

論文 孔内局部載荷試験によるコンクリート強度推定に関する一考察

皿井 剛典*1・田中 徹*2・北山 穂高*3・金子勝比古*4

要旨: 本稿は、構造物の任意の深度におけるコンクリート強度を推定するために開発した「孔内局部載荷試験装置」を用いた、コンクリートへの局部載荷におけるコンクリートの破壊挙動について考察したものである。局部載荷後のコンクリート中の状態を確認するため、試料を非破壊・非接触で観察できる X 線 CT 装置を用いたところ、載荷点直下にコーン状の圧密領域が形成されていることが分かった。これをもとに、孔内局部載荷試験によるコンクリート強度の推定の過程に、土質力学における基礎の支持力問題と同様の考え方を適用できることを証明した。

キーワード: 孔内局部載荷試験, 破壊挙動, X 線 CT 装置, 圧密領域, 貫入抵抗値, コンクリート強度

1. はじめに

筆者らは、凍害等によりコンクリート表面から劣化が進行した構造物の、任意の深度におけるコンクリート性状を把握するための調査・試験装置として「孔内局部載荷試験装置」(以下、試験装置)を開発し(図-1)、種々の室内試験(孔内局部載荷試験)を実施してきた^{1),2),3)}。「孔内局部載荷試験」(以下、載荷試験)は、コンクリ

