

論文

[1072] 超硬練りコンクリートのコンシステンシーに関する研究

櫻井次郎*1・迫田恵三*2・森川一行*3・国分範夫*4

1. はじめに

単位水量が著しく少ない超硬練りコンクリート[1][2][3]は、セメントペーストの量が少なく、骨材間隔が狭くなるため、せん断強度が増加し、結果的に圧縮強度が増すので、少ないセメント量で所要の強度が得られる。超硬練りコンクリートは、コンクリート製品の製造に用いられるが、その製造システム制御技術の研究[4]を推進するためには、振動締固め中の超硬練りコンクリートの挙動を詳細に検討する必要がある。従来、振動締固めによるコンクリートの極めて複雑な挙動についての報告[5]があるが、残念ながら、質量を満載して振動締固めをうける、超硬練りコンクリートの挙動を知る方法は無かった。そこで、振動締固めによって、鉄筋に働く力を測定する実験をおこなったところ、コンクリート全体の沈降に伴い、鉄筋は一旦ある力で引き込まれて沈降する。コンクリートの沈降の終息とともに落ち着いた後、荷重計の張力によって振動中のコンクリート内を静かに引き上げられてゆく。最終的に、鉄筋に働く浮力の分だけ軽くなって釣り合った。この現象と資料[4]を基礎として、新しく開発した球形加速度センサ（以下球形センサ、または単にセンサという）を用い、平板状の質量を満載した、強力な振動締固め実験装置によって、振動締固め終了時期の判定とコンシステンシーに関連する次のような結果を得た。

- 1) 振動締固めをうける超硬練りコンクリート中における、球の浮上と液状化との関係および加速度波形の変化と締固め終了ならびにコンシステンシーとの関係
- 2) 振動締固めをうけて粘弾性体の性状を帯びる超硬練りコンクリートの中を運動する、球の速度とコンシステンシーとの関係

本研究の測定手法によれば、実験に用いたコンクリートの配合について、コンシステンシーの測定が可能であるものと判断できる。

2. 実験装置

振動締固め中に、コンクリート内部と加圧板に発生する加速度波形、球および加圧板の変位などを調査するために、新しく開発した球形センサなどを用いた実験装置を図-1に示す。使用する球の大きさは、コンクリート円柱の断面積に対して、無視できる程度であって、骨材の最大寸法より十分大きい断面積を有するものとする。同じ装置により、球の引き上げ速度の測定ができるが、球引き上げ速度は十

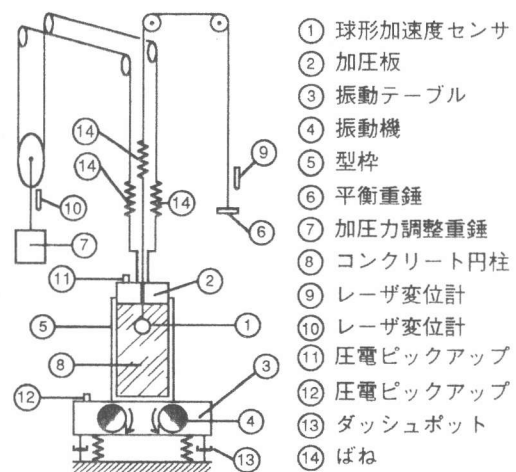


図-1 実験装置

*1 桜井建材産業（株）取締役副社長（正会員）
 *2 東海大学海洋学部海洋土木工学科助教授、工博（正会員）
 *3 桜井建材産業（株）生産研究所主任研究員
 *4 桜井建材産業（株）生産研究所研究員

分に小さくなるように、平衡重錘を調整する必要がある[6]。実験に用いた球形センサの直径は38mm、球の直径は28.5mmで、コンクリート中で球形センサに働く浮力は0.687N、球に働く浮力は0.284Nである。本研究の測定装置は、最大振動数110Hz、限界加速度25G(1G=9.81m/s²、以下同じとする)、最大出力53kNであり、この装置を用いて超硬練りコンクリートの振動締固めに関して多くの測定が可能である。

表-1 コンクリートの配合

水セメント比 W/C(%)	セメント (kg/m ³)	水 (kg/m ³)	細骨材 (kg/m ³)			粗骨材 (碎石) (kg/m ³)
			細砂	中砂	粗砂	
35	300	105	384	473	886	235
36	300	108	383	472	885	235
38	300	114	382	471	882	234
40	300	120	381	470	879	233

