

吹付けコンクリートの支保機構に関する基礎的研究

柴田 英明*・小島 義文**

Experimental Study on a Thin Flexible Tunnel Support System such as Shotcrete Lining

By Hideaki Shibata* and Yoshifumi Kojima**

Synopsis: In order to make clear the mechanical efficiency of a thin flexible tunnel support system, it is very important to study the redistribution of stress which takes place in the surrounding ground due to tunneling. In this paper, model tests of tunneling in a dry sand ground were carried out in which shotcrete lining were simulated by using the cohesive soils.

Using the model tests, the relations between the deformation of lining and the load acting on lining are examined to know the mechanical efficiency of tunnel support system such as shotcrete lining. The mechanism leading to the failure of the shotcrete lining is also investigated.

要旨: トンネル掘削に伴う応力の再配分は、地山の初期応力状態と力学的特性との関連で検討しなければならないが、それらは種々の要因が絡み合って非常に複雑である場合が多い。

本研究では、乾燥砂地山を対象とした降下床実験における降下床の降下量と降下床土圧との関係が、吹付けコンクリートのような柔支保構造の支保理論における壁面変位と壁面半径方向応力との関係に類似していることに着目し、乾燥砂土槽中で吹付けコンクリートを想定したライニングモデル実験を行った。結果として、ライニング作用荷重を増加させたときのライニングの変形とライニング反力、及び周辺地山中の鉛直方向土圧の変化との関係を求め、吹付けコンクリートの荷重支持機構とライニングの破壊条件を見出すことを目的とした。

1. まえがき

1976年、上越新幹線中山トンネルにおいて、我が国初めての NATM 工法がトンネル工事として適用されて以来、わずか数年の間に数多くのトンネル建設でこの工法が採用されるようになった。それに伴い、ロックボルトの作用効果¹⁾や吹付けコンクリートの支保機構²⁾³⁾に関する理論研究⁴⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾⁸⁾も進み、昭和61年より、山岳トンネルにおいては、NATM 工法が標準工法として採用されるに至った。しかし、この工法には、トンネル掘削に伴う応力の再配分など幾つかの基礎的問題が未解決のままである。トンネルを掘削するということは、平衡状態に

ある地山内の初期応力を一旦乱し、各掘削段階において応力の再配分を繰り返しながら、新たな平衡状態へと導くことである。また、トンネル掘削に伴う応力の再配分は、地山の初期応力状態と力学的特性との関連で検討しなければならないが、それらはいろいろの要因が絡み合って、非常に複雑である場合が多い。吹付けコンクリートには地山そのものを支保するというより、地山の強度的劣化を極力抑え、地山が本来持っている耐荷能力を積極的に活用させるのが目的であるので、ある程度変形可能な支保部材である。よって吹付けコンクリートを設けた場合、トンネル切羽の進行等によってライニングに作用する荷重が増加するときライニングには変形が生じる。この変形により、地山中の応力は再配分を繰り返していくことになる。

本研究では、乾燥砂地山を対象とした降下床実験⁹⁾¹⁰⁾における降下床の降下量と降下床土圧との関係¹¹⁾が、吹

*土木工学科 専任講師

Lecturer, Civil Engineering Division

**土木工学科 技術職員

Technical Staff, Civil Engineering Division

付けコンクリートのような柔支保構造の支保理論¹²⁾における壁面変位と壁面半径方向応力との関係に類似していることに着目し、乾燥砂土槽中で吹付けコンクリートを想定したライニングモデル実験¹³⁾を行った。結果として、ライニング作用荷重を増加させたときのライニング天端の変形量と作用荷重及び地山中の鉛直方向土圧の変化を求めることにより吹付けコンクリートの荷重支持機構とライニングの破壊条件及び吹付けコンクリートの変形に伴う周辺地山の応力の変化について調査することを目的とした。

2. 実験装置及び実験方法

吹付けコンクリートは適度にフレキシブルであって地山の弾性変形には容易に追随でき、さらに地山挙動に臨機応変に対処して、追加施工可能な支保部材である。本実験で使用するライニングも、吹付けコンクリートを想定したものであるため、載荷荷重の増加に伴い、ある程度変形可能なライニングとするため、粘土を主材料として作成した。ライニングの材料はベントナイト31%、石粉4%、石コウ23%、水42%を混合したものであり、作成方法としてはこの混合物を30 cm×20 cmの薄板状に伸ばし、径10 cmの半円形型枠に載せ、乾燥させない状態で2日養生したものである。なお、ライニングの厚さは3.2, 2.6, 1.6 mmの3種類とした。実験土槽の地山として、乾燥した豊浦標準砂を $\rho_d \div 1.5 \text{ g/cm}^3$ 程度にバイブレーターを用いて締め固めて作り、載荷荷重は空気圧にて加えることとした。載荷速度はそれぞれ1分間で0.1, 0.2, 0.4 kgf/cm² 載荷することとした。反力は図1に示すようにロードセルを用いて測定した。ライニング天端の変形量は倍率10倍程度のスタンドマイクロスコープを用いて測定した。また、地山中の土圧についてはタイプBE-2KCの土圧計にて計測した。なお、土圧計の配置は図2に示すとおりである。なお、ライニングの破壊状況を調べるため、本実験では、ライニングが完全に破壊するまで行った。また、ライニング材の圧縮強度は一軸圧縮試験により求めている。

3. 実験結果

3.1 ライニング厚が異なる場合

1分間で0.2 kgf/cm²の載荷速度で載荷したときの載荷圧とライニング天端の変形量との関係、さらに載荷圧とライニング反力との関係、及びライニング天端の変形量とライニング反力との関係をそれぞれ図3、図4、図5に示している。図3より、どの厚さにおいても載荷圧の増加に従って、天端の変形量は増える傾向を示してい