ート構造物に削孔したコア孔内の任意の深度において、

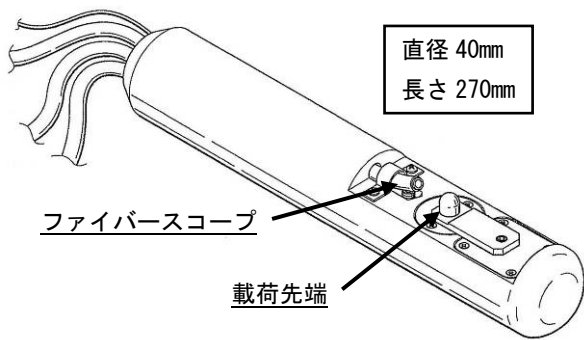


図-1 孔内局部載荷試験装置

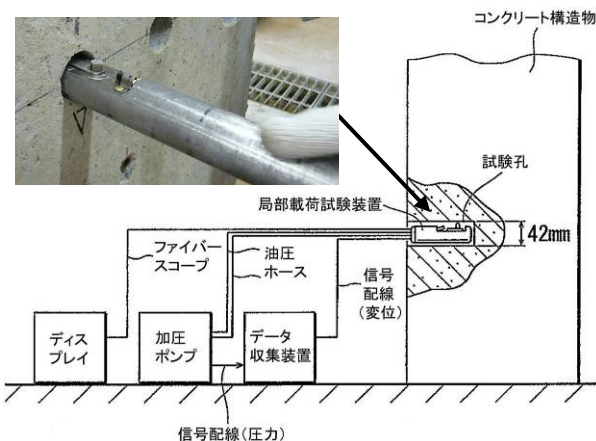


図-2 孔内局部載荷試験の概要

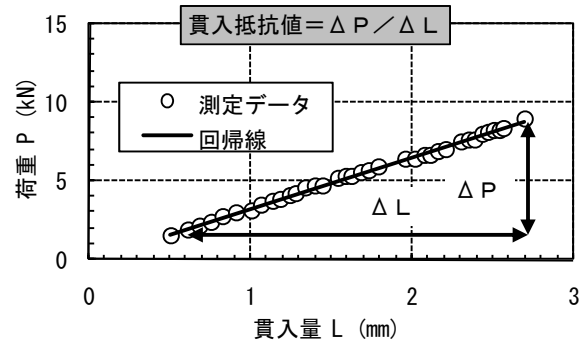


図-3 貫入抵抗値の算出方法

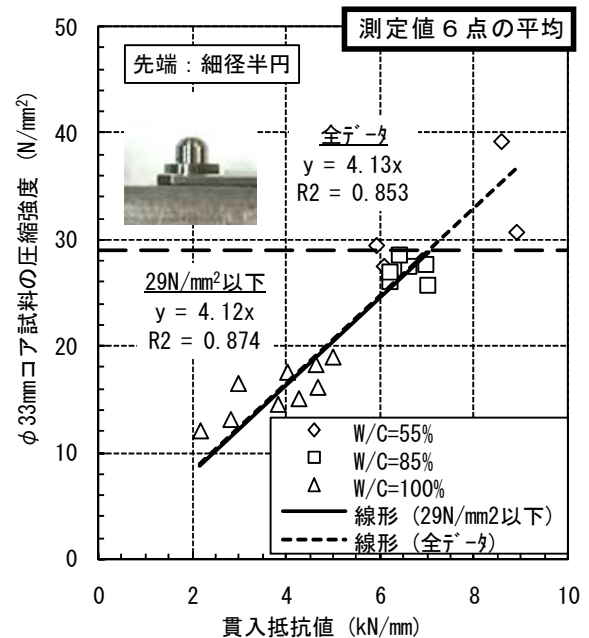


図-4 貫入抵抗値とコンクリート強度の関係 [測定値6点の平均]

*1 川崎地質 (株) 事業本部保全技術部保全技術グループ課長代理 工修 (正会員)

*2 戸田建設 (株) 土木営業統轄部環境ソリューション部主管 工修 (正会員)

*3 北海道大学大学院工学研究科環境フィールド工学専攻

*4 北海道大学大学院工学研究科教授 工博

試験装置の荷重先端を孔壁に貫入させる（図-2）ことにより得られる荷重と貫入量の関係から“貫入抵抗値”を求める（図-3）ものである。

これまでに実施したコンクリート供試体を用いた荷重試験の結果からは、荷重先端に直径 6mm の「細径半円」を用い、同条件の 6 点の貫入抵抗値を測定すれば、得られた貫入抵抗値をおよそ 4 倍した値が、荷重点付近のコンクリート強度と推定できることが分かっている（図-4）¹⁾。

本稿では、荷重試験による破壊状況を X 線 CT 装置により観察し、その破壊挙動について考察する。

2. X 線 CT 装置による破壊状況の観察

2.1 観察用試料作製

X 線 CT 装置による破壊状況の観察用試料は、水セメント比を 55% (圧縮強度 56.9N/mm²), 85% (27.2N/mm²), 100% (17.7N/mm²) としたφ50×L100mm のモルタル円柱供試体の天端面（端面研磨）に「細径半円」を荷重した後（写真-1），荷重点周辺にエポキシ樹脂を含浸

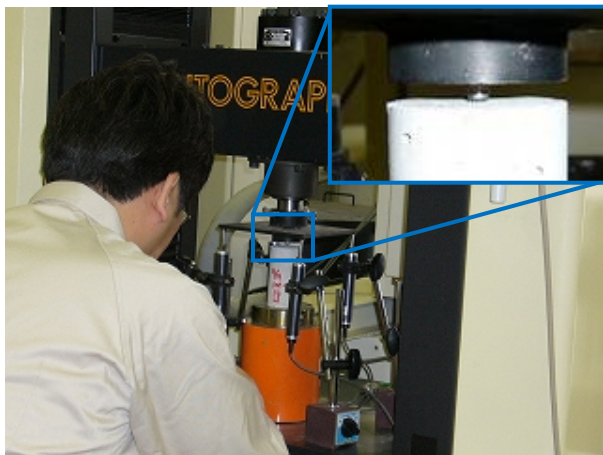


写真-1 モルタル供試体への荷重試験状況

表-1 モルタル円柱供試体の使用材料

材料名	種類	産地・品名	密度 (g/cm ³)
セメント	普通	太平洋セメント株	3.16
水	地下水	つくば市	1.00
細骨材	陸砂	外浪逆浦産 (70%)	2.60
	砕砂	葛生産 (30%)	2.67

表-2 モルタル円柱供試体の配合

水セメント比 (%)	単位量 (kg/m ³)			
	セメント	水	細骨材	
			陸砂	砕砂
55	507	279	887	390
85	328	279	990	436
100	279	279	1018	448

