

論文 等分布荷重下における大型鉄筋コンクリート円形スラブのせん断耐力

秋山 暉*¹・後藤貞雄*²・中沢 亨*³

要旨：コンクリート製大型容器や海洋構造物の底版では円形スラブに等分布荷重が作用する機会が多いが、この種の構造物のせん断耐力については明確な算定式が提案されていない。そこで円形スラブのせん断耐力と破壊時の特性を明らかにするため、想定した実構造物の1/8程度の縮尺模型を用いて鉄筋配置の影響とせん断補強筋の効果に着目した等分布荷重実験を行った。実験の結果、大型円形スラブに対しても、小型の円形スラブについて得られたせん断耐力式を用いて耐力算定が可能であることおよびせん断補強筋の効果を確認した。

キーワード：円形スラブ、等分布荷重、せん断耐力、せん断補強筋、耐力式

1. はじめに

コンクリート製大型容器や海洋構造物で円形のスラブに等分布荷重が作用する場合のせん断耐力についてはこれまであまり研究されておらず、従来、この種の構造物を設計するには梁に対するせん断設計法を準用する機会が多かった。しかし、二方向鉄筋の影響による耐力の増加やせん断補強筋の影響などスラブ特有の問題があり、大型構造物にも適用可能な円形スラブのせん断耐力式の確立が必要である。

ここでは、直径50~70m、部材厚さ5~7m程度の大型の構造物を想定し、これに等分布荷重が作用する場合のせん断耐力を対象として、形状、配筋等をモデル化した縮尺模型を用いて耐力実験を行い破壊時の特性を明らかにしようとするものである。また、円形スラブのせん断耐力式については小型の試験体について報告された算定式〔1〕の適用性を検証した。

2. 実験概要

大型円形スラブ試験体は、D51鉄筋を用いた実構造物の1/8程度の縮尺模型試験体を想定することとし、D6鉄筋を用いて、配筋状況を実構造物に近似させたものであり、これまでの既往の研究〔1〕に用いられた試験体に比べて約4倍の大きさである。荷重は、試験体外周近傍に配置した支点到囲まれた直径7.8mの円形状の荷重面に、油圧によって等分布荷重を作用させた。

これまで、大型円形スラブについてはスケール効果の影響やせん断補強筋の効果に関しての研究がほとんど行われていないので、ここでは、せん断補強筋の無い場合で有効高さと配筋状態の違いに着目した試験とせん断補強筋の有無に着目した試験の2種類を3体の試験体を用いて行った。また、検討は等分布荷重作用時の破壊モードの把握や、斜めひびわれと鉄筋降伏の関係、大型円形スラブの耐力、せん断補強筋の効果の確認等について行った。

* 1 鹿島建設(株)技術研究所第一研究部主管研究員 (正会員)

* 2 東京ガス(株)生産技術部部長 (正会員)

* 3 清水建設(株)土木本部設計第2部部長

表-1 試験体の諸元

	試験体寸法			鉄筋			コンクリート
	有効高さ d(mm)	載荷径 ℓ (mm)	ℓ / d	半径方向鉄 筋比 p_r (%)	円周方向鉄 筋比 p_o (%)	せん断 補強筋	試験時強度 (MPa)
No.1 試験体	872	7,800	9	0.32~0.74	0.45~0.74	無	22.2
No.2 試験体	780	7,800	10	0.40~0.75	0.49~0.75	無	29.8
No.3 試験体	872	7,800	9	0.32~0.74	0.45~0.74	有	28.5

2. 1 試験体

試験体の諸元は表-1に示したとおりであり、No.1試験体は試験体直径/有効高さ (ℓ/d)=9 で施工の簡便さを考慮して斜め筋の上に4段の引張鉄筋を配置したもので、中心付近の主筋は格子状に配置し、ここから外周に向かっては半径方向と円周方向配置である。また圧縮鉄筋も同様の2段配筋であり、隅角部はゲルバーヒンジの検討を行い斜め鉄筋を配置した。この配筋状況を図-1に示した。No.2試験体は $\ell/d=10$ であり、鉄筋の定着をより確実にするために斜め筋を主筋の上段筋に定着した。

