

論文 ステンレス鉄筋コンクリート部材の基礎的性質

篠田佳男^{*1}・横田 弘^{*2}・二羽淳一郎^{*3}・長瀧重義^{*4}

要旨：ステンレス鉄筋は高い防食性を有し，コンクリートの補強用鋼材に使用することで，鉄筋コンクリート構造物の耐久性を大幅に向上することができる。本研究では，ステンレス鉄筋の実用化を目的に，ステンレス鉄筋の機械的性質および鉄筋コンクリート部材の性状を把握するために実験を行った。その結果，ステンレス鉄筋の応力～ひずみ関係を把握し，疲労特性に関する知見を得た。また，鉄筋とコンクリートの付着性状は異形棒鋼と同等であること，さらに鉄筋コンクリート部材は従来の示方書で設計できる見通しを得た。

キーワード：ステンレス鉄筋，耐久性，機械的性質，疲労強度，ひび割れ

1. はじめに

ステンレス鋼は，「Stainless (さびない)」の意味の通り，極めて高い防食性を有している。そのため，コンクリートの補強用鋼材に使用することで，厳しい腐食性環境における鉄筋コンクリート構造物の大幅な耐久性向上が期待できる。実際，海外では基準類が整備され，ステンレス鉄筋の実用化が進んでいる¹⁾。

ステンレス鋼は，成分の50%以上を鉄 (Fe) が占め，クロム (Cr)，ニッケル (Ni)，それに微量の元素から構成されている。その金属材料の性質は成分元素だけでなく，結晶構造，加工条件，そして熱処理条件等によって異なる。ステンレス鋼は高い防食性を有しているが，鋼種によってその腐食抵抗レベルが同一ではない。また，機械的性質として，明確な降伏点を有しておらず，伸びが異形棒鋼に近い20～30%から50～60%と高い値を示すなど性質を異にする。

本研究は，その優れた防食性，特に塩害環境における鉄筋コンクリート構造物の耐久性向上を実現する材料として，ステンレス鉄筋に着目し，実用化を目的に一連の取り組みを行っている。このうち，本論文は，ステンレス鉄筋の材

料的性質および鉄筋コンクリート部材の基礎的な力学性状について，実験で得られた知見を述べるものである。

2. ステンレス鉄筋

ステンレス鋼の高い防食性は，表面に形成されるクロムの酸化皮膜 (不動態皮膜) の性質による。合金成分としてCrが10.5%以上存在することで，不動態化を生じることが明らかにされている。現在のJISはCr含有量の上限值を定めており，ステンレス鋼はCrを10.5～32%含んだ合金と定義されている²⁾。

JISでは，ステンレス鋼材の記号をSUSと表示している。これは，Steel Use Stainlessの頭文字を使用したものである。また，鋼種記号は，SUSに続いて3けたの数字が使われている。この数字は，国際的に広く使用されている，AISI (American Iron and Steel Institute) で使用されているタイプ3桁の数字に準じている。3桁数字の最初の数字は下記のように鋼種で分類されている。

200番台 Cr-Ni-Mn系

300番台 Cr-Ni系

*1 日本コンクリート技術(株) 代表取締役 博(工) (正会員)

*2 (独)港湾空港技術研究所 構造強度研究室長 工博 (正会員)

*3 東京工業大学大学院 理工学研究科土木工学専攻教授 工博 (正会員)

*4 愛知工業大学 工学部都市環境学科教授 工博 (正会員)

400 番台 Cr 系

600 番台 高温・高強度合金系

ステンレス鋼は、合金成分、結晶構造、熱処理等によって、不動態皮膜の防食性だけでなく、金属材料としての性質も異なる。今回の実験では、Cr-Ni 系のオーステナイト系ステンレス SUS304, SUS316 と、Cr 系のフェライト系ステンレス SUS410L の 3 種類のステンレス鉄筋を使用した。

3. 実験概要

3.1 疲労試験

本試験は、JIS Z 2273「金属材料の疲れ試験法通則」に準じて、ステンレス鉄筋の S-N 線図の作成および疲労限を確認するために行った。ここで、疲労限は繰返し回数が 300 万回を超える応力度を意味する。試験片は D19 とした。