させ、荷重点を含むように約 10~20mm 角 (W/C=100% のみ約 20mm 角とし、予備実験を行った) に切断することにより作製した（写真-2）。

なお、W/C=55%の試料は、モルタル円柱供試体が破壊に至ったものであり、試料中に 3 本のひび割れを含んだ状態である（写真-2の最上段の写真）。

モルタル円柱供試体の使用材料を表-1に、配合を表-2に示す。水セメント比 85%及び 100%のモルタル供試体を作製する場合、材料分離が生じやすいが（実際に、材料分離気味であった）、本実験では圧縮強度を変化させることに重点を置いていることから、増粘剤等の添加

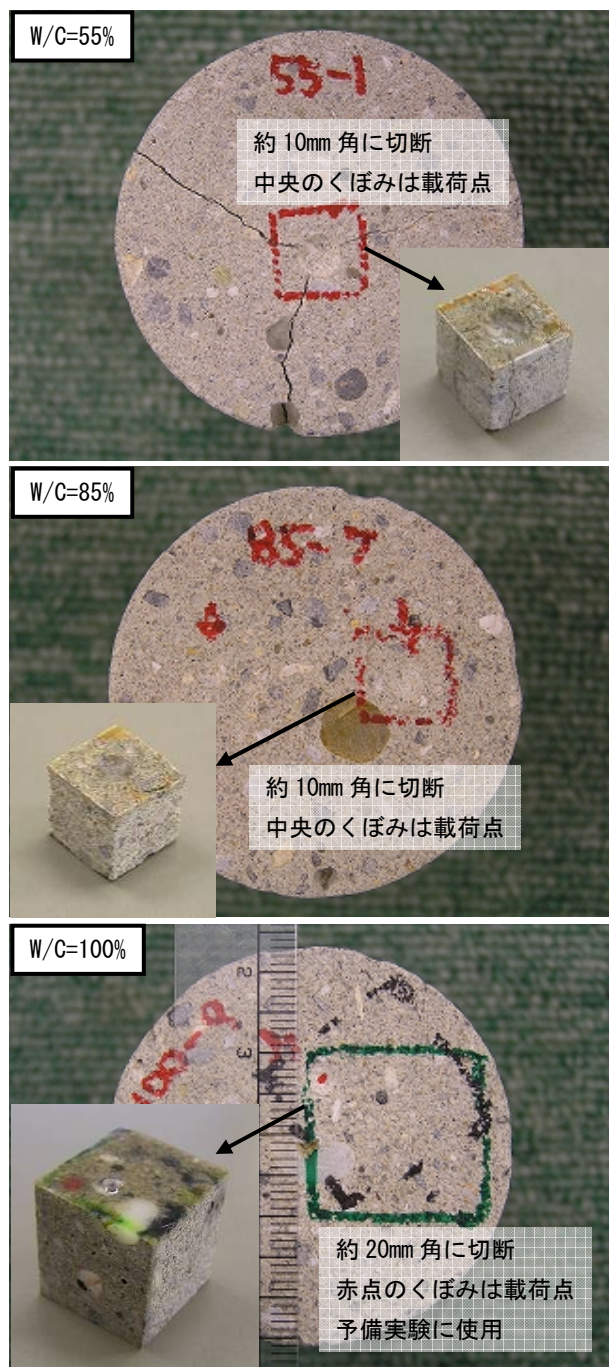


写真-2 観察用試料



写真-3 X線CT装置

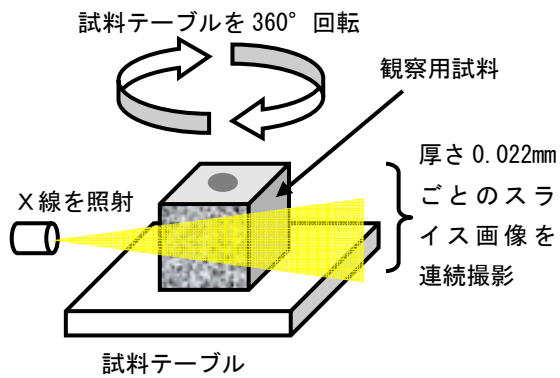


図-5 X線CT装置による観察(撮影)の概要

は行わずに供試体を作製した。なお、試料名は、3つの圧縮強度レベルの呼称として水セメント比 W/C=55%, 85%, 100%を用いた。

2.2 観察方法

観察には、試料を非破壊・非接触で観察できる X 線 CT 装置 (写真-3) を用いた。この装置を用いることによって、試料中の密度の違いを可視化 (色の明暗) できることから、観察用試料の載荷点近傍と周辺の状態を観察し、比較した。

