

地中埋設管の群効果に関する実験的研究

(Experimental Study on the Group Effect of Underground Conduits)

富永晃司* (Koji TOMINAGA)

山本春行** (Haruyuki YAMAMOTO)

キーワード：砂質土／地下構造物／土圧／すべり面／模型実験 (IGC : H - 8)

§ 1. 序

水やガス等の輸送管は、一般に道路やその他の地下に埋設される。これらの地中埋設管は、交通荷重や地震による振動の他に、地盤で拘束されているため、地盤沈下や管路に沿った近接地での工事による局所的な地盤の変状に影響され易い。すなわち、周辺地盤の沈下や変形の程度によっては、埋設管は管軸方向にも、あるいは管軸と直角方向の断面内においてもかなりきびしい状態になっていることが考えられる。

このような状況に対して、特に本論文で対象としたような断面内の問題としては、周辺地盤の沈下によって地中埋設管に作用する土圧に関して、Spangler¹⁾の研究が発表されて以来、数多くの理論的ならびに実験的研究が行われてきた。理論的なものとしては、地中埋設管に作用する土圧の問題に有限要素解析法を適用してその性状を調べた成田²⁾の研究や、管-地盤系の相互作用を考慮して平面弾性解析を行った浅井³⁾や大川⁴⁾などの研究が見られる。一方、実験的なものとしては、埋設管周辺地盤の変形状態を調べるために模型土槽を用いた松尾⁵⁾や西尾^{6), 7)}による模型実験、また遠心力装置を用い矢板引抜き時の埋設管の挙動性状を調べた高田^{8), 9)}の研究などがある。さらに、実大の埋設管を用いてその挙動性状を検討した市原¹⁰⁾、矢部¹¹⁾、吉川¹²⁾ならびに東田¹³⁾などの現場実験の報告がある。

これらの研究の流れの中で、埋設管に関する現在の設計の骨格となっているSpanglerの土圧算定式について、幾つかの問題点が指摘されている。特に、この算定式を導くための基本的仮定において、土中に生じるせん断面を鉛直の二平面で近似したことゝの妥当性や、またせん断面が地表面にまで到達しない場合の等沈下面についての指摘が多い¹⁴⁾。この点について、筆者らも単一の地中埋設管を用いて平面ひずみ状態で土かぶり厚さを変化させた模型実験を行い、周辺地盤に発生するせん断面の状況について調べた¹⁵⁾。その結果として、埋設管上方のせん断面はSpanglerの仮定したような左右二対の鉛直な平面とはならず、上方に扇状に広がった形状を示すことを明らかとした。

以上、既往の研究について概説したが、これらのほとんどは単一の埋設管を対象にしたものである。しかし、現実には複数の管が並列に近接して配置される状況もあることが考えられる。この場合には、それぞれの埋設管に働く土圧は地盤内応力として地盤内を三次元的に伝播してゆき、他の埋設管の挙動に影響を及ぼすいわゆる群効果(相互作用)が問題となる。このような複数の埋設管の挙動性状を扱った実験的あるいは理論的な研究は、ほとんど報告されていないのが現状である。したがって筆者らは、複数の埋設管の周辺地盤に変形(沈下)が生じる場合の埋設管の挙動性状を明らかにすることを目的とした実験的研究を行ってきた。本論文では、これらの研究成果として、特に埋設管の設置間隔が、比較的浅い位置に設置された埋設管の挙動性状に与える影響について、土槽による模型実験の結果に考察を加えた内容を報告する。

§ 2. 実験概要

本実験の概要、あるいは試験の方法などは、文献¹⁵⁾で記載した内容とはほぼ同じであるので、以下ではその概

* 広島大学工学部第四類 助教授 ** 同 助手

略を紹介するに留めた。したがって、これらの詳細については同論文を参照されたい。

実験は、Fig. 1 に正面図を、そしてFig. 2 に側面図を示す装置を用い、実験地盤中に設置した 2 本の埋設管（鋼製の円管、直径30mm、長さ200mm）を押し上げて周辺地盤との間に相対変位を与える方式で実施した。本実験土槽（内法寸法：高さ=600mm、長さ=830mm、奥行=200mm）は前面に強化ガラス、側面および背面には鋼板を配している。またFig. 3 の断面図に示すように、土槽の両端は半円形の断面となっている。これは、埋設管の押し上げに伴って変位する地盤と土槽の内壁面との摩擦による二次的な応力（地盤内に発生する土槽内壁面を支点としたアーチ作用）をできる限り小さくし、隅角部における応力の乱れを極力おさえようと意図したものである。さらに土槽内壁面と地盤間との摩擦力を低減させるため、文献^{16)・17)}などで用いられているシリコングリスとテフロンシート（厚さ0.05mm）の互層膜を内壁面に配した。