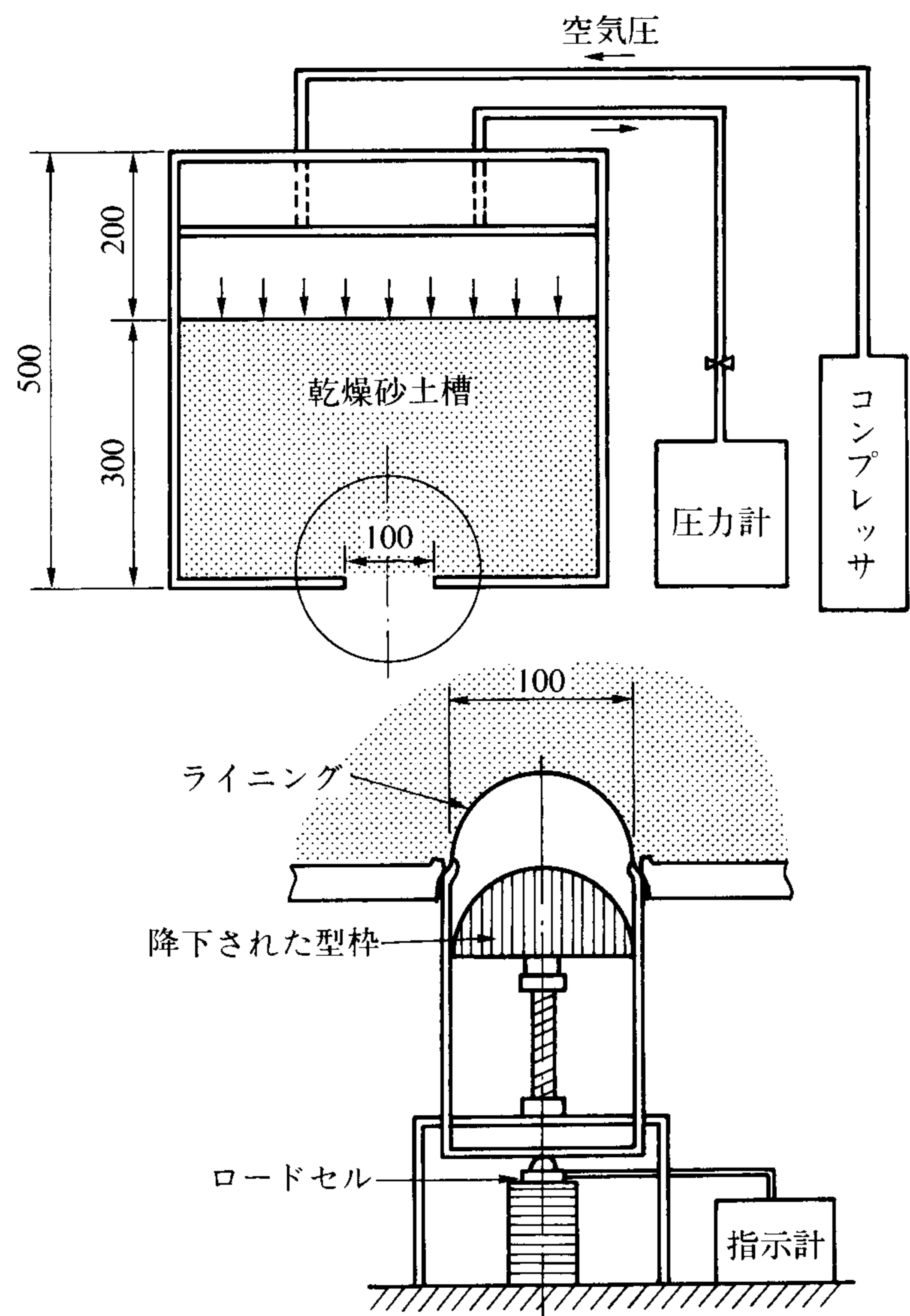


図1 ライニング模型実験装置

るがその増加率は厚さの違いに影響されず殆んど同じ値を示している。一方、ライニング破壊時の天端の変形量は $d=1.6 \text{ mm}$ のとき $s=0.25 \text{ kgf}$ で $\delta_L=2.7 \text{ mm}$ 、 $d=2.6 \text{ mm}$ のとき $s=0.5 \text{ kgf}$ で $\delta_L=3.2 \text{ mm}$ のとき $s=0.6 \text{ kgf}$ で $\delta_L=5.5 \text{ mm}$ となっている。図4より、ライニング反力は載荷圧の増加に伴い大きくなる傾向を示しているが、その増加率はライニングの厚さによって大きく違っている。即ち、厚さが厚くなるほど、載荷圧が増加するに従い、ライニング反力が大きくなっている。図5より、ライニングの厚さの影響は天端の変形量よりもライニング反力に著しく表われることが判った。以上の実験結果より、ライニング厚さ、既ち、ライニングの剛性が変化することはライニング反力、即ち、ライニングそのものの地山を支持する力に影響を持つことが判った。ここで、ライニングが薄くなっても、十分、大きな載荷圧に耐えることが実験結果より判断できるが、このことから、このような柔なライニングでは、ライニングが地山と一体化することにより、支保機構が安定すると判断することができる。

