

以上述べてきた解析方法により、東京～品川間にみられる地質の特性を現わすものとして、

① Model-I : 粘土層上部に地下水があり、粘土層の下は洪積の砂礫、または砂利層の場合；(上部に荷重がある場合)

図-12 変位図

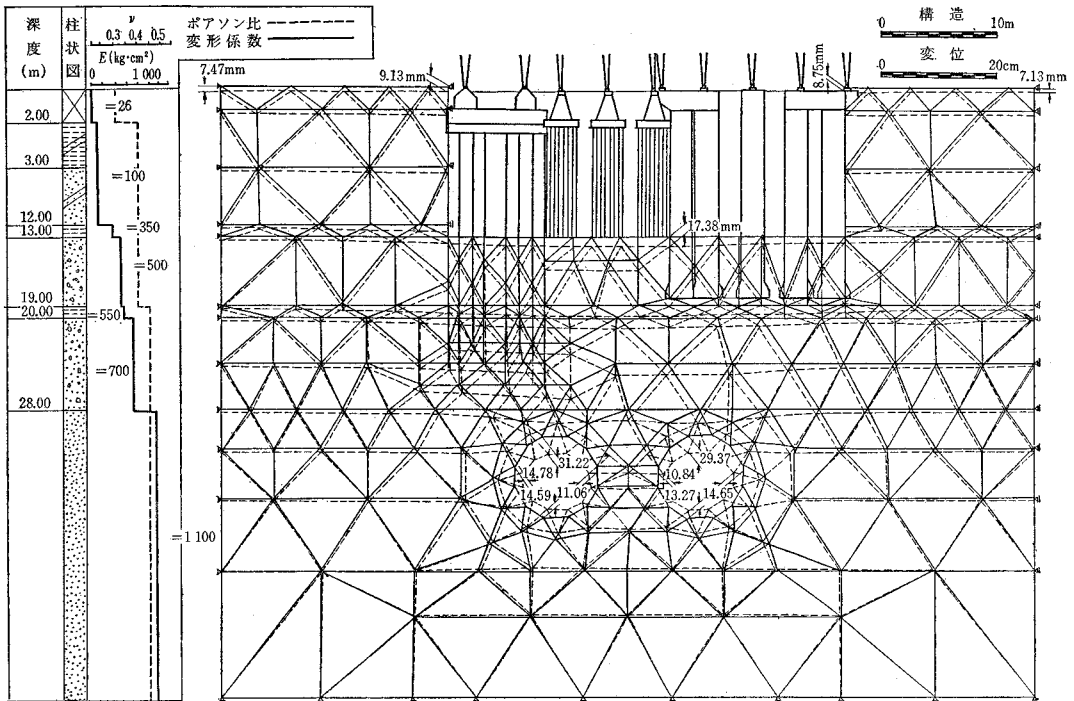
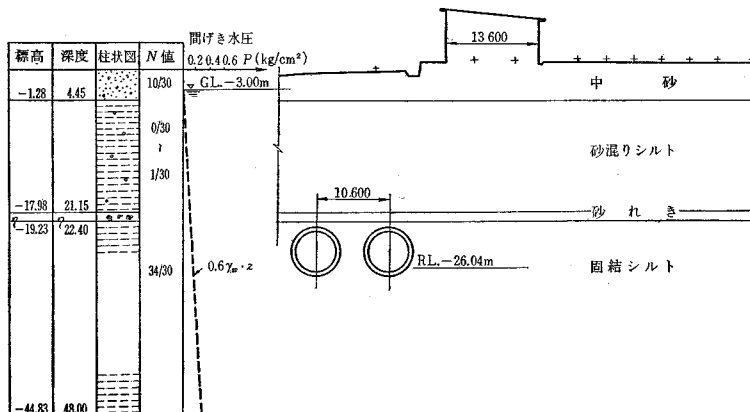


図-13 沈下解析断面 (モデル-II)



② Model-II：沖積のシルト層が厚く地下水がある場合；(土荷重のみ)

の2つの場合を考え、これについて解析した結果を、図-11~15に示す。

多くの施工例にみられるシールドトンネルの掘削に

ともなって起こる地盤沈下は、比較的短期間にその大部分が現われている。

このことは、地盤沈下が、地盤材料の弾性ならびに弾塑性的なせん断変形による傾向が強いと推定される。

また、各解析断面における地盤特性および解析結果か

図-14 変位図 (弾性)