実験地盤は、模型埋設管を所定の位置で前面のガラス面と直角になるように配した後、砂を上方から多重の金網を通して落下させるサンド・レイナー法¹⁸⁾を用いて作製した。実験に使用した砂は、豊浦標準砂である。なお、実験の繰返しにおいて、毎回作製される地盤の特性がなるべく一定であり、かつ地盤内でなるべく均一となるようにサンド・レイナーのキャリブレーションを実施し、地盤作製にあたっての基準を設定した¹⁹⁾。ただし、本実験では約90%の相対密度をもつ地盤を対象にした。Table 1 に実験に使用した豊浦標準砂に関する諸元を示しておく。なお同表中の内部摩擦角 ϕ' は、実験地盤と同様の相対密度が得られるように、サンド・レイナー法を用いてモールド内に作製した気乾状態の砂試料について、実施した三軸圧縮試験結果（側圧は0.2～1.0 kgf/cm²）から求めた値である。また、埋設管の周辺地盤の変形状態を観察するために、ガラス面を通して地盤の動きが見えるように、ガラス面の近傍の実験地盤内には水平に20mm間隔で厚さ約1.0mmの着色砂層を設けた（Fig. 1 参照）。

実験地盤中に設置した埋設管は、それぞれ前後 2 本の押し上げ用の鋼棒（直径10mm）と緊結されており、この押し上げ棒は実験地盤と縁切りするために鋼製シリンドー（外径12mm）の中を通し、実験土槽下部にある押し上げ板と接続している。なお、押し上げ棒とシリンドーとの間には、摩擦を低減させるためのストローク・ベアリング（上・下端部に計 2 個）を配し、潤滑剤としてシリコン液を塗布するとともに、シリンドー先端部には砂が入り込み摩擦が生じることを防ぐために、ゴムパッキンを取り付けてグリスを封入した。さらに、埋設管とガラス面との接触部には、スプリングを埋め込んだアクリル製部品を埋設管の先端部に取り付けた。このアクリル製部品は、ガラス面との摩擦力を低減させ、かつ砂が噛み込まないようにするため、1.5mm幅の外周肉厚部分のみでガラス面と接触させるとともに、適度のスプリング反力を与える工夫を施した（Fig. 4 参照）。

実験における埋設管と地盤との相対変位は、変速モーターを動力としたスクリュウ・ジャッキにより、押し上げ板を毎分 1 mm の速度で上昇させて与えた。この埋設管の押し上げに要する力は、スクリュウ・ジャッキの上部に設置したロードセルによって測定し、押し上げ板の上昇変位量はダイヤルゲージ（前後に 2 個設置）により測定した。なお、埋設管に作用している鉛直土圧がそのままロードセルによって計測されるように、押し上げ板などの実験治具の重量が 4 本のワイヤーと接続したカウンター・バランスと釣り合うようにあらかじめ調整を行った（Fig. 1 参照）。また、埋設管の上昇変位 3 mm ごとに、前述した着色砂層の動きを写真撮影し、埋設管周辺地盤の変形状況を記録した。そして地盤表面の隆起量は、地盤表面に等間隔に配した 9 個のアルミニウム片（40×15×3mm）の上昇変位をダイヤルゲージで測定して求めた。

8.3. 実験結果とその考察

本実験は、並列に設置した 2 本の埋設管（以後、複管と称す）について、埋設管上方部の土かぶり厚さを10d（d：模型埋設管の直径30mm）と規定し、設置間隔（埋設管の中心間隔）Rを2d、4d、6d、および8dと変化させる条件で実施した。なお比較のために、以下に示す各図においては、文献¹⁵⁾で報告した 1 本の埋設管（以後、単管と称す）で同じ土かぶり厚さ10d の実験結果を併記しておいた。

