

報 告

[1037] 若材令コンクリートの強度推定法

正会員○宇野洋志城 (佐藤工業中央技術研究所)

正会員 弘中義昭 (佐藤工業中央技術研究所)

1 はじめに

現在シールド工法分野では、セグメントの代りに場所打ちコンクリートを使用するECL工法の開発が進められている。その1つに、覆工体を鉄筋コンクリートとし、リング毎に打設したコンクリートを加圧しながらシールドを推進するシステムがある<sup>1)</sup>。この種のシステムでは、推進加圧することによりテールポイドにコンクリートが充填され、周辺地盤のゆるみ等の悪影響を少なくできる特長を有するが、リング毎に鉄筋、内型枠組み立て等の作業に伴い妻型枠であるプレスリングの脱型が必要となり、脱型時期の判定が品質、工程管理上重要である。通常、脱型時におけるコンクリートの強度管理は打設後の経過時間および強度管理用供試体(現場養生)による圧縮強度をもとに行っているが、施工管理上は現場コンクリートによる直接的な強度管理が望ましい。しかし、若材令時における極めて低強度のコンクリートの非破壊的な現場強度推定方法として規格・規準化されたものはない<sup>2) 3) 4)</sup>。圧縮強度10kgf/cm<sup>2</sup>程度の低強度を対象とした試験としては、土質分野における貫入方式、回転方式等が規格・規準化されているにすぎない<sup>5) 6)</sup>。本報告は、若材令コンクリートの強度推定法の確立を目的とし、貫入方式による圧縮強度推定の可能性について室内実験により検討を加えたものである。

2 実験概要

2.1 実験内容

貫入方式による圧縮強度推定方法の基本概念は、若材令時のコンクリート表面に荷重を載荷したときに生じるくぼみの大きさがコンクリート強度の大小により異なることに着目し、そのくぼみの径と圧縮強度との関係を求めようとするものである。このような貫入方式により圧縮強度を推定する場合、粗骨材の有無が推定精度に影響を及ぼすと考えられる。したがって、粗骨材が存在してもそれに影響を受けない推定方法の検討を行う必要がある。実験は、貫入方式による圧縮強度推定の可能性の確認を目的としてモルタルによる予備実験Ⅰと、最適な貫入部の絞り込みを目的とした予備実験Ⅱおよび推定精度に影響を及ぼすとして選定した4つの因子(載荷荷重、垂直精度、細骨材率、強度発現過程)に関する検討を目的とした本実験とに分けられる。予備実験Ⅰと本実験の因子と水準を表-1に示す。

表-1 因子と水準(予備実験Ⅰ、模範)

ケースNo.	1	2	3	4	5	6	7	8
配合 No.	1			4	5	2	3	
試料	モルタル	コンクリート			モルタル			
載荷荷重(kgf)	10	30	10					

(1) 予備実験Ⅰ(ケースNo.1)

予備実験Ⅰでは、貫入方式による圧縮強度推定の可能性の確認を目的としてモルタルにより実験(ケースNo.1)を行った。なお、モルタルは表-3に示す配合のコンクリート(配合No.1)を5mmふるいによるウェットスクリーニングを行って作成した。実験装置は改良型プロクター貫入試験装置(2.2で詳述)を使用し、貫入部には半径R=50mmの半球を取付けて、載荷荷重を10kgfとして実験を行った。

表-2 因子と水準(予備実験Ⅱ)

因子	水準
貫入部形状	半球、円錐
貫入部半径(mm)	25, 50, 75
載荷荷重(kgf)	20, 30

(2) 予備実験Ⅱ

予備実験Ⅱでは、最適な貫入部の絞り込みを目的とした実験を行った。実験の因子と水準を表-2に示す。なお、実験装置は改良型プロクター貫入試験装置を使用した。

### (3) 本実験 (ケースNo. 2~8)

本実験では、予備実験Ⅱの最適な貫入部の絞り込み結果から選定した貫入部を取付けた実験装置を使用し、推定精度に影響を及ぼすとして選定した4つの因子(載荷荷重、垂直精度、細骨材率、強度発現過程)に関する検討を目的とした実験(ケースNo. 2~8)を行った。ただし、強度発現の差をもたらす単位セメント量の影響と粗骨材の影響とを区別するためにケースNo. 7, 8はモルタルを対象にした。モルタルは表-3に示す配合のコンクリート(配合No. 2, 3)を5mmふるいによるウェットスクリーニングを行って作成した。なお、実験装置はケースNo. 2, 3では低強度コンクリート用貫入試験装置(2.2で詳説)、ケースNo. 4~8では改良型プロクター貫入試験装置を使用した。