また、No.3試験体はNo.1試験体にせん断補強筋を配置した構造で、No.1試験体で得られた結果を基本として、「コンクリート標準示方書」(6.3.5)式[3]の梁におけるせん断補強筋の効果が円形スラブにおいても期待できるかどうかを検討するものである。配筋の設計は、図-2の斜線部Vsに相当する補強を行い検討荷重を達成するように計画した。

2. 2 使用材料

コンクリートに使用した最大骨材寸法は $G_{max}=10\text{mm}$ で打設時期が各試験体で異なるため、コンクリートの配合は、標準養生試験体の圧縮強度 $\sigma_{28}=24\text{MPa}$ を目標として、それぞれの試験体で若干変えた。使用した鉄筋は全てD6であり、No.1試験体では $\sigma_{sy}=430\text{MPa}$ 、No.2、No.3試験体では $\sigma_{sy}=380\text{MPa}$ の鉄筋を用いた。

2. 3 試験体の製作

コンクリート打設は実構造物と同一の2層打ちとするため上段鉄筋の下で一層目を打ち止め、上段鉄筋を組立てた後に二層目を打設して完成させた。

2. 4 試験方法と計測項目

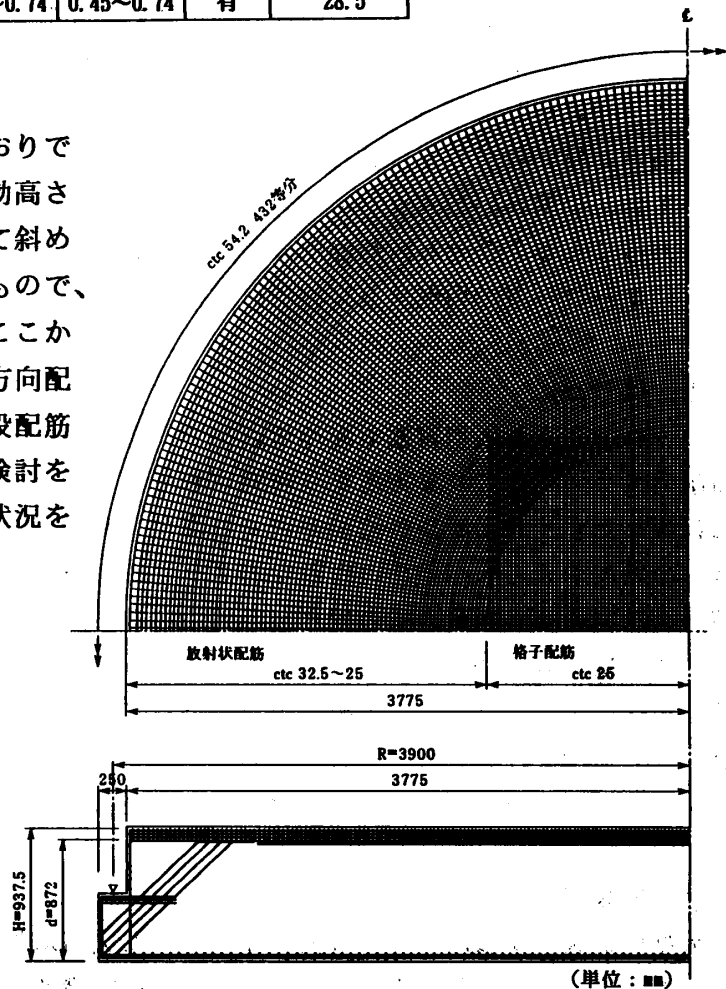


図-1 No.1試験体の配筋例

載荷装置を図-3に示したが、支点間距離 7.8mを直径とする載荷面にポリウレタンゴム製のダイヤフラム式油圧ジャッキで等分布荷重を作用させるもので、ジャッキ反力は試験体外周48等分割点に設置した支承で単純支持することとした。

載荷は一方向の繰返し載荷で行い、第3サイクルで支点から1d内側の断面に作用するせん断応力度が梁としての許容応力度に達するように設定し、各サイクルの荷重を順次高めながら第4サイクルで破壊させた。