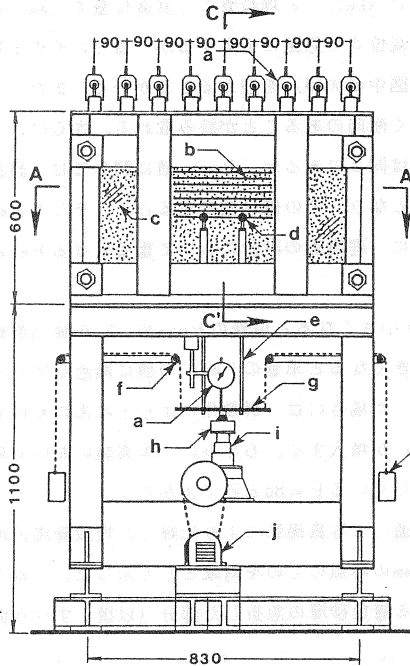


Fig.1 Front view of test apparatus (unit:mm)

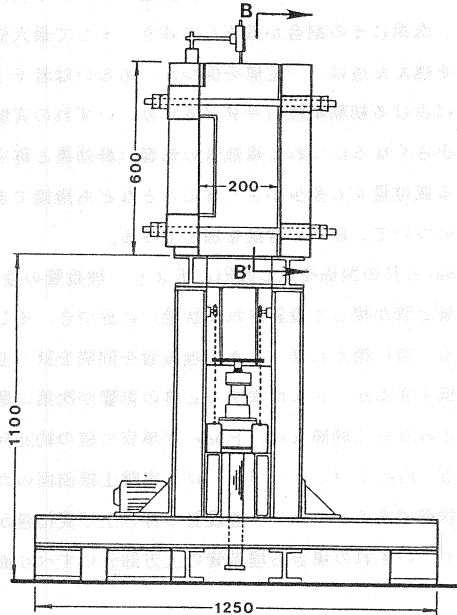
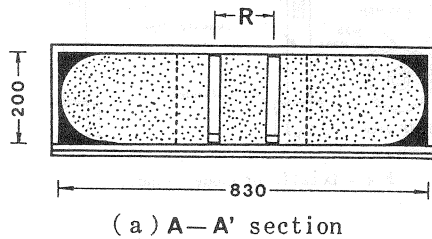
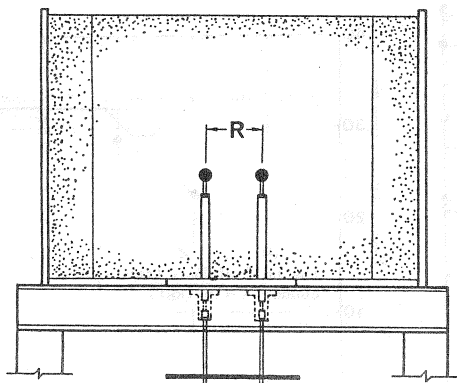


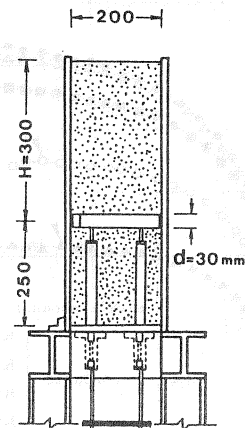
Fig.2 Side view of test apparatus (unit:mm)



(a) A-A' section



(b) B-B' section



(c) C-C' section

Fig.3 Sectional view of model box (unit:mm)

Fig. 5 は、実験より得られた埋設管 1 本あたりの押し上げ力 P (kgf) と埋設管の上昇変位量 δ (mm) の関係を、まとめて示したものである。同図より、 P は初期の小さな変位 δ で急激に上昇するが、直ちにその上昇率が鈍り、次第にその割合が低下してゆき、そして最大値 $P_{\max}$ (図中の矢印) を迎えることが分る。また、 P が $P_{\max}$ を越えた後は、一定値を保つか、あるいは若干下降していく傾向のあることが読み取れる。さらに、 $P \sim \delta$ 関係における初期剛性 ($= P / \delta$) は、いずれの実験結果もほぼ同じであるが、 $P_{\max}$ 値に関しては、設置間隔 R が小さくなるにつれて複数管の影響 (群効果と称す) が顕著となり、その値は減少すること、そして $P_{\max}$ が生じる変位量 δ も多少小さくなることなども指摘できる。ここに、埋設管の設計において重要となる $P_{\max}$ 値の特性について、以下に考察を加えてみる。