## 2. 2 実験装置

実験に使用した低強度コンクリート用貫入試験装置(写真-1)は、従来の土質試験用の貫入試験装置を低強度コンクリートに適用できるように、貫入部の形状および載荷荷重に改良を加えたものである。また、改良型プロクター貫入試験装置は、従来のプロクター貫入試験装置本体の先端に今回使用した貫入部を取付け、載荷荷重の垂直性を保てるようにしたものである。試験装置の貫入部は取替えが自在にでき、最大載荷荷重は30kgf, 60kgfの2種類から選択できる。なお、くぼみの径の測定精度を高めるために、貫入部にピアノ線(φ=0.5mm)により突起状の目印を十字型にハンダ付け加工してある。

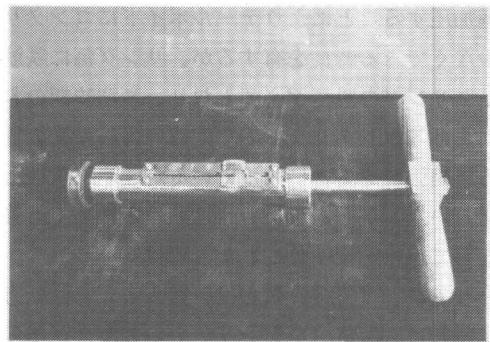


写真-1 低強度コンクリート用貫入試験装置

表-3 コンクリートの配合

配合No.	G max (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量* (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤
						W	C	S	G	
1	25	18±2.5	4±1	50	47	182	364	816	934	1456
2				45	47	182	404	802	918	1818
3				55	47	182	331	828	950	1159
4				50	42	182	364	728	1024	1274
5				50	52	182	364	904	846	1638

ただし、C:普通ポルトランドセメント、混和剤:AE減水剤 単位量\* 混和剤は g/m<sup>3</sup>

## 2. 3 コンクリートの配合および使用材料

使用したコンクリートの配合を表-3に示す。また、予備実験Ⅰと本実験で使用したモルタルは、表-3の配合No. 1, 2, 3のコンクリートを5mmふるいによるウェットスクリーニングを行って作成した。

## 2. 4 実験方法

供試体作成に用いたモールドはφ10cm×20cmの鋳物モールドとした。貫入試験は1つの供試体について3回行ない、その平均値をくぼみの大きさとした。以下に予備実験Ⅰ、予備実験Ⅱ、本実験に共通な実験手順を示す。

- ①加圧モールド試験装置により10kgf/cm<sup>2</sup>で10分間加圧して、圧縮強度推定用供試体を作成する。
- ②作成後の供試体は貫入試験を行なうまで20℃恒温室内で養生する。
- ③モールドをつけたままの供試体底面部分のコンクリート表面に貫入試験装置を押し当て所定の荷重を載荷して、くぼみを3カ所つける。なお、このときのくぼみに残る十字型目印の跡が対称であることを確認して貫入試験装置の垂直性のチェックとする。
- ④各十字型目印の跡の大きさをノギスで0.05mm単位まで測定して、平均値をそのコンクリートの

くぼみの径とする。

⑤供試体を直ちにモールドから脱型して圧縮強度試験を行う。

⑥くぼみの径と圧縮強度との関係を求める。

### 3 実験結果および考察

#### 3.1 貫入方式による圧縮強度推定の可能性(ケースNo.1)

図-1に配合No.1を使用したモルタルの場合(ケースNo.1)におけるくぼみの径と圧縮強度との関係を示す。その結果から得られるくぼみの径D(mm)と圧縮強度 $\sigma$ (kgf/cm<sup>2</sup>)との関係を式-(1)に示す。

$$\sigma = 17.0 \times e^{-0.128 \times D} \quad (1.27 \leq \sigma \leq 8.55, \text{相関係数: } r = -0.933, \text{データ数: } n = 71, W/C = 50\%) \quad \text{式-(1)}$$

