

論文

[1092] コンクリートの大型供試体直接引張試験装置に関する研究

正会員○佐藤 正俊 (中部電力 電力技術研究所)

正会員 上田 稔 (中部電力 電力技術研究所)

正会員 遠藤 孝夫 (電力中央研究所)

長谷部宣男 (名古屋工業大学)

1. まえがき

コンクリートの破壊力学[1]やマスコンクリートの温度応力の問題[2]などにおいては、コンクリートの引張特性の解明が重要なテーマであり、そのために種々の引張試験法が用いられている。その試験法の中で直接引張試験は一軸応力状態の試験として、理想的であるが大変難しい試験とされている。本研究はこの直接引張試験をできるだけ適正に行うための試験方法について若干の考察を行うとともに、特に供試体寸法や骨材の大きさ、試験方法の影響等の引張特性の解明に資するため、従来のものに比して大型な供試体の直接引張試験装置について研究を行うものである。従来の直接引張試験は、供試体直径10~15cm程度以下、最大骨材寸法20~40mm程度以下のものがほとんどである。

過去に行われた直接引張試験方法は供試体に引張力を与える方式より、(a) ボルト締め方式 (b) 挟み込み方式 (c) 埋め込みボルト方式 (d) 鋼板接着方式に大別される(図-1)[3]。また、供試体形状は一様断面の円柱、角柱、断面形状の変化した鼓形等、様々なものが用いられ現在でも確立された試験方法はない。直接引張試験が適正であるためには、偏心のない一軸引張状態で供試体内を一樣な応力状態とする必要がある。特にコンクリートの破壊過程においては、コンクリートの材料複合性により一部の骨材界面の剥離が起点となり破壊が進行し、その後の試験状態ひいては試験結果に大きく影響を与えることになる。またこの影響は供試体を大型化したり、骨材を大きくする程大きくなり易いと考えられる。この点を考慮すると直接引張試験においては、少なくとも試験方法に起因して不均一な応力状態が生じないようにし、載荷初期段階では一樣な応力状態とすべきである。従来の直接引張試験においても、試験方法に起因して十分な試験成功率が得られなかったり、引張強度を適正に評価していない場合がいくつかあると思われる。

本研究では、まず供試体内にできるだけ一樣な応力状態を得るという点に着目し、試験方法の選定を行った。そしてその結果採用した方法(供試体と鋼板の断面が同じ鋼板接着方式で、供試体の断面も一樣な方法、以下鋼板及び供試体断面一樣鋼板接着方式と称する)に対し、試験治具が供試体内の応力状態に与える影響についての解析的検討をFEM解析により詳細に行い、その検討結果より試験治具の設計を行った。さらに、作製した装置を用いてφ30xH60cmの円柱モルタル供試体の直接引張試験を行い、試験装置の妥当性の検証を行った。これにより、コンクリートの大型供試体直接引張試験装置を提案するものである。

2. 試験方法の考察と選定

供試体内の応力状態を一樣にするという点より、従来の試験方法(試験方式及び供試体形状)について考察を行う。

(a) ボルト締め方式、(b) 挟み込み方式、(c) 埋め込みボルト

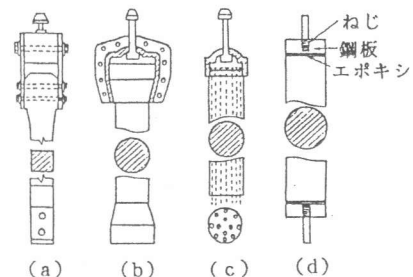


図-1 直接引張試験方式 文献[3]

