

コンクリート曲げ強度の寸法効果における 初期応力の影響

二羽淳一郎¹・日高重徳²・田邊忠顕³

¹正会員 工博 アジア工科大学院助教授 構造工学科 (G.P.O. Box 2754, Bangkok 10501, Thailand)

²正会員 工修 (株)ピー・エス 土木技術部 (〒170 東京都豊島区南大塚3-20-6)

³正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科 (〒464 名古屋市千種区不老町)

乾燥収縮による初期応力の存在が、コンクリートの曲げ強度の寸法効果にどの程度影響するかを明らかにするために、コンクリートの初期応力分布を実測し、その分布形状を実験的に明らかにした。分布形状は、供試体の寸法ならびに乾燥期間に応じて変化し、これを2次曲線で近似することは適切ではないことが示された。さらに、材齢の進行に伴う各種材料特性値の経時変化を実験的に把握した。破壊力学に基づく数値解析にこれらの情報を組み込むことにより、曲げ強度の寸法効果における初期応力の影響を評価し、これを実験的に検証した。検討の結果、供試体寸法とコンクリート特性長さとの比の増加に伴い、初期応力の影響が顕著となることが明らかとなった。

Key Words : flexural strength, size effect, initial stress, drying shrinkage, fracture mechanics, material property

1. 序論

コンクリートの曲げ強度は、鉄筋コンクリート部材においては、一般に曲げひび割れ発生モーメント、あるいはこれを用いた曲げひび割れ発生後の鉄筋コンクリート部材の曲げ剛性を予測するために用いられる。ただし、無筋コンクリート、あるいは大型部材等で曲げ補強筋比がごくわずかな鉄筋コンクリート部材では、耐荷力そのものの評価の際に必要な。

コンクリートの破壊力学の研究の進展に伴い、曲げ強度は、コンクリートの材料特性値としては取り扱えないことが明らかとなってきた。すなわち、コンクリートの曲げ強度は、強度試験に供する試験体の寸法に依存するものであり、全く同一のコンクリート、具体的には同一の引張強度と破壊力学特性値を有するコンクリートで作られたと仮定しても、試験体高さの増加に伴って曲げ強度は次第に低下していく。つまり、曲げ強度には寸法効果が存在することが明らかとなっている。この寸法依存性のため、コンクリートの曲げ強度は、材料特性値とはなり得な

いのである。

直接引張試験においても、ひび割れの発生状況が完全には一様でないことから、引張強度にも曲げの影響が存在し、このため厳密には引張強度にも寸法効果が存在すると考えられるが、その程度が曲げ強度と比較して小さいことから、本論文では引張強度は寸法効果のない材料特性値として取り扱うものとした。

さて、コンクリート標準示方書には、曲げ強度の特性値が規定されているが、これは高さ10ないし15cmの標準的な曲げ試験体による強度試験を暗黙のうちに前提としているためと考えられる。

一方、CEB-FIP Model Code 90には、試験体の高さの関数により寸法効果を考慮する、曲げ強度の評価式(式(1))が規定されている。

$$\frac{f_b}{f_t} = \frac{1 + 1.5 (h/h_0)^{0.7}}{1.5 (h/h_0)^{0.7}} \quad (1)$$

ただし、 f_b : コンクリートの曲げ強度、 f_t : コンクリートの引張強度、 h : はりの高さ、 $h_0=10\text{cm}$ 。

また内田らは破壊力学的な検討に基づき、はりの

高さ h とコンクリートの特性長さ l_{ch} から、寸法効果を予測する式(式(2))を提案している2).

$$\frac{f_b}{f_t} = 1 + \frac{1}{0.85 + 4.5(h/l_{ch})} \quad (2)$$

ただし、 l_{ch} :コンクリートの特性長さであり、コンクリートの破壊エネルギー G_F 、ヤング係数 E_c 、引張強度 f_t より、式(3)のように定義される。

$$l_{ch} = E_c G_F / f_t^2 \quad (3)$$

著者らも、破壊力学の手法に基づいた有限要素解析により3等分点載荷時のコンクリートはりの曲げ強度についてパラメトリックスタディを行い、曲げ強度の寸法効果予測式(式(4))を提案している3)。この中では、はりの高さ h と、より一般的な指標であるコンクリート圧縮強度 f_c' を意図的に用いて、寸法効果を表している。

$$\frac{f_b}{f_t} = 1.36 (h/h_0)^{\frac{1}{2}} (f_c'/f_{co}')^{\frac{1}{20}} \quad (4)$$

ただし、 $f_b/f_t \geq 1.0$ 、 $h_0=10\text{cm}$ 、 $f_{co}'=300\text{kgf/cm}^2$ 。

さてこれらの式は、多少の違いはあるものの、コンクリートの曲げ強度の寸法効果をいずれも同じような傾向で予測するものである3)。しかしながら、対象となるコンクリートはりに内部に初期応力が存在していないことを前提としている。

乾燥収縮による初期応力の存在は、コンクリートの曲げ強度に大きく影響するはずであり、曲げ強度の寸法効果においても、これは考慮しておくべき要因である。本論文は、乾燥収縮による初期応力の存在が、コンクリートの曲げ強度の寸法効果に、どの程度影響するかについて、実験的ならびに数値解析的に検討した結果を述べるものである。

2. 乾燥によるコンクリートの初期応力

(1) 初期応力の測定目的

乾燥によるコンクリート内部の応力分布について、田澤らは逐次除去法により、これを測定し、2次曲線によって近似している4)。これに対して、秋田らは、乾燥により引張応力が生じるのは、乾燥面から1cm程度に過ぎないことを解析的に示している5)。

このように、コンクリート内部の初期応力の大きさや分布形に対しては、様々な考え方が提案されている。この初期応力の存在がコンクリートの曲げ強度に大きな影響を及ぼすという点については、容易に予想されるところであり、破壊力学に基づく数値解析においても、解析結果をより現実的なものとするために、初期応力の影響を取り込んだ形での研究