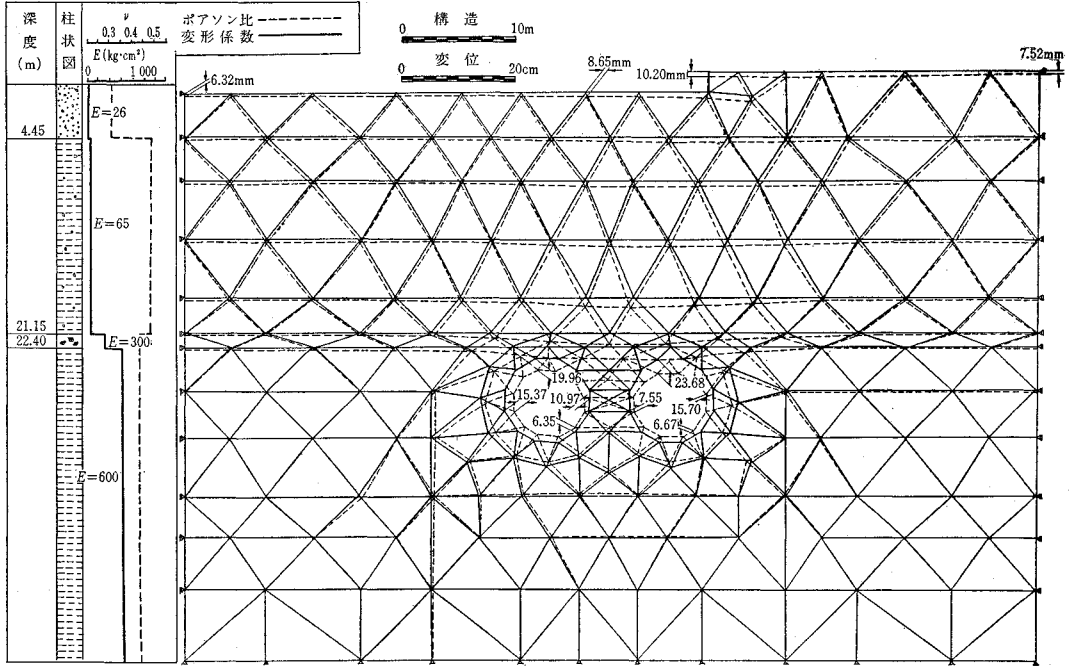
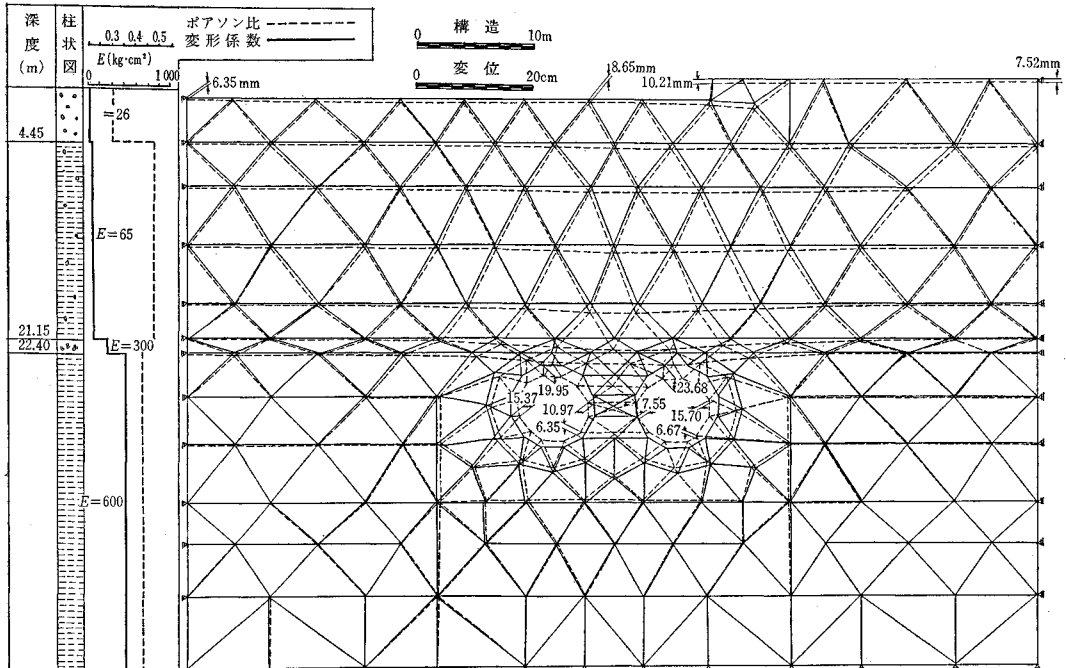