表-2
コンクリートのVC値

水セメント比 W/C(%)	VC値 (s)
35	378
36	246
38	126
40	55

3. 実験方法

3.1 実験に用いたコンクリートおよび振動締固めの条件

今回の実験に用いたコンクリートの配合を表-1に、そのコンクリートのVC値を表-2に示す。コンクリート円柱は、高さ約300mm、直径150mm、加圧板は、直径149mm、質量13.5kg、加圧力3.73kN/m²とする。加圧力は、多くの測定実験の結果適切な値として採用した。励振振動数、励振加速度および励振変位振幅を表-3に示す。

3.2 測定方法

先に述べた図-1において、球形センサ①とばね⑭は、平衡重錘⑥によって空気中において完全に平衡が保たれる。したがって、コンクリート中のセンサには0.687Nの浮力が働くことになる。ばねを介して、ケーブルによって支持されたセンサを、型枠断面の中心線上適当な高さに、一時的にケーブルの移動を止めて保持する。型枠を振動テーブル③上に十分強固に固定し、振動機④を起動する。正確に計量したフレッシュコンクリート12.7kgを、約25秒間で型枠⑤に投入し充填する。コンクリート投入開始後30秒経過

表-3 励振振動数、励振加速度、励振変位振幅

振動数 (Hz)	上段：励振加速度 (G)									
	下段：変位振幅 (mm)									
70	9	10	12	13	14	-	-	-	-	-
	0.44	0.51	0.61	0.66	0.71	-	-	-	-	-
85	-	10	12	13	14	15	16	18	20	-
	-	0.34	0.41	0.45	0.48	0.52	0.55	0.62	0.69	-
100	-	10	-	-	14	15	16	18	20	22
	-	0.25	-	-	0.35	0.37	0.40	0.44	0.50	0.55

したとき、センサを支持するケーブルを開放する。投入開始後40秒経過したとき、加圧板②をコンクリート上面に載せる。加圧板の質量は13.5kgで、加圧力調整重錘⑦によって加圧力を3.73kN/m²に調整する。振動締固めをうけるコンクリート中の加速度波形をセンサ、センサの変位をレーザ変位計⑨、加圧板の変位をレーザ変位計⑩、加圧板に発生する加速度波形を圧電ピックアップ⑪などを用いて計測し、締固め中のコンクリートの挙動を記録した。平衡重錘に、さらに引き上げ力に相当する9.81Nの付加重錘を加える。引き上げ力と球に働く浮力との和10.09Nによって、振動中、コンクリート円柱の底部に埋入した球を引き上げる。平衡重錘の変位をレーザ変位計⑨を用いて計測し、球の引き上げ速度を得た。

4. 実験結果および考察

4.1 振動締固めをうけるコンクリートの挙動

振動締固め中の超硬練りコンクリートの挙動に関する測定結果を図-2に示す。縦軸の諸量の縮尺は凡例によっている。Kuch[7]は、振動締固めの過程を5段階に分けているが、ここでは、数多くおこなった実験結果から、図-2に示す諸要素の挙動を次の3段階に分けることが妥当であると判断した。

1) 初期の段階(機械的な充填締固めの過程) --- 0 - c

空気の放出がおこなわれ、加圧板(コンクリートの上面)が急激に沈降する。球形センサの沈降がとまり、浮上を初める段階(c:液状化の発現)。

2) 中期の段階(液状化がさらに進み、締固めが促進される過程) ----- c - d

締固めが促進され、粒子間の間隔が最小に近づく。コンクリートの液状化が進行し、加圧板の沈降は殆どなくなる。センサの捉える加速度波形の振幅が急激に減少して、締固めが終了する段階(d)。

3) 最終の段階(付加加圧過程)

コンクリートが粘弾性体の性状を帯び、付加加圧に適する段階。球形センサは浮上を継続する。

4.2 超硬練りコンクリートのコンシステンシー

励振加速度12G、振動数85Hzの場合について、水セメント比35%, 36%, 38%, 40%毎に、振動締固め中の超硬練りコンクリートの挙動を図-3に示す。各軸の単位は図-2と同じである。一定のコン