$P_{\max}$ と R の関係を示した Fig. 6 より、埋設管の設置間隔 R が小さくなると単管の $P_{\max}$ の $1/2$ の値 (原理的には、管と管が接して設置された状態) に近づき、そして R が大きくなると単管の $P_{\max}$ の値に漸近していくことが分る。言い換えれば、2 本の埋設管を間隔を狭く並列に設置した場合には、群効果により 1 本あたりの $P_{\max}$ 値は低下するが、 R が増加すると群の影響が次第に薄れ、 $P_{\max}$ が増大する。ちなみに、本実験において単管と同等とみなせる間隔 R は、 $P_{\max}$ が単管の値の約 95% 以上を示している $R \geq 8d$ とみてよからう。

一方、Fig. 7 (a) ~ (j) は、実験土槽前面のガラス面を通して写真撮影により記録した埋設管周辺地盤の変形状態である。ただし、埋設管の押し上げ変位量が 15mm と 30mm の時点のものを対象として示した。これらの図において、いずれの場合も埋設管の上方部分にすべり面と思われる着色砂層の急折した部分 (以後、すべり面と記

Table 1 Physical properties of sand

Uniformity coefficient	$U_c = D_{60}/D_{10} = 1.56$
Specific gravity	$G_s = 2.63$
Maximum density	$\rho_{\max} = 1.641 \text{ (g/cm}^3\text{)}$
Minimum density	$\rho_{\min} = 1.341 \text{ (g/cm}^3\text{)}$
Relative density	$D_r = 90\%$
Internal friction angle	$\phi^* = 43^\circ$

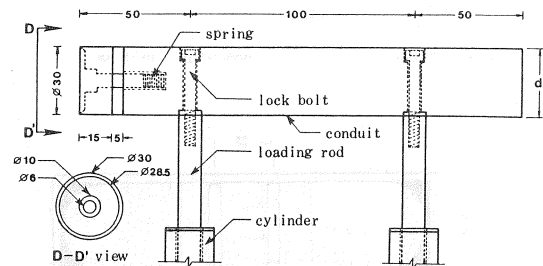


Fig. 4 Details of model conduit (unit:mm)

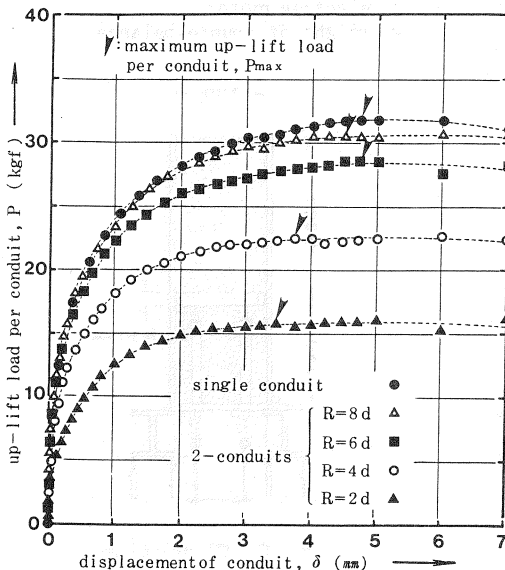
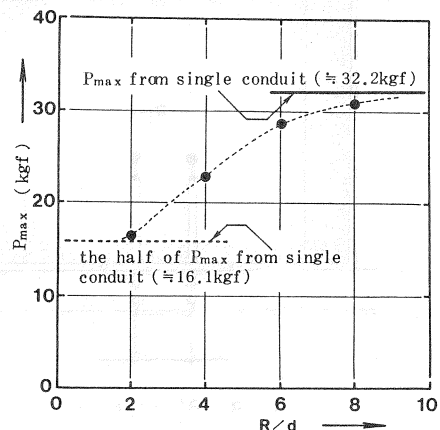

 Fig. 5 Effect of conduit spacing R on $P - \delta$ relation


Fig. 6 Relationship between maximum up-lift load per conduit and spacing of conduits

す)が見られる。またこのすべり面は、埋設管の上昇に伴って埋設管の近傍に生じたものが次第に上方へと進行してゆき、その形状は文献¹⁵⁾で報告した単管の場合 (Fig. 7 (a), (b) 参照) と同様に、上方に扇状に広がった形となっている。なお複管においては、単管では見られない現象として、それぞれの埋設管から内側に発生しているすべり面が交叉する変形状が観察される。すなわち、このことよりお互いの埋設管を支点としたアーチ作用が、地盤中に生じているものと推察される。またこの交叉する位置は、設置間隔 R が增大するに伴って上方へと移行する傾向のあること、さらに設置間隔の狭い $R=2d$ では、上記の埋設管の内側のすべり面はほとんど現れなく、内側の砂が埋設管と一体となって変位することなどが明らかとなった。