計測は荷重、ひびわれ幅、変形、鉄筋ひずみ、コンクリートひずみの5項目で各試験体 350点以上について測定を行った。

3. 実験結果と考察

3.1 破壊モードの検討

円形スラブの場合、部材内部でのひびわれ伸展状況を実験中に観察することができない。そのため、破壊モードを正確に把握することは極めて困難であるが、①荷重と中心位置の変位(図-4)、②直径に沿って切断した断面の破壊状況(図-5)、③荷重と鉄筋ひずみの変化曲線(図-6、7)の関連性を検討することによって破壊モードの推定を試みた。

まず検討に当たっては、せん断補強筋のあるNo.3試験体について破壊モードを検討し、その結果を踏まえてNo.1、No.2試験体を検討した。

(1) No.3試験体(せん断補強筋あり)

図-6は中心位置での鉄筋ひずみの挙動を示したものであるが、ひびわれが入るまでは全断面有効としての変化を示し、ひびわれが入った後は、梁としてのRC断面計算で得られる鉄筋ひずみ(以下RC計算値と称す)と非常に近似した傾向を示した。これによって中心付近の部材

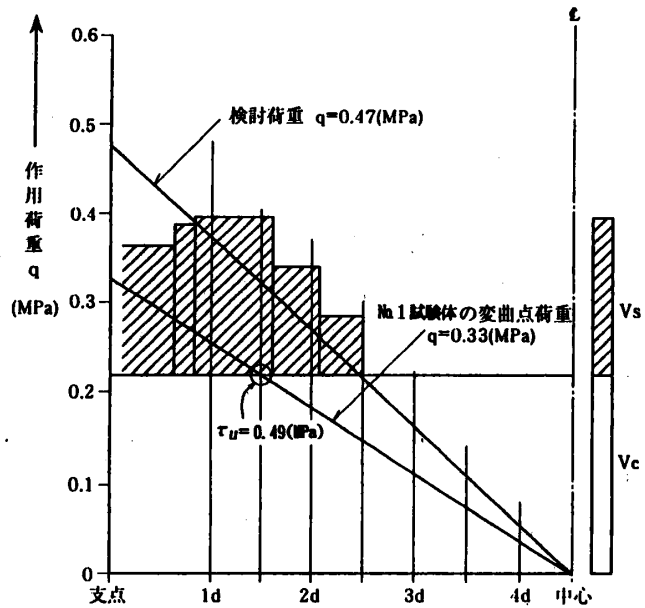


図-2 No.3試験体のせん断補強設計

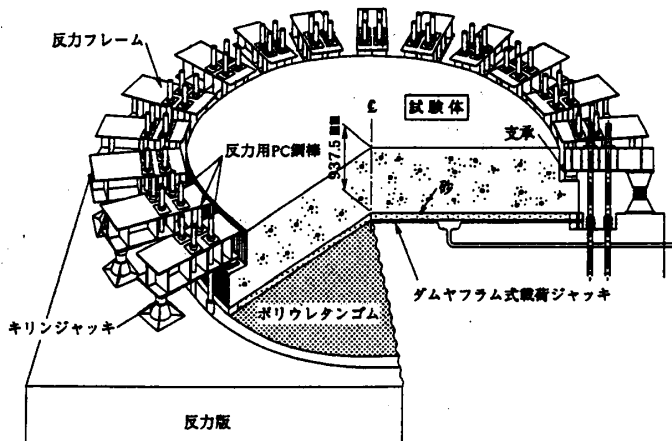


図-3 載荷装置図

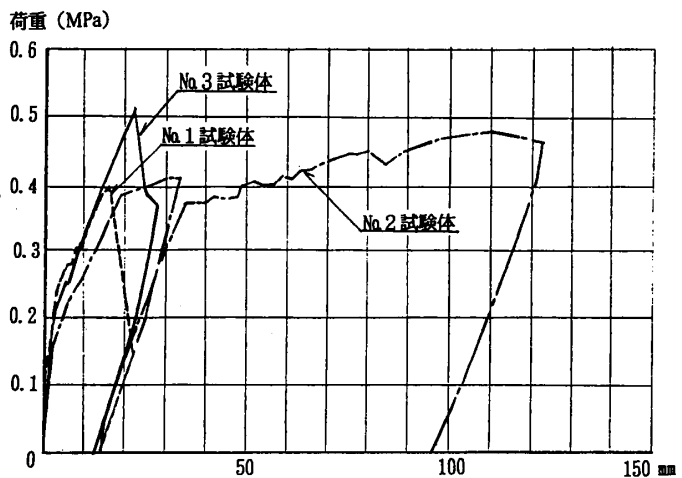


図-4 中心位置の変位

は、試験中を通して曲げ部材としての挙動を示したことが分かる。

これに対して図-7は支点から1dと1.5d位置の引張り鉄筋ひずみ(R-2, R-5)の変化を示したものであるが、荷重が0.35MPa程度に達すると鉄筋ひずみはRC計算値を超えて急激に増加する傾向を示している。また、荷重がこれ以上になると半径方向鉄筋ひずみの増加傾向は低減し、逆にせん断補強筋のひずみが急激に増加した。

これらの鉄筋ひずみの変化は1d付近から2dに向かって伸びる斜めひびわれの発達によって生じたもので、No.3試験体の破壊は斜めひびわれの発達→斜めひびわれ位置の半径方向筋の降伏→せん断補強筋の降伏→最終破壊(主鉄筋に沿う破壊)の順序で破壊が進行したと考えられる。

なお、最終破壊は斜めひびわれ発生位置より外周部のせん断補強筋量の不足による鉄筋降伏が原因で、引張鉄筋に沿うひびわれを形成して起っており、急激な耐力の低減をきたしている。

(2) せん断補強筋の有無の影響

No.1試験体はNo.3試験体においてせん断補強筋を省いた構造であり、斜めひびわれ発生位置、すなわち支点から1d位置の半径方向筋が降伏すると同時に図-5のように引張り鉄筋に沿う破壊面が形成され破壊にいたっている。

またNo.1、No.3試験体の半径方向筋の挙動には相違がある。No.1試験体では斜めひびわれが発達するとそのまま破壊につながるのに対して、No.3試験体では斜めひびわれの成長に応じてせん断補強筋が有効に働き始め、半径方向鉄筋のひず

