

論文 鉄筋コンクリート床スラブの長期たわみに関する有限要素解析

沖野 旨郁^{*1}・堺 孝司^{*2}・吉田 秀典^{*3}・真鍋 忠晴^{*4}

要旨：本研究では，コンクリートの力学挙動に関するひび割れを考慮した有限要素解析手法にクリープ，乾燥収縮モデルを新たに組み込んで，大気湿度変化による RC 造床スラブの変形挙動について検討するとともに，各種要因の長期たわみに及ぼす影響の程度について検討した。解析は実験における挙動を再現でき，その結果，材齢 1 年程度では，スラブ内部は乾燥収縮の影響が大きく，湿潤期間であってもたわみの挙動としては増加傾向になることが解析的に示された。また，たわみに最も影響するのは乾燥収縮によるひび割れであり，クリープの影響は小さいことも示された。

キーワード：RC 造床スラブ，長期たわみ，クリープ，乾燥収縮，ひび割れ，湿度，FEM 解析

1. はじめに

近年，マンションやオフィスビルなどにおいて，多様な生活スタイルに対応するように空間の自由度が高いものが多く採用されている。この要求を満たすため，床スラブのスパンが大型化する傾向にある。これにより問題となるのが床スラブの長期たわみである。この問題に関して，実験や解析により予測方法が提案されている。実験に関しては，実規模レベルのものは難しいため縮小された供試体を用いて挙動を明らかにしている。しかし，寸法効果などにより縮小された供試体では大型スラブの挙動を再現できるとは限らない。一方，解析においては，ひび割れ，クリープ，乾燥収縮を個々に評価したものは多く存在する。しかし，これらを連成させたものは依然として少ない。これら要因を連成させた代表的なものとして，高橋ら¹⁾や武田ら^{2),3)}の解析的研究がある。現在，ひび割れの評価方法としては，ひずみ-軟化型のものが一般的となりつつあるが，上記の解析的研究では，ひび割れの影響を弾性係数の低下として扱っている。

また，RC 造床スラブのような薄い部材は，大気の湿度変化の影響を大きく受けるとされている。高橋ら¹⁾や武田ら^{2),3)}は，大気湿度変化の影響を含むクリープ係数を用いているが，コンクリート中の湿分の拡散に関する検討に基づいたものではなく，実際どのように影響を与えているのか検討の余地がある。

本研究では，ひび割れの評価をひずみ-軟化型として考慮した有限要素解析手法にクリープ，乾燥収縮モデルを新たに組み込んで，松崎らが行った RC 造 1 方向スラブの実験結果⁴⁾と比較を行い，大気湿度変化による RC 造床スラブの変形挙動について検討するとともに，各種要因の長期たわみに及ぼす影響の程度についても分析評価した。

2. モデル概要

2.1 コンクリートおよび鉄筋の構成則

本研究では，解析の対象を RC 造床スラブとすることから，コンクリートおよび鉄筋の構成モデルには，「鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説 1999」(以下，RC 基準とする)に準拠して

*1 株式会社 穴吹工務店 研究開発部 研究開発課 工修 (正会員)

*2 香川大学教授 工学部安全システム建設工学科 工博 (正会員)

*3 香川大学助教授 工学部安全システム建設工学科 博士(工学) (正会員)

*4 株式会社 穴吹工務店 研究開発部 部長 (非会員)

構築された構成モデルを採用した^{5),6),7)}。その概略を図-1, 2 に示す。ここで、コンクリートの引張側に関しては、各要素において最大引張応力を求め、その応力が引張強度： $0.56\sqrt{\sigma_B}$ (σ_B ：圧縮強度)⁵⁾に達した場合、最大主応力方向に対して垂直な方向にひび割れが入るものとしている。この場合、ひび割れの入った方向に対して直角となる方向にのみ軟化が生じるものとしている。これにより、ひび割れ発生・進展に伴うコンクリートの異方性を表現している。なお、採用している構成側は、要素内に複数のひび割れが含まれる平均化構成側であるため、要素分割によってコンクリートが消費する破壊エネルギーは異なり、局所化を前提とした解析の場合、その前提が崩れない程度に十分小さな要素分割を必要とするが、本解析では局所化は前提としていない。