ト方式は、いずれもボルトや挟み込み治具とコンクリートの接触面で応力が不均一となり、供試体内に応力状態が一樣でない範囲が必ず存在する。(a)、(c)方式では、偏心しないようボルトを供試体の中心軸上に正確に埋め込まなければならない。さらに正確に埋め込んだとしても、載荷時に埋め込んだボルト付近の骨材の分布や、ボルトとコンクリートの付着の不均一さ等が原因となって偏心が生じ易い。供試体形状はいずれの方式でも、断面変化があると応力集中が生じ、破壊の起点となり易い。供試体の断面は全長にわたって一樣とする必要がある。(b)方式で断面変化部のある供試体を用いた齊藤らの試験 [4]は、成功率が約70%であり、残りは全て供試体の断面変化部で破断している。また、コンクリートの大型供試体の直接引張試験は、(c)方式で断面変化のある供試体を用いたXie, N.らの試験 [5] (供試体長360cm、計測断面45x45cm、最大骨材寸法 150mm)がある程度であるが、その成功率は約60%であり、試験方法の影響があると考えられる。上記に対し (d)鋼板接着方式では、アタッチメントの鋼板を供試体と同じ断面とすれば、鋼板と供試体接着面直下での断面変化による応力集中を防ぐことができる。さらに、鋼板内で応力状態が一樣となる程鋼板厚さを厚くすれば、接着面直下より供試体内の応力状態をほとんど一樣にすることができる。この方式は接着面より破断する可能性が高いという指摘 [6]があるが、近年の接着剤の開発により短時間で高い接着強度を持ち、高温加熱等により除去も容易な接着剤が市販されており、これを用いた報告もいくつかなされている。しかし、鋼板及び供試体断面を等しくし、かつ供試体断面も一樣として試験を行った例はほとんどないようである(例えば文献 [7]、[8])、文献[9]が見当たる程度である。また、(d)方式を除いては治具の取り付け範囲が必要であり、その上供試体のある範囲を一樣な応力状態とするためには、供試体を大きくしなければならない。大型供試体を対象にした試験では極めて大きな供試体となる [5]。

以上より、直接引張試験を適正に行うには、供試体と鋼板の断面が同じ (d)の鋼板接着方式で、供試体の断面も一樣とする鋼板及び供試体断面一樣鋼板接着方式が最良の方法である。この方法による試験装置の概略図 ($\phi 30 \times H60 \text{cm}$ 供試体の場合) を図-2 に示す。なお、以下に $\phi 30 \text{cm}$ 、 $\phi 15 \text{cm}$ 円柱供試体用試験治具の設計を解析的検討を基に行うが、円形に限らず他の断面形状の供試体に対しても同様な検討を行い、試験治具を設計することができる。

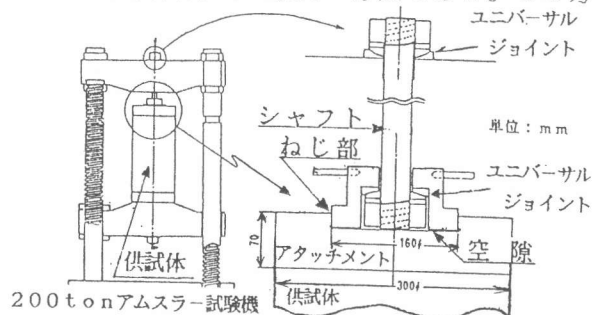


図-2 直接引張試験装置 ($\phi 30 \text{cm}$ 供試体用)

3. 解析的検討

3.1 検討内容

試験装置は円柱供試体に接着したアタッチメントの鋼板をシャフトにセットする部分がねじ込み式であるため、アタッチメントにシャフトをねじ込む部分 (ねじ込みシャフト) 下部には空隙がありここでは応力が伝達されない (図-2)。引張応力はシャフトからねじ部を通してのみアタッチメントへ伝達される。このためねじ込みシャフト半径が大きすぎると中央部の応力は小さくなる。反対に半径が小さすぎると供試体の外側の応力が小さくなる。また、アタッチメントが厚い程、接着面直下より一樣な応力状態を得易い。このため一樣な応力状態を与える主な要因として、(1)ねじ込みシャフト半径 (r)、(2)アタ