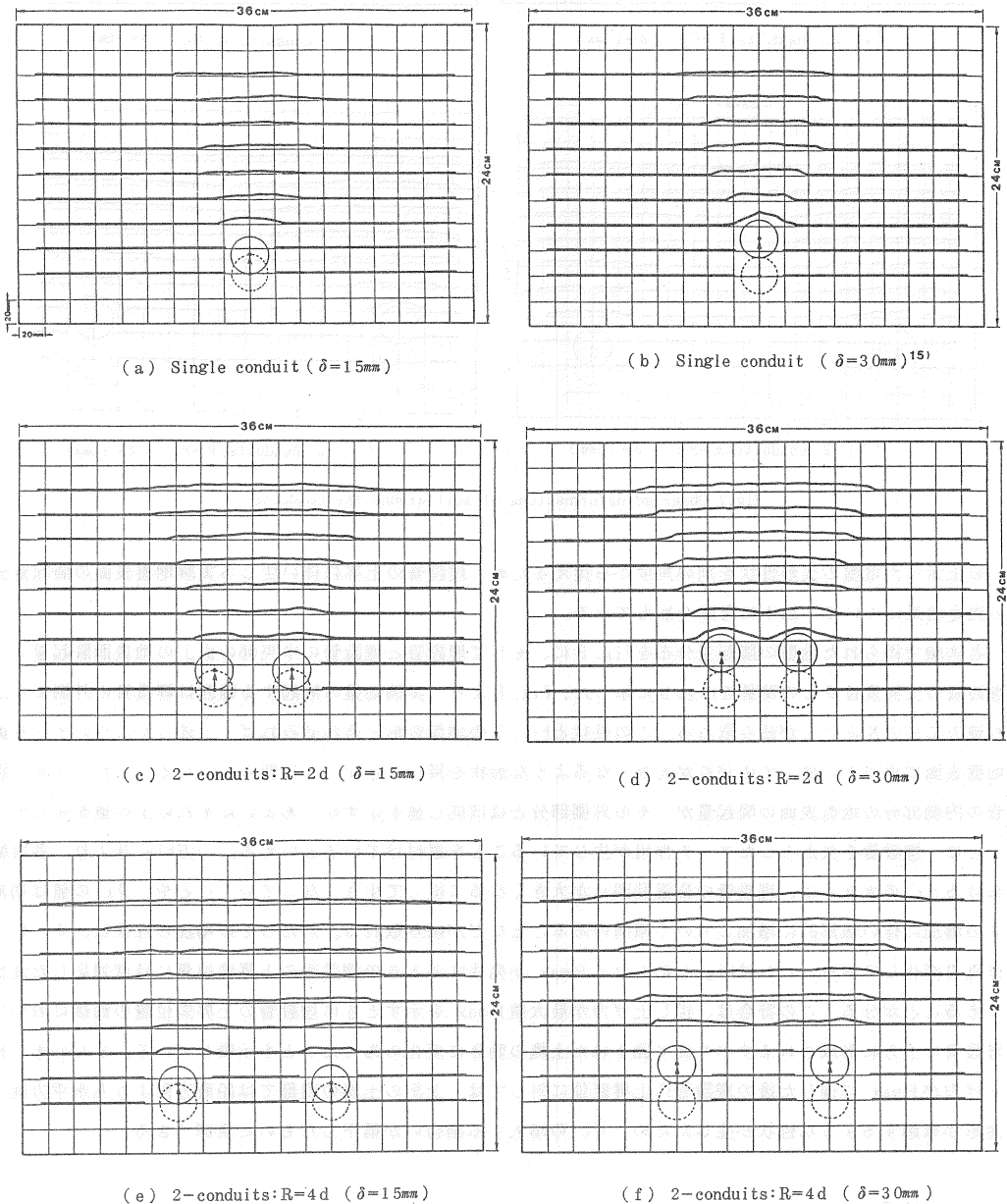


Fig.7 Observed deformations of soil around the conduits

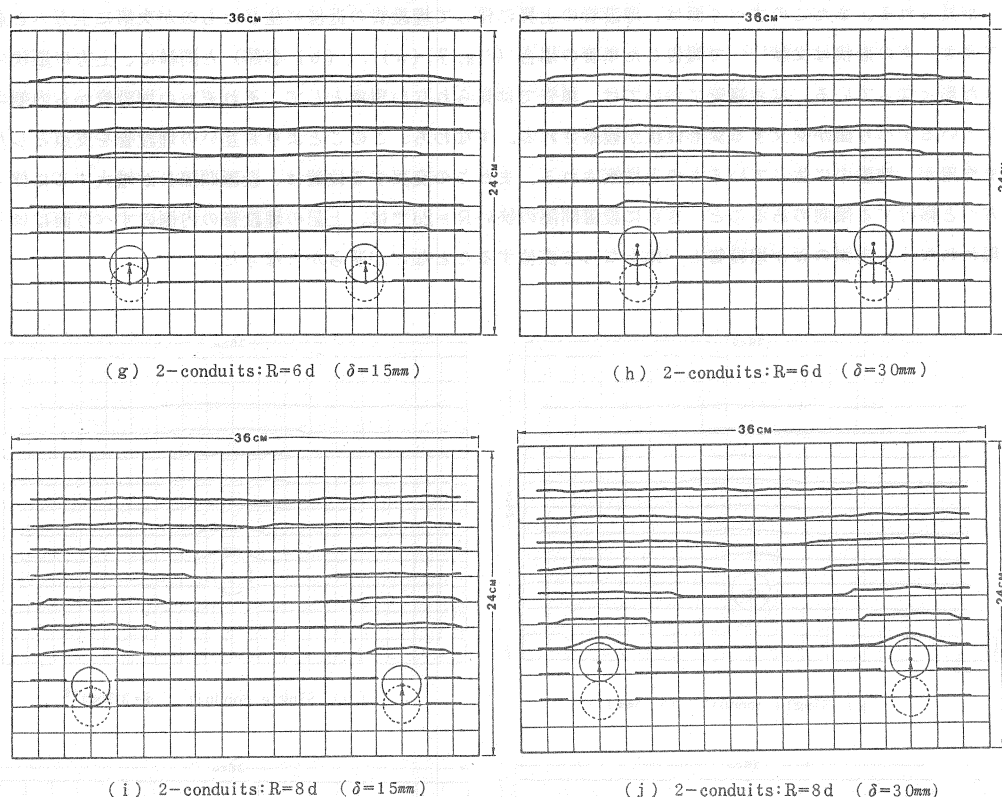


Fig.7 Observed deformations of soil around the conduits

以上示した地盤の変形状を別の角度から捉えるため、埋設管の上昇に伴い生じる実験地盤表面の隆起量分布の測定結果について、以下に考察を加えてみる。

各実験で得られた地盤の隆起量分布をFig. 8に、そして埋設管と埋設管の中央部の直上の地表面隆起量 δ_c と埋設管の上昇変位 δ との関係をFig. 9に示した。Fig. 8より、実験地盤の隆起する範囲は埋設管の外側よりかなり遠方にまで及ぶことが読み取れる。この性状とFig. 7の地盤変形と合わせみれば、上述したようにすべり面が地盤表面に近づくに従って広がりが大きくなるような形状を持つことが、より明らかとなる。また、2本の埋設管の内側部分の地盤表面の隆起量が、その外側部分とほぼ同じ値を示すか、あるいはそれ以上の値を示していることは、埋設管を支点としたアーチ作用が生じていることを裏付けているといえる。一方Fig. 9より、各実験における δ_c の大きさは、埋設管の設置間隔 R が大きくなるに従って小さくなっていくことや、 δ_c の値は初期の δ の増加に伴い線形的に増加していく傾向のあることなどが読み取れる。ただしその増加の性状は、 $\delta = 4 \sim 5\text{mm}$ 付近で変化しており、これはFig. 5における $P_{\max}$ が発生するときの埋設管の上昇変位量にはほぼ対応した変位量であることが分る。この符合は、押し上げ力が最大値 $P_{\max}$ を示すときの埋設管の上昇変位量の前後において、埋設管の上方に形成されるすべり面で囲まれた土塊の動きに変化のあったことを示唆している。すなわち、押し上げ力が $P_{\max}$ に達した後の埋設管の上昇変位に対しては、上記の土塊の内部では鉛直方向よりも水平方向への変形が卓越するような性状が生じたため、 δ_c の増大する割合が低下したものと推測できる。