本解析においては、コンクリートに関しては3次元ソリッド要素(8節点)、鉄筋に関してはトラス要素(2節点)を用いた。なお、コンクリートと鉄筋との間の付着は、今回の解析では完全固着としている。

解析に用いた材料特性は、比較を行う松崎らの実験⁴⁾で使用したものをを用いた。コンクリートのヤング係数とコンクリートの曲げ引張り強度に関してデータが示されていないため、RC基準⁵⁾を参考にコンクリート強度より算出した。解析に用いた材料特性一覧を表-1に示す。

2.2 クリープ、乾燥収縮ひずみ

今回の解析においては、コンクリートのクリープひずみに阪田らの提案式⁸⁾、乾燥収縮ひずみにCEB-FIP Model Code 1990(以下CEBコードとする)式⁹⁾を用いた。これは、多くの予測式について検討した結果、これらが実験の長期たわみの実挙動を最もよく表現できたことによる。

3. 有限要素解析

3.1 解析概要

解析スラブの寸法などは、松崎らのRC造1

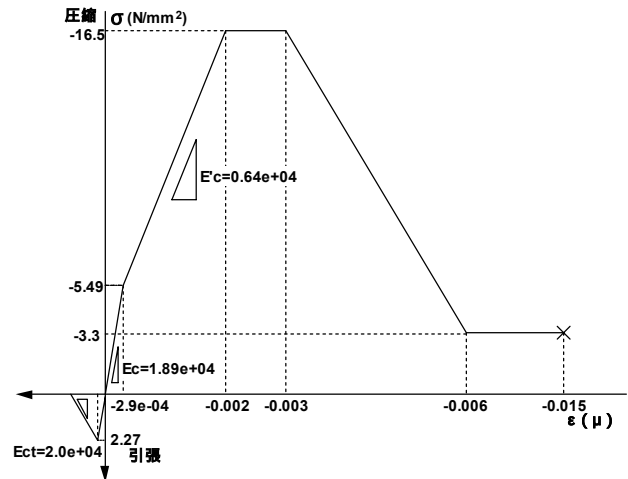


図-1 コンクリートの構成側

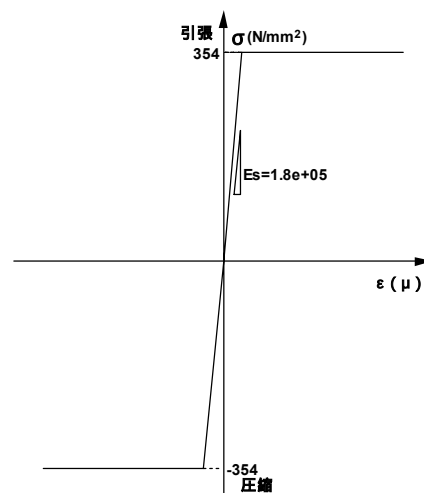


図-2 鉄筋の構成側

表-1 材料特性

コンクリート	圧縮強度	16.5N/mm ²
	ヤング係数	18,900N/mm ²
	単位体積重量	2.4kN/m ³
	初期降伏	5.49N/mm ²
	ポアソン比	0.2
	曲げ引張強度	2.27N/mm ²
	軟化係数	20,000N/mm ²
	降伏条件	von-Mises
鉄筋 (D10)	硬化則	等方硬化(圧縮領域)
	降伏強度	354N/mm ²
	ヤング係数	185,000N/mm ²
	降伏条件	von-Misesタイプ
	硬化則	等方硬化