観察は、観察用試料を試料テーブルに置き、X線を照射しながら360°回転させることにより行った(図-5)。このような観察(撮影)を試料の上端(載荷点のある面)から厚さ0.022mmごとに行い、1試料につき390枚のスライス(平面透過)画像を得た。

2.3 観察結果

「細径半円」により載荷したモルタル円柱供試体から切り出した観察用試料の X 線 CT 装置による観察の結果、写真-4 (W/C=55%), 写真-5 (W/C=85%, 100%) に示すスライス画像が得られた。スライス画像には、気泡等の空隙が黒く、セメントペーストが灰色に、骨材が白っぽく表示されている。

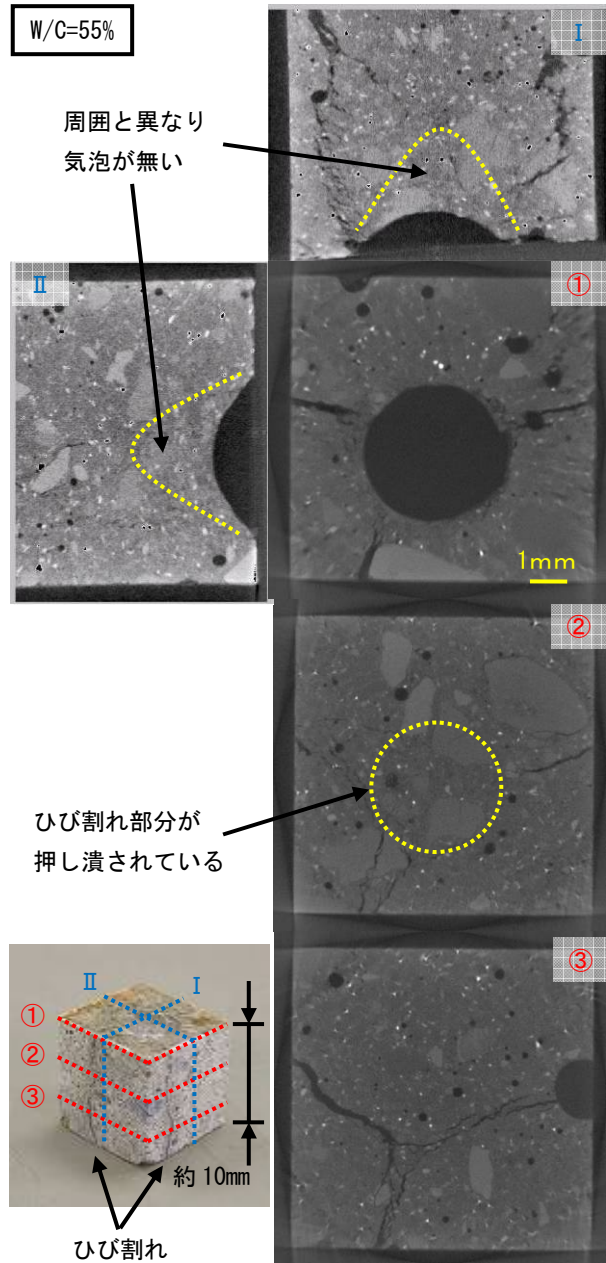


写真-4 試料観察画像 W/C=55%

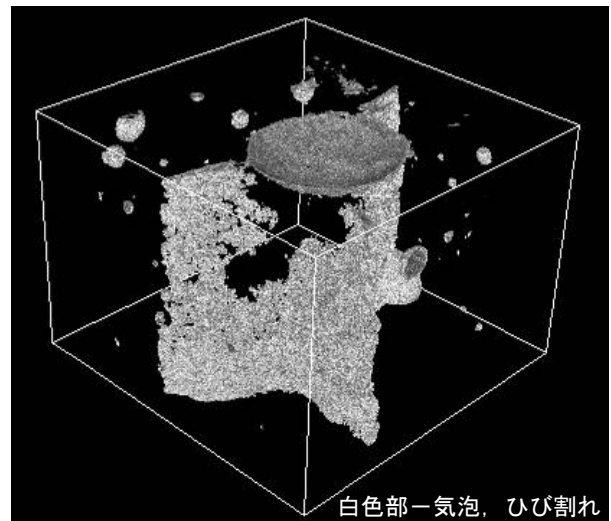


図-6 三次元加工による気泡、ひび割れの抽出

(1) ひび割れ周辺の状態

W/C=55%の試料(写真-4)は、荷重点から3方向にひび割れが広がっており、試料側面において肉眼でひび割れが確認できる。X線CT装置によるスライス画像ではひび割れや気泡は黒く見えるが、荷重面から約8mm下の断面③には約120度の角度で分岐した3本のひび割れが確認できる。しかしながら、荷重面の断面①や中間の断面②では、ひび割れが荷重点周辺で途切れており、連続していない。

図-6は、スライス画像を三次元加工し、空隙やひび割れを抽出した図である。図中の白色部分が空隙やひび割れを示しているが、写真-4と同様に荷重点周辺や直下(数mmの範囲)にひび割れを示す部分(白色部)が見られない。

これは、荷重点周辺や直下のモルタルが荷重によって

圧密され、ひび割れを押し潰したために生じたと推測される。但し、その影響範囲は浅く、数mm程度である。

(2) 荷重点周辺の状態

写真-4や写真-5に示した各観察試料のスライス画像には、供試体作製時に混入した気泡が黒色に表示され、試料中に点在している様子が見て取れる。しかしながら、荷重点直下に気泡は無く、周囲と異なった状態である。