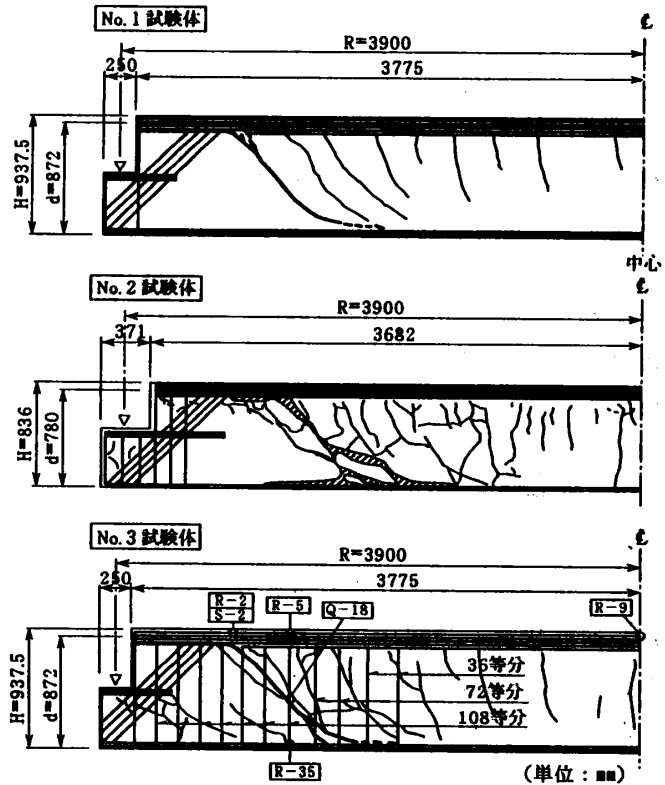


図-5 切断面のひびわれ状況

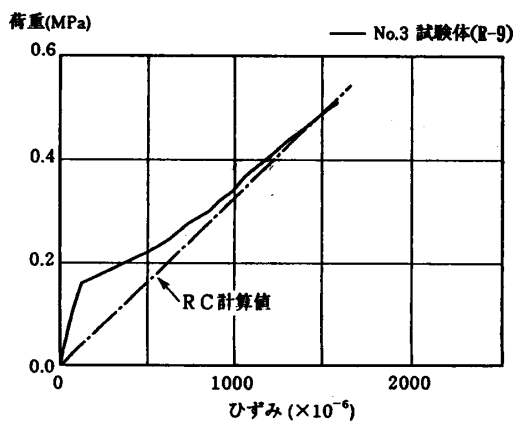


図-6 中心位置の鉄筋ひずみ

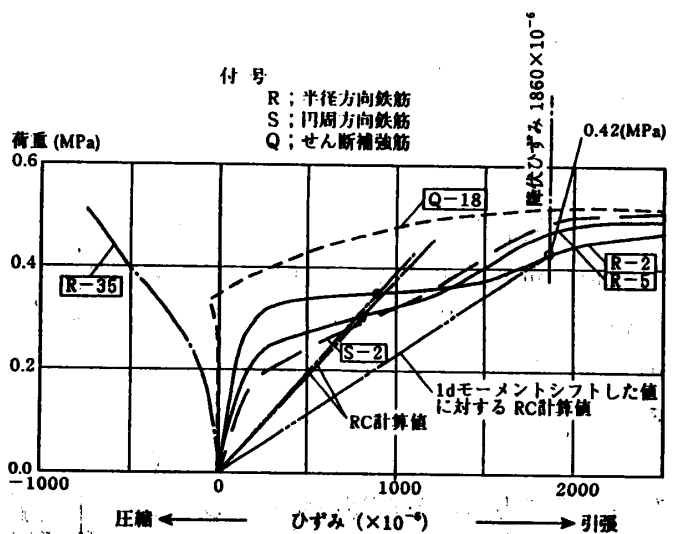


図-7 破壊位置付近の鉄筋ひずみ

みは1 d モーメントシフトしたRC計算値に沿って増加した。このように、せん断補強筋は斜めひびわれの発達を制限して半径方向筋の降伏を遅らせる効果があることが確かめられた。

(3) 斜め鉄筋の定着の影響

Na 1、Na 3 試験体とNa 2 試験体では斜め鉄筋の定着方法に違いがあり、Na 1、Na 3 試験体では主筋の下に添わせて、またNa 2 試験体では5段配筋のうち4段を貫通して定着している。

このため、Na 1 とNa 2 試験体で比較すると1.5 d 位置の主筋降伏まではほとんど同じ挙動を示すが、主筋の降伏に伴いNa 1 試験体では引張り鉄筋に沿ったひびわれで剥離する破壊を示したのに対して、Na 2 試験体では、この部分での破壊は起こらず、鉄筋の降伏による伸び変形によって円盤状に押し抜ける延性の大きな破壊モードを示した。(図-4)

3. 2 大型円形スラブのせん断耐力

本実験に用いた試験体は、各試験体間で形状や鉄筋比に若干の差がある。しかし、現在、等分布荷重が作用している状態での円形スラブの耐力を算定する確立された方法がなく、試験体相互の耐力比較を直接行うことができない。そこで、ここでは小型の円形スラブのせん断耐力についての実験式 [1] を用いて検討することとした。