3.2 両引き試験

実験は、図-1 に示すように、長さ 850mm のコンクリート部材に鉄筋を埋め込んだ両引き試験体を使用して行った。試験体数は、実験パラメータを鉄筋の鋼種 4 水準 (SUS304, SUS316, SUS410L, SD345)、かぶり 2 水準 (30mm, 50mm)、鉄筋径 2 水準 (D19, D25) の合計 16 体とした。

実験は、コンクリート部材中心軸に配置した鉄筋に直接引張力を与える、両引き試験とした。測定項目は、載荷荷重、ひび割れ幅およびひび割れ状況とした。なお、ひび割れ幅はパイゲージを使用して測定した。

3.3 梁の載荷試験

載荷試験は、図-2 に示すように、断面が 250mm × 400mm、長さが 2,900mm の形状寸法のものを使用した。試験体は、表-1 に示す 2

体で、引張鉄筋比を 0.98% にした曲げ先行型の B19ST 試験体と、主鉄筋比を 1.74% としたせん断卓越型の B25ST 試験体とした。B19ST 試験体は主鉄筋に SUS304 の D19 を、B25ST 試験体は主鉄筋に SUS304 の D25 を使用した。試験体のせん断スパンには、D8 の SUS304 を 80mm 間隔にせん断補強筋として配置した。コンクリートは表-2 に示す配合のもので、呼び強度 27N/mm²、粗骨材最大寸法 20mm のレディーミクストコンクリートを使用した。

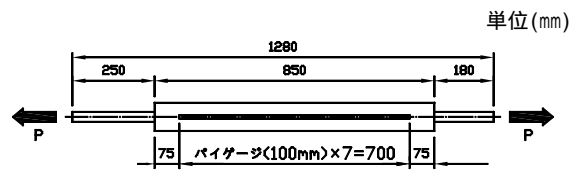


図 - 1 両引き試験体

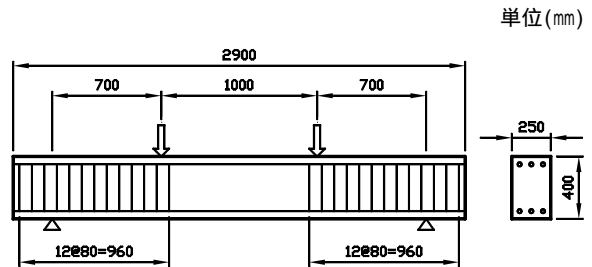


図 - 2 梁試験体

表 - 1 試験体諸元

試験体名	主鉄筋		せん断補強筋	
	使用鉄筋	p (%) (A _s /bd)	使用鉄筋	p (%) (A _w /bs)
B19ST	3D19	0.98	D8@80	0.50
B25ST	3D25	1.74	D8@80	0.50

有効高さ d = 350mm

表 - 2 コンクリートの配合

呼び強度	セメントの種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
					W	C	S	G	A _d
27	H	20	52.5	43.9	168	320	619	1029	3.84

実験は 2 試験体ともにせん断スパン 700mm , 等モーメント区間 1000mm の 2 点集中荷重方式を採用した。計測項目は, 荷重荷重, 試験体のたわみ, コンクリートひずみ, 鉄筋ひずみ, ひび割れ幅およびひび割れ状況とした。なお, ひび割れ幅はコンタクトゲージを使用して測定した。

4. 実験結果および考察

4.1 鉄筋引張試験

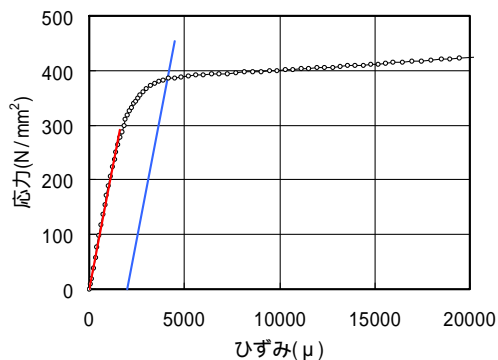
実験に使用した鉄筋は異形棒鋼と同一の表面突起をもつもので、その引張試験結果を表-3 に示す。異形棒鋼 SD345 に比べると、SUS304 および SUS316 鉄筋は引張強度が 600N/mm^2 を、伸びが 40% を超える大きな値となった。特に、SUS316 は 50% を超える大きな伸びを示した。このように、オーステナイト系ステンレスは異形棒鋼に比べて、大きな塑性領域を有することとなる。これに対して、フェライト系ステンレス SUS410L は異形棒鋼と比べると、伸びがほぼ同程度か若干大きく、またヤング係数や引張強度が小さくなっている。