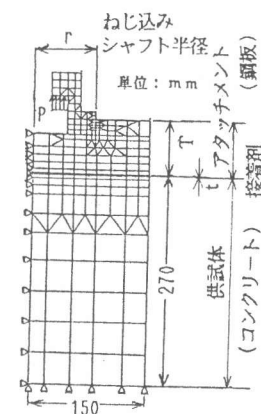


図-3 解析モデル図

ッチメントの厚さ (T) について比較検討した (検討 I (形状検討))。各解析ケースに対し供試体内の応力状態 (鉛直方向応力) を比較し、応力状態が供試体内の広い範囲で一様となっているものを見出す。さらに検討 II (接着剤に関する検討) として、検討 I (形状検討) により選定したアタッチメントを対象に (1) 接着剤厚さ (t)、(2) 接着剤の物性の影響についても調べた。

3. 2 解析モデルと解析手法

試験装置の 1/4 をモデル化し、円筒座標系軸対称 FEM 解析を行った。モデルの一例を図-3 に示す。応力の伝達状態を正確に把握するためシャフト部を含めたモデルとした。シャフトがアタッチメントに取り付けられるねじ部の厳密なモデル化は要素数の膨大な増加をもたらすモデル化が複雑になる。また、厳密なモデル化を行ったとしても雄ねじと雌ねじのせん断特性の設定は難しい。さらに、ねじ部には上部程応力が集中する。本解析では以上の点を考慮して、ねじ部の 1/2 のみがアタッチメントに連続的に結合されているモデルとした。なお、ねじ部の長さについては鋼板の厚さを不必要に厚くしないよう、ねじ込みシャフト半径ごとに設計し [10]、必要最小限の長さとした。要素は三角形 (6 節点)、四角形 (8 節点) アイソパラメトリック要素を用いた。各材料物性は試験に基づき表-1 の値とした。

3. 3 解析結果

(1) 検討 I (1) ねじ込みシャフト半径

一例として、アタッチメント厚さ 70mm に対し、ねじ込みシャフト半径を 70~90mm の範囲で 5mm ピッチで変化させ、接着面直下と供試体内 50mm の応力状態を比較したものを図-4 に示す。縦軸は鉛直方向応力 σ_z を供試体内が一様な応力状態となった場合の応力 σ_0 で除し無次元化した値 (以下応力係数)、横軸は供試体中心軸からの距離を表す。応力係数が 1 を越える部分は試験においてこの範囲で破壊が進行してしまう可能性がある。例えば、ねじ込みシャフト半径 70mm は、80mm に比べ接着面直下で応力係数が 1 を越える部分がかなり大きくなっており、ねじ込みシャフト半径が応力状態に与える影響が大きいことが分かる。また、応力係数の最大は接着面直下に比べ供試体内 50mm の位置でかなり小さくなっている。アタッチメント厚さ 70mm に対し、ねじ込みシャフト半径 80mm が最も一様に近い応力状態である。同様の検討をアタッチメント厚さ 60、80mm に対しても行った。

(2) 検討 I (2) アタッチメント厚さ

上述のとおり、アタッチメント厚さを 60、70、80mm のそれぞれの場合に対し最適のねじ込みシャ

表-1 材料物性

材 料	弾性係数 (kgf/cm ²)	ポアソン比
コンクリート	320,000	0.2
接着剤	* 34,000 (材令 7 日) 27,000 (" 3 日) 19,000 (" 1 日)	0.42
鋼 板	2,100,000	0.29