ここではせん断強度で扱うこととし、梁のせん断耐力式の a/d と β_p を円形スラブ用に変換したもので下式を用いた。

$$\tau_{ucal} = 0.2f_c^{1/3} (0.75 + 1.40Vd/M)(1 + \beta_p + \beta_d) \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに

τ_{ucal} ; せん断補強筋のない部材のせん断強度 (MPa)

f_c ; コンクリートの圧縮強度 (MPa)

d ; 有効高さ (cm)

M ; 検討断面の曲げモーメント

V ; 検討断面のせん断力

$$\beta_p = 100p_r + 100p_o / 4.35 - 1$$

p_r ; 検討断面の半径方向鉄筋比

p_o ; 検討断面の円周方向鉄筋比

$$\beta_d = (100/d)^{1/4} - 1 \geq 0 \quad (d:cm)$$

表-2 実験結果と計算値

	実験結果		計算値		τ_u / τ_{ucal}	
	荷重 (MPa)	1.5d位置のせん断強度 τ_u (MPa)	破壊位置	せん断強度 τ_{ucal} (MPa)		
Na 1 試験体	0.39	0.59	1.5 d	0.59	1.0	
Na 2 試験体	鉄筋降伏	0.38	0.67	1.5 d	0.71	0.94
	最大	0.47	0.81	—	—	—
Na 3 試験体	0.52	0.78	—	—	—	