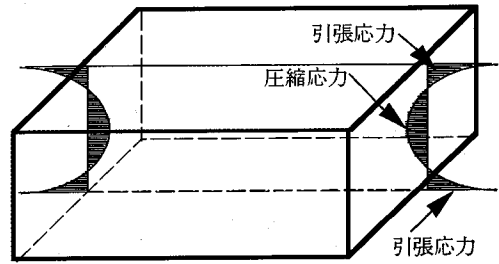


図-1 弾性体プレート中の初期応力分布の概念図

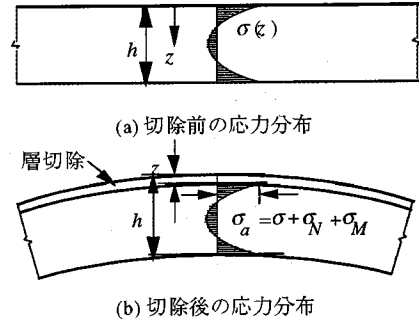


図-2 層切除の前後における応力分布と板の変形状態

が必要となってくるのである。

そこで本研究においては、田澤らと同様に、コンクリート供試体を層状に逐次切除していくことにより、実際に初期応力を測定し、その大きさや分布形に関する情報を得ることとした。その際に、将来の曲げ強度寸法効果解析への適用を考慮し、比較的大型の供試体も用いることとした。

(2) 応力測定理論

逐次除去法による応力測定については、既往の応力測定手法6)に準拠した。

図-1に示すように、弾性体の板の両表面部に引張、中心部に圧縮の初期応力があるとき、これを上面から層状に切除していく。その結果、この切除部分に存在していた引張応力から生じる軸引張力と曲げモーメントを、残った部分で負担することになるため、板全体の長さが長くなるとともに、板は上に凸の曲げ変形を示す。その際に、残った部分でのひずみの測定から、この変形による曲率の変化を明らかにして、切除部分の初期応力を求めていく。ただし、初期応力の大きさがあくまでも弾性範囲内であることが前提となる。

この測定理論を以下に簡単に説明する。図-2に示すように、単位幅 $b=1$ で、高さ h の板の表面から、 z だけ切除した状態を考える。この部分に存在していた初期応力を $\sigma=\sigma(z)$ とし、切除後、 z の位置における応力が σ_a に変化したとする。この際の応力の増

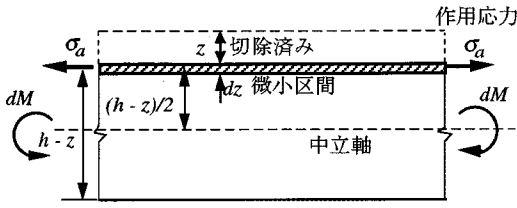


図-3 微小区間dzにおける曲げモーメント

加分は軸引張力による部分 σ_N と曲げモーメントによる部分 σ_M に区分され、式(5)のように表される。

$$\sigma_a = \sigma + \sigma_N + \sigma_M \quad (5)$$

ただし、切除前後の軸方向力の釣合い、ならびに切除後に断面に作用するモーメントと曲率の関係より σ_N と σ_M は、それぞれ式(6)、式(7)から求められることになる。

$$\sigma_N = \int_0^z \sigma(z) dz / (h-z) \quad (6)$$

$$\sigma_M = \frac{E}{\rho} \frac{h-z}{2} \quad (7)$$

ただし、 E はヤング係数、 $1/\rho$ は切除後の板の曲率である。

さらに、切除後の応力 σ_a の変化を考えるために、 z からさらに dz だけ切除することを想定する。この dz 部分の応力が形成する曲げモーメントは、図-3を参考にすれば、式(8)のように表される。

$$dM = \sigma_a \frac{h-z}{2} dz = \frac{\sigma_a (h-z)}{2} dz \quad (8)$$

さらに、 $1/\rho = M/(EI)$ を考慮すると、

$$d\left(\frac{1}{\rho}\right) = \frac{dM}{EI} = \frac{1}{EI} \frac{\sigma_a (h-z)}{2} dz = \frac{6\sigma_a}{E(h-z)^2} dz \quad (9)$$

となるので、 σ_a は曲率の微分として式(10)のように表される。

$$\sigma_a = \frac{E(h-z)^2}{6} d\left(\frac{1}{\rho}\right) / dz \quad (10)$$

式(5)、(6)、(7)および(10)より、式(11)が得られる。

$$\frac{E(h-z)^2}{6} d\left(\frac{1}{\rho}\right) / dz - \frac{E}{\rho} \frac{(h-z)}{2} - \int_0^z \sigma(z) dz / (h-z) = \sigma \quad (11)$$

式(11)は両辺に σ を含む形となっているので計算が煩雑である。そこで、変形して σ を曲率の関数で表

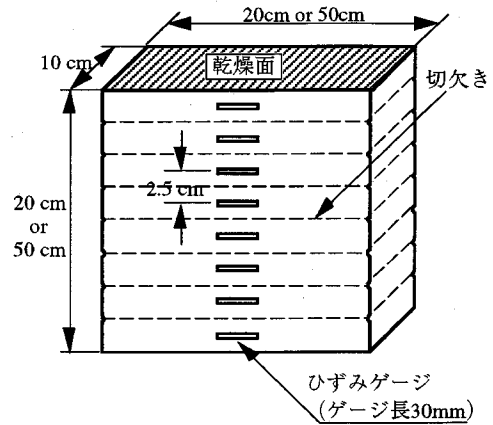


図-4 初期応力測定用供試体

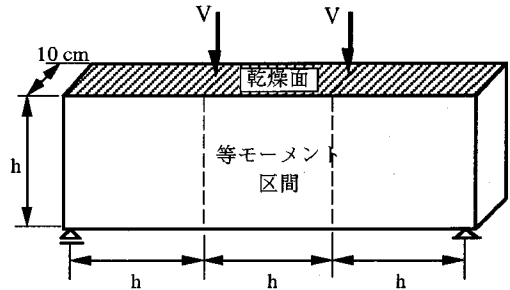


図-5 3等分点載荷を受ける無筋コンクリートはり

すことにする。式(11)を z で微分し、さらに部分積分して変形していくと最終的に式(12)が得られる。

$$\sigma = \frac{E(h-z)^2}{6} d\left(\frac{1}{\rho}\right) / dz - \frac{2E}{3} \frac{(h-z)}{\rho} + \frac{E}{3} \int_0^z \frac{1}{\rho} dz \quad (12)$$

式(12)の右辺は、曲率 $1/\rho$ とその微分、ならびに積分を用いて評価できる。したがって、板の切除に伴う曲率の変化を測定し、 z と $1/\rho$ の関係を実験的に定めておけば、式(12)より、板の初期応力分布が得られることになる。