気泡が無い領域は、スライス画像では荷重点直下に三角形に広がっているように見え、図-6の三次元画像では円錐状(コーン状)となっているようにも見える。これは、荷重によってできた圧密領域を示していると考えられ、元々存在した気泡が押し潰されたことにより生じたと推測される。

なお、W/C=100%の試料のスライス画像には、荷重点直下の気泡が潰れたり、骨材にひび割れが生じた状態が確認できる。これは、圧密途中の状態を示していると推測され、この状態から更に荷重すると(荷重点が拡大すると)、圧密状態(押し潰された状態)となると考えられる。

(3) 影響範囲

荷重による圧密領域は、気泡の分布状況から、荷重点周辺や直下数mmのごく限られた範囲と考えられる。このため、荷重試験による構造物への影響は、ほとんど無いと言える。

3. 孔内局部荷重試験における貫入抵抗値とコンクリート強度との関係に関する考察

3.1 破壊プロセスのモデル化

孔内局部荷重試験は、コンクリート構造物に削孔したコア孔壁に荷重先端を貫入させ、得られた荷重と貫入量の関係から貫入抵抗値を求め、コンクリート強度を推定するものである。

荷重先端によりコンクリート表面に一軸荷重した場合には、荷重(厳密には荷重表面力)が小さいと、コンクリートの弾性応答により、荷重域のコンクリートは沈下する。一方、荷重がある程度以上となると、荷重先端直下のモルタルが圧縮降伏して塑性化し、これに伴い荷重先端は貫入される。この時の荷重先端の貫入量には、塑性変形に関係した荷重先端の貫入量と、弾性変形に起因した変位量の両者が含まれていることになる。

ここで、強度と弾性率はほぼ比例関係にあることから、塑性変形量と弾性変形量も比例すると考えることができる。更に、塑性変形量は弾性変形量に比較して十分大きいと考えられることなどから、近似的には、試験装置で測定される荷重先端の貫入量は、塑性変形による荷重先端の貫入量にほぼ相当すると取り扱うことができる。