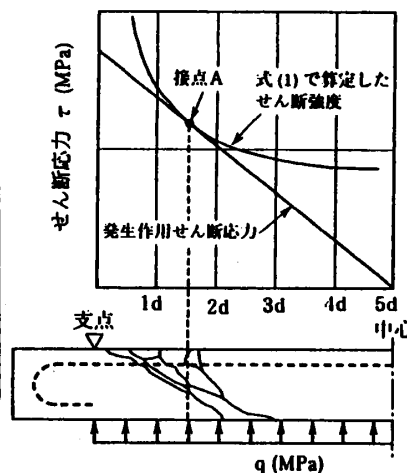


図-8 計算概念図

等分布荷重の場合は図-8にせん断強度の計算概念図を示したが、これにおいて各断面毎に得られた式(1)によるせん断耐力算定値と発生せん断応力との接点Aが破壊の中心であり、この時の発生せん断応力が計算上のせん断強度であると仮定する。このようにして、円形スラブの破壊位置とせん断強度を算定すると表-2のように破壊位置は支点から $1.5d$ となり、実際の破壊面と一致すること、またせん断耐力の実測値と計算値の比較においても両者は良く一致していることが確認された。これによって式(1)は β_d を考慮した上で大型スラブのせん断耐力の算定にも有効であることが確認されたので、円形スラブにおいても梁の場合[2]と同様に有効高さの4乗根を考慮したスケール効果が存在するといえる。また、梁についてのせん断耐力式[3]に本試験体の諸数値を用いて算出したせん断強度に比べると円形スラブの強度は1.5倍程度の値になることが分かった。

せん断補強筋の効果については計画段階でせん断補強筋のない円形スラブのせん断強度として $\tau_c = 0.49\text{MPa}$ (支点から $1.5d$ 内側)を基本とし、せん断補強効果としては梁と同等の効果[1] $\tau_c = 0.29\text{MPa}$ を見込んだ検討荷重 $q = 0.47\text{MPa}$ を想定し、これを達成することができた。しかし、実験値で見るとNo.3試験体のせん断強度はNo.1試験体のせん断強度 $\tau = 0.59\text{MPa}$ に比べて 0.19MPa の増加に止まっておりせん断補強筋の効果は見掛上小さかった。これは図-4に見られるようにNo.3試験体の破壊時変位がNo.1試験体の最大値変位を越えており、この時せん断補強筋のない試験体の保有するせん断強度が最大値より低減しているためと考えられる。

4. まとめ

本実験の結果をまとめると次のとおりである。

- (1) 小型の円形スラブについて得られたせん断耐力式を大型スラブに適用することが可能であり、スケール効果は梁の場合と同様有効高さの4乗根で表現でき、せん断強度は梁としての計算値に比べて1.5倍の値を示した。
- (2) せん断補強筋は円形スラブの場合でも有効である。
- (3) 円形スラブの半径方向筋の設計には $1d$ 程度のモーメントシフトが必要である。
- (4) 斜め鉄筋の定着を上段の主筋に定着した場合、せん断破壊した後も押し抜き抵抗力によって大きな変形に耐えられる。

謝辞：本研究において、横浜国立大学工学部建設学科 池田尚治教授、東京大学工学部土木工学科 岡村甫教授、電力中央研究所我孫子研究所 青柳征夫参事のご指導を頂きました。ここに、深く感謝いたします。

参考文献

- [1] IWAKI, R, AKIYAMA, H, OKADA, T, SHIOYA, T: SHEAR STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE CIRCULAR SLABS PROC. OF JSCE, No. 360/V-3 pp155~164, Aug. 1985
- [2] 井畔瑞人, 塩屋俊幸, 野尻陽一, 秋山暉: 等分布荷重下における大型鉄筋コンクリートはりのせん断強度に関する実験的研究、土木学会論文集、第348号/V-1 pp175~184、1984.8
- [3] 土木学会: コンクリート標準示方書(平成3年版)設計編