(3) 実験供試体の概要

初期応力測定のために用いた供試体を図-4に示す。供試体は、一辺が20cmまたは50cmの正方形で、厚さはいずれも10cmのプレート状のコンクリートである。これは、図-5に示す3等分点載荷を受ける無筋コンクリートはりの等モーメント区間を模擬したものである。

2.(2)で述べた測定理論に基づいて、層切除により、逐次、初期応力を求めていくことになる。この

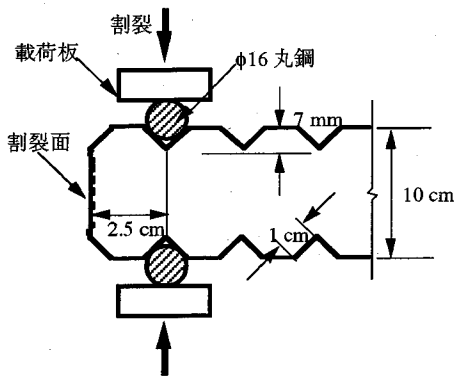


図-6 供試体側面の切欠きと割裂による層切除の概略

表-1 コンクリートの配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤
50	48.5	191	382	796	886	0.43

ため層切除の際には、ゲージ長30mmのひずみゲージを供試体表面に2.5cmピッチで貼付した。

層切除の際に切断機等を使用して、供試体に熱や水分を与えることは初期応力分布に影響を与えることになるので避けなければならない。そこで、供試体を割裂することにより、層切除することとした。割裂による層切除の位置を正確なものとするために供試体の側面には、図-6に示すように、2.5cm間隔で、一辺が1cmの直角二等辺三角形の切欠きを設けた。層切除時には、供試体両側面の切欠きにφ16の丸鋼をあてがい、所定の位置で確実に割裂できるようにした。

供試体は、各実験条件当たりいずれも8体作成した。乾燥を防ぐため、コンクリート打設直後に、打設面をポリ塩化ビニルシート（塩ビシート）で覆い、材齢24時間で脱型し、以後材齢7日まで水中養生した。

その後、上下2面のみを乾燥面、側面は非乾燥面として、気中（25±3℃、70±5%R.H.）に放置した。非乾燥面とした供試体側面には、厚さ0.55mmのゴム系の粘着テープ、塩ビシート、布製粘着テープの順に貼付し、塩ビシートの継目部はポリエステル系テープを用いて確実にシールした。乾燥開始後、3、7、28、91日で層切除を行い、乾燥による初期応力を測定した。

本実験に用いたコンクリートの配合は表-1の通りである。使用したセメントはN社製の早強セメン

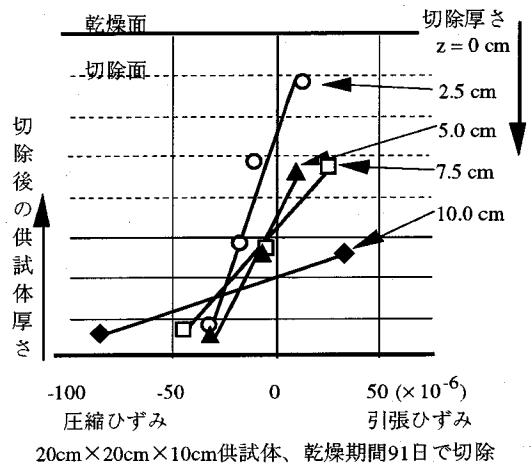
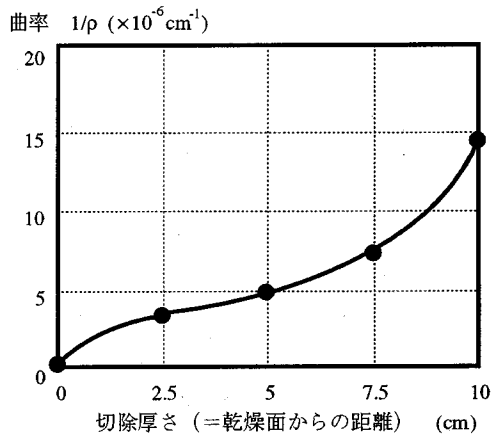


図-7 層切除により生じるひずみ分布



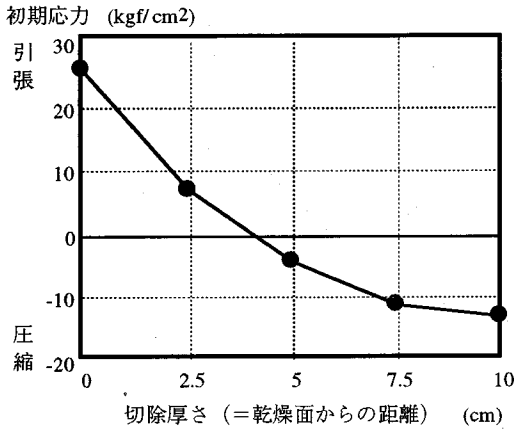
20cm×20cm×10cm供試体、乾燥期間91日

図-8 層切除に伴うコンクリート板の曲率の変化

ト（比重3.14）である。粗骨材は春日井産の碎石で、最大寸法13mm、比重2.62、吸水率0.86%、FM=6.62である。また細骨材は、豊田産の山砂で、比重2.51、吸水率1.47%、FM=2.80である。スランプが8cm程度となるよう、T社製の高性能AE減水剤を適量使用した。

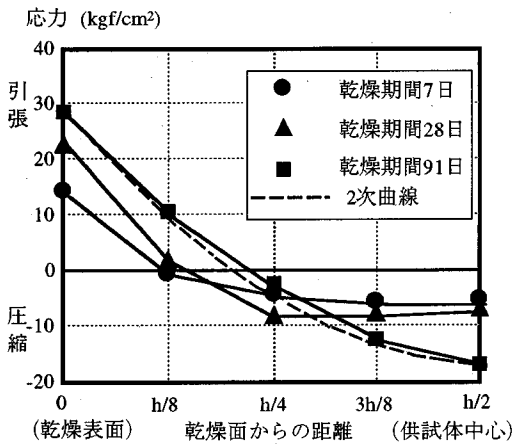
(4) 初期応力の測定結果

2.(2)で述べた応力測定理論に基づいて、層切除により生じるひずみを測定した。図-7に示すひずみ分布は、一辺20cmの供試体を乾燥期間91日で切除した場合の測定結果である。なお、本研究では、上下の乾燥面からの初期応力分布形は、対称であると仮定しており、層切除は供試体高さの半分まで行うにとどめた。残存するひずみゲージ数が減少していくので、それ以上の層切除は有用な情報を与えないからである。