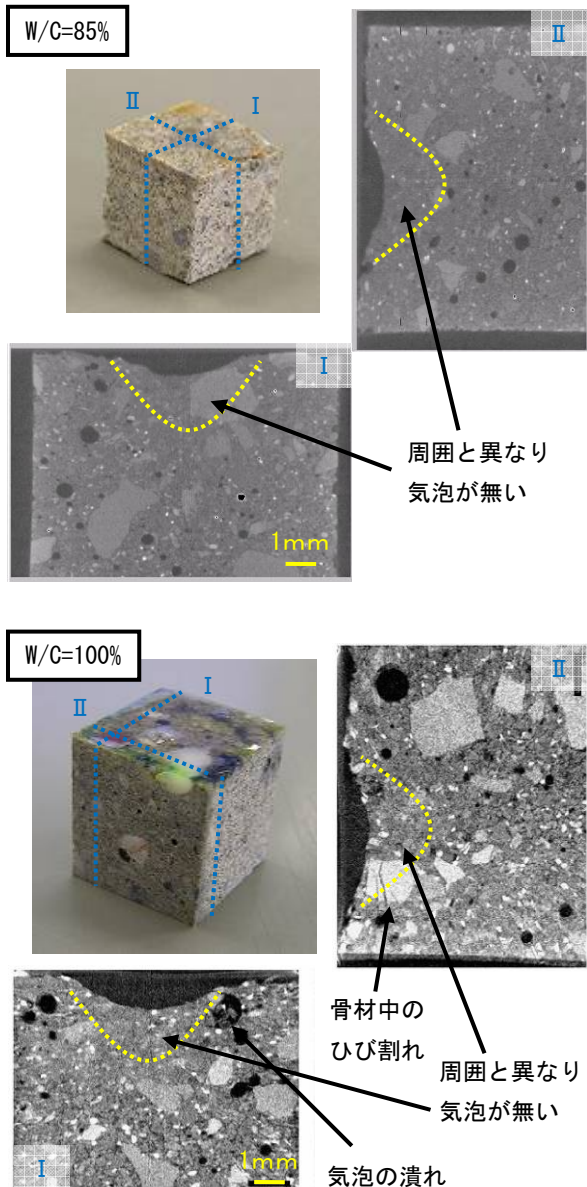


写真-5 試料観察画像 W/C=85%, 100%

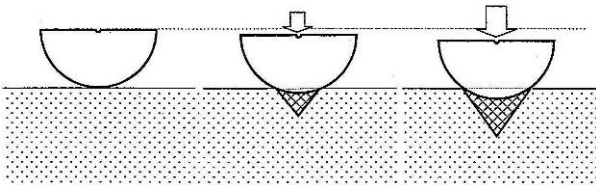


図-7 荷重先端の貫入とコンクリート状態変化

すなわち、図-7に示すように、荷重に伴い、荷重先端とコンクリートの接触部の直下に受動接触面積が増大し、その結果、接触部直下の塑性域が拡大する。すなわち、コンクリートは塑性挙動を示すが、これに伴って荷重先端の接触面積が増大するため、見かけ上塑性的な平衡状態が達成され、貫入量の増大に伴って荷重も増大する。

以上のモデルに基づくと、貫入抵抗値とコンクリート強度との関係を定式化するためには、荷重先端の形状を考慮した荷重先端の貫入量と接触面積との関係、コンクリートの塑性状態における支持力等を明らかにしたうえで、荷重と貫入量との関係ならびに貫入抵抗値とコンクリート強度との関係を分析する必要がある。

3.2 貫入量と荷重面積との関係

「細径半円」の半径 R ($=3\text{mm}$)、貫入量を u とし、荷重先端がコンクリートに接触する領域を荷重領域とすると、荷重領域半径 r は式(1)のようになる (図-8)。