各鉄筋 (D19) の応力とひずみの関係を図-3 に示す。ステンレス鉄筋は、鋼種によって応力～ひずみ曲線が異なっている。基本的には明確

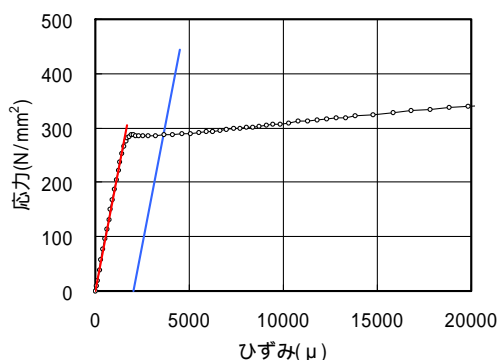
表 - 3 鉄筋の引張試験結果

材質	呼び名	降伏強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (KN/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	伸び (%)
SUS304	D8	329	158	603	44.2
	D19	389	185	687	42.2
	D25	390	183	692	43.5
SUS316	D19	287	178	641	55.5
	D25	325	164	627	52.8
SUS410L	D19	337	147	481	24.8
	D25	302	157	497	24.3
SD345	D19	372	186	571	23.4
	D25	386	182	568	22.1

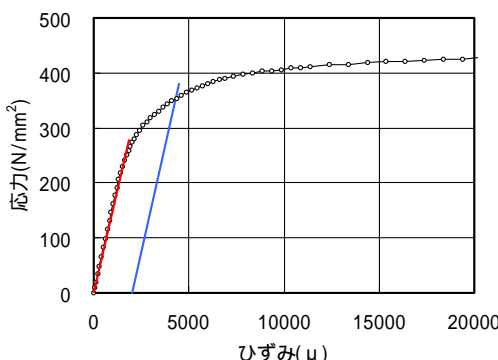
* ; 疲労試験使用鉄筋



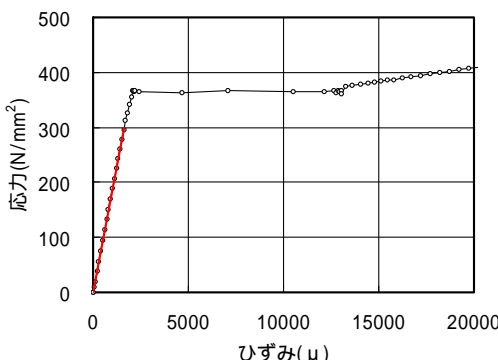
(a) SUS304



(b) SUS316



(c) SUS410L



(d) SD345

図 - 3 各鉄筋の応力～ひずみ関係(D19)

な降伏点を示さず、降伏強度はPC鋼棒同様に、残留ひずみが 2000×10^{-6} となる応力度とした。これに対して、異形棒鋼 SD345 は、明確な降伏点を示したとともに、 $13,000 \times 10^{-6}$ 程度のひずみからひずみ硬化を示した。

4.2 疲労試験

ステンレス鉄筋の疲労試験結果を図-4(a)に示す。疲労強度は SUS410L, SUS316, SUS304 の順に高くなった。SUS410L はコンクリート標準示方書の計算値³⁾と良く一致していることが認められた。これは、計算値が異形棒鋼の結果に基づいていること、また SUS410L が異形棒鋼に近い引張強度や伸びを有しているためと思われる。これに対して、引張強度や伸びが大きい SUS304, SUS316 は疲労強度も大きくなった。