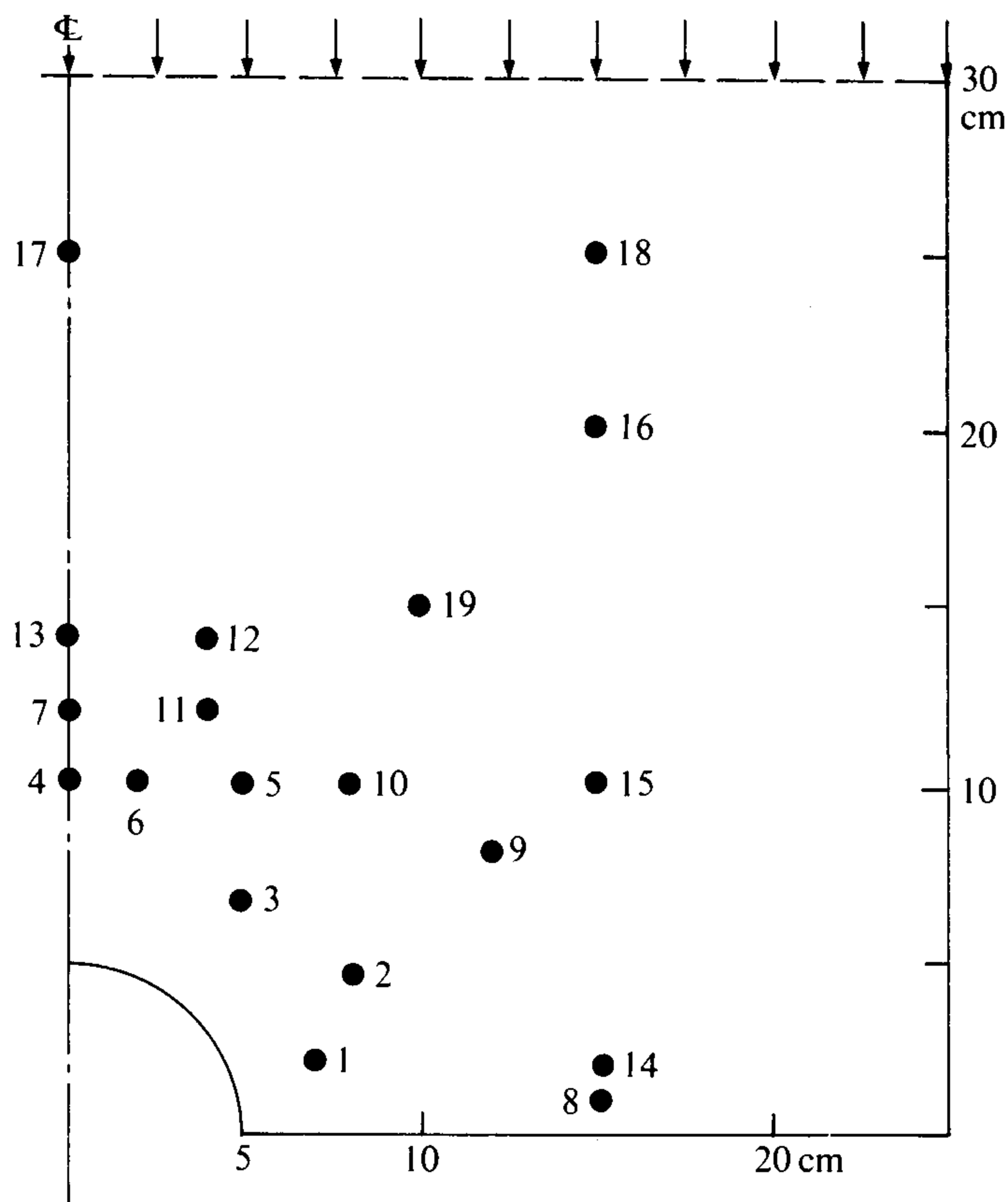


図2 土圧計の配置図

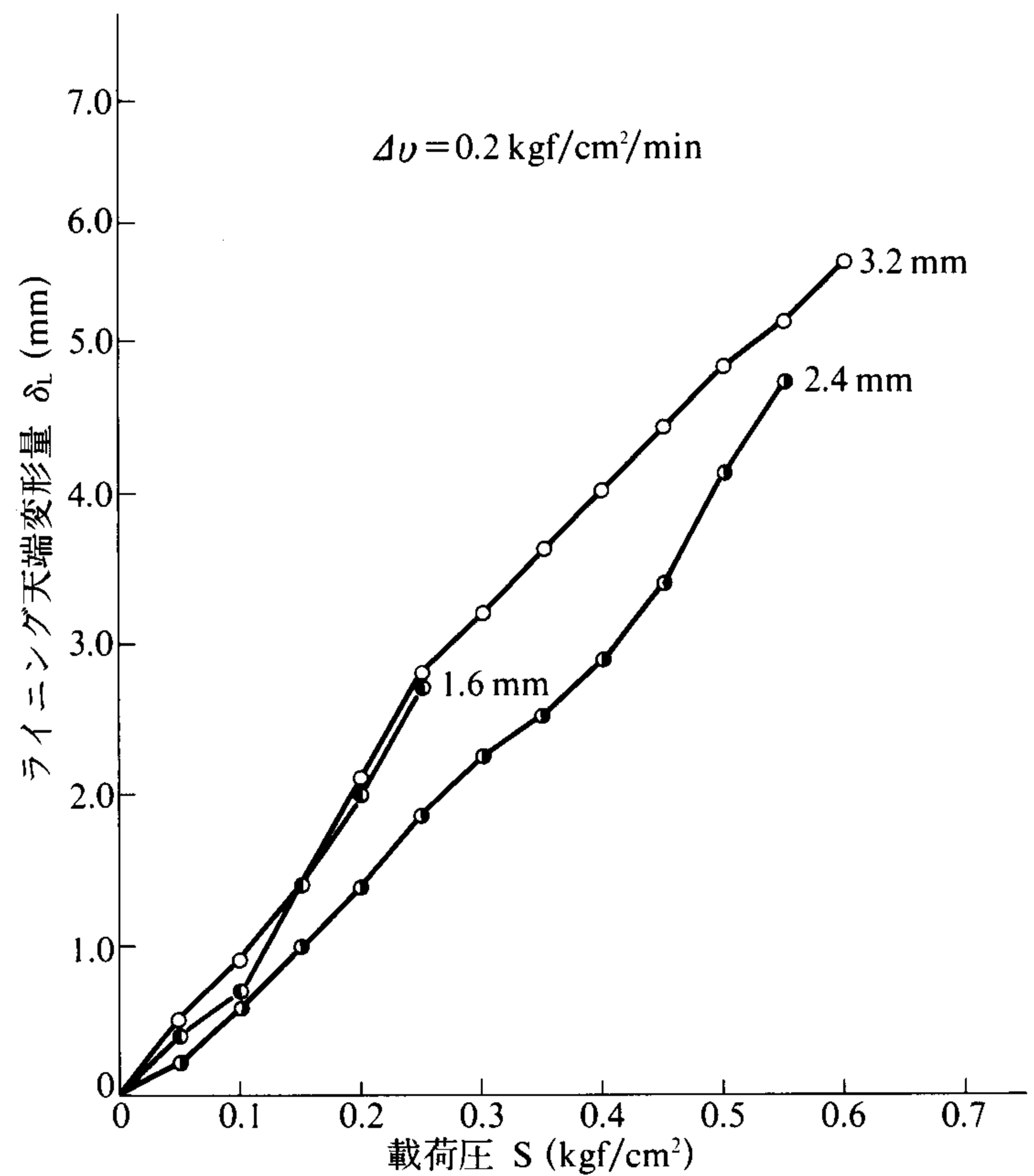


図3 載荷圧とライニング天端の変形量との関係

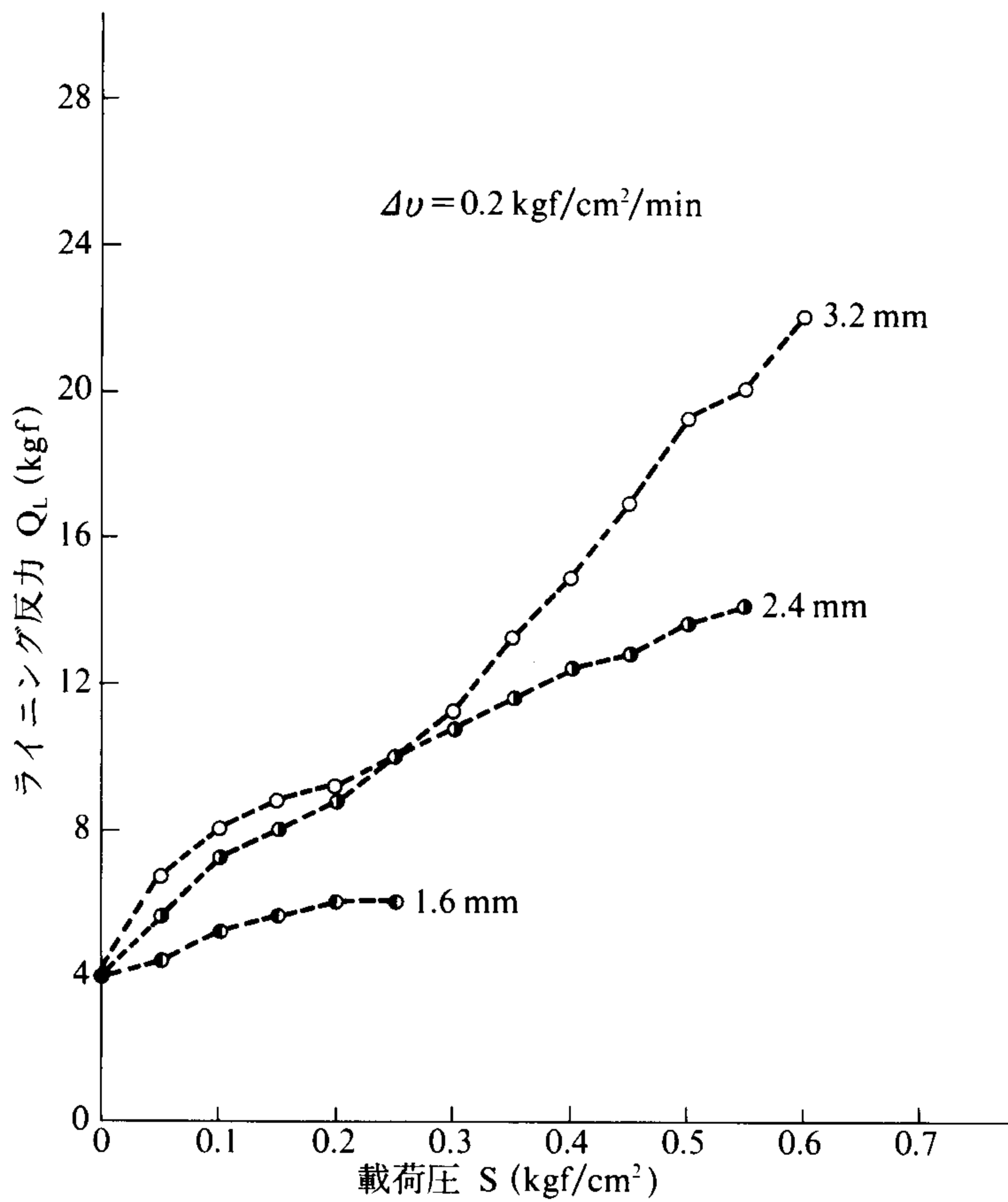


図4 載荷圧とライニング反力との関係

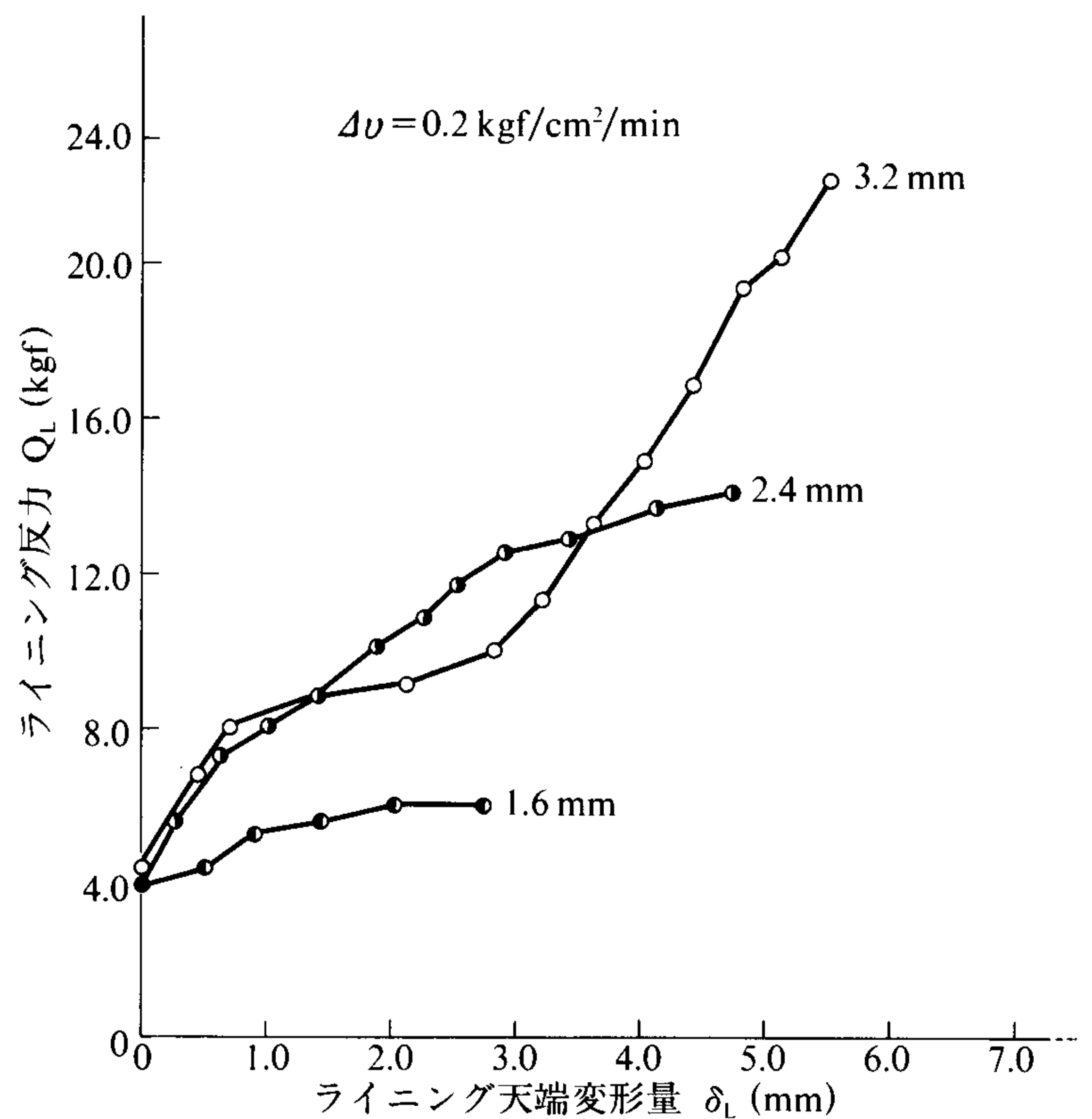


図5 ライニング天端変形量とライニング反力との関係

3.2 載荷速度が異なる場合

次にライニング厚さが同一で、載荷速度が変化する場合の結果をそれぞれ図6, 7, 8に示している。ライニング厚さを3.2 mmとしたときを例とし、図6では載荷圧

とライニング反力との関係、図7では載荷圧とライニング天端の変形量との関係、図8ではライニング天端の変形量とライニング反力との関係を示している。図6より、載荷圧の増加に伴い、どの載荷速度においてもライ