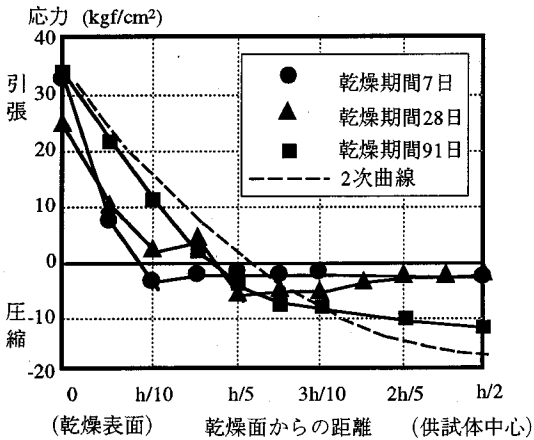


20cm×20cm×10cm供試体, 乾燥期間91日

図-9 層切除より得られる初期応力分布



(a) 1辺20cmの供試体の初期応力分布



(b) 1辺50cmの供試体の初期応力分布

図-10 測定された初期応力分布

図-7に示されるように、実験的に得られたひずみの値は、ほぼ直線分布しており、層切除後の供試体においても平面保持の仮定が成り立っていると判断される。このひずみ分布を最小二乗近似により直線に回帰させ、これにより層切除に伴う曲率の変化を実験的に定めた。

図-8は、図-7のひずみ分布から得られる、層切除に伴う曲率の変化を表したものである。図-8に示された曲線は、プロットされた各点を多項式近似（この場合は4次式で近似）したものである。式(12)において必要となる曲率の微分は、図-8に示された曲線の接線から、また曲率の積分は、図-8の曲線下の面積として、それぞれ定めることができる。そして、最終的に式(12)より、初期応力が計算される。図-9はこのようにして得られた初期応力分布（供試体寸法20cm×20cm×10cm, 乾燥期間91日）の例である。

なお、式(12)によって初期応力を求める際に、曲率の変化に加えて、コンクリートのヤング係数が必要となる。本研究では、プレート状供試体と同一の乾燥条件下に置いた円柱供試体（φ10×20）の圧縮試験から、各材齢におけるコンクリートのヤング係数を別途測定しておき、これを式(12)に適用した。

図-10(a)(b)は一辺20cmならびに50cmの供試体に対して、それぞれ測定された初期応力分布形を示したものである。図の横軸は、分布形の相対的な比較を容易にするため、乾燥面からの距離を、供試体の辺の長さで割って無次元化してある。また、図中の点線は、参考のために示した2次曲線であり、乾燥期間91日における供試体表面での初期応力の値を境界条件として与えたものである。

図-10(a)に示す一辺20cmの比較的小型の供試体の初期応力分布から、乾燥期間の増加とともに、乾燥表面での引張応力が増加し、また応力が引張から圧縮に転じる点も次第に供試体内部に移動していく様子が認められる。乾燥期間28日程度では、応力値が急激に変化するものは、乾燥面に近い部分に限られ、内部の圧縮応力分布は一樣に近い。したがって、この場合は、初期応力分布を2次曲線で近似することは不適當である。ただし、乾燥期間が91日になると、応力分布形はほとんど2次曲線に一致してくる。

一方、図-10(b)の一辺50cmの比較的大型の供試体の初期応力分布には、一辺20cmのものとは比べて大きな違いが見られる。すなわち、乾燥期間の増加に伴い、表面の引張応力は増加し、応力が反転する点も供試体内部に移動していくが、その様子は一辺20cmのものと相似ではない。

例えば乾燥期間91日の場合でも、卓越した引張応力が存在している領域は乾燥表面部にとどまってお

り、この初期応力分布を二次曲線で近似するためには、さらに時間の経過が必要であることを示している。引張応力の存在する領域が表面部に限定されていることに加え、乾燥期間91日の一辺50cmの供試体では、中心部の圧縮応力の分布形が一樣に近く、かつその大きさも一辺20cmの供試体に比べて小さい。

このような傾向は、供試体寸法の増加とともに、さらに顕著となると考えられる。したがって、供試体が小さく、かつ乾燥期間が十分に長い場合を除き、初期応力分布を二次曲線で仮定することは適切ではないと判断される。

3. コンクリート材料特性値の経時変化

(1) 実験の概要

本研究の最終的な目的は、乾燥による初期応力によって、コンクリート曲げ強度の寸法効果がどの程度影響されるかを明らかにすることである。そのために、2.で述べたように層状切除による実験を実施し、初期応力分布に関する実験データを得た。

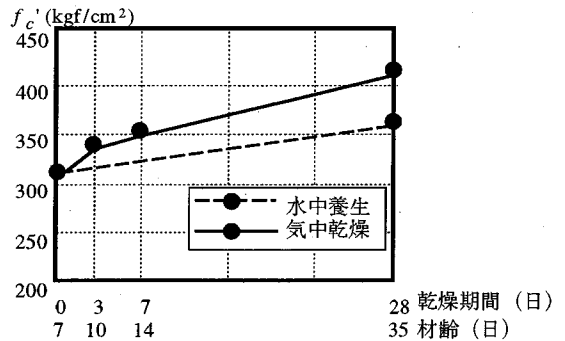
ただし、曲げ強度を数値解析的に予測していくためには、この初期応力分布に加えて、コンクリートの引張強度、弾性係数、破壊エネルギーといった、各種の材料特性値が必要となってくる。そこで、これらの材料特性値が、材齢の進行によって、どのように変化していくかを実験的に明らかにすることとした。

使用したコンクリートの材料と配合は、初期応力測定に用いたものと同一である(表-1)。圧縮強度、引張強度、ヤング係数は、通常の $\phi 10 \times 20$ の円柱供試体より求めることとした。ヤング係数は応力-ひずみ曲線におけるピーク応力の1/3割線係数から定めた。また破壊エネルギー G_F は、RILEMの推奨法に基づき、 $10 \times 10 \times 84$ cmの切欠きはりの3点曲げ試験から求めた。