#### 3.2 最適な貫入部の形状および寸法

図-2に貫入部を半径R=75mmの円錐とした場合、図-3には貫入部を半径R=50mmの半球とした場合におけるくぼみの径と圧縮強度との関係をそれぞれ示す。表-2に示す6種類の貫入部形状および寸法を比較すると、貫入部形状を円錐とした場合、データのばらつきが大きく、くぼみの径と圧縮強度の間には明確な関係は認められなかった。この傾向は半径R=75mmでは最も顕著になった。これは貫入部が傾くことによってくぼみの径に誤差が生じたからであり、半径の増加とともに誤差も大きくなるからと考えられる。一方、半径R=25mmでは貫入深さが増すために、コンクリート表面の損傷度が增大するとともに圧縮強度の変化に対応したくぼみの径の変化量が小さくなり、測定精度が低下した。次に、貫入部形状を半球とした場合、データのばらつきは円錐の場合と比較すると小さいが、半径R=25mmでは円錐の場合と同様にコンクリート表面の損傷が見られ、くぼみの径の

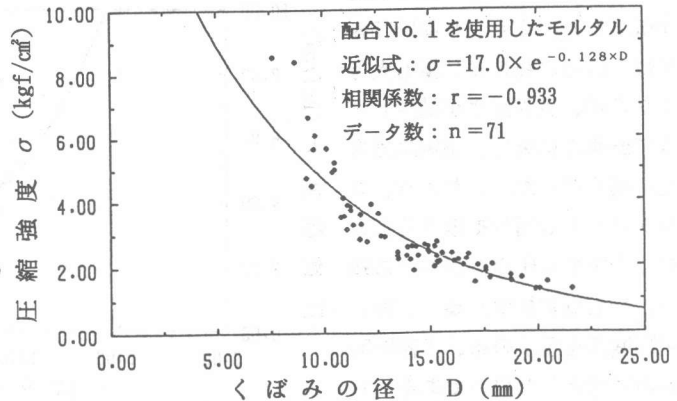


図-1 くぼみの径と圧縮強度との関係(予備実験I, W/C=50%)

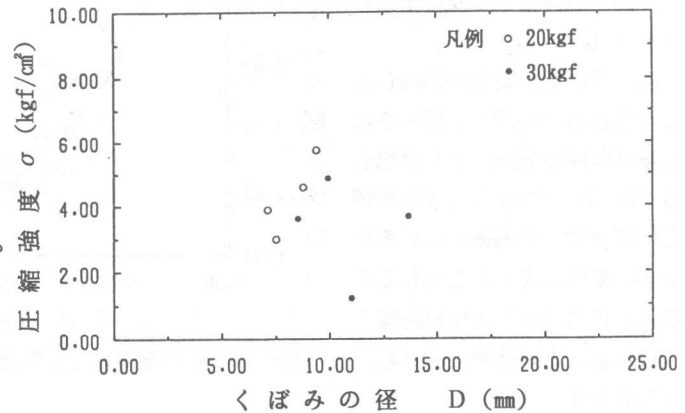


図-2 くぼみの径と圧縮強度との関係(予備実験II, 半径R=75mmの円錐)

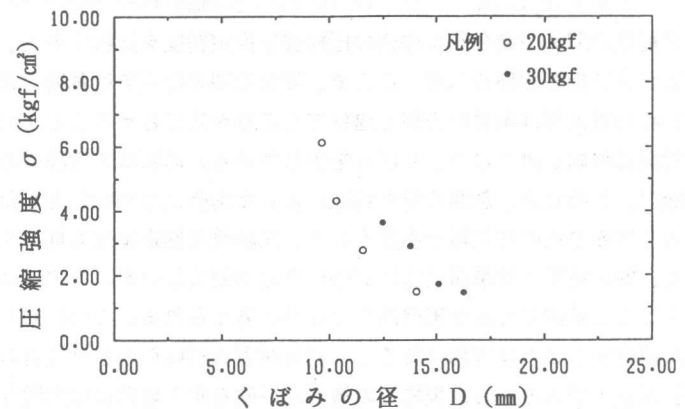


図-3 くぼみの径と圧縮強度との関係(予備実験II, 半径R=50mmの半球)