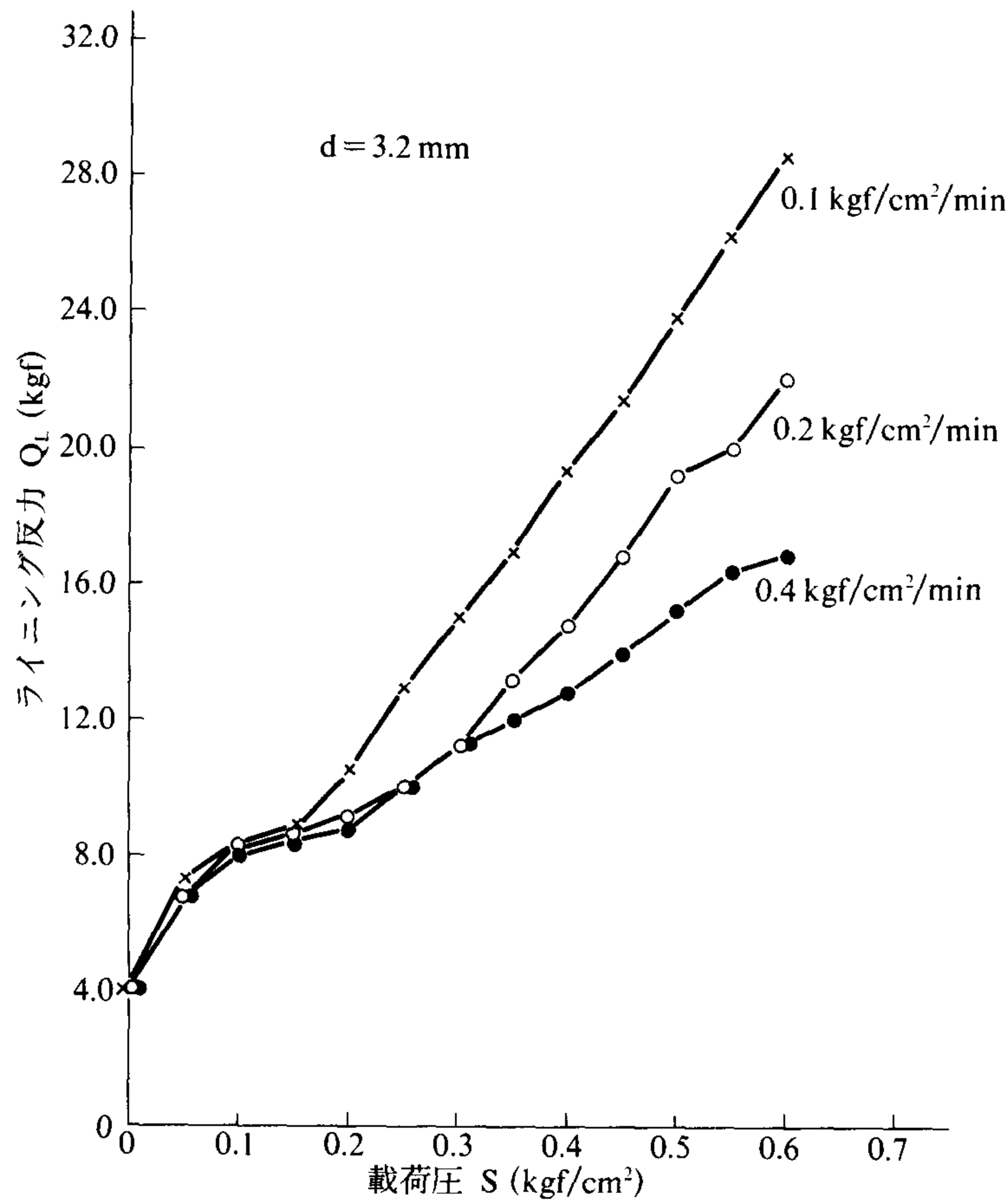


図6 載荷圧とライニング反力との関係

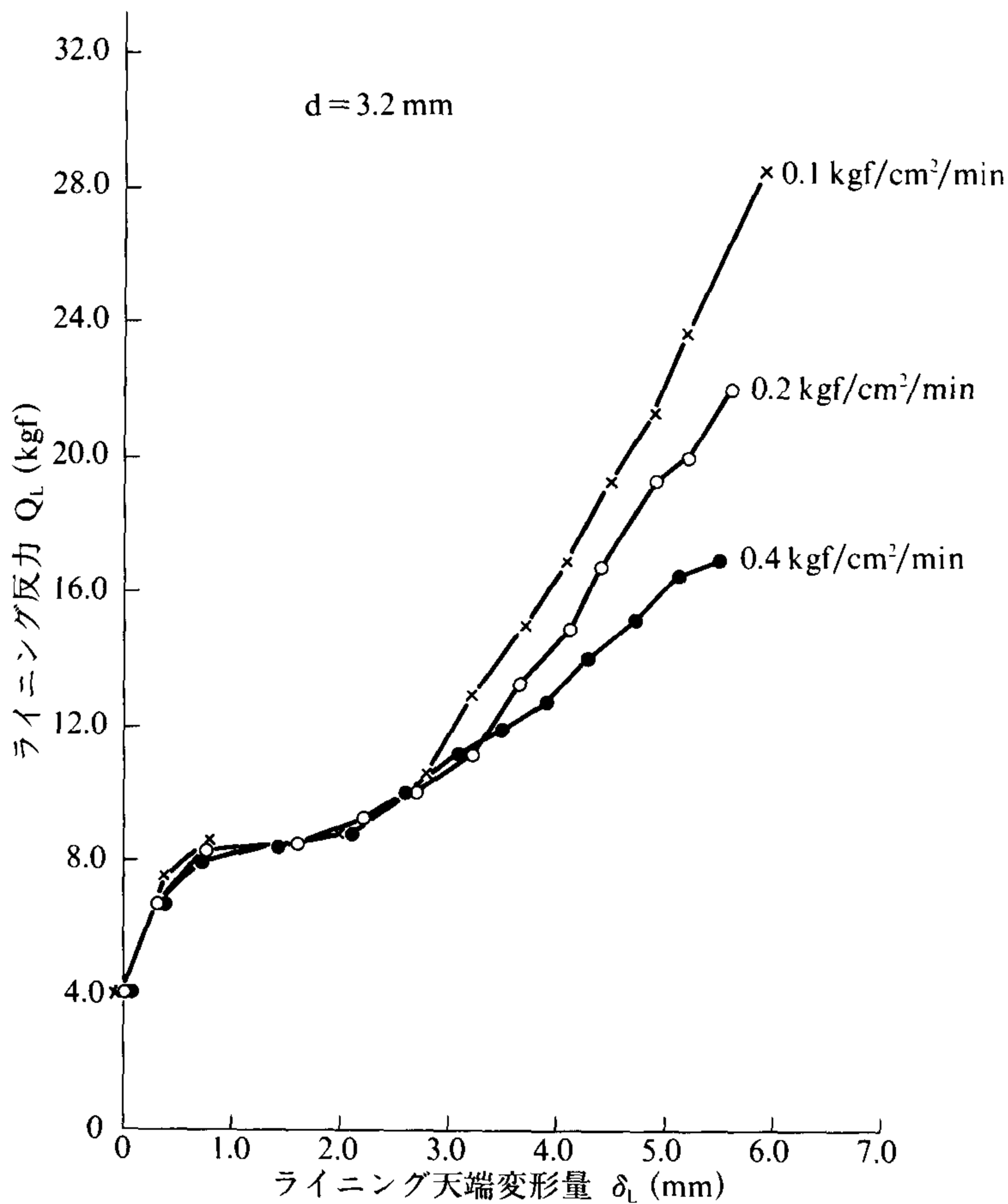


図8 天端変形量とライニング反力との関係

ニング反力は増加する傾向を示しているが、その増加率は載荷速度の速い方が小さい値を示している。また、図

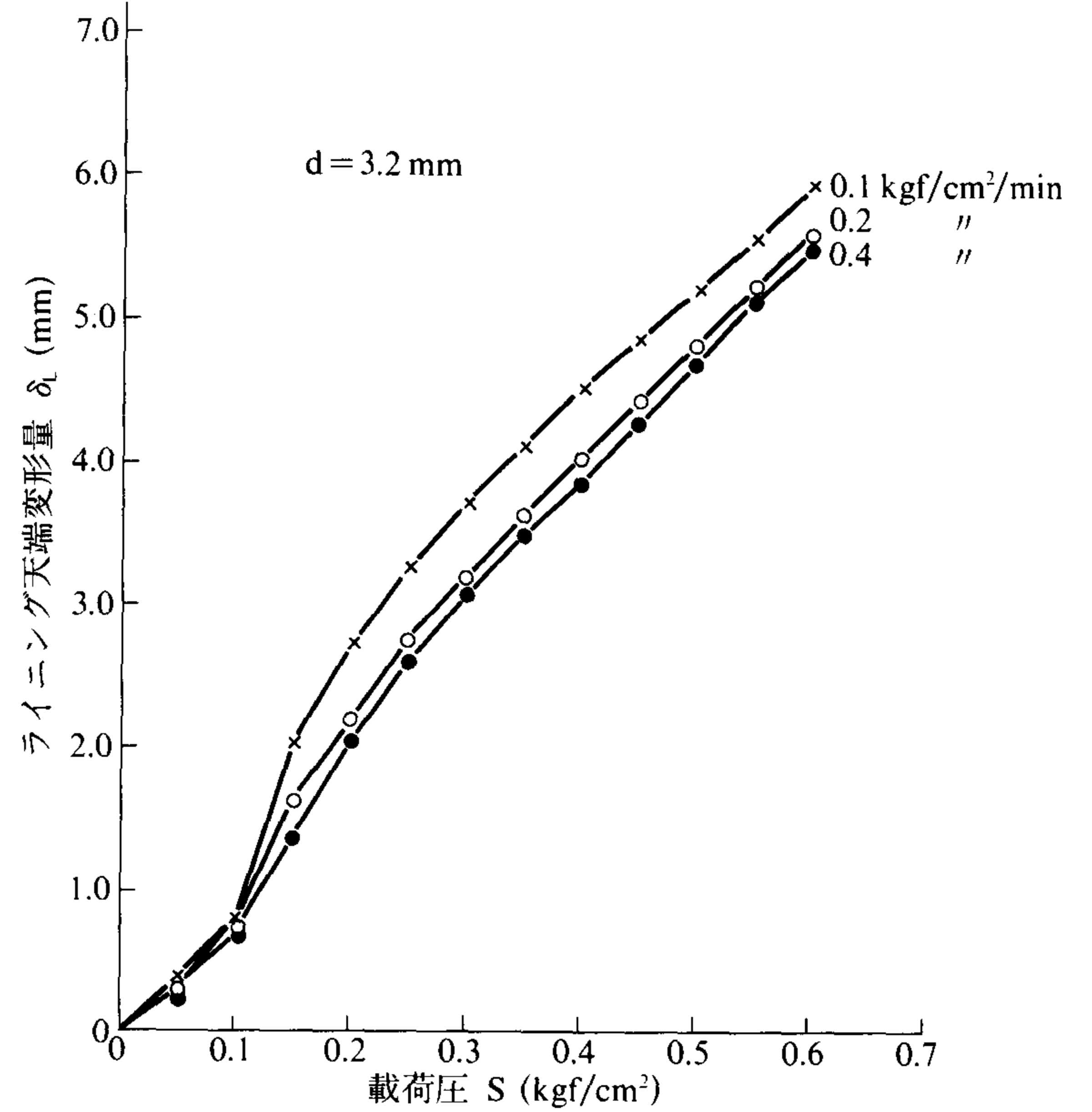


図7 載荷圧とライニング天端変形量との関係

7より、ライニング天端の変形量は、載荷圧の増加に伴い、それぞれ増加しているが、その増加率は載荷速度の影響を差程受けておらず、天端の変形量には載荷速度の違いの影響が少ないことがわかる。一方、このことは図8からも如実に表われていることがわかる。以上の実験結果より、同一ライニングであっても、ライニングに作用する荷重の伝達速度の変化によっても、ライニングの変形が微妙に変化し、このことより、ライニングの支保状態も変化することがわかる。

3.3 ライニング剛性と載荷圧との関係

図5~8のライニング挙動より、ライニングの破壊に至る直前までのライニングの天端の変形量とライニング反力との関係について、載荷圧増分 $\Delta S = 0.1 \text{ kgf/cm}^2$ 作用時のライニング反力増分及びライニング天端の変位増分の平均を求め、図示したのが図9である。