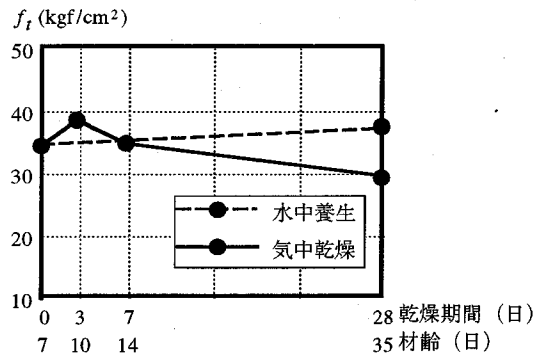
これらの供試体はいずれも1実験条件当たり3体以上作成し、その平均値を求めた。材齢7日までは全て水中養生したが、その後は、気中(25±3℃, 70±5%R.H.)で自由に乾燥させたものと、そのまま水中養生を継続したものに区分した。これは、乾燥の有無が、材料特性値自体の経時変化にどの程度影響するかを調べるためである。

(2) コンクリート材料特性値の経時変化

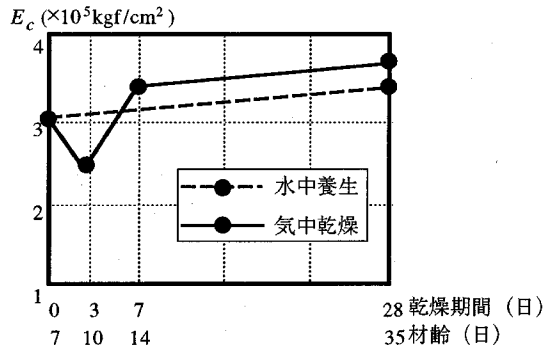
図-11に、圧縮強度、引張強度、弾性係数、破壊エネルギーの経時変化を示す。図中の実線が水中養生後、気中で乾燥させた場合、破線が水中養生を継続した場合を示している。



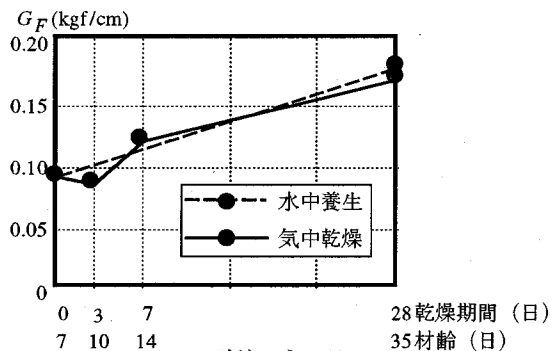
(a) 圧縮強度



(b) 引張強度



(c) 弾性係数



(d) 破壊エネルギー

図-11 コンクリート材料特性値の経時変化

圧縮強度は、気中乾燥、水中養生とも、経時的に漸増していくことがわかる。ただし、乾燥させた場合の方が強度の増加率が大きい。

引張強度は、乾燥させた場合と水中養生では、異なった挙動を示す。水中養生の場合は、圧縮強度同様、漸増していくが、気中で乾燥させた場合は、乾燥開始後、一時急増した後、漸減していく。

弾性係数と破壊エネルギーの経時変化の傾向は類似している。水中養生した場合は、いずれも次第に増加していく。しかし、乾燥させた場合は、乾燥開始後、一時急減し、その後、再び増加に転じ、乾燥期間28日程度では、水中養生の場合と同程度の大きさとなっている。

4. コンクリート曲げ強度の経時変化

(1) 実験の概要

コンクリート曲げ強度における初期応力の影響を検討するため、供試体の寸法と養生条件を変化させた実験を行った。使用したコンクリートの材料と配合は、初期応力分布や材料特性値の測定に用いたものと同一である(表-1)。このコンクリートを用いて、高さ10cm×幅10cm×長さ40cm(スパン30cm)、高さ20cm×幅10cm×長さ70cm(スパン60cm)、高さ50cm×幅10cm×長さ180cm(スパン150cm)の3通りの無筋コンクリートはり供試体を作成した。これを3等分点載荷することにより、コンクリートの曲げ強度を求めた。

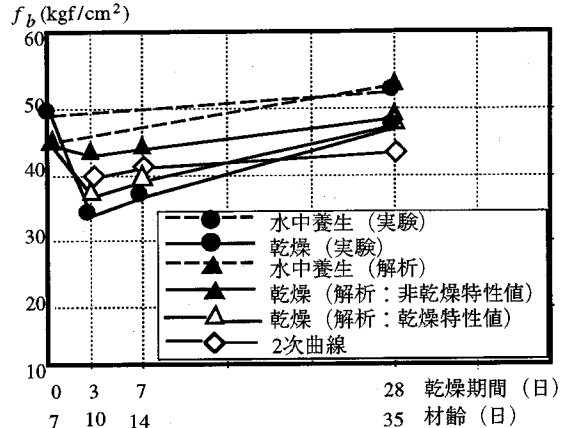
全ての供試体は、材齢7日まで水中養生した。その後は、そのまま水中養生を継続したものと、上下2面を除く4面をシールして、気中(25±3℃, 70±5% R.H.)で放置して乾燥させたものとに区分した。この際の4面のシールの方法は、初期応力測定時に行ったものと同様である。

(2) 実験結果

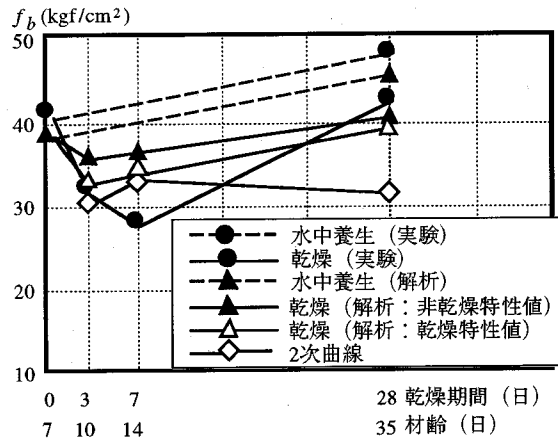
図-12にコンクリート曲げ強度の経時変化を示す。図中の●印が実験結果を示している。

高さ10cmおよび20cmの供試体は各実験条件当たり3体作成し、その平均値を求めた。この場合、水中養生した供試体の曲げ強度は、材齢とともに確実に増加している。これに対して、水中養生後、気中で乾燥させたものの曲げ強度は、乾燥期間3~7日の間、一旦急激に低下し、その後再度上昇し、乾燥期間28日で、ほぼ水中養生したものと同程度まで回復する。