変化量も小さくなり、測定精度が低下した。また、半径R=75mmではくぼみの径の変化量も大きくなるが、貫入深さが減少しすぎて鮮明さに欠け、測定誤差を生じ易くなった。これより、コンクリート表面を損傷することなく十字型目印の跡が鮮明に残り、最も測定精度が高く、強い相関関係を示すのは、半径R=50mmの半球とした場合である。したがって、本実験では半径R=50mmの半球を取付けた実験装置を使用することとした。

### 3. 3 載荷荷重の及ぼす影響 (ケースNo. 2, 3)

図-4に載荷荷重を30kgfとした場合(ケースNo.2)、図-5には載荷荷重を10kgfとした場合(ケースNo.3)におけるくぼみの径と圧縮強度との関係をそれぞれ示す。その結果から得られるくぼみの径D (mm)と圧縮強度 $\sigma$  (kgf/cm<sup>2</sup>)との関係を式-(2)、(3)に示す。

$$\bullet \sigma = 26.2 \times e^{-0.172 \times D} \quad (0.49 \leq \sigma \leq 7.03, \text{相関係数: } r = -0.907, \text{データ数: } n = 124, \text{載荷荷重 } 30\text{kgf}) \quad \text{式-(2)}$$

$$\bullet \sigma = 16.7 \times e^{-0.196 \times D} \quad (0.49 \leq \sigma \leq 8.79, \text{相関係数: } r = -0.856, \text{データ数: } n = 121, \text{載荷荷重 } 10\text{kgf}) \quad \text{式-(3)}$$

2種類の荷重を載荷した場合の圧縮強度推定精度を比較すると、載荷荷重を30kgfとした場合の方が強い相関関係を示す。ここで、硬化初期の時点では載荷荷重の大小によらず(今回の場合は10kgfと30kgf)貫入部は粗骨材を押し返けてくぼみを生じさせることができるが、強度の発現につれて粗骨材は移動し難くなり、くぼみを生じさせるためにはある程度の載荷荷重が必要になる(今回の場合は30kgf)。このため、載荷荷重を10kgfとした場合には30kgfとした場合に比べて強度の増加に対するくぼみの径の変化量が小さくなり、圧縮強度推定精度も低下するものと考えられる。したがって、推定精度上は載荷荷重は30kgfの方が望ましいが、人力により荷重30kgfを水平方向に載荷することは困難であり実用的ではないと考えられる。これに対して、荷重10kgfならば水平方向に載荷することは容易であるし、載荷荷重を10kgfとした場合の圧縮強度推定精度も相関係数が0.85以上であるから、現場での適用を目的とする場合には問題ない。

### 3. 4 垂直精度の及ぼす影響 (ケースNo. 4)

垂直性が保たれる改良型プロクター貫入試験装置を使用した場合に得られるくぼみの径D (mm)と圧縮強度 $\sigma$  (kgf/cm<sup>2</sup>)との関係を式-(4)に示す。

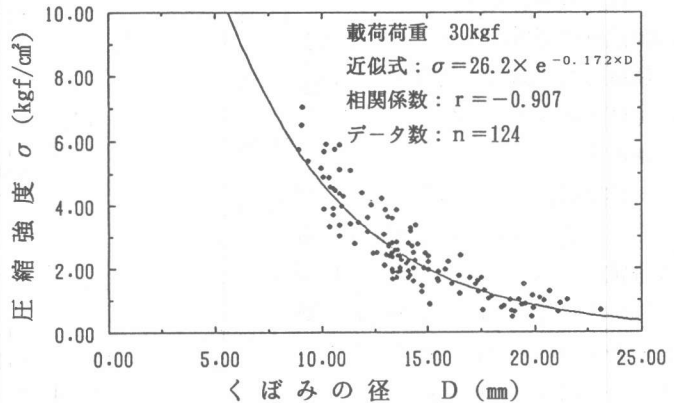


図-4 くぼみの径と圧縮強度との関係(本実験、載荷荷重30kgf)