図9より、載荷速度が同一であるとき、ライニング厚さが異なる場合、厚さが厚いものほどライニング反力が大きく、ライニング天端の変位増分が小さくなる傾向を示している。一方、載荷速度を変化させた場合を比較してみると、同一変位増分では、載荷速度が速くなればなるほど、ライニング反力増分が大きな値を示す傾向を示している。ここで、ライニングの厚さや載荷速度の変化について考えてみると、ライニング材料の物性が同一でも、厚さが変化するとライニングそのものの剛性が変化することにな

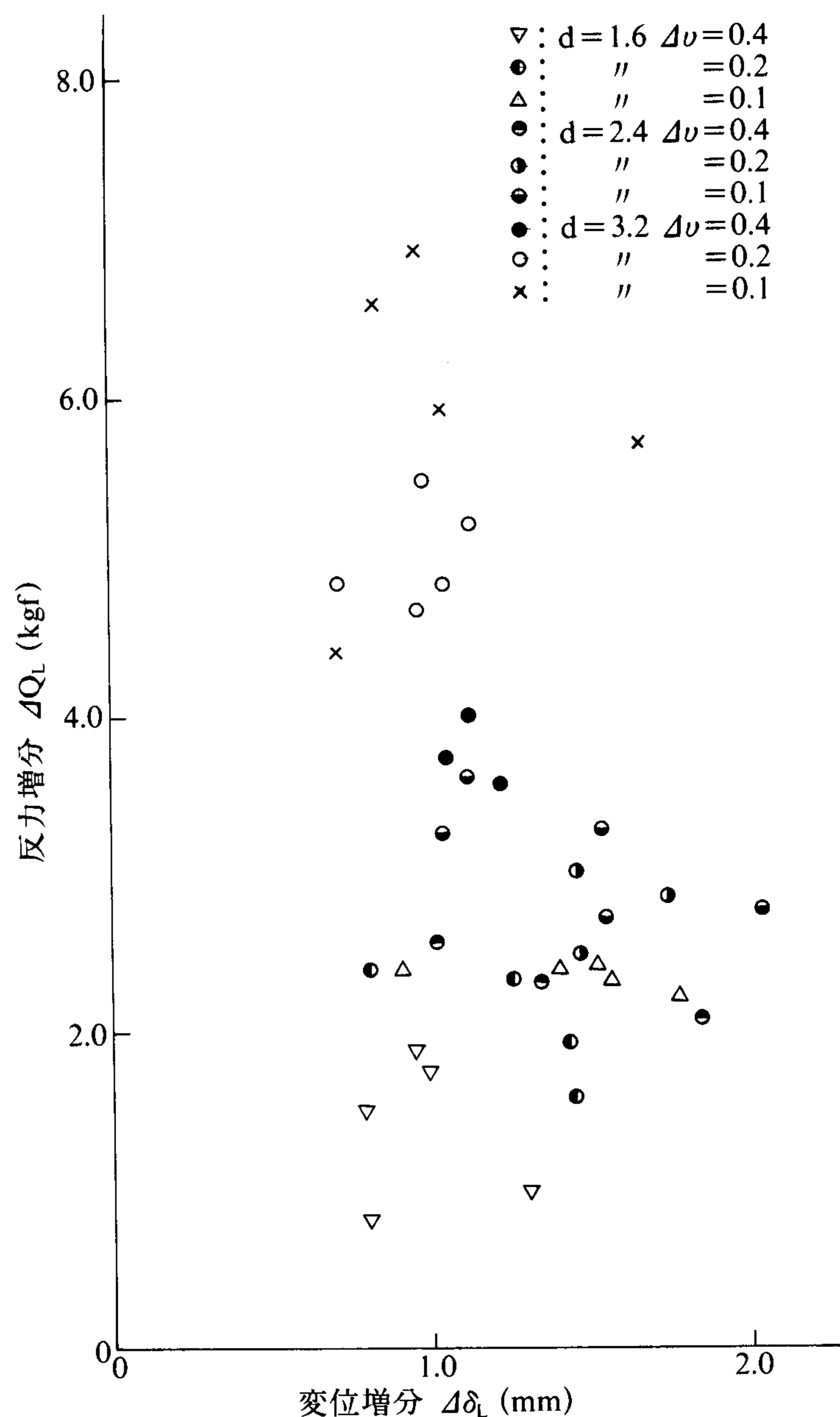


図9 変位増分と反力増分との関係

る。一方、荷重速度が変化するという事はトンネル掘削における切羽進行速度が変化することと同じである¹³⁾。実験結果より、荷重速度の変化がライニングの変形や作成荷重に影響を持つことがわかるが、これは即ちトンネル掘削における切羽進行速度がライニングの支保機構に影響を与えることを実証したことになる。

3.4 ライニング周辺地山中の応力

ライニングの変形に伴う周辺地山中の応力の変化を調べるため、図2に示した箇所に土圧計を設置して、鉛直方向土圧を計測した。図10に荷重圧と鉛直方向土圧との関係の一例を示す。また、各荷重段階における土圧の大きさをそれぞれ図11, 12に示している。図10より、ライニング天端直上 (No. 4) では、荷重圧が増加しても土圧は殆ど増加せず、ライニングが破壊する直前でも 0.1 kgf/cm² と小さい値のままである。これは荷重圧増加と