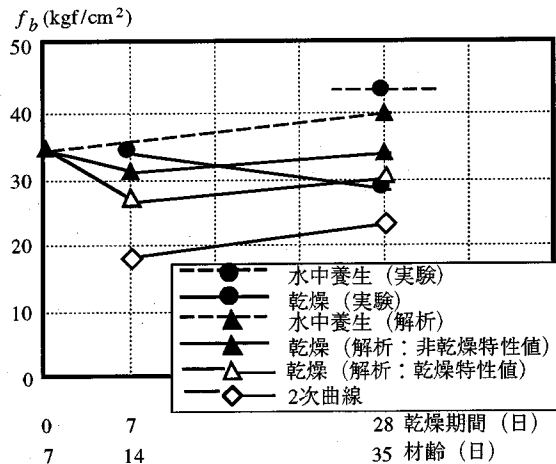
高さ50cmの供試体は、水中養生を継続したもの1体と、乾燥期間7日と28日各1体の計3体である。データ数は少ないのであるが、高さ50cmの場合は、高



(a) 高さ10 cmのはりの曲げ強度



(b) 高さ20 cmのはりの曲げ強度



(c) 高さ50 cmのはりの曲げ強度

図-12 コンクリート曲げ強度の経時変化

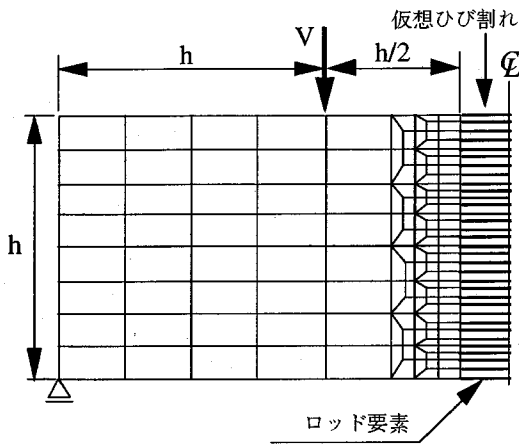


図-13 解析に用いた要素分割

さ10cm, 20cmの供試体で認められたような, 乾燥期間の増加に伴う曲げ強度の回復は認められず, 曲げ強度は乾燥期間の増加とともに次第に低下していく傾向を示し, 水中養生したものの強度に比べて, 明らかに小さい結果となった。

(3) 解析結果

図-12中に△印と▲印で示したものは, 破壊力学に基づき, 仮想ひび割れモデルと, 非線形ロッド要素を用いた有限要素解析の結果である。

乾燥させた供試体の初期応力分布には, 図-10に示した実測結果を直接適用した。なお高さ10cmの場合には, 供試体高さに対して無次元化した高さ20cmの供試体の初期応力分布を与えている。

解析に用いた破壊エネルギー, 引張強度等の材料特性値には, 図-11に示した実験結果を使用した。

図-13に解析に用いた要素分割を示す。対称性を考慮し, はりの1/2部分のみを解析している。スパン中央に仮想ひび割れを配置し, ここにひび割れ方向に垂直に33本のロッド要素 η を配置した。ロッド要素は単位長さ(この場合は, はりの1/2部分を解析していることから, ロッド要素長 $L=1/2$)とし, また引張軟化曲線には1/4モデルを用いた。この他のコンクリート要素は全て弾性体とし, 4節点アイソパラメトリック要素でモデル化した。初期応力, 材料特性は, 全てロッド要素の定式化において考慮した。

図-12において, △印が自由に乾燥させた場合の材料特性値を用いた解析結果であり, ▲印が水中養生を継続した場合の材料特性値を用いた解析結果に対応している。

自由に乾燥させた場合の材料特性値を用いた解析(△印)では, 乾燥の影響を, 初期応力分布の評価

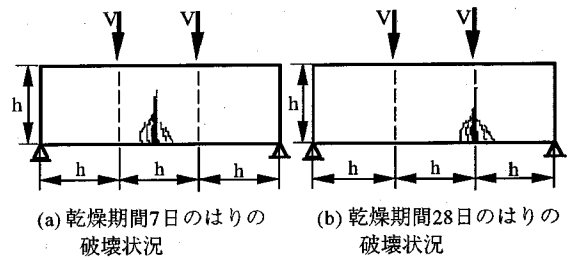


図-14 高さ50cmのはりの破壊時のひび割れ状況

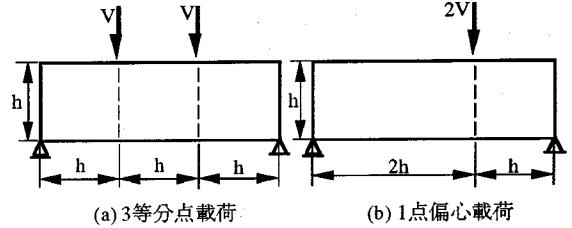


図-15 荷重条件の相違

と, 材料特性値の評価で, 二重に考慮することになる。このため, 水中養生を継続した, 乾燥の影響のない場合の材料特性値を用いる方(▲印)がより適切であるとも考えられるが, 自由に乾燥させた場合の材料特性値を用いた解析結果(△印)の方がより実験結果に近い結果となった。

図-12に示される通り, 高さ10cmおよび20cmのはりの場合, 乾燥による初期応力分布と, 材料特性値の経時変化を考慮した解析結果は, 実験において認められた曲げ強度の低下とその後の回復を再現できている。

図中に◇印で示したものは, 乾燥時の材料特性値の経時変化は考慮したものの, 初期応力の分布形は2次曲線とした場合の解析結果である。この場合は, 乾燥開始後の強度低下は予測されているものの, その後の強度回復はうまく捉えられていない。

この結果は, 乾燥を伴うコンクリート曲げ強度の経時変化の予測のためには, 材料特性値の経時変化に加えて, 断面内の初期応力分布形を正しく評価することが必要であることを意味している。この両者を適切に考慮することにより, 破壊力学に基づく数値解析によって, 曲げ強度の経時変化を予測していくことが可能となるのである。