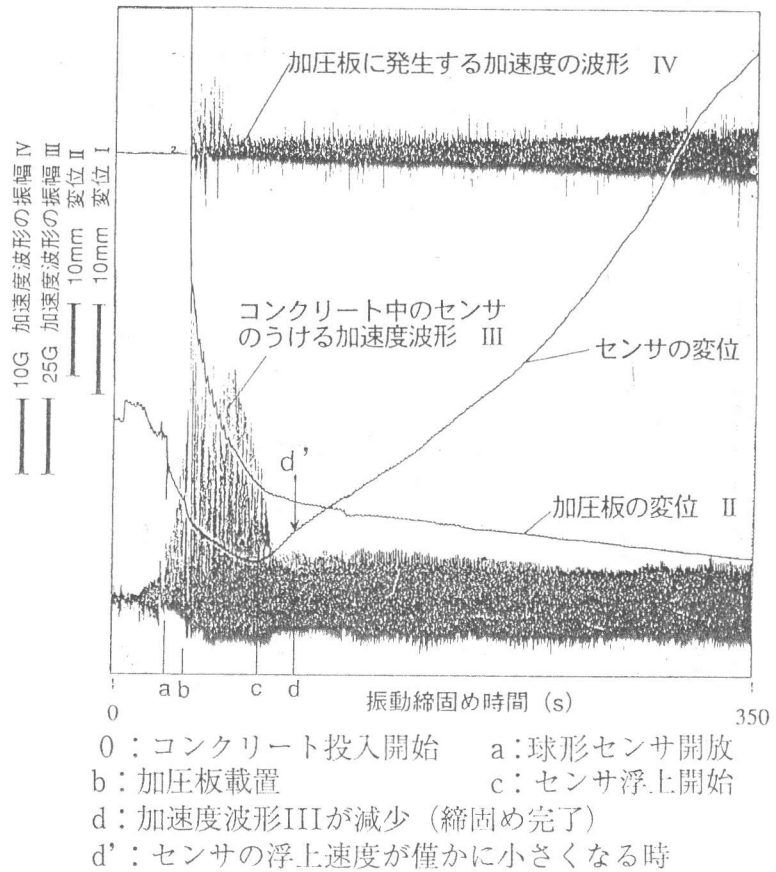


図-2 振動締固め中の超硬練りコンクリートの挙動 (1)

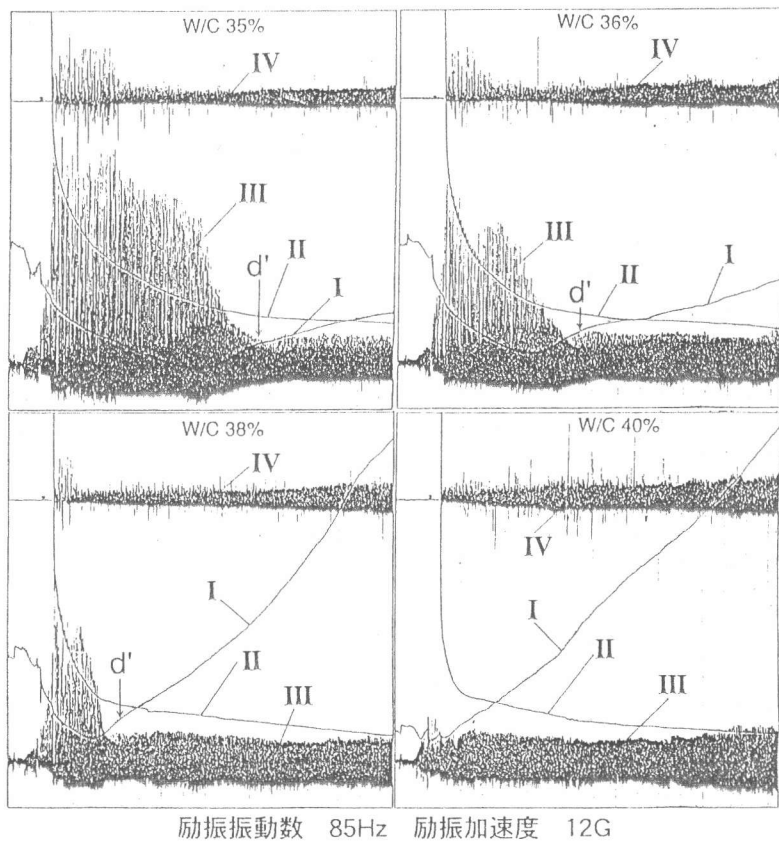


図-3 振動締固め中の超硬練りコンクリートの挙動 (2)