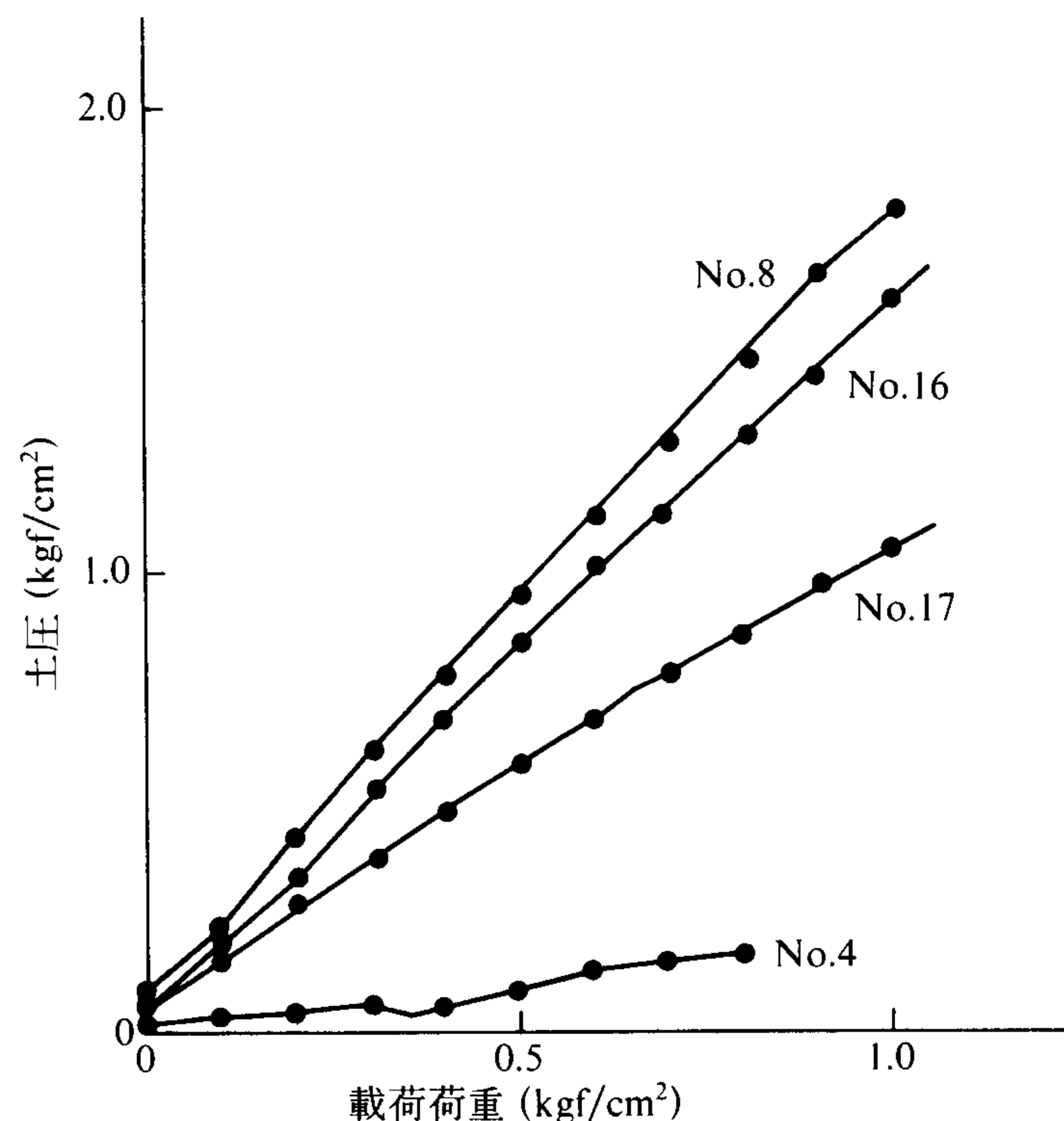


図10 荷重荷重と土圧との関係

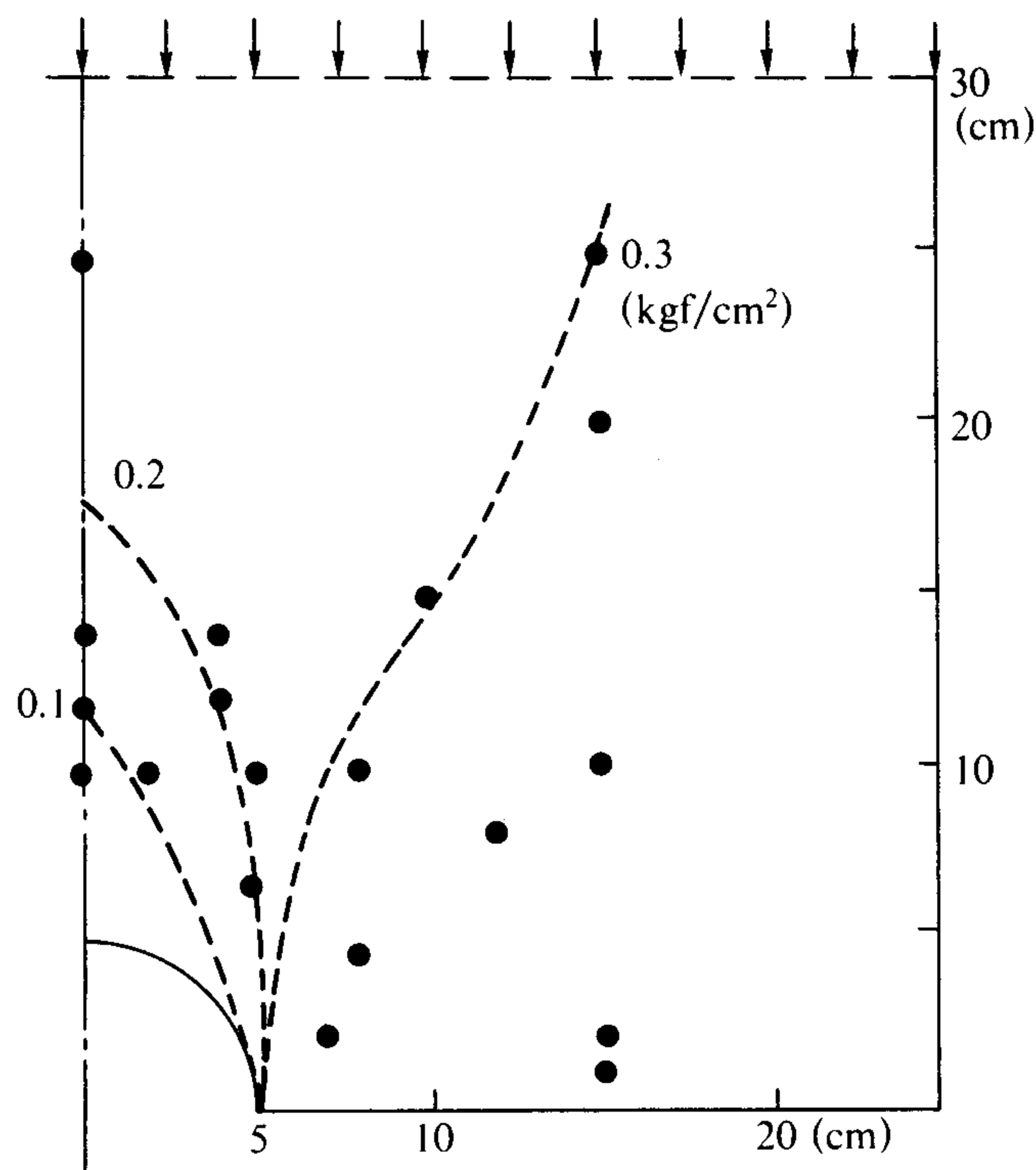


図11 土圧の分布図 (S=0.2 kgf/cm²)

ともにライニングの変形が始まり、No. 4 付近では、このライニング変形の影響が直接地山にも伝わり、地山そのものもライニングの変形に伴って動き始めるために、土圧が殆ど増加しないことを示している。また、No. 17 付近では、ライニングの上方部であるにもかかわらず、荷重圧の増加に伴い、土圧は徐々に増加する傾向を示している。この土圧の増加量は 0.1 kgf/cm² 程度である。この土圧の変化状況からこの地山付近では、ライニ

ングの変形の影響が直接及ぼされるのではなく、下方の地山が動き出した後、それに追従するように動き出すため、土圧がNo. 4付近の土圧よりも大きくなると判断できる。次に、No. 8やNo. 16付近の地山の土圧は載荷圧の増加に伴い荷重増分と同じ大きさで増加する傾向を示している。このことから、ライニングの側方部やライニングから離れた箇所では、ライニング変形の影響は殆んどないことを示している。

一方、各荷重段階における鉛直方向土圧の分布状況を調べると地山の自重のみが使用するとき、載荷面より深くなるに従い、土圧は少しずつ大きい値となっている。また、図11より、載荷圧が0.2 kgf/cm²作用したとき、同一土圧の大きさを点線で結ぶと図のようになる。なお、このときのライニング天端の変形量は約2 mmである。同様にして、ライニングが破壊する直前の土圧の分布状況を図12に示している。このときのライニング天端の変形量は約5 mmである。上記の実験結果より、ライニングの変形による影響はライニングの上方部には直接伝わっていくが、側方部には殆んど影響を及ぼさないことがわかる。