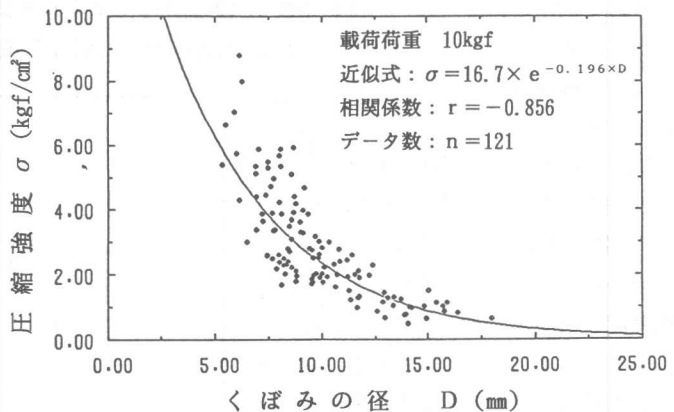


図-5 くぼみの径と圧縮強度との関係(本実験、載荷荷重10kgf)

$$\sigma = 15.3 \times e^{-0.162 \times D} \quad (0.63 \leq \sigma \leq 5.45, \text{相関係数: } r = -0.783, \text{データ数: } n = 107) \quad \text{式-(4)}$$

ここで、垂直精度に劣る低強度コンクリート用貫入試験装置を使用した場合の式-(3)とコンクリート面と貫入部との垂直性が保たれる機構の改良型プロクター貫入試験装置を使用した場合の式-(4)とを比較すると、式-(3)の方が強い相関関係を示すが大きな差は認められず、現場コンクリートの圧縮強度推定に貫入方式を適用する場合には、貫入時の垂直精度の差が推定精度に及ぼす影響は小さい。

### 3.5 細骨材率(s/a)の及ぼす影響(ケースNo. 5, 6)

細骨材率(s/a)が42%と52%のコンクリートを使用した場合に得られるくぼみの径D(mm)と圧縮強度 $\sigma$ (kgf/cm<sup>2</sup>)との関係を式-(5), (6)に示す。

$$\sigma = 15.1 \times e^{-0.174 \times D} \quad (0.43 \leq \sigma \leq 3.88, \text{相関係数: } r = -0.816, \text{データ数: } n = 62, s/a = 42\%) \quad \text{式-(5)}$$

$$\sigma = 12.0 \times e^{-0.154 \times D} \quad (0.62 \leq \sigma \leq 4.89, \text{相関係数: } r = -0.800, \text{データ数: } n = 72, s/a = 52\%) \quad \text{式-(6)}$$

ここで、コンクリートから粗骨材を取り除いて作成したモルタルを対象にした場合には載荷荷重を10kgfとしても相関係数は0.90程度で高い精度の圧縮強度推定が可能であるのに対して、コンクリートを対象にした場合には相関係数は0.80程度となり、推定精度が劣るのは粗骨材の及ぼす影響と考えられる。しかし、細骨材率が異なる3種類の配合(s/a=42, 47, 52%)のコンクリートを使用した場合の式-(5), (3), (6)を比較すると大きな差は認められず、細骨材率(s/a)を42~52%の範囲で変化させたコンクリートを対象とする場合には、細骨材率の差が推定精度に及ぼす影響は小さい。

### 3.6 強度発現過程の及ぼす影響(ケースNo. 7, 8)

単位水量一定で水セメント比(W/C)が45%と55%のモルタルを使用した場合に得られるくぼみの径D(mm)と圧縮強度 $\sigma$ (kgf/cm<sup>2</sup>)との関係を式-(7), (8)に示す。

$$\sigma = 8.01 \times e^{-0.083 \times D} \quad (1.11 \leq \sigma \leq 3.22, \text{相関係数: } r = -0.883, \text{データ数: } n = 60, W/C = 45\%) \quad \text{式-(7)}$$

$$\sigma = 11.9 \times e^{-0.110 \times D} \quad (1.17 \leq \sigma \leq 4.08, \text{相関係数: } r = -0.943, \text{データ数: } n = 56, W/C = 55\%) \quad \text{式-(8)}$$

ここで、単位水量一定で単位セメント量を変えることにより強度発現過程に差ができる。強度発現過程の差が圧縮強度推定に影響を及ぼすならば、それぞれの配合に対応する固有の実験式が得られると考えられる。しかし、強度発現過程の異なる3種類の配合(W/C=45, 50, 55%)のモルタルを使用した場合の式-(7), (1), (8)を比較すると大きな差は認められず、単位水量一定で水セメント比(W/C)を45~55%の範囲で変化させたコンクリートを対象とする場合には、強度発現過程の差が推定精度に及ぼす影響は小さい。