高さ50cmのはりの場合, 解析的に得られた曲げ強度の経時変化の傾向は, 定性的に言えば, 高さ10cmおよび20cmの場合と同様となった。

高さ50cmの供試体に対して, 実験から得られた破壊時のひび割れ状況を図-14に示す。

実験では, 分配桁を用いて3等分点荷重を行ったのであるが, 図-14に示す破壊時のひび割れ状況か

ら考えて、乾燥期間28日の場合には、荷重の偏心、あるいは載荷点や支点での回転や変位の拘束の影響があったのではないと思われる。

例えば、図-15に示すように、3等分点載荷ではなく、いずれか一方の載荷点で偏心載荷が起きたとすると、同一の荷重作用時に、はりに発生する最大モーメントは4/3倍となる。これは極端な場合であるが、非対称なひび割れ状況からみて、乾燥期間28日のはりでは、偏心載荷等の影響があり、このため実験的に得られた曲げ強度が低下したのではないかと考えられる。

5. 初期応力の影響を考慮したコンクリート曲げ強度の寸法効果

今回得られた実験結果と解析結果を図-16に示す。図の縦軸は、曲げ強度 f_b と引張強度 f_t の比であり、横軸は供試体の高さ h をコンクリートの特性長さ $l_{ch}=E_c G_P / f_t^2$ で割って無次元化したものである。

図中の▲印、●印は乾燥による初期応力が存在しない場合であり、実験では水中養生を継続したものに对应している。一方、□印、△印、および○印は、乾燥により初期応力が存在する場合である。

図-16(a)に示す実験結果によれば、初期応力の影響がない場合、曲げ強度と引張強度の比 f_b/f_t は一つの曲線上に乗っている。したがって、この場合は材齢に依存せず、パラメータ h/l_{ch} によって、 f_b/f_t を一義的に定めることが可能であると言える。

しかしながら、乾燥による初期応力が存在する場合は、 h/l_{ch} の増加とともに f_b/f_t が低下していく傾向、すなわち寸法効果は認められるものの、 f_b/f_t の大きさ自体は、乾燥期間に依存して変化している。これは、4.(3)で述べたように、乾燥の進行に伴う初期応力分布の変化と材料特性値の経時変化の複合作用によるものと考えられる。なお定性的には、 h/l_{ch} が大きくなるほど初期応力の有無による影響が現れ、初期応力の有無によって、 f_b/f_t の大きさに違いが生じていることがわかる。

図-16(b)は、有限要素法による寸法効果の解析結果である。乾燥による初期応力分布には図-10の実測結果、材齢の進行に伴う材料特性値の変化には図-11の実験結果をそれぞれ適用している。

寸法効果解析の結果は、初期応力の影響をより明確に表現している。すなわち、初期応力が存在する場合に対しても、その影響を一義的に評価することが可能であって、しかも h/l_{ch} が大きくなるほど初期応力の有無による影響が増幅されることが示されている。

なお、図-17は、数値解析から得られる曲げ強度

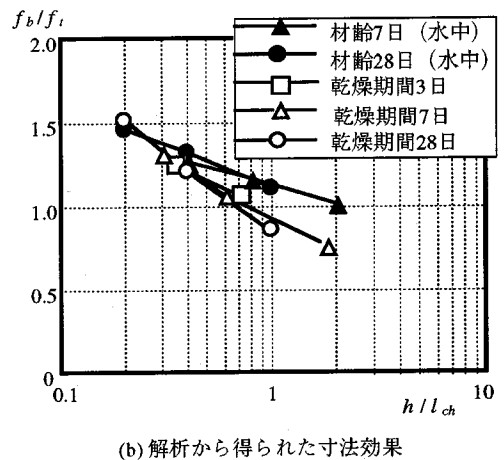
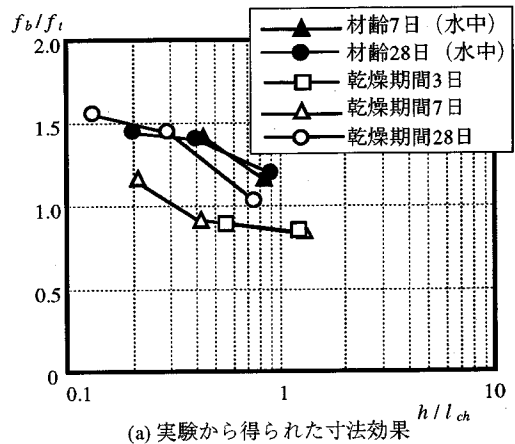


図-16 初期応力を考慮した曲げ強度の寸法効果

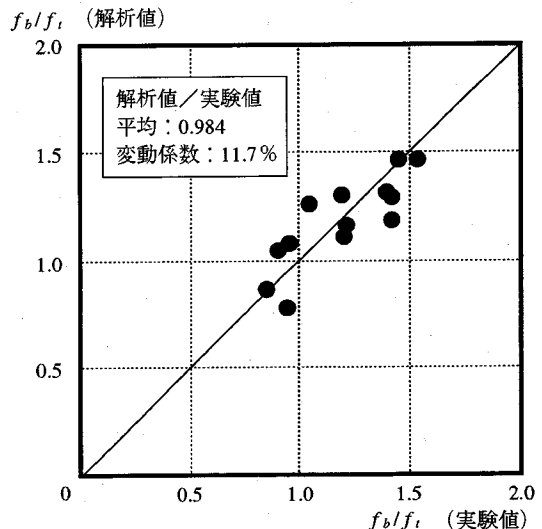


図-17 曲げ強度の解析値と実験値の比較

と実験から得られる曲げ強度を、それぞれ引張強度で無次元化して比較したものである。実験条件として、はりの高さ、初期応力の有無、材齢が変化している。

図-17によれば、解析値と実験値の比の平均は0.984で、変動係数は11.7%である。初期応力が存在する場合であっても、その大きさや分布形を正しく評価し、さらに材料特性値の経時変化を考慮することにより、破壊力学に基づく数値解析により、曲げ強度を精度良く推定できることが認められる。

6. 結論

乾燥収縮による初期応力の存在が、コンクリートの曲げ強度の寸法効果にどの程度影響するかを明らかにすることを目的として研究を行った。まずそのための前提として、初期応力分布を実測し、その分布形状を実験的に明らかにした。さらに、材齢の進行に伴う各種材料特性値の経時変化を実験的に把握した。これらの情報を組み込んだ数値解析により曲げ強度の寸法効果を予測するとともに、これを実験的にも確認した。本研究の結果得られた結論は以下の通りである。

(1)乾燥によるコンクリートの初期応力分布は、コンクリートの寸法、ならびに乾燥期間により変化していく。コンクリートの寸法が小さく、かつ乾燥期間が十分に長い場合は、初期応力分布形を2次曲線で近似することが可能であるが、寸法が大きく、また乾燥期間が短い場合は、2次曲線による初期応力分布の仮定は適切ではない。