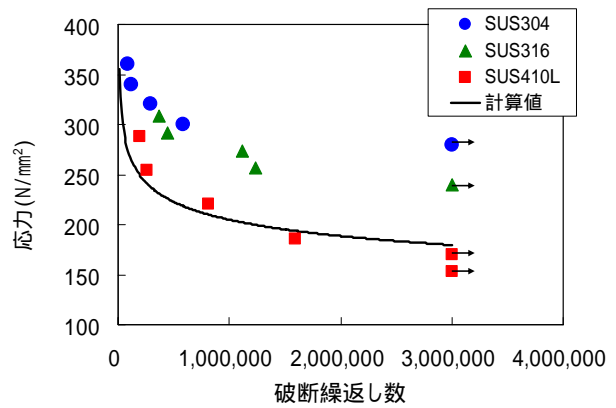
次に、図(b)は SUS304 と SUS316 のデータを SUS410L との引張強度比で除して再整理したものである。例えば、SUS304 の $696/460 = 1.51$ となる。応力を 1.51 で除して再整理することで、ステンレス鉄筋の疲労強度は、鋼種に関わらずほぼ同様に評価できることが分かった。これは、ステンレス鉄筋の疲労強度が引張強度に強く依存することを示唆している。

また、300 万回の繰返し回数を記録した疲労限界は SUS304 が 280 N/mm^2 , SUS316 が 240 N/mm^2 , SUS410L が 170 N/mm^2 の応力を示した。

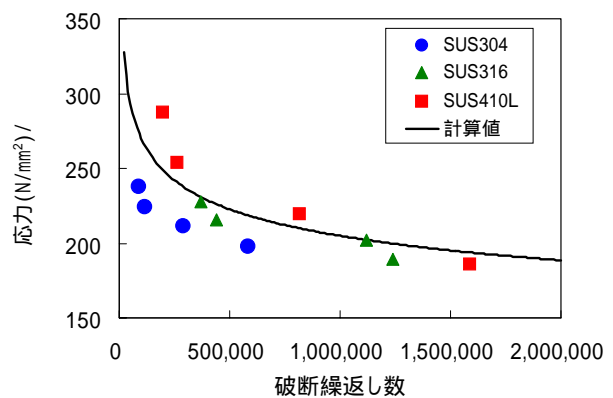
4.3 両引き試験

両引き試験で得られたひび割れ状況の代表例として、D25 使用でかぶり 3cm 試験体のひび割れの発生状況を図-5 に示す。ひび割れの発生状況は各試験体でほぼ一致していることが認められた。

次に、ひび割れ幅の最大値の結果について、D19 でかぶり 3cm, D25 でかぶり 5cm の試験体での計算値と実験値の関係を図-6 に示す。ここで、計算値はコンクリート標準示方書に示されている式で算定した。鉄筋の種類に関わらず、実験値に比べて計算値が若干安全側の評価となっているが、精度良く推定されていることが認められる。



(a) 試験結果



(b) 結果の再整理

図 - 4 疲労試験結果

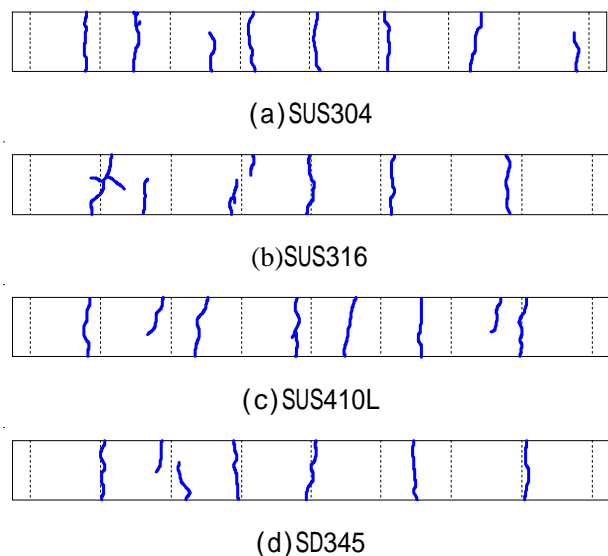
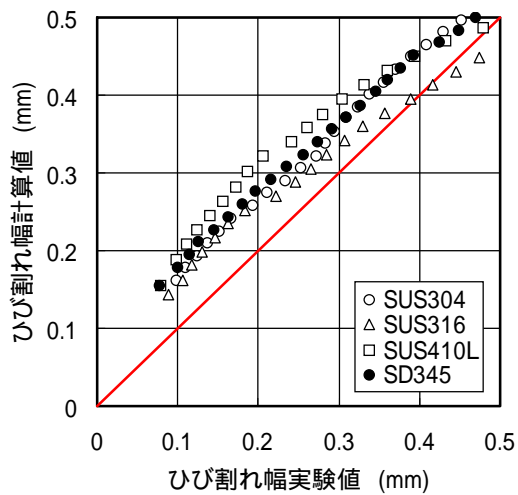
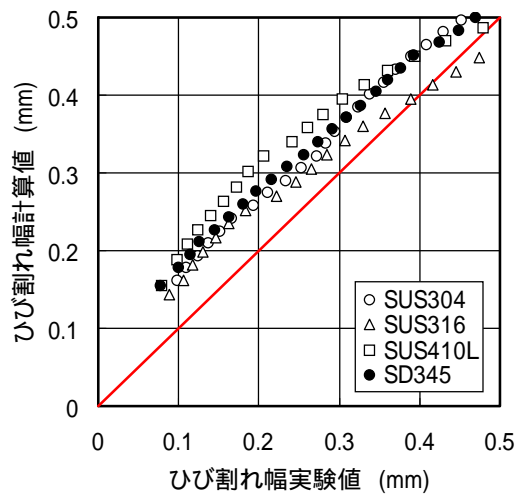