### 3.7 圧縮強度推定式

以上の結果から、本実験範囲内のコンクリートを対象とする場合には、配合の違いによる圧縮強度推定値の変動は少ない。図-6に載荷荷重を10kgf/cm<sup>2</sup>としたすべての場合(ケースNo. 3~6)におけるくぼみの径と圧縮強度との関係を示す。その結果から得られるくぼみの径D(mm)と圧縮強度 $\sigma$ (kgf/cm<sup>2</sup>)との関係

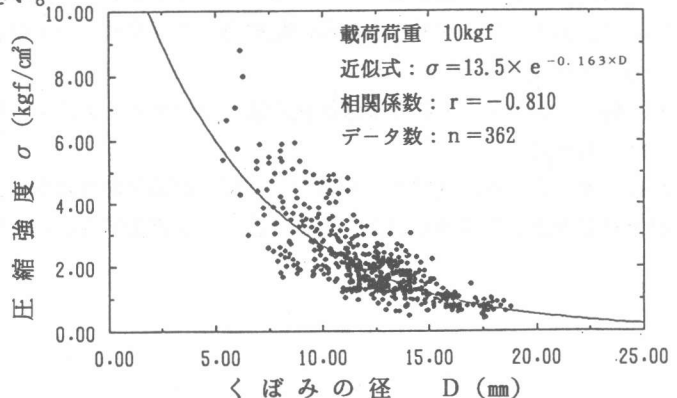


図-6 くぼみの径と圧縮強度との関係(模範, ケースNo. 3~6)

を式-(9)に示す。

$$\sigma = 13.5 \times e^{-0.163 \times D} (0.43 \leq \sigma \leq 8.79, \text{相関係数: } r = -0.810, \text{データ数: } n = 362) \dots\dots\dots \text{式-(9)}$$

#### 4 結論

- ①最適な貫入試験装置の貫入部は、半径R=50mmの半球である。
- ②載荷荷重は推定精度上大きい方が望ましい。しかし、取扱い易さを考慮した場合は10kgf としてよい。
- ③貫入時の垂直精度が推定精度に及ばず影響は、本実験範囲内では問題ない。
- ④細骨材率(s/a)を42～52%の範囲で変化させたコンクリートを対象とする場合には、細骨材率(s/a)が推定精度に及ばず影響は小さい。
- ⑤単位水量一定で水セメント比(W/C)を45～55%の範囲で変化させたコンクリートを対象とする場合には、強度発現過程が推定精度に及ばず影響は小さい。
- ⑥以上の④、⑤の結論から、本実験範囲内のコンクリートを対象とする場合には、載荷荷重を10kgf とする方法で式-(9)により強度を推定できる。

#### 5 おわりに

若材令時における現場コンクリートの非破壊的な強度推定法を確立することを目的とし、貫入方式による圧縮強度推定の可能性について室内実験により検討を行なった。その結果、粗骨材の有無が推定精度に及ばず影響を取り除くことはできないが、半径R=50mmの半球を取付けた貫入試験装置をコンクリート表面に垂直に押し当てて荷重10kgf を載荷する場合には、コンクリート表面に生じるくぼみの径と圧縮強度との間に強い相関関係があることがわかった。今後は、荷重30kgf を水平方向に載荷するために貫入試験装置を機械的に改良する等、推定精度の向上を図る必要がある。

#### 謝辞

本研究をすすめるにあたり、ご指導、ご助言いただいた東京都立大学山本稔名誉教授に厚く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 場所打ちコンクリートライニング工法 (SECL工法) の開発、SECL工法開発室：技術研究所報、佐藤工業(株)中央技術研究所、1988年3月、No.14、pp.149～158
- 2) 材料施工委員会第1分科会、コンクリート非破壊試験法研究小委員会：コンクリート強度推定のための非破壊試験方法マニュアル、日本建築学会、1983年
- 3) 谷川、山田：コンクリートの非破壊検査、コンクリート工学、1989年3月、Vol.27、No.3、pp.5～13
- 4) 尼崎：コンクリートの非破壊検査方法、コンクリート工学、1989年3月、Vol.27、No.3、pp.31～33
- 5) G. サングレラ、(室町、赤木訳)：貫入試験と地盤調査、鹿島出版会、1976年
- 6) 土質調査法改訂編集委員会：土質調査法、土質工学会、1982年