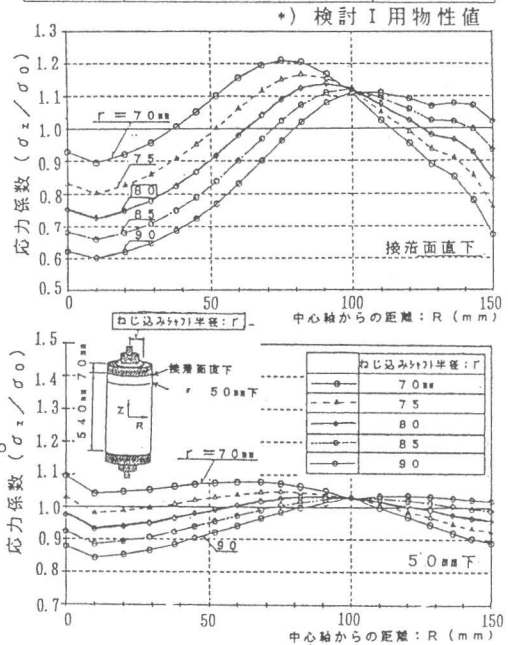


図-4 ねじ込みシャフト半径の影響

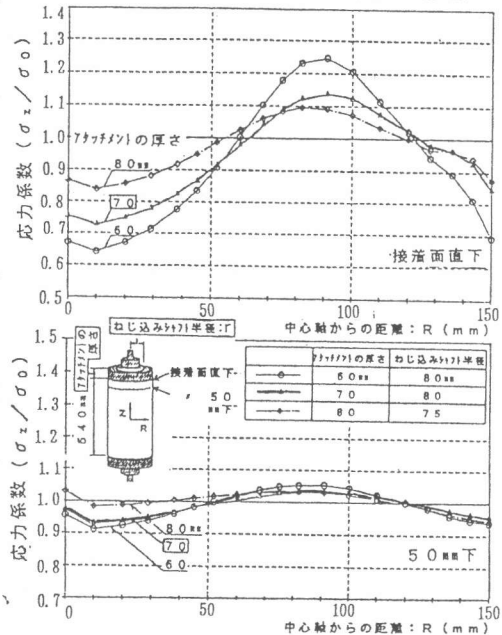


図-5 アタッチメント厚さの影響

フト半径を求め、その接着面直下と供試体内50mmの応力状態を比較した結果を図-5に示す。当然ながらアタッチメントが厚くなる程、応力の最大値は抑えられ良い結果である。

以上の結果より、最適なアタッチメントの厚さとねじ込みシャフト半径を決定する。基本的には供試体内は一樣な応力状態の応力係数を1とするべきであるが、アタッチメントを供試体に接着する際の作業性を考慮するとその重量はできるだけ軽くしたい。そこで、40kgを越えない重さを一つの目安とし、応力状態の良いものを選定する。アタッチメント厚さ60mmは接着面直下の応力係数の最大値は1.25であり、他に比べ約1割も大きく応力状態は悪い。厚さ80mmのアタッチメントでは応力状態は他に比べ良いが約42kgの重量となる。さらに、供試体内に50mm程度入った所では、応力係数の最大値はアタッチメント厚さ70mmと80mmではほとんど同じであり、応力係数1に対しわずか3%大きいだけである。従って、ねじ込みシャフト半径80mm、厚さ70mmのアタッチメントを作製することとした。この場合の供試体内部の応力状態を図-6に示す。応力状態は供試体内部に入るに連れて一樣に近づき、供試体内90mmではほとんど一樣であることが分かる。また、図は略すが供試体内25mm以上内部では、半径方向応力 σ_r 、回転角方向応力 σ_θ 、せん断応力 τ_{rz} がほとんど零で一樣となっており、一軸応力状態である。なお、実際の試験においては、供試体接着面より90mm以内で破断している場合や、たとえ90mm以上の内部で破断しても、接着面より90mm以内に貼った表面ゲージの値が他の位置の値より先に大きくなり、この部分で破壊が先行していると認められる場合は、その後の試験状態に影響があると考えて、試験結果に含めないようにするのが望ましい。

$\phi 15\text{cm}$ 供試体用のアタッチメントについても $\phi 30\text{cm}$ 供試体用と同様の検討を行った。その結果最も一樣な応力状態に近いアタッチメント厚さは80mm、ねじ込みシャフト半径は60mmであった。図-7はその場合の供試体内の応力状態である。 $\phi 30\text{cm}$ 供試体用の場合と異なりアタッチメントが厚くても重量は軽く作業性に問題ないので、接着面直下より供試体内の応力状態をほとんど一樣とすることができる。なお、この結果を基に $\phi 30\text{cm}$ 供試体用アタッチメントを相似形として作製すると、厚さは16cmでその重量は約96kgとなり作業性が非常に悪くなる。