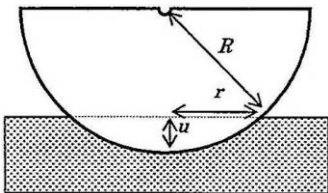


図-8 荷重先端と貫入量

$$r^2 = R^2 - (R - u)^2 = 2Ru - u^2 \quad (1)$$

したがって、荷重面積 A は、

$$A = \pi r^2 = 2\pi Ru \left(1 - \frac{u}{2R}\right) \quad (2)$$

ここで、

$$\frac{u}{2R} \ll 1 \quad \text{であれば、} \quad A \cong 2\pi Ru \quad (3)$$

3.3 極限支持力の推定

半無限固体表面の有限領域を載荷する問題で、固体が塑性挙動する場合の耐力を求める問題は、材料学におけるポンチ打ち込みの支圧力問題、土質力学における基礎の支持力問題等としてよく知られている。これらは対象とする材料が異なるので応用分野も異なるが、いずれも材料を塑性体と近似して荷重極限荷重を求めるものである。そこで、これら塑性理論に基づいて表面荷重にお

ける極限支持力を推定する方法について考える。

Terzaghi は、基礎の極限支持力 q_u (N/mm^2) を式(4)で与えている。

$$q_u = \alpha c N_c(\phi) \quad (4)$$

但し、 c は粘着力、 α は形状係数で円形の場合 $\alpha=1.3$ である。 $N_c(\phi)$ は同一断面寸法の 2 次元帯状基礎に対する支持力係数であり、内部摩擦角 ϕ に関する無次元関数である。特に、Terzaghi は $\phi=\phi$ と与えられると仮定して、支持力係数を式(5)で与えている。

$$N_c(\phi) = \cot \phi \left[\frac{\exp\{(3\pi/2 - \phi) \tan \phi\}}{1 - \sin \phi} - 1 \right] \quad (5)$$

式(5)によると、 $\phi=35^\circ$ のとき $N_c=57.8$ 、 $\phi=40^\circ$ のとき $N_c=95.7$ である。

これに対して、Prandtl は $\phi=\pi/4 + \phi/2$ と仮定して、支持力係数を式(6)で与えている。

$$N_c(\phi) = \cot \phi \left[\exp(\pi \tan \phi) \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} \right) - 1 \right] \quad (6)$$

式(6)によると、 $\phi=35^\circ$ のとき $N_c=46.1$ 、 $\phi=40^\circ$ のとき $N_c=75.3$ である。

当初は、底面が粗い場合は Terzaghi の仮定が、滑らかな場合は Prandtl の仮定が成立すると解釈されており、土の力学における基礎支持力算定の問題では Terzaghi の支持力係数が用いられていた。しかしながら、その後、底面の粗さ・滑らかさに関わらず $\phi=\pi/4 + \phi/2$ となること、言い換えれば、材料に関わらず Prandtl の仮定が妥当であることが明らかにされている⁴⁾。

そこで、ここでは支持力係数 N_c は Prandtl の支持力係数 (式(6)) を用い、荷重域形状の影響については Terzaghi の形状係数を用いた表現 (式(4)) を用いることとする。

なお、X 線 CT 装置による観察で荷重点直下に見られた圧密領域は、図-9 のくさび形の領域を観察したものと考えられる。

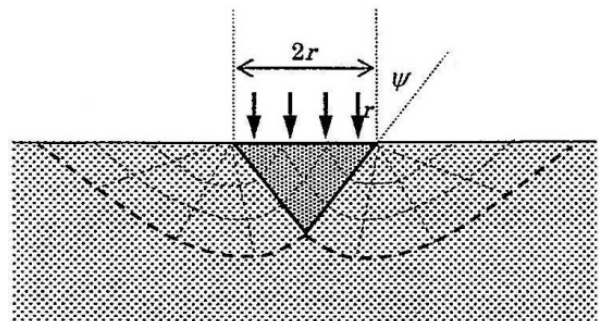


図-9 支持力図

コンクリート強度 S_c と粘着力 c との関係は、

$$c = \xi(\phi) S_c \quad (7)$$

$$\xi(\phi) = \frac{1 - \sin \phi}{2 \cos \phi} \quad (8)$$

である。特に、 $\phi=35^\circ$ のとき $\xi=0.26$ 、 $\phi=40^\circ$ のとき $\xi=0.23$ となる。従って、極限支持力 q_u を圧縮強度 S_c を用いて表すと式(9)となる。

$$q_u = \alpha \xi(\phi) N_c(\phi) S_c \quad (9)$$

3.4 荷重と貫入量との関係

載荷領域周囲では、コンクリートは降伏して塑性釣合い状態にあり、その支持力が上記の極限支持力で与えられると仮定すると、全荷重 P は、

$$P = q_u A \quad (10)$$

となり、

$$P = (\alpha \xi(\phi) N_c(\phi) S_c) (2\pi R u) \left(1 - \frac{u}{2R}\right) \\ = Ku \left(1 - \frac{u}{2R}\right) \quad (11)$$