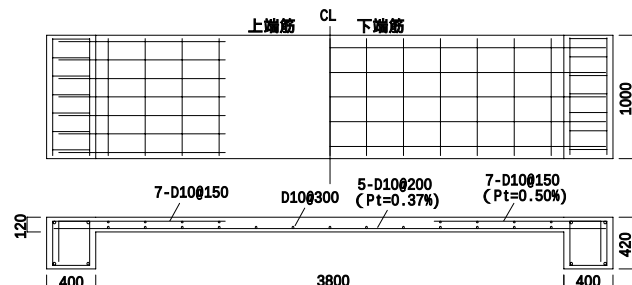


図-3 解析スラブ概略

方向スラブ長期たわみ実験⁴⁾を再現するため、実験で用いたものと同一になるようにした。この概略を図-3に示す。スラブはスパンが3800×1000mm、スラブ厚が120mmで、両端に梁を設けた一方向スラブである。配筋に関しては、端部は上端筋:7-D10@150, 下端筋:5-D10@200, 中央部は下端筋:5-D10@200となっている。積載荷重としては、17.7N/mm²(Aモデル)と積載荷重なし(スラブ自重のみ)(Bモデル)の2種類を考慮した。解析は3次元有限要素解析で行い、材料特性は前章で示したとおりである。境界条件は、実験⁴⁾と同様となるように梁下端を完全固定とした。また、クリープひずみに関して、問題設定を平易なものとするため圧縮側と引張側のひずみ量は同一とし、クリープポアソン比は弾性ポアソン比と同一とした。なお、これ以降、解析結果に示されるたわみ量は、実験で測定されたスラブ中央での値を示す。

3.2 解析結果

(1) クリープのみを考慮した解析

まず、大気湿度変化を考慮する解析の前に、本研究で対象としているRC造床スラブのクリープ算定に関して、阪田らの提案式の適用性について検討を行った。実験では、クリープのみの影響を調べるため、全面にエポキシ樹脂をコーティングし、乾燥を防いだ試験体について検討している。この結果と比較するため、乾燥収縮は考慮せずにクリープのみを考慮した解析を行った。ここで、スラブ内部の湿度は水分の出入りがないため、深さ方向に対して一定であると考えられる。しかしながら、スラブ内部への湿度の影響については明確ではないことから、この解析においては、阪田らの提案式における相対湿度の使用許容範囲である最小値:40%と最大値:90%を用いて検討することにした。解析結果を図-4, 5に示す。これらの結果は、考慮すべき大気湿度としては40%と90%の間にあることを意味している。いずれにしても、大気湿度の適切な考慮により阪田らの提案式は、クリープによるたわみを評価することが出来ると判

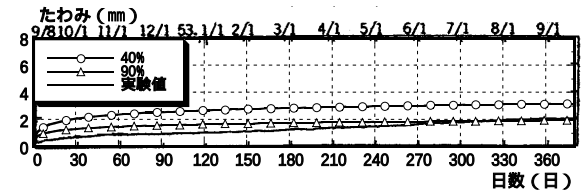


図-4 クリープのみによるたわみ量 (Aモデル)

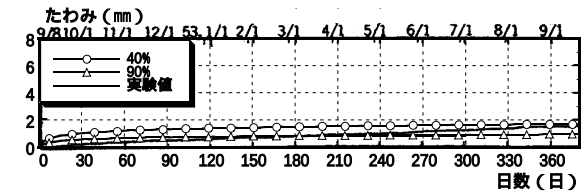


図-5 クリープのみによるたわみ量 (Bモデル)