図 - 5 ひび割れ発生状況



(a)D19 (かぶり 30mm)



(b)D25 (かぶり 50mm)

図 - 6 ひび割れ幅の実験値と計算値の関係

このように、ひび割れの発生状況やそのひび割れ幅は、鉄筋の種類に関わらず、ほぼ同様な結果を示した。

4.4 梁試験

B19ST試験体とB25ST試験体の荷重と試験体中央部でのたわみの関係を、曲げ終局耐力時の荷重計算値 P_{ucal} を含めて図-7 に示す。両試験体ともに、せん断ひび割れの発生と主鉄筋の降伏後にたわみが急増した。また、B25ST試験体のひび割れ図を図-8 に示す。等曲げモーメント区間に曲げひび割れが分散し、せん断スパンにせん断ひび割れが形成している状況が認められる。

次に、せん断補強筋の測定した最大ひずみを図-9 に、そして等曲げモーメント区間で測定されたひび割れ幅の関係を図-10 に示す。せん断ひび割れ発生後のせん断補強筋のひずみ測定値および曲げひび割れ幅の最大値は、若干安全側であるが精度良く推定されている。

ステンレス鉄筋は、異形棒鋼に比べると、ヤング係数が小さいことや明確な降伏点を有していないなどの点で、その性質を異にする。しかし、梁試験体でのひび割れ発生状況、せん断ひび割れの発生荷重等はほぼ同じであった。また、

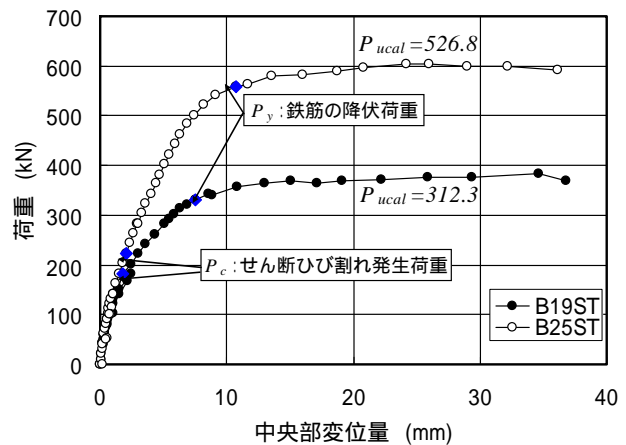


図 - 7 荷重～スパン中央変位の関係

両引き試験の結果からも、ステンレス鉄筋とコンクリートとの付着性状は異形棒鋼と同等であるといえる。これは、鉄筋とコンクリートの付着が鉄筋のふしによる機械的なメカニズムに支配されていることによる。

このように、ステンレス鉄筋を用いたコンクリート部材は、曲げひび割れ幅および変位・変形の観点からの使用性照査および棒部材の曲げ耐力やせん断耐力等の安全性照査をコンクリート標準示方書に示される算定式に準じて行うことの妥当性が確認された。