但し、

$$K = 2\pi \alpha R \xi(\phi) N_c(\phi) S_c \quad (12)$$

である。

特に、 $\frac{u}{2R} \ll 1$ であれば、簡単な一次式となる。

$$P \cong Ku \quad (13)$$

ここで、式(11)及び式(13)は、荷重-貫入量曲線は貫入量が載荷先端半径に比較して小さい範囲では直線となること、貫入量が比較的大きくなると上に凸の曲線となることを示している。

3.5 貫入抵抗値とコンクリート強度との関係

「細径半円」の場合について、貫入抵抗値とコンクリート強度との関係を考察する。局部載荷試験では、荷重-貫入量曲線の勾配から貫入抵抗値を求め、この貫入抵抗値からコンクリート強度を推定している。特に、室内試験における貫入抵抗値は、貫入量が比較的小さい範囲のデータから求められていると考え、貫入抵抗値は、式(12)の K に相当する。従って、式(12)から、貫入抵抗値を用いたコンクリート強度評価式は式(14)のようになる。

$$S_c = \frac{1}{2\pi \alpha R \xi(\phi) N_c(\phi)} K \quad (14)$$

ここで、「細径半円」の $R=3\text{mm}$ であるので、

$$S_c = \frac{1}{6\pi \alpha \xi(\phi) N_c(\phi)} K \quad (15)$$

となる。

ここで、コンクリートの内部摩擦角を文献5) ($35^\circ \leq \phi \leq 40^\circ$) を参考として $\phi=35^\circ$ とすると(支持力係数 N_c は Prandtl の式(6))、コンクリート強度 S_u (N/mm^2) と

貫入抵抗値 K (kN/mm) の関係は、式(15)により $S_u=3.4K$ となる。これは、室内試験により求められた係数4とほぼ一致する値である。

なお、このような関係は、理論上いかなる強度のコンクリートに対しても成り立つと考えられるが、室内試験では、コンクリート強度が高いほど貫入抵抗値との相関性が弱くなる傾向にある(図-4)。このため、載荷試験による強度推定の適用範囲は、コンクリート強度 29N/mm^2 以下とした¹⁾。従って、本章により証明された関係についても、 29N/mm^2 以下のコンクリートを適用範囲とする。

4. まとめ

- (1) 孔内局部載荷試験によるコンクリート強度の推定の過程には、土質力学における基礎の支持力問題と同様の考え方を適用できることから、本試験による強度評価が妥当であることを証明することができた。
- (2) X線CT装置を用いた観察により、載荷点直下に圧密領域が確認された。これは、基礎の支持力問題における基礎直下のくさび形の領域を、実際に観察したものと考えられる。

参考文献

- 1) 皿井剛典, 田中 徹, 清水陽一郎, 高橋 輝: 孔内局部載荷試験によるコンクリート性状の把握に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.2, pp.709-714, 2007.7
- 2) 皿井剛典, 高橋 輝, 田中 徹, 清水陽一郎: コア孔を利用した孔内局部載荷試験装置の開発, 土木学会第61回年次学術講演会概要集 6-129, pp.257-258, 2006.9
- 3) 清水陽一郎, 田中 徹, 高橋 輝, 皿井剛典: 孔内局部載荷試験によるコンクリート構造物の強度推定方法に関する研究, 土木学会第61回年次学術講演会概要集 6-130, pp.259-260, 2006.9
- 4) (社)地盤工学会(東京), 地盤工学数式入門, pp.185, 2001
- 5) 園田恵一郎, 蛭名貴之: パーフォボンドリブにおけるコンクリートのせん断強度特性に関する極限解析理論による考察, 土木学会論文集 No.781/V-66, pp.213-218, 2005.2