8.4. 結語

本論文は、比較的浅い位置に2本の埋設管が並列に設置される場合を対象として、周辺地盤の沈下によりこれ

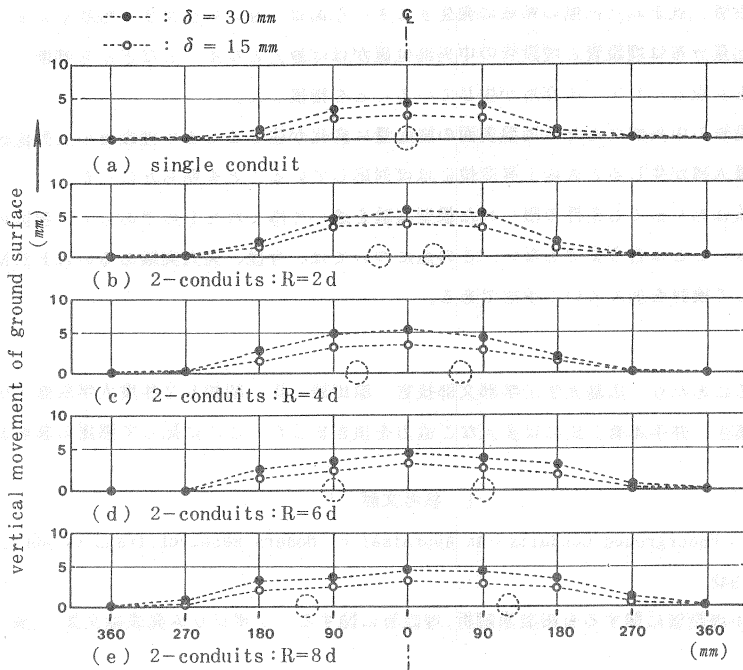


Fig.8 Distributions of vertical movement of ground surface

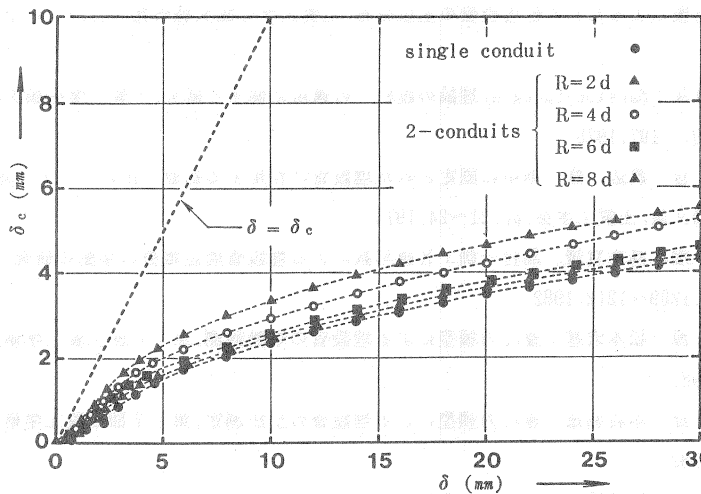


Fig.9 Relationships between vertical movement of ground surface at center line in Fig.8, δ_c and conduit displacement δ

らの埋設管に作用する鉛直土圧、ならびに周辺地盤の変形状態を模型実験を通して明らかにしたものである。本研究において得られた結果を要約すれば、以下のとおりである。

- 1) 並列2本に配した埋設管の設置間隔がある程度小さくなると、群の影響（群効果）が現われ、埋設管の押し上げ力の最大値が単管のそれより低下することを明らかにした。また、反対に群効果が無視できる設置間隔は、管径の約8倍以上であることを示した。
- 2) 埋設管と地盤との相対変位によって地盤中に発生するすべり面は、Spanglerが仮定した解析モデルとは異なり、上方に向かって広がる扇形の形状となることを明らかにした。

- 3) 埋設管と埋設管に挟まれた内側の領域に発生するすべり面は、互いに交叉する性状を示すこと、あるいは地盤表面の隆起量分布は埋設管と埋設管の中央部位置がほぼ最大となることなどから判断して、地盤中に埋設管と埋設管を支点としたアーチ作用が生じていることを指摘した。
- 4) 埋設管と埋設管の中央部にあたる地盤表面の隆起量に変化が生じるときの埋設管の上昇変位は、埋設管の押し上げ力の最大値が生じるときの上昇変位にほぼ対応していることを明らかにした。