(3) 検討II (1) 接着剤厚さ

アタッチメントの鋼板接着時に接着剤を所定の厚さにすることは困難である。そこで、接着剤

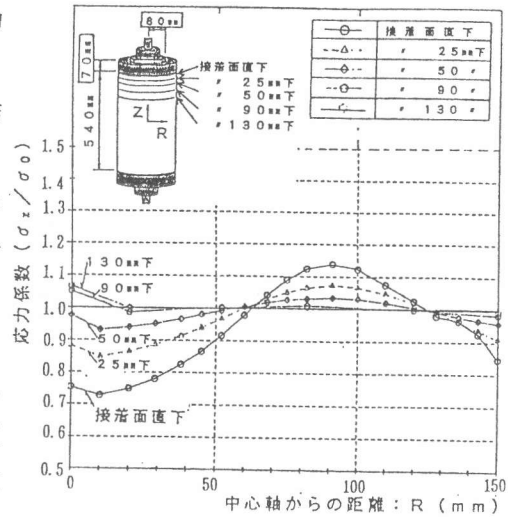


図-6 応力分布図 ($\phi 30\text{cm}$ 供試体)

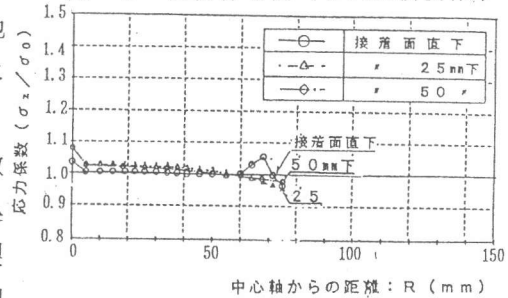


図-7 応力分布図 ($\phi 15\text{cm}$ 供試体)

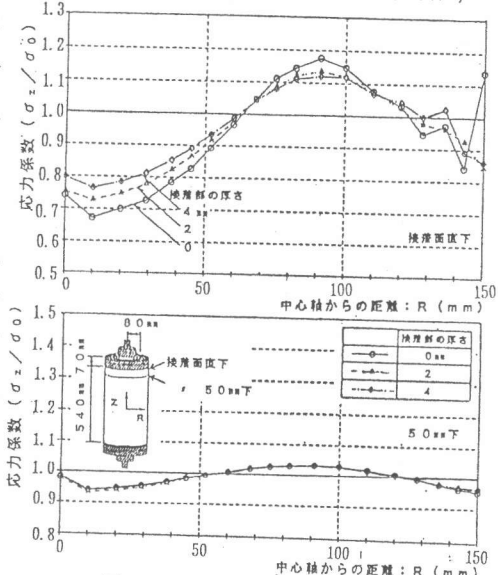


図-8 接着剤厚さの影響

の厚さを0, 2, 4mm と変えて接着剤の厚さが応力状態に与える影響を比較した結果を図-8に示す。アタッチメント形状は検討I（形状検討）で決定した厚さ70mm、ねじ込みシャフト半径80mmである。図より接着剤の厚さが厚くなるほど接着面直下の応力状態が一様に近くなる。これは接着剤の弾性係数がアタッチメントの約1/100、コンクリートの約1/10と小さく、これが供試体内の応力集中の緩衝材となっていると考えられる。応力係数の最大値は接着面直下で2mmと4mmとでほとんど差がなく、供試体内50mmでは全く差はない。よって、接着剤の厚さが供試体内の応力状態に与える影響は小さい。

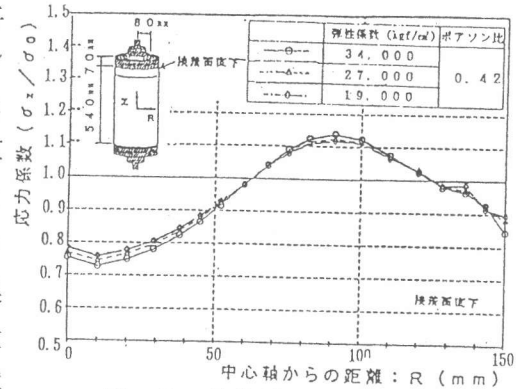


図-9 接着剤の物性の影響

表-2 試験条件

材 令	接着剤	2 日
	供試体	12 日
荷重速度	0.06 kgf/cm ² /sec (割裂試験相当)	