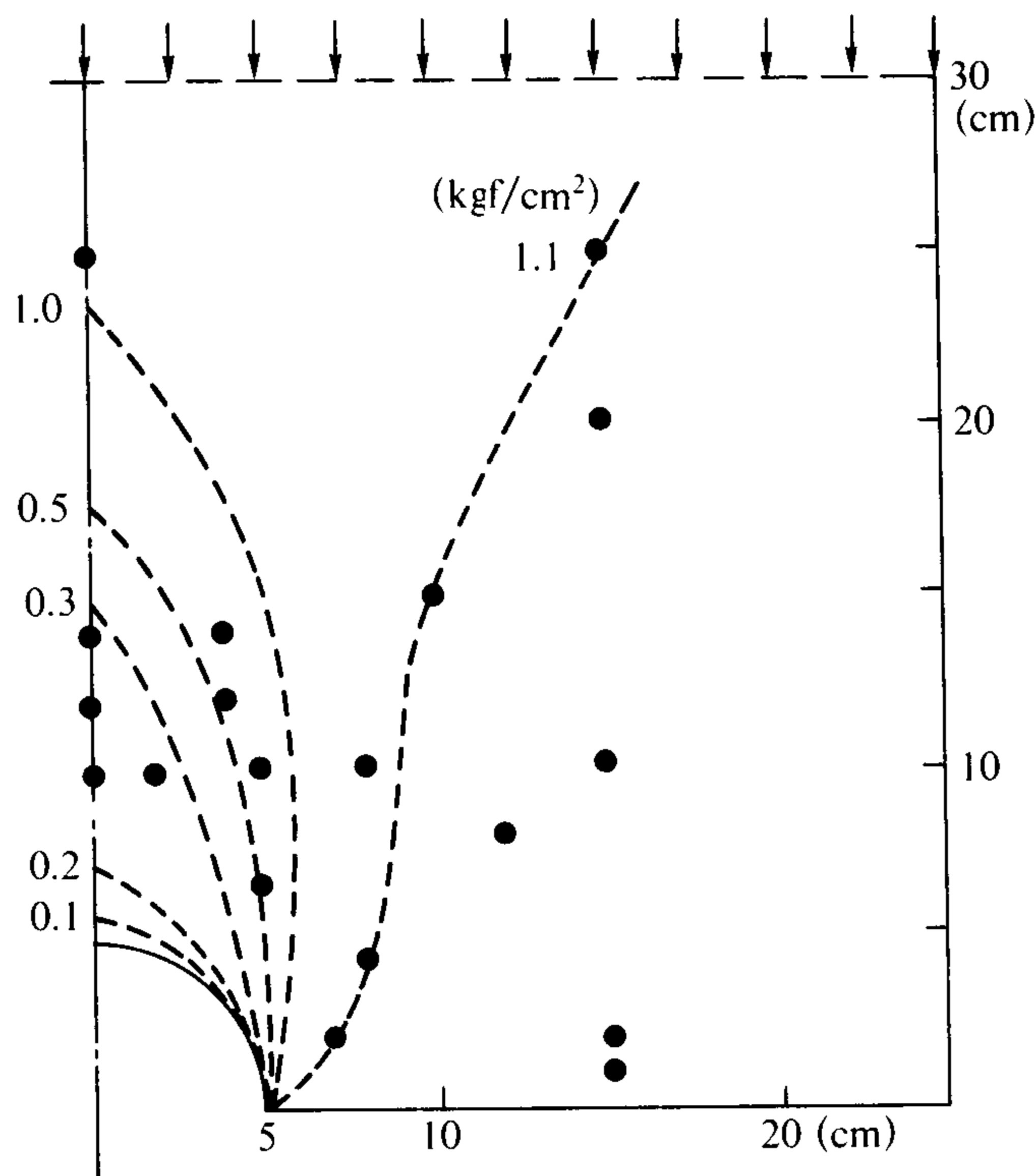


図12 破壊時の土圧の分布図

3.5 周辺地山内の応力伝達機構

前項の実験結果より、この模型のような半円型ライニング支保構造では、ライニング変形の影響範囲が図13に示される範囲に分けられると判断できる。即ち、載荷圧

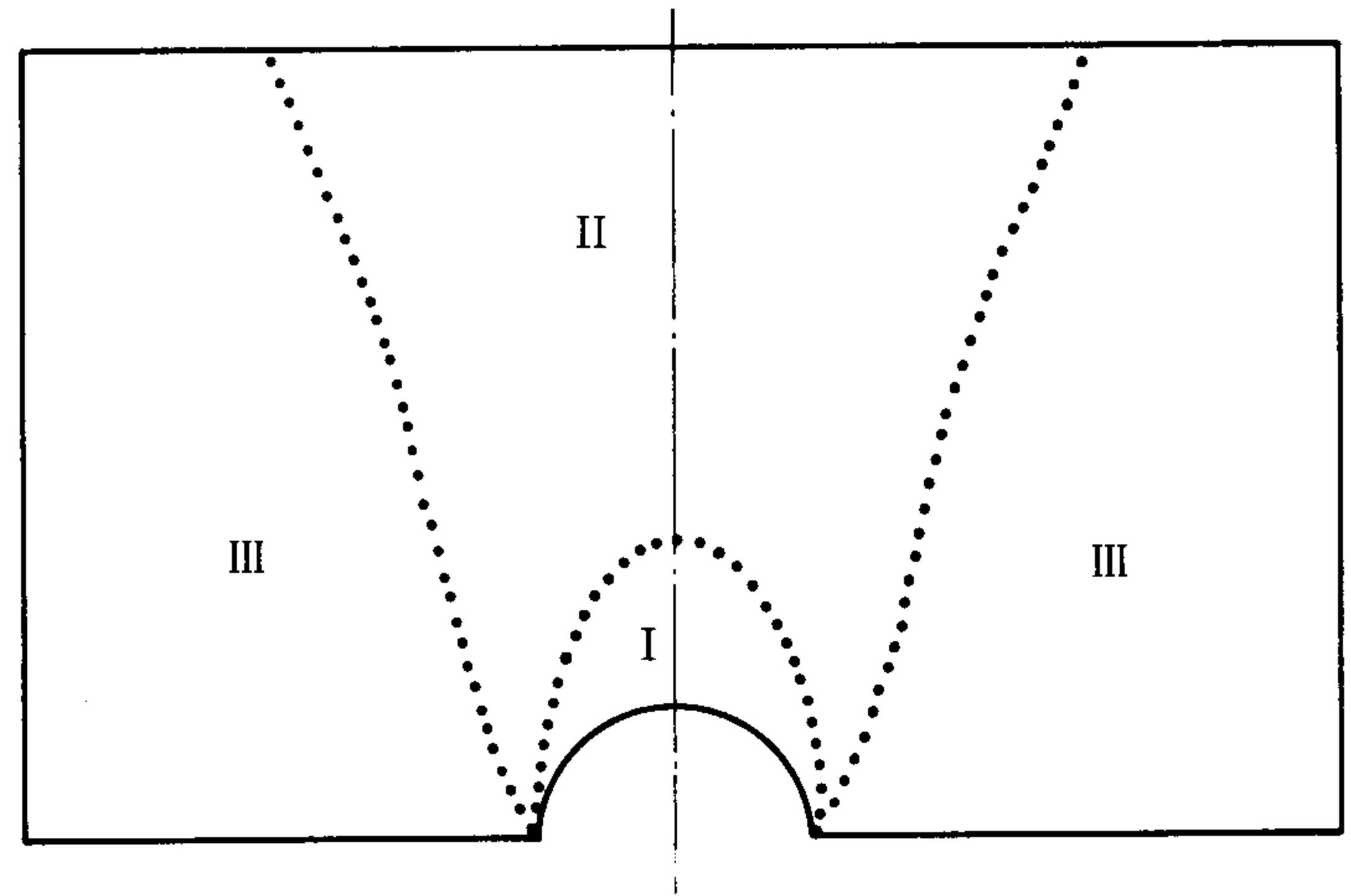


図13 載荷荷重の伝達機構

が作用し始めたときに、ライニングも同時に変形し始めるが、このとき、ライニング周辺の地山内でライニングの変形とともに動き始める部分（I領域）と、I領域の動きに追従して動き出す部分（II領域）、さらにライニングの変形の影響を殆んど受けない部分（III領域）に分けることができる。特にI領域はライニングが破壊するまでライニングと一体化になって動いている。ここで、ライニングの一軸圧縮強度は約0.5 kgf/cm²であり、一方このライニングの破壊圧縮応力¹³⁾は2~3 kgf/cm²である。即ち、ライニングそのものの強さ以上にこの支保構造は支えていることになる。これはI領域の地山内ではアーチング作用が働くことにより、載荷圧の多くの部分を受け持って支えるためと考えることができる。

3.6 ライニングの破壊状況について

ライニングの破壊をライニング反力 Q_L のピーク時とし、このときのライニングの円周方向軸圧縮力として求めた破壊圧縮応力 σ_f とライニングの厚さ d との関係を図14に示している。

ここで、破壊圧縮応力は次式より求めた。

$$\sigma_f = \frac{Q_{Lmax}}{A} = \frac{Q_{Lmax}}{2 \cdot d \cdot l} \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