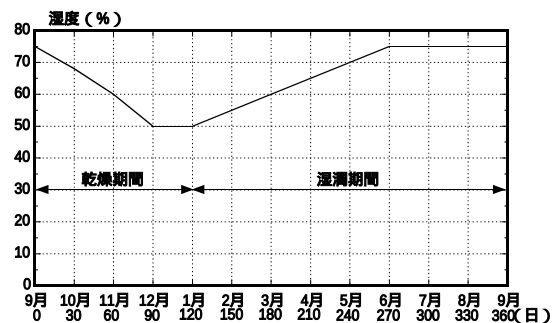


図-6 解析に用いた大気湿度変化量

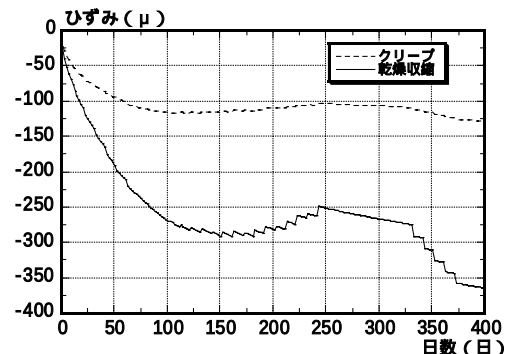


図-7 大気湿度変化による
クリープ・乾燥収縮ひずみ量

断される。

(2) 大気湿度変化のスラブの変形挙動に及ぼす影響

スラブのような薄い板部材は大気湿度変化の影響が大きい。クリープに関する阪田らの提案式、乾燥収縮に関するCEBコード式には、湿度に関する項を含むことから大気湿度変化によってこれらのひずみ量も変化する。本研究において比較対象とする実験結果には、大気湿度変化については述べられていないため、実験が行われた昭和52年前後の東京の湿度を参考にし、図-6のように平均化した年間の湿度分布を考慮

した。この条件下における乾燥収縮ひずみ量と単位応力あたりのクリープひずみ量を図-7 に示す。ここで、このひずみ変化に関しては、乾燥から湿潤に至る過程と湿潤から乾燥に至る過程を同一現象としている。実際は、両過程においては水分の移動速度などが違うため¹⁰⁾、ひずみ増分量も異なる。したがって、両過程を同一現象として解析することは適切ではないと思われる。しかしながら、本研究では問題設定を平易なものとするために収縮方向にも膨張方向にも同じ挙動をするものと仮定した。次に、大気湿度による影響がスラブ深さ方向に対して表層部のみか、それとも内部まで影響しているのか明らかではないことから、ここでは以下の2つのモデルを検討することとした。

モデル1：スラブ全断面に大気湿度の影響を考慮する。

モデル2：スラブ上下面表層部分（表面から15mmまで）のみ大気湿度の影響を考慮する。

これらのモデルを用いて解析を行い、湿度変化を受けるスラブのたわみの挙動について実験と比較した。その結果を図-8、9に示す。図-8に示すモデル1に関しては、初期から内部を収縮させているため、初期段階から過大評価する傾向が見られ、特に載荷荷重のあるAモデルはその傾向が強い。その理由は、乾燥収縮によってひび割れが発生したことに起因している。また、Aモデル、Bモデルにおいて、乾燥過程と湿潤過程におけるひずみ増分量を同じとして解析しているということも理由の一つとして考えられるが、湿潤期間に入った150日前後からのたわみの回復が顕著に見られる。この期間の膨張方向のひずみ増分は約40 μ で、たわみ回復量は約1mmである。たわみの回復量に関しては、載荷荷重による違いは見られない。図-9に示すモデル2に関しては、初期段階においては実験値とほぼ同様の傾向を示している。その後、実験値よりも小さくなっていることから約90日前後で次層に乾燥が進んでいくと思われる。な