クリートと振動条件のもとで、各現象の現われ方の相違を、水セメント比に応じて良く識別することができる。振動締固め中にコンクリート粒子が大きく移動しておれば、勿論この方法は成り立たない。そこで、水セメント比38%の超硬練りコンクリートを5層に色分けして充填し、締固めが終了する時期を過ぎてなお十分に締固め、硬化した後切断してみた。その切断面を図-4に示す。この図から、5層のコンクリートが充填されたまま大きな移動運動を起こしていないことがよく確認できる。

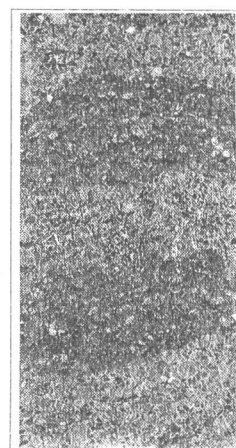


図-4 5層に色分けしたコンクリートの切断面

4.2.1 測定に適する励振加速度およびコンクリートの練り置き時間の影響

励振振動数85Hz、加速度10G, 13Gおよび14Gの場合に、それぞれ水セメント比36%, 38%および40%、同じく振動数85Hzで、12Gの場合水セメント比35%, 36%, 38% および40%について、加速度波形が急激に減少するまでの時間と水セメント比

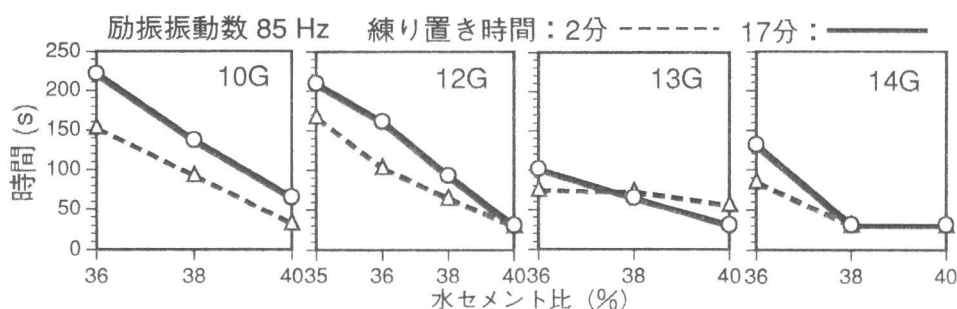


図-5 水セメント比とセンサの捉える加速度波形が急激に減少するまでの時間との関係

との関係を図-5に示す。励振加速度14G、水セメント比40%の場合、コンクリートの液状化が早く、波形が急激に減少するまでの時間の測定

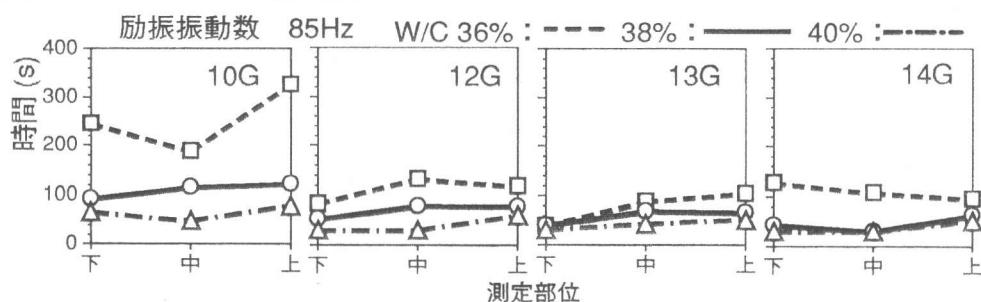
はできなかった。励振加速度が小さい場合は、練り置き時間があると、締固め時間が長くなるが、加速度が大きくなると両者の差は小さくなる。また、水セメント比の差についても、加速度が小さいほど締固め時間の差が大きくなる傾向を示している。表-4によれば、測定時の周囲の温度変化は3℃以内と狭い範囲にあるので測定値に対する温度の影響は少ないものと考えられる。したがって、コンシステンシーの測定にあたっては、励振加速度、コンクリートの練り置き時間、周囲の温度などコンクリートの性状に影響を及ぼす要因について十分に注意する必要がある。