なお、以上の結論はあくまでも条件の限られた模型実験を通して得られたものであって、現実の場合に直ちに適用できるものでないことは言うまでもない。この点については、今後、実大実験あるいはFEM解析や極限解析を行うことによって検討を加えていく予定である。

[謝辞]

本実験を実施するにあたり、広島大学工学部文部技官・原田誠一氏、昭和62年度大学院修了生・竹谷雅則氏ならびに同学部卒業生・井手本有三氏には多大なご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) Spangler, M.G.: Underground Conduits—An Appraisal of Modern Research, Trans. of ASCE, Vol. 113, pp. 316~374, 1948
- 2) 成田国朝: 地中埋設管に関する有限要素解析, 埋設管に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp. 9~12, 1975
- 3) 浅井貞重: 地盤との相互作用による地中埋設管の応力と変形の計算式, 土と基礎 (土質工学会), Vol. 34, No. 8, pp. 13~19, 1986
- 4) 大川秀雄: 地盤自重によるたわみ性埋設管の土圧分布, 土質工学会論文報告集, Vol. 27, No. 4, pp. 167~175, 1987
- 5) 松尾 稔、堀内孝英: Marston-Spangler理論の設計への適用に関する研究, 土質工学会論文報告集, Vol. 15, No. 2, pp. 97~107, 1975
- 6) 西尾宣明、吉越 亘、渡辺 修: 地中に固定された埋設管に作用する鉛直土圧について, 埋設管に関するシンポジウム発表論文集, 土質工学会, pp. 21~24, 1975
- 7) 西尾宣明、米山 潔、高木宜雄、島村一訓: X線写真による埋設管周辺地盤の挙動の研究, 第17回土質工学研究発表会, pp. 1209~1212, 1982
- 8) 高田直俊、東田 淳、松本宏基: 遠心力模型による埋設管の挙動観測, 第16回土質工学研究発表会, pp. 1593~1596, 1981
- 9) 高田直俊、東田 淳、中村祐造: 遠心力模型による埋設管の土圧測定, 第17回土質工学研究発表会, pp. 1201~1204, 1982
- 10) 市原松平、林 裕貴、遠藤慎治: 暗キヨに作用する鉛直土圧の実例, 土と基礎 (土質工学会), Vol. 6, No. 2, pp. 9~16, 1958
- 11) 矢部正宏: 大口径遠心力鉄筋コンクリート管の埋設実験, 土木技術資料, 第11巻, 第11号, pp. 21~25, 1969
- 12) 吉川 弘、上田勝弘、大奥史也、大西翼美、安住好博: 矢板引抜き時の埋設管および周辺地盤の挙動実験結果について, 第14回土質工学研究発表会, pp. 1537~1530, 1979
- 13) 東田 淳、堀田清美、篠崎 亘、三笠正人: 遠心力鉄筋コンクリート管 (コンクリート支承) に加わる土圧と管の強度について, 土木学会論文報告集, 第310号, pp. 97~112, 1981
- 14) 土質工学会編: 地中埋設管の調査・設計から施工まで, pp. 379~386, 1984
- 15) 富永晃司、山本春行、竹谷雅則: 地中埋設管の押し上げ挙動に関する実験結果, 土質工学会中国支部論文報

告集, Vol.5, No.1, pp.67~75, 1987

- 16) 生原 修、龍岡文夫：砂の模型支持力実験における側壁面条件の影響, 第19回土質工学研究発表会, pp.967~970, 1984
- 17) 山肩邦男、伊藤淳志、下平祐司、南坂貴彦：鋼管で側方拘束された砂地盤における標準貫入試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.899~900, 1985
- 18) P.Walker and T.Whitaker: An Apparatus for Forming Uniform Beds of Sand for Model Foundation Tests, Geotech., Vol.17, No.2, pp.161~167, 1967
- 19) 竹谷雅則、佐原 守、富永晃司、山本春行：砂地盤中の模型埋設物に関する実験的研究 - その1. 実験概要とその結果 -, 日本建築学会中国支部研究報告集, 第13巻, pp.145~148, 1986