(4) 検討II(2)接着剤の物性

接着の時期や接着してからの材令により接着剤の物性は異なる。そこで、物性試験に基づき接着剤の物性を表-1に示すように変え、その影響を比較した結果が図-9である。図より接着剤の物性が供試体内の応力状態に与える影響はほとんどないと言える。実際の試験においては所要の強度が得られるアタッチメント接着後1日で試験可能である。

表-3 配合条件

配合	セメント	水	細骨材
	1	0.52	2.75
セメント	早強ホ [®] ルトラ [®] セメント		

4. モルタル供試体試験

4.1 試験概要

3. の検討結果に基づき作製した試験装置の妥当性を検討するため、コンクリートよりも材質的に均質なモルタル供試体を用いて検証試験を行った。試験は当社研究所所有の200tonアムスラー試験機に直接引張試験用装置を取り付け行った(図-2)。試験条件を表-2に示す。試験では、上部のシャフト部に取り付けたロードセルより荷重を読みとり、供試体表面の90°ごとに6カ所ずつ貼り付けたゲージ(60mm)よりひずみを計測した(図-10)。この応力-ひずみ関係より試験の妥当性を評価する。

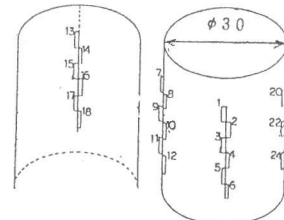


図-10 ゲージ位置
(φ30cm供試体)

4.2 供試体の作製

供試体は、φ30xH60cm、φ15xH30cmそれぞれ3体である。配合を表-3に示す。打設して翌日脱型しすぐに水中養生した。材令8日で供試体端面を上下3cmづつダイヤモンドカッターでカットした。これは供試体上端部のレイタンスによる弱部や供試体下端部に大きな骨材が集まりやすいことより、大型供試体の上下端部は中央部に比べ材質が異なり変形の不均一さの原因となる可能性があるためである。さらに上下端面を平行にすることで形状による偏心を防ぐことが期待できる。端面カット後気中養生し、表面ゲージの接着とアタッチメントの接着を行った。なお、特殊な端面処理は行っていない。

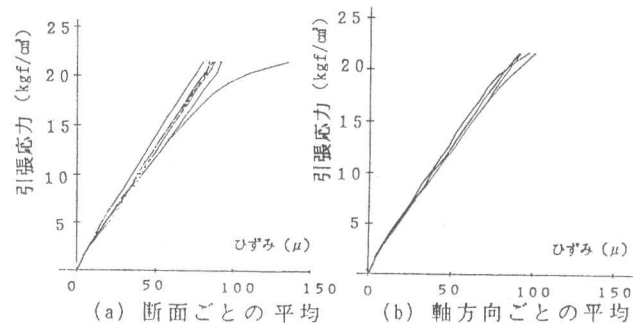
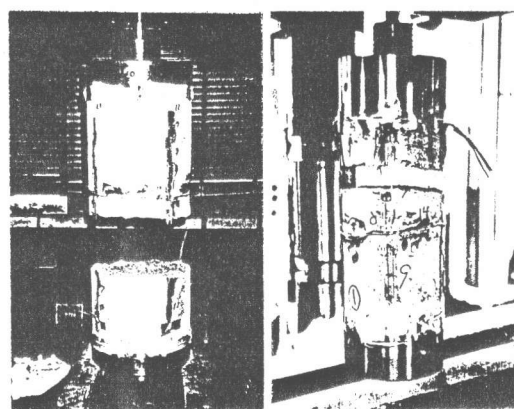


図-11 応力-ひずみ曲線

4.3 試験結果

ひずみ測定結果の一例としてφ30cm供試体の応力-ひずみ曲線を図-11(a)、(b)に示す。(a)は

供試体の断面ごとのひずみを平均し、比較した図である。(b)は軸方向ごとのひずみを平均し、比較した図である。図より骨材界面の剥離が生じてないと考えられる低荷重レベルでは、応力-ひずみ曲線は線形であり、各線ともほぼ一致している。これより供試体全体の応力状態がほぼ一様であると考えられる。また、図には示していないが $\phi 15\text{cm}$ 供試体からも同様の結果が得られている。なお図-11(a)において高荷重レベルになるに連れて、破断面となった断面のひずみが他の断面の歪みに比べ大きくなり 100μ 以上の値で破断している。