図-15 変位図 (塑性)



らみて、トンネル掘削断面付近の土層はいずれも密に締まっている（ N 値は50以上）ため、その力学的挙動を弾性地盤における挙動として取り扱っても、比較的信頼度は高いものと考えられる。

従って、トンネル周辺の変位をはじめ地表面の沈下量は、応力解法による弾性および弾塑性沈下解析の結果に近いとみなされる。

しかし、トンネル掘削による地盤沈下を弾性変形のみにおさえるためには、施工上において次の条件が満足されなければならない。

- ① 切羽における掘削上の呼びみがないこと。
- ② シールド推進にあたって、切羽の余掘りがないこと。
- ③ シールドの推進がスムーズであること。
- ④ 裏込注入前において、トンネルの掘削断面は、正しい形状を保持し、地盤の肌落ちなど崩壊がないこと。
- ⑤ 裏込注入が完全であること

シールドトンネルの施工にあたり、上述の諸条件が満足されなるときは、トンネル掘削による地盤沈下は、解析結果より大きくなるものと考えられる。

シールド掘削による沈下量を少なくする方法として、

- ① シールドのフードを地山に貫入してから掘削すること。
- ② 切羽をフェースジャッキ等で押えながら、部分的に掘削すること。
- ③ シールド推進と同時に裏込注入を行なうこと。

④ 薬液注入等により、地山の改良を行なうこと。

⑤ 上部の載荷重の分布をはかること。

等が考えられる。実際の施工にあたっては、これらの施工条件を十分考慮することが必要である。

4. むすび

沖積層、洪積層に施工されるシールド工事においては山岳トンネルと異なり地表面の沈下が特に問題となり、事前にある精度をもって沈下量を推定することの必要性が痛感される。

沈下の解析方法の一案として、有限要素法による弾性、弾塑性沈下計算を試みたので、その概要を述べた。

実際のシールド工事における沈下の詳細な測定値は非常に少なく、たまたま東京、大阪の二、三の例についてこの方法による値を比較することができたが、その結果はよく近似していることがわかった。

本解析方法の適用範囲、精度については、なお今後の実施例によって確かめることとしたい。

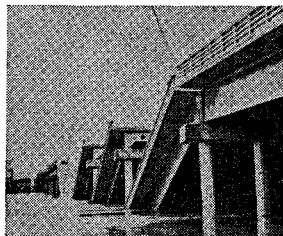
なお、光弾性実験によるチェック、大阪、福島における事例、房総西線新子安（山岳トンネル）の事例、また薬液注入による沈下対策については機会を得て発表したい。

この解析にあたっては、都立大山本 稔教授、名大川本 勝万助教授、東大石原研而助教授、東洋大赤木俊允先生のご指導を得ました。ここに厚くお礼申し上げます。

(1969.7.25・受付)

土木学会新潟震災調査委員会編

昭和39年 新潟地震震害調査報告



- | | | |
|---------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> 第1編 総論 | <input type="checkbox"/> 第2編 地震 | <input type="checkbox"/> 第3編 土質・地質 |
| <input type="checkbox"/> 地盤変動 | <input type="checkbox"/> 第4編 道路 | <input type="checkbox"/> 第5編 鉄道 |
| <input type="checkbox"/> 第6編 河川 | <input type="checkbox"/> 第7編 道路橋 | <input type="checkbox"/> 第8編 鉄道橋 |
| <input type="checkbox"/> 第9編 港湾・漁港・空港 | <input type="checkbox"/> 第10編 電力施設 | <input type="checkbox"/> 第11編 衛生施設 |
| <input type="checkbox"/> 第12編 農林土木 | <input type="checkbox"/> 第13編 建築 | <input type="checkbox"/> 第14編 通信施設 |
| <input type="checkbox"/> 第15編 工場災害 | | |

B5判・904ページ 上製箱入

頒価 10000円 会員特価 9000円
送料 200円

お申込みは土木学会または書店へ……書店経由の場合は会員であっても会員特価の取扱いはありません。