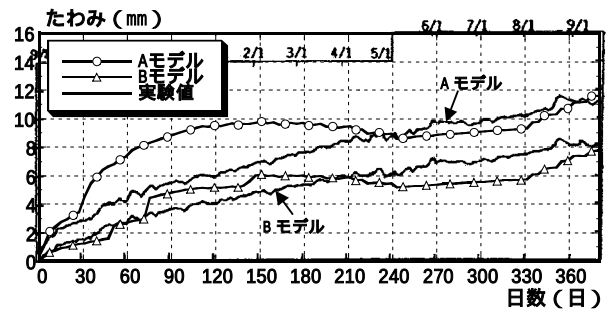


図-8 モデル1におけるたわみ量

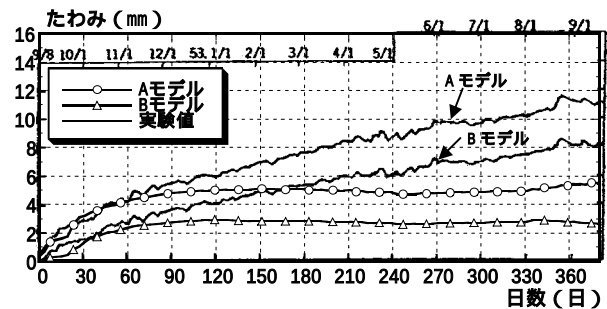


図-9 モデル2におけるたわみ量

お、湿潤期間によるたわみの回復は約0.4mm程度と小さいものであった。

以上の結果、この2つのモデル設定では実験における挙動を表現できないことが明らかとなった。実際は、この2つのモデルの間にあると考える。実験における挙動は、湿潤期間中においても緩やかに増加する傾向にある。モデル2の解析結果では、湿度の影響によるたわみの回復が若干見られる。しかし、実験結果ではたわみの回復は見られない。他の実験結果²⁾についても同様の傾向であり、最初の材齢1~2年間は、湿度の影響によるたわみの回復はなく、全体としてたわみは増加傾向にあった。これらのことより、コンクリート材齢1~2年では、湿潤期間であってもスラブ内部の乾燥による収縮の影響が大きいため、たわみの挙動としては増加になり、乾燥収縮が落ち着いてくる2年後程度から湿潤による影響が現れてくると考えられる。

そこで、上述した挙動を解析的に検討するために、新たに解析を追加した（モデル3）。比較に用いた実験結果が約1年であることから、スラブ内部は乾燥が継続して進行している状況であるとし、上記の2つのモデルの解析結果も考慮し、以下の仮定により検討を行った。

- 1) スラブ断面を 8 層に区切り (1 層あたり 15mm), スラブ上下面表層より内部に向かって乾燥を進行させる。
- 2) 各層の乾燥開始日数について, モデル 2 の解析結果より次の層に乾燥の影響がおよぶ日数を 90 日とする。よって, スラブ上下面表層から内部に向かって 2 層目は 90 日, 3 層目は 180 日, 4 層目は 270 日から乾燥が始まるものとした。なお, 乾燥が始まるまではひずみ量は 0 とする。
- 3) 湿潤期間においては, コンクリートの空気中の水分吸収率は小さく, 内部まで浸透するのに時間がかかる¹¹⁾ことからスラブ上下面表層の 1 層のみに湿潤による影響を与え, それ以外の内部の層は乾燥を継続させる。
- 4) 3) においてスラブ内部を乾燥状態としているが, このときコンクリート内部の湿度の状況は明らかではないので, 大気湿度 60% の環境下での挙動を示すものと仮定する。
- 5) クリープに関しては, スラブ上下面表層の 1 層のみに湿潤による影響を与え, 内部 (2 ~ 4 層) は初期より大気湿度 60% の環境下での挙動を示すものと仮定する。本来, 乾湿の影響は時間とともに内部に及ぶが, そのメカニズムは依然, 不明な点が多く, 本研究では簡易的にこのように取り扱った。

これらの仮定の下における単位応力あたりのクリープひずみ量と乾燥収縮ひずみ量を図-10, 11 に, スラブ中央におけるたわみ量を図-12 に示す。A モデル, B モデルともに 240 日前後において, たわみの回復が若干見られるが, 解析結果は実験の挙動をよく表しているといえる。