(2)コンクリートの圧縮強度、弾性係数、破壊エネルギーは、乾燥状態に置かれた場合でも、経時的に漸増していく。ただし、引張強度は、これらと異なり、乾燥状態では漸減していく結果が得られた。

(3)乾燥状態に置かれた高さ10cmならびに20cmのコ

ンクリートはりの曲げ強度は、乾燥初期には一時急減するが、乾燥期間の増加とともに、次第に回復していく。この一連の現象は、適切な初期応力分布と、材料特性値の経時変化の両方を考慮することにより、数値解析的にも予測可能である。

(4)乾燥による初期応力は、曲げ強度の寸法効果則に影響を与えることが確認された。初期応力の有無の影響は、特に m_{ch} の大きい、比較的大型のコンクリートはりで卓越してくる。逆に、 h/m_{ch} の小さい小型のコンクリートはりでは、初期応力の有無の影響は顕著ではなくなってくる。

謝辞：本研究における実験実施にあたり、中部大学工学部土木工学科・平澤征夫教授ならびに同研究室の皆様から多大の協力を受けました。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) CEB: CEB-FIP Model Code 1990, *Bulletin d'Information*, No. 213/214, 437 pp., 1993.
- 2) 内田裕市, 六郷恵哲, 小柳 治: コンクリートの曲げ強度寸法効果に関する破壊力学的検討, 土木学会論文集, No. 442, V-16, pp. 101-107, 1992.2.
- 3) 日高, 二羽, 田邊: コンクリート曲げ強度の寸法効果に対する各種要因の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.2, pp.33-38, 1994.6.
- 4) 田澤栄一, 宮沢伸吾, 山本哲也, 斉藤幸治: 乾燥を受ける無筋コンクリートの自己応力について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.10, No.2, pp.255-260, 1988.6.
- 5) 秋田 宏, 藤原忠司, 尾坂芳夫: 含水率分布に基づいた乾燥収縮応力の評価, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.403-408, 1991.6.
- 6) 川田雄一他編: 応力測定マニュアル, オーム社, 1972.3.
- 7) 二羽: 非線形ロッド要素を用いたコンクリートはりの曲げ強度寸法効果解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.2, pp.75-80, 1993.6.

(1995.11.20受付)

THE INFLUENCE OF INITIAL STRESSES ON THE SIZE EFFECT OF CONCRETE FLEXURAL STRENGTH

Junichiro NIWA, Shigenori HIDAKA and Tada-aki TANABE

To clarify the influence of initial stresses of concrete due to drying shrinkage on the size effect of flexural strength, the initial stress of concrete has been measured and the stress distribution has been evaluated experimentally. The time-dependent changes of material properties have also been evaluated by the experiment. Based on the fracture mechanics in which these information are incorporated, the influence of initial stresses on the size effect of concrete flexural strength is calculated, and it is verified by the experimental data. According to this investigation, it is found that the existence of initial stresses will provide the large decrease in flexural strength especially for huge plain concrete beams.

有限要素法による3次元 温度ひび割れ解析

森本博昭¹・小柳 洽¹

¹正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科 (〒501-11 岐阜市柳戸1-1)

本研究は、温度ひび割れに対する実用的な3次元解析モデルについて検討を行ったものである。3次元解析モデルの適用性を検証した上で、解析モデルを組み込んだFEMによりコンクリート壁に発生する温度ひび割れの幅および温度応力の3次元分布性状を明らかにした。また、ひび割れ制御鉄筋量とひび割れ幅との関係についても検討を行った。さらに、2次元FEM解析とCPひび割れ幅法の適用性について明らかにした。

*Key Words: thermal crack, discrete crack model, bond slip model, FEM, extended CP method
crack control, 3-d analysis, thermal stress*

1. はじめに

温度ひび割れは、構造物の耐久性および機能性に悪影響をおよぼすので、設計および施工の段階において十分な配慮が必要である。ひび割れ対策を実施するにあたっては、事前に対策の実施条件とひび割れ幅などとの関連を検討しておくことが必要となる。過去にいくつかの温度ひび割れの解析方法が提案されたが、近年、日本コンクリート工学協会マスコンクリートの温度応力研究委員会（以下、JCIマスコン委員会という）からCPひび割れ幅法¹⁾ならびに有限要素法（以下、FEMという）温度ひび割れ解析モデル²⁾が提案された。さて、現時点でのひび割れ解析は、大半がひび割れを2次元的にモデル化するものである。しかし、実際のひび割れは3次元的に変化するものと考えられる。このため、既往の2次元的な解析では、得られたひび割れ幅などの計算結果がどの断面のものであるが不明確となっている。また、2次元FEM温度ひび割れ解析（以下、2次元解析という）では壁厚さ方向の温度分布の取り扱いも問題となる。一方、実務面では経験的に対策の実施条件が決定され、結果として期待した効果が得られなかった場合もある。実効のある温度ひび割れの制御を実現するためには、対策の実施条件とひび割れの制御効果の関係を3次元的に把握することが有効である。さらに、次元温度ひび割れ解析（以下、3

次元解析という）はCPひび割れ幅法などの簡易算定法および2次元解析の精度の検証ならびに改善を計る上でも大きな意義を有する。

本研究は、離散ひび割れモデルを導入した3次元解析法により壁体の温度応力およびひび割れ幅の解析を行い、壁体における温度ひび割れ幅の3次元的な分布性状を実測値と比較しながら明らかにしたものである。また、3次元解析に加えて、2次元解析ならびにCPひび割れ幅法を用いた解析も行い、3次元解析結果との比較を行いながらこれらの適用性と問題点を指摘した。さらに本研究で示した3次元解析法を用いて、鉄筋のひび割れ幅制御効果を明らかにした。

2. 3次元解析モデル

本研究で用いた3次元解析モデルは、離散ひび割れモデルを用いたJCIマスコン委員会モデルの基本概念¹⁾に添ったものである。図-1に示すように、本モデルではひび割れ位置に定義された2つの節点間の開きによってひび割れが表現される。本研究では、ひび割れの発生予想位置にあらかじめ2つの節点を定義しておき（以下、二重節点という）、ひび割れ発生までは大きな剛性を持つ結合要素で節点間を結合しておく。そして、ひび割れ発生の時点で結合要素の剛性を極めて小さな値とすることによりひび割れを表現する手法を用いた。また、鉄筋の付着すべり