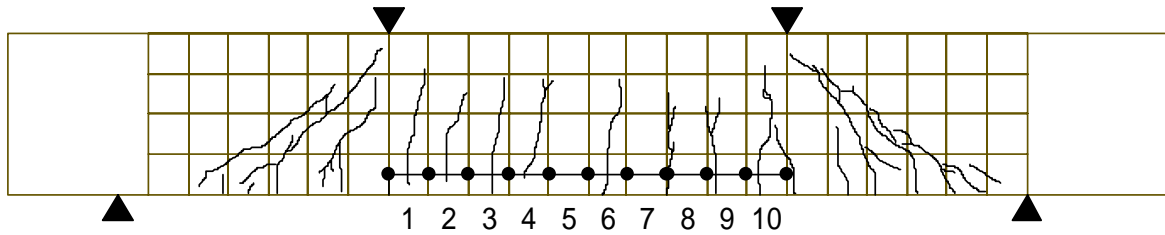


図 - 8 ひび割れ発生状況

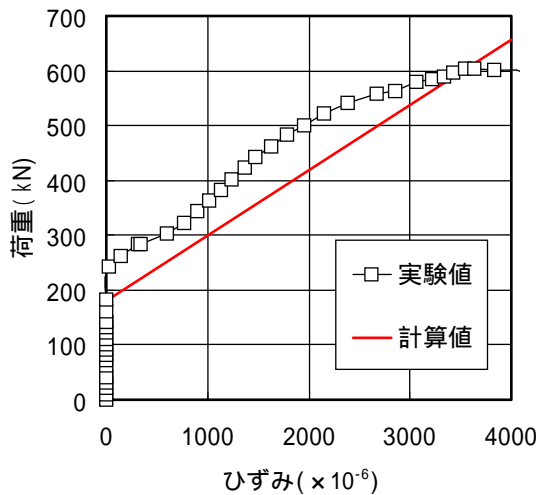


図 - 9 せん断補強鉄筋ひずみの履歴

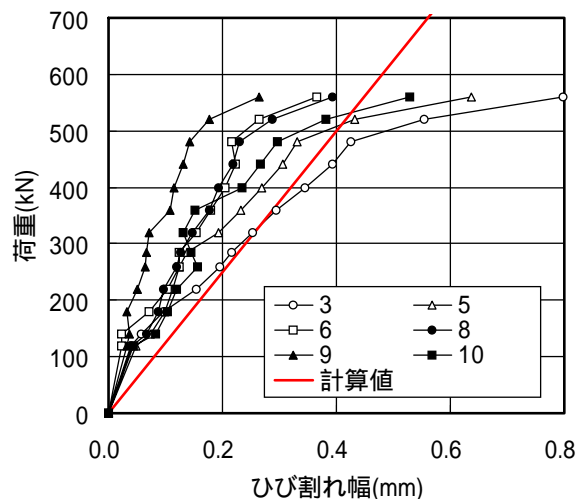


図 - 10 荷重と曲げひび割れ幅の関係

5. まとめ

本研究で得られた成果のまとめを以下に示す。

- (1) ステンレス鉄筋は明確な降伏点を示さなかった。オーステナイト系は異形棒鋼と比べて伸びや引張強度が大きな値を示し、塑性領域が大きくなった。これに対して、フェライト系は伸びが 20~30% 台と、異形棒鋼に近い値であった。
- (2) 疲労強度は、SUS304, SUS316, SUS410L の順に高く、引張強度に依存した結果となった。3 鋼種ともに、300 万回繰返し回数を記録した疲労限が確認された。
- (3) 鉄筋コンクリート部材として重要な、ステンレス鉄筋とコンクリートの付着性状は異形棒鋼と同等であった。また、曲げ耐力やせん断耐力は、通常の鉄筋コンクリート棒部材と同様に、コンクリート標準示方書に

準拠して取り扱うことができることを確認した。

謝辞；本研究は、経済産業省工業標準推進調査等委託（社会基盤創生標準化調査）の一環として、「ステンレス鉄筋の JIS 化および施工指針委員会（委員長：長瀧重義愛知工大教授）」を設置して行ったものである。ここに、本委員会の委員および関係者各位に厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) Gardner L. : The use of stainless steel in structures, Progress in Structural Engineering and Materials, Vol.7, No.2, pp.45-55, 2005
- 2) ステンレス協会：ステンレスの初歩, 2003
- 3) 土木学会：【2002 年制定】コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]