(a) ($\phi 30\text{cm}$ 供試体) (b) ($\phi 15\text{cm}$ 供試体)

写真-1 供試体破断状況

写真-1 (a)、(b) に供試体の破断状態の一例を示す。供試体は全て供試体内で破断しており、その位置は $\phi 30\text{cm}$ 供試体では供試体下部のアタッチメント接着部より $12\sim 37\text{cm}$ 、 $\phi 15\text{cm}$ 供試体では $13\sim 21\text{cm}$ の範囲でばらついている。引張強度は $\phi 30\text{cm}$ 供試体では $19.6\sim 22.7\text{kgf/cm}^2$ 、 $\phi 15\text{cm}$ 供試体では $22.4\sim 27.0\text{kgf/cm}^2$ であり、供試体本数が3本と少ないものの強度のばらつきは比較的小さい。なお、現在コンクリート供試体 ($\phi 30\times H60\text{cm}$ 、 $\phi 15\times H30\text{cm}$) の試験を行っているが、ほとんどが供試体内で破断しており、 $\phi 30\text{cm}$ 供試体においては供試体接着面より 90mm 以内で破断しているものはごくわずかである。また引張強度のばらつきが比較的小さい結果が得られている。

5. 結論

- (1) 大型供試体の直接引張試験装置について、供試体内の応力状態をできるだけ一様にするという点から試験方法の選定を行った。その結果、供試体と鋼板の断面が同じ鋼板接着方式で、供試体の断面も一様な方法（鋼板及び供試体断面一様鋼板接着方式）が最良の方法と考えられる。
- (2) この試験方法においては、供試体内の応力状態にねじ込みシャフト半径やアタッチメント厚さが大きな影響を与える。試験治具の設計には試験装置を模擬した解析的検討を行う必要がある。本研究では $\phi 30\text{cm}$ 、 $\phi 15\text{cm}$ 供試体用試験治具の設計をFEM解析結果を基に行った。円形に限らず他の断面形状の供試体に対しても同様な検討を行い、試験治具を設計することができる。
- (3) アタッチメント接着の接着剤の厚みや物性は、供試体内の応力状態にはほとんど影響しない。
- (4) 本研究において作製したコンクリートの大型供試体直接引張試験装置により、供試体寸法、骨材の大きさ、試験方法等、引張特性の要因に関する試験が行われることが期待される。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造の破壊力学に関するコロキウム、第3章、破壊靱性パラメータと試験法、pp.18-34、1990。
- 2) 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報告書、日本コンクリート工学協会、1985。
- 3) 岡田 清・六車 熙：コンクリート工学ハンドブック、朝倉書店、pp.393-394、1981。
- 4) Saito, M. and Imai, S. : Direct Tensile Fatigue of Concrete by the Use of Friction Grips, ACI Journal, pp.431-438, 1982。
- 5) Xie, N. and Liu, W. : Determining Tensile Properties of Mass Concrete by Direct Tensile Test, ACI Materials Journal, pp.219-219, 1989。
- 6) 吉本 彰ほか：純引張試験用コンクリート供試体に関する研究、セメント技術年報、Vol.27、pp.231-234、1978。
- 7) Guo, Z. and Zhang, X. : Investigation of Complete Stress-Deformation Curves for Concrete in Tension, ACI Materials Journal, pp.278-285, 1987。
- 8) Tinic, C. and Bruhiwilert, E. : Effect of Compressive Loads on the Tensile Strength of Concrete at High Strain Rates, The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol.7, No.2, pp.103-108, 1985。
- 9) 篠原保二ほか：コンクリートの引張強度に及ぼす曲げ変形の影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.481-482、1991。
- 10) 日本機械学会：機械工学便覧、日本機械学会、pp.7.35-7.36、1977。