(3) 長期たわみに及ぼす各要因の影響度分析
モデル 3 におけるクリープ, 乾燥収縮, ひび割れの各要因のたわみに及ぼす影響の程度について検討する。解析はクリープおよび乾燥収縮のそれぞれにひび割れを考慮した場合と考慮しない場合の 4 ケースについて行った。その結果を図-13, 14 に示す。A モデル, B モデルともク

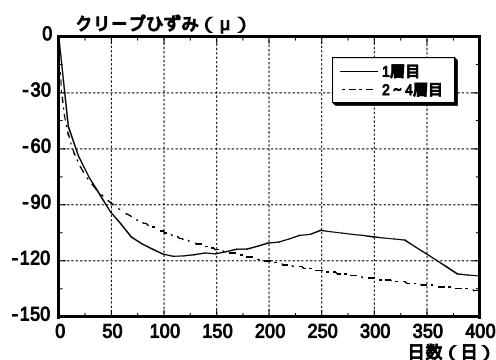


図-10 クリープひずみ量

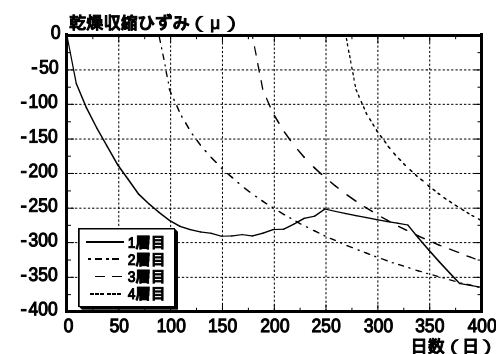


図-11 各層の乾燥収縮ひずみ量

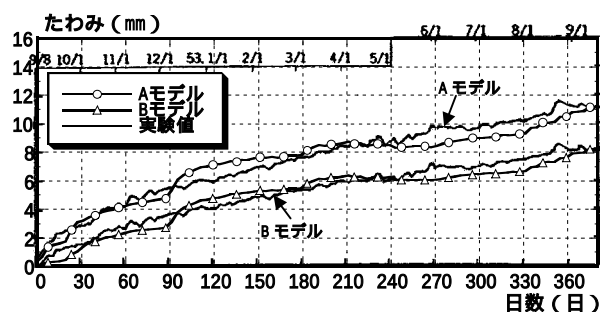


図-12 モデル 3 におけるたわみ量

リープに関しては, ひび割れの影響をほとんど受けなかったため, ひび割れを考慮した挙動も考慮していない挙動も同じであった。乾燥収縮に関しては, ひび割れの影響が大きく見られ, ひび割れを考慮した場合と考慮しない場合では全く違った挙動となった。載荷荷重がない B モデルは, クリープの影響はあまりなく, 乾燥収縮によるひび割れの影響でたわみの挙動が決定されていた。また, 実験最終段階における解析結果の各要因によるたわみ量は表-2 に示すとおりであり, たわみに対して最も影響が大きいものは乾燥収縮によるひび割れであり, ひび割れを考慮しないクリープおよび乾燥収縮による影響は小さいことが解析においても示された。

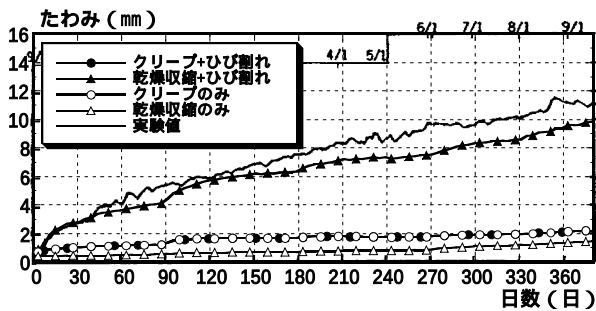


図-13 各要因によるたわみへの影響(Aモデル)