表-4 実験時の周囲の温度

励振振動数 85Hz	
励振加速 (G)	温度 (℃)
10	10.0~12.5
12	11.5~12.5
13	15.0~15.5
14	16.0~19.0

4.2.2 測定に適するコンクリート円柱の部位

図-6に、励振振動数85Hzの場合について、コンクリート円柱の部位と、コンクリート投入開始からセンサの捉える



上：コンクリート円柱の底から約250mm 中：底から約150mm 下：底から約50mm

図-6 測定部位とセンサの捉える加速度波形が急激に減少するまでの時間との関係

加速度波形が急激に減少するまでの所要時間との関係を示す。全般的には、下部の方が短時間で加速度波形が急激に減少する傾向にあるが、位置の違いによる差は小さいといえる。しかし、14Gで水セメント比36%の場合には、上部の方が短時間で加速度波形が急激に減少する傾向にあり、10Gで水セメント比36%では中心部が最も短時間で加速度波形が減少しており、特異な挙動をしている。このことは、硬練りコンクリートであっても、硬さ（コンシステンシー）の相違によって締固め中のコンクリートは円柱の部位によって、その挙動が異なる可能性があることを示していると考えられる。したがってコンシステンシーの測定にあたって、測定部位の選択には注意が必要である。

4.3 コンシステンシー測定方法の簡略化

図-7は、締固め中センサが捉える加速度波形が急激に減少するまでの所要時間と、センサの浮上を示す変位の傾き（速度）が僅かに小さくなる時、すなわち、曲線上に小さなこぶを生ずる（d'：図-2、図-3に矢印で示す）までの所要時間とを、水セメント比毎に比較して示している。図から、これらの現象は、ほぼ時を同じくして起こることがわかる。このことから、センサによる加速度波形の計測の代わりに、球の変位からd'の時期を知ることによって、コンシステンシーの測定方法の簡略化が期待できる。

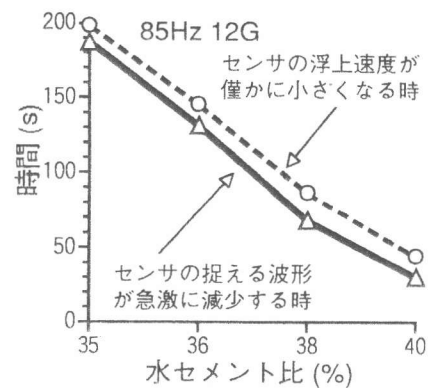


図-7 波形が急激に減少する時とセンサの浮上速度が僅かに小さくなる時との関係

4.4 コンクリート中における球の引き上げ速度とコンシステンシー

図-8は、水セメント比38%の超硬練りコンクリートを、7層に色分けして型枠内に充填し、振動締固めによって、液状化したコンクリートの中を、3.2の方法で球を引き上げ、硬化後切断した断面を示す。コンクリートの中には、球の引き上げによってもたらされる大きな変形を示す、あたかも航跡のような模様が、そのまま残されている。今回、実験的に、振動締固め中のコンクリート内における、球の引き上げ速度を測定した。引き上げ中球の速度は、球引き上げによってもたらされる大きな変形と振動の影響によって、微妙な変化を示すが、ここでは、平均速度を用いることとした。図-9に、水セメント比と球の平均引き上げ速度との関係を示す。各励振加速度毎に、水セメント比の変化に対応する引き上げ速度の変化を識別することができるので、球の引き上げ速度によっても、コンシステンシーの測定が可能であるものと判断できる。また、図-9によれば、励振加