ここで、

Q_{Lmax} : 破壊時のライニング反力 (kgf)

A : ライニングの降下床面との接地面積 (cm²)

d : ライニング厚さ (cm)

l : ライニングの奥行きで 30 cm である。

一方、ライニング材料の一軸圧縮強度 q_u および破壊ひずみ ϵ は次のとおりである。

$$q_u = 0.5 \sim 1.0 \text{ kgf/cm}^2$$

$$\epsilon = 0.8 \sim 1.2\%$$

図14より、破壊圧縮応力の方が一軸圧縮強度よりも大

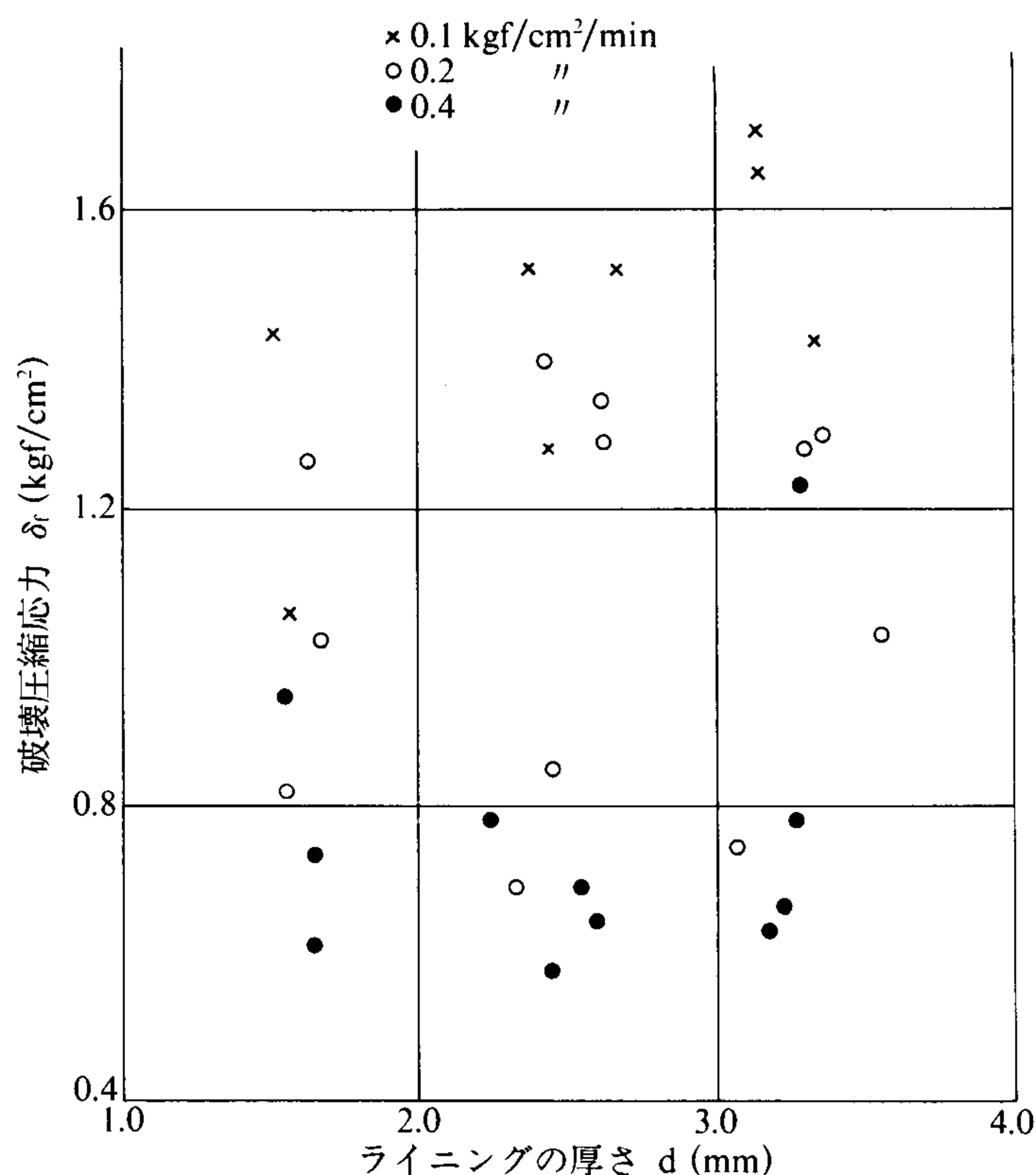


図14 ライニングの厚さと破壊圧縮応力との関係

きくなっているが、これはライニングが地山と一体化することにより、大きな載荷圧を支えていることになる。また、ライニングの厚さが薄くなるほど Q_{Lmax} はやや小さくなる傾向を示している。一方、破壊時の変化状況を観察してみると、 δ_L は 5 mm 前後でライニングの多くは側壁部でトンネル内にせり出すようにせん断破壊を生じている。このときのライニングの圧縮ひずみを半円が天端変位分だけ楕円になったとして計算してみると 1.5% を示しており、一軸圧縮試験の破壊ひずみより大きい値となっている。以上のライニングの破壊状況からも、本実験で用いたようなライニング厚さ d とトンネル直径 D との比 $d/D \approx 3\%$ 程度の薄肉ライニングが大きな載荷圧に耐えることができるのは、その大部分を地山が支持していることと、Peck¹²⁾ が説明しているように、柔なたわみ性ライニングでは、反力が一様に分布し、ライニング内に曲げモーメントが生じないためである。

4. 結 論

本研究では、吹付けコンクリートを想定したライニングモデル実験を行うことにより、作用荷重の変化に伴う柔支保構造の支保機構と破壊状況およびライニングの変形に伴う周辺地山の動きと応力について把握することを試みた。この実験から得られた結果をまとめると次のとおりである。

1. 一定の載荷圧が作用しているときのライニングの変

形と反力は、ライニングの剛性とライニング周辺地山の物性によって決定する。

2. 載荷速度の変化はライニングの変形と反力との関係に大きな影響力がある。即ち、載荷速度が速くなると、同一載荷圧増加量に対して、ライニングの変形は小さく、ライニング反力の増加量は大きくなる。
3. ライニングの破壊圧縮応力がライニングそのものの一軸圧縮強度よりも大きいことから、吹付けコンクリートのような薄肉柔支保構造では、変形することにより周辺地山の荷重分担能力を引き出し、ライニングが地山と一体化した支保機構をもつことがわかる。
4. ライニング変形の影響は地山の直上部分に著しく表われる。
5. 半円形トンネルの場合、ライニングの破壊は円周方向に圧縮せん断破壊とみなすことができる。
6. ライニング厚さがトンネル直径の 2~3% 程度の薄い厚さでも、十分支保能力をもっていることがわかる。これは周辺地山が載荷圧のほとんどを支持し、ライニングに大きな曲げモーメントが作用しないような支保機構を地山がつくりあげるためである。

本研究は砂地山を対象とした吹付けコンクリートによる支保機構を研究するための実験を行ってきたが、ライニングの変形と地山の動きについては定性的に把握することができた。

謝辞：本研究の遂行にあたり、早稲田大学理工学部教授森麟博士から懇切な御指導、御助言を賜りました。同博士、および実験に協力頂いた卒業生諸氏に対しまして、ここに記して深謝なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 山本 稔：ロックボルトの作用効果について、土木学会論文報告集，第277号，pp. 95~104, 1978
- 2) 足立紀尚・田村 武・八嶋 厚：薄肉柔支保構造（吹付けコンクリート，ロックボルト）の支保機構に関する実験的研究，土木学会論文集，第358号/Ⅲ-3，pp. 47~52, 1985
- 3) 森 麟・川村哲也：乾燥砂地山トンネルにおけるライニングの支保機構に関する実験的研究，第38回土木学会年次講演会，pp. 107~108, 1983
- 4) 土木学会：ロックボルト・吹付けコンクリートトンネル工法（NATM）の手引書，トンネル・ライブラリー，第2号，1984
- 5) 土木学会：トンネルにおける調査・計測の評価と利用
- 6) 土質工学会：NATM工法の調査・設計から施工まで
- 7) Rabcewicz, L. V.: Stability of tunnels under rock load, Water Power, June, July and August, 1969

- 8) 建設省土木研究所資料：トンネルの支保構造に関する研究報告，昭和56年6月
- 9) 村山朔郎・松岡 元：粒状土地盤の局部沈下現象について，土木学会論文報告集，第172号，pp. 31～41, 1969
- 10) 村山朔郎・松岡 元：砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第187号，pp. 95～108, 1971
- 11) 石村利明・猪熊 明：模型実験によるトンネル土圧の研究，第15回土質工学研究発表会，1980
- 12) Peck. R. B.: Deep excavation and tunnelling in soft ground, 7th Int. Cont. Soil Mech. Found. Eng, State of the arts volume, Mexico, pp. 225～290, 1969
- 13) 柴田英明・川村哲也・森 麟：薄肉柔支保構造の支保機構に関する実験的基礎研究，土と基礎，34-2 (337), 1986, pp. 19～24