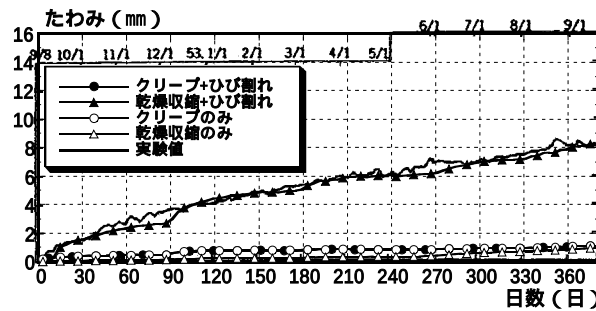


図-14 各要因によるたわみへの影響(Bモデル)

表-2 各要因によるたわみ量

要因	Aモデル	Bモデル
クリープ(ひび割れ考慮なし)	2.2mm	1.1mm
乾燥収縮(ひび割れ考慮なし)	1.5mm	1.0mm
ひび割れ	8.4mm	7.3mm

4. まとめ

ひび割れを考慮したコンクリートの力学挙動に関する有限要素解析手法にクリープ，乾燥収縮のモデルを組み込み，大気湿度変化の影響によるスラブの変形挙動について解析的に検討した。

その結果，材齢1年程度のスラブの内部は乾燥収縮の影響が大きく，湿潤期間における表層の湿潤による膨張ひずみの影響は小さいことが解析的に示された。また，スラブのたわみに最も影響を与える要因は，乾燥収縮によるひび割れであり，クリープによる影響は小さいことも示された。

なお，本稿では実験期間が1年程度の実験結果と比較を行い検討したが，2年を超える場合には，スラブ内部の状況は異なったものと思われることから，今後その検討も必要である。また，コンクリートの水分移動に関しては，拡散係数などによる時間依存モデルを解析に組み込むことで実挙動に近いスラブの変形挙動を評価することも可能となると考えられる。

参考文献

- 1) 高橋久雄，武田寿一，小柳光生，大池武：床スラブの長期たわみに関する研究（単純支持スラブ実験），コンクリート工学，Vol.14，No.10，pp.10-18，1976.10
- 2) 武田寿一，高橋久雄，小柳光生：床スラブの長期たわみに関する研究，コンクリート工学論文，Vol.21，No.9，pp.115-124，1983.9
- 3) 武田寿一，小柳光生：拘束スラブの長期たわみに関する研究，コンクリート工学論文，Vol.23，No.1，pp.101-112，1985.1
- 4) 松崎育弘，畑野筆，田中久雄：鉄筋コンクリート造床スラブの長期たわみに関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1571-1572，1979.9
- 5) 鉄筋コンクリート構造計算基準・同解説1999，1999
- 6) 吉田秀典，竹下智正，堺孝司，森西隆寛：低張力材料の構成モデルを用いたポイドスラブの非線形解析，応用力学論文集，Vol.4，pp.325-332，2001.8
- 7) 吉田秀典，和田光真，堺孝司：鉄筋コンクリートスラブの挙動に及ぼす端部拘束条件の影響，応用力学論文集，Vol.5，pp.411-420，2002.8
- 8) 阪田憲次，椿龍哉，井上正一，綾野克紀：高強度域を考慮した乾燥収縮ひずみおよびクリープ予測式の提案，土木学会論文集，No.690/V-53，pp.1-19，2001.11
- 9) Comité Euro-International du Béton：CEB-FIP MODEL CODE 1990，1990
- 10) たとえば，秋田宏，藤原忠司，尾坂芳夫：モルタルの乾燥・吸湿・吸水過程における水分移動，土木学会論文集，No.420/V-13，pp.61-99，1990.8
- 11) 藤原忠司，石田宏，佐藤嘉一郎，小西俊之：コンクリート中の水分移動に及ぼす環境条件および配合の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.11，No.1，pp.223-228，1989.7