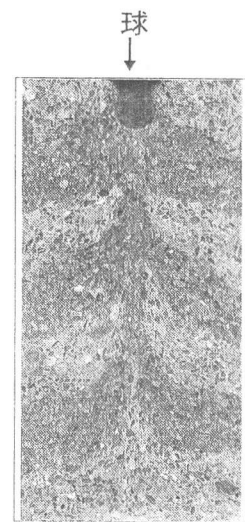


図-8 球引き上げによって生じるコンクリート内部の成層破壊

速度が大きくなるにしたがって、引き上げ速度が早くなる傾向が見られる。これは、振動加速度が、締固め中の超硬練りコンクリートの性状に

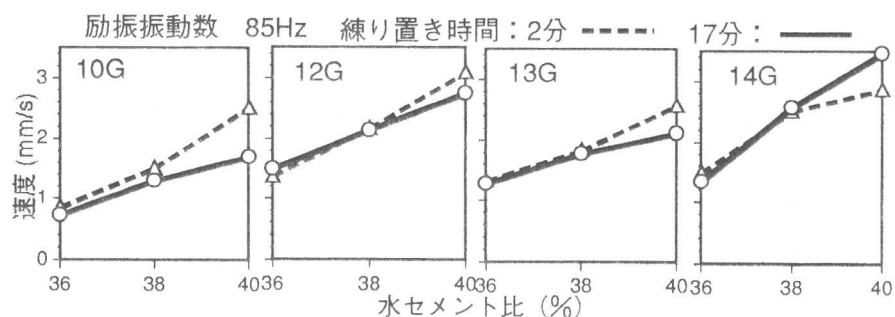


図-9 水セメント比と球の引き上げ速度との関係

及ぼす影響によるものと思われる。これらの現象は、超硬練りコンクリートの性状およびコンシステンシーの研究にとって重要と考えられるので、今後慎重に検討する必要がある。

5. まとめ

今回、新しく開発した球形センサを用いた実験装置によって、超硬練りコンクリートが振動締固めをうけて液状化してゆく現象を捉えることに成功し、その過程を次の3段階に分けることができた。

1) 空気の放出がおこなわれ、加圧板が急速に沈下し、球形センサが浮上を始める（液状化の発現）
までの機械的な充填締固めの段階

2) 液状化が進行し、粒子間の間隔が最小に近づき、センサの捉える加速度波形が急激に減少して、
締固めが完了するまでの段階

3) コンクリートは粘弾性体の性状を帯び、付加加圧に適するようになる段階

振動締固めによる、コンクリート中の加速度波形が急激に減少するときに、コンシステンシーの予測に関係していることがわかった。したがって、本研究の測定手法によれば、実験に用いた配合のコンクリートについて、コンシステンシーの測定が可能である。

超硬練りコンクリートのコンシステンシーの測定に関して、次のことがいえる。

1) 球形センサに代えて、単に球の変位を捉えることによって、測定方法の簡略化が期待できる。

2) コンクリートの配合、励振振動数、励振加速度、コンクリートの練り置き時間、周囲の温度など、コンクリートの性状に影響を及ぼす要因について補正をおこなうことによって、より信頼性の高い値を得ることが可能である。

なお、コンクリート中の球の運動速度とコンシステンシーとの関係、ならびに球引き上げによる、コンクリートの大きな変形などについて、現在おこなっている電子等価回路による振動解析とあわせて、今後慎重に研究を進めてゆく方針である。

[謝辞]

この研究は、静岡県科学技術振興財団による研究開発事業の一環として実施されているものである。

本研究に対して、適切な御指導と御助言を賜った徳島大学工学部長河野清教授、終始御支援を戴いている東海大学海洋学部斎藤晃教授、土屋明助教授ならびに木村正雄助教授に対して深く感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 河野清・竹村和夫・荒木謙一(1972)：土木用即時脱型ブロックに用いるコンクリートの締固め条件と適正配合について、セメント・コンクリート，No.305，9-15
- 2) 谷川恭雄・森博嗣(1993)：フレッシュコンクリートのレオロジーと流動解析，コンクリート工学，Vol.31，No.10，5-16
- 3) 丹野弘・森濱和正(1989)：V-74 超硬練りコンクリートの配合条件と振動締固め特性に関する研究，土木学会第44回年次学術講演会資料，202-203
- 4) 櫻井次郎・斎藤晃・土屋明・迫田恵三・木村正雄・森川一行・国分範夫・芝原嘉之(1993)：振圧コンクリート製造システム制御技術の研究(その1)，東海大学紀要海洋学部第36号，31-62
- 5) Werner Altmann (1988)：Schwingungsverhalten des Betons bei seiner Verdichtung，Betonwerk Fertigteil-Technik，1/88，10-15
- 6) 宇野木早苗・斎藤晃・小菅晋(1990)：海洋技術者のための流れ学，東海大学出版会，212-237
- 7) Helmut Kuch(1992)：Model Formation in Vibratory Compaction of Concrete，Betonwerk Fertigteil-